

# Tracerhydrologie in der Lysimetrie

Johann Fank<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Die hydrologische Markierungstechnik setzt Markierungsmittel ein, um fließendes Wasser verfolgen zu können. Die Verfolgung des Wasserpfades im Untergrund durch die Messung der Tracer erlaubt eine direkte Einsicht in die räumliche und zeitliche Verbreitung des eingesetzten Stoffes unter bekannten Rahmenbedingungen.

Wesentliche Ziele des Einsatzes von Tracern in der ungesättigten Zone sind:

- Vergleich von Sickergeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Horizonten des Bodens und der ungesättigten Zone unter ungestörten und gestörten Bedingungen,
- Vergleich des Transportes von Wasser und von gelösten Stoffen durch den Einsatz mehrerer Markierungsmittel,
- Vergleich des Verhaltens der eingesetzten Tracer mit dem Transportverhalten von Schadstoffen,
- Überprüfung bzw. Verifizierung von Modellkonzepten über Stofftransportprozesse in der ungesättigten Zone.

Anhand von Beispielen des Einsatzes tracerhydrologischer Methoden in der Lysimetrie wird deren Bedeutung für die Ergebnisinterpretation vorgestellt und diskutiert. Zentrale Punkte sind dabei:

- Überprüfung von Lysimetern hinsichtlich des Transportverhaltens
- Erfassung präferentieller Flüsse
- Bestimmung von Transportparametern in Lysimetern

- Erarbeitung von Massenflussbilanzen.

*Schlagwörter:* Lysimeter, Hydrologie, Tracer, Stofftransport

## Summary

Tracer-hydrological methods are used to trace flowing water in subsurface regions. Measurement of tracer concentration gives direct insight on spatial and time dependent distribution at well-known boundary conditions.

Investigation aims with the use of tracers in the unsaturated zone are:

- Comparison of seepage water velocity in different horizons of soil and unsaturated zone under disturbed and undisturbed conditions
- Comparison of water transport and solute transport using different tracers
- Comparison of tracer properties with transport properties of contaminants
- Validation of conceptual models on transport processes in the unsaturated zone.

Examples on the use of tracer methods at lysimeter test sites will show their relevance for the interpretation of investigation results. Main topics are:

- Validation of lysimeters in term of water movement and solute transport
- Differentiation between water movement and (contaminant) transport
- Detection and quantification of preferential flow
- Determination of mass balances in lysimeters.

*Keywords:* lysimeter, hydrology, tracer, mass transport

## Einleitung

Wasserbewegung und Stofftransport in den wasserunge-sättigten Deckschichten fluvioglazialer Grundwasserleiter werden aufgrund ihrer Bedeutung für den diffusen Eintrag von Stickstoff seit mehreren Jahrzehnten unter Berücksichtigung regionaler meteorologischer und hydrogeologischer Faktoren untersucht. Ein wesentliches Werkzeug zur Gewinnung von prozessorientierten Datensätzen ist dabei der Einsatz von Lysimetern.

Die Fließbewegung und damit die Verweilzeit des Sickerwassers wird vom schichtspezifischen Wassergehalt und den herrschenden hydraulischen Potentialen gesteuert, welche neben meteorologischen Größen und unterschiedlichen

Landnutzungsformen auch von bodenphysikalischen Parametern abhängen, deren in situ Erfassung in grobklastischen Sedimenten auch heute noch auf erhebliche messtechnische Probleme stößt, sodass die Ergebnisse von Modellberechnungen der Wasserbewegung und des Stofftransportes in der ungesättigten Zone einer intensiven Überprüfung anhand von Plausibilitätskontrollen bedürfen.

Die hydrologische Markierungstechnik setzt Markierungsmittel ein, um fließendes Wasser verfolgen zu können. Die Verfolgung des Wasserpfades im Untergrund durch die Messung der Tracer erlaubt eine direkte Einsicht in die räumliche und zeitliche Verbreitung des eingesetzten Stoffes unter bekannten Rahmenbedingungen.

<sup>1</sup> Joanneum Research, Institute of Water Resources Management - Hydrogeology and Geophysics, Elisabethstraße 16/II, A-8010 GRAZ

\* Ansprechpartner: johann.fank@joanneum.at

## Tracerhydrologische Untersuchungen in der ungesättigten Zone

Der Wasserfluss und der Stofftransport in der Ungesättigten Zone war Ziel vieler Untersuchungen. In einer großen Zahl von Beiträgen wurde die Bedeutung des präferentiellen Flusses hervorgehoben (SCHOEN et al. 1999; VAN DER HOVEN et al. 2002). In den Bodenwissenschaften wurden Farbstoffe als Tracer zur Veranschaulichung von Fließpfaden intensiv eingesetzt (KUNG et al. 2000; YASUDA et al. 2001; ÖHRSTRÖM et al. 2004). Einen Überblick über die Verwendung von Farptracern in der ungesättigten Zone geben FLUY und WAI (2003). JABRO et al. (1994) und auch FANK & BERG (2001) zeigen in unterschiedlichen Versuchen, dass Bromid einen guten Tracer zur Untersuchung von Wasserbewegung und Stofftransportprozessen und zur Erfassung präferentieller Flüsse darstellt. Auch natürliche Isotope wie Deuterium, Tritium und  $^{18}\text{O}$  wurden in Studien zum Wasserfluss eingesetzt (MACIEJEWSKI et al. 2006; MALOSZEWSKI et al. 2006; MALI et al. 2006). Neueste Technologien erlauben die Quantifizierung von Stoffflüssen in Lysimetern mittels 3D - Electrical resistivity tomography (KOESTEL et al. 2008).

### Beispiele für Tracerexperimente

Zur Veranschaulichung der Bedeutung von Stofftransport-Experimenten unter definierten Rahmenbedingungen für das Verständnis der in der ungesättigten Zone ablaufenden Prozesse werden in Folge einige Beispiele von in den letzten Jahren durchgeführten Markierungsversuchen unterschiedlicher Zielsetzung vorgestellt.

### Erfassung präferentieller Flüsse

Besondere Bedeutung gewinnt die Tracerhydrologie in der ungesättigten Zone zur Visualisierung von Makroporenflüssen in der ungesättigten Zone. Markierungsversuche zur Visualisierung und Bewertung von präferenziellen Wasserwegigkeiten bzw. Stoffflüssen wurden einerseits in einem Kleinzugsgebiet im oststeirischen Hügelland

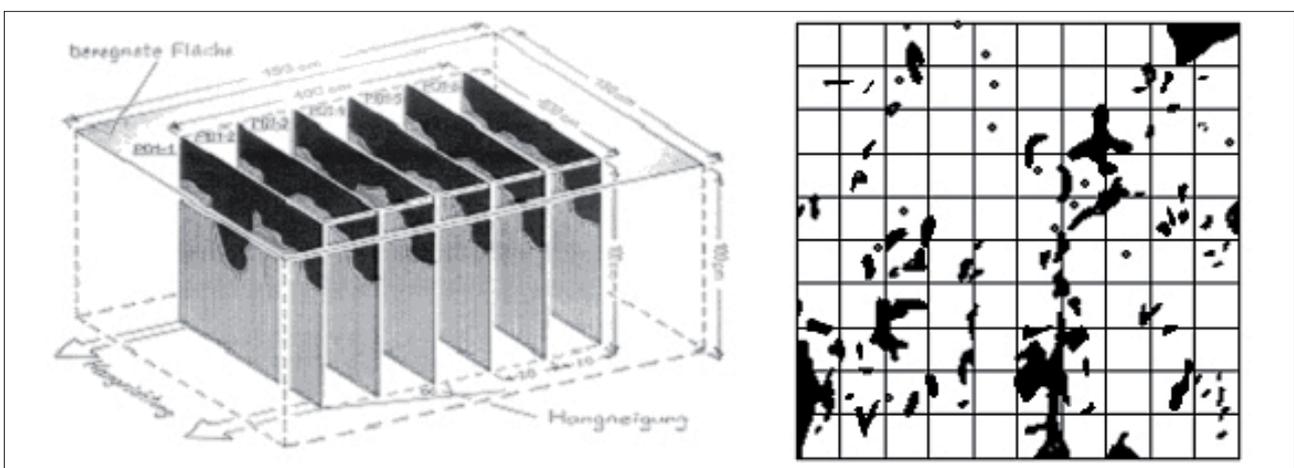
(*Abbildung 1*) unter forstlicher Nutzung bzw. am Versuchsfeld Wagna (*Abbildung 2*) unter ackerbaulicher Nutzung durchgeführt.

In beiden Fällen wurde eine etwa 3 m<sup>2</sup> große Oberfläche mit Brillantblau – ein Lebensmittelfarbstoff – beregnet (Intensität etwa 40 mm in zwei Stunden) und der darunter liegende Bodenkörper im Ausmaß von 1\*1\*1 m nach dem Schema in *Abbildung 1* herauspräpariert. Durch den Färbeversuch wurden bevorzugte Fließmuster in der ungesättigten Zone klar dokumentiert. Während an den fünf untersuchten Standorten im Einzugsgebiet Pöllau (THEURETZBACHER 1997) durch diese Untersuchungen die Bedeutung der Geschichte der Landnutzung für Transportprozesse klar herausgearbeitet werden konnte, unternahmen BERG et al. (1999) und BERG et al. (2001) den Versuch den Makroporenfluss über die Farbintensität auch zu quantifizieren. Bei letzteren insgesamt 8 Versuchsstandorten konnte die wesentlich stärkere Bedeutung von Bio-Makroporen im Feinbodenhorizont gegenüber den Inhomogenitäten im unterlagernden Kies für den präferentiellen Fluss herausgearbeitet werden.

### Bestimmung von Verweilzeiten des Wassers in der Ungesättigten Zone

Grundlage jeder Prognose von Wasserbewegung und Stofftransport in der ungesättigten Zone ist die Kenntnis von Transportparametern. In *Abbildung 3* ist die Ermittlung der mittleren Verlagerungsgeschwindigkeit des Wassers in der ungesättigten Zone aus der Schwerpunktkonzentration der Tracerdurchbruchkurven an Messstellen in unterschiedlichen Tiefen der Forschungsstation Wagna dargestellt. Dabei wurden nach flächenhafter Beregnung mit ~40 mm Wasser und darin gelöstem Tracer (NaBr) die Tracerdurchbruchkurven in Lysimetern und Sickerwassersammlern in unterschiedlichen Tiefen aufgenommen und daraus die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit aus der Schwerpunktkonzentration ermittelt.

Dargestellt ist der Vergleich der Ergebnisse zweier Bromid-Tracerversuche unter unterschiedlichen hydrologischen



**Abbildung 1:** Tracerversuche zur Visualisierung bevorzugter Fließwege im Oststeirischen Hügelland (THEURETZBACHER 1997): schematische Darstellung der Aufarbeitung des markierten Bereiches (linkes Bild) und Dokumentation bevorzugter Fließwege bis 1 m Tiefe an einem Waldstandort, 24 Stunden nach Traceraufbringung (rechtes Bild).

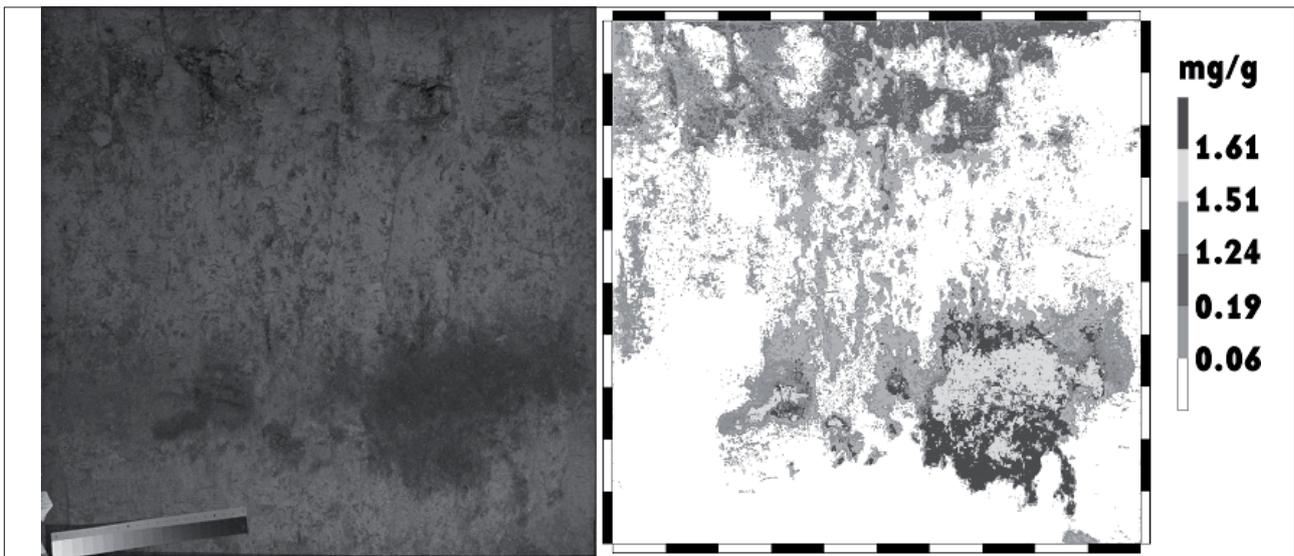


Abbildung 2: Quantifizierung des Stofftransportes in bevorzugten Fließwegen mit Hilfe von Auswerteverfahren der digitalen Bildverarbeitung an einem Ackerstandort bis in eine Tiefe von 1 m, 24 Stunden nach Traceraufbringung (BERG et al. 1999 und BERG et al. 2001).

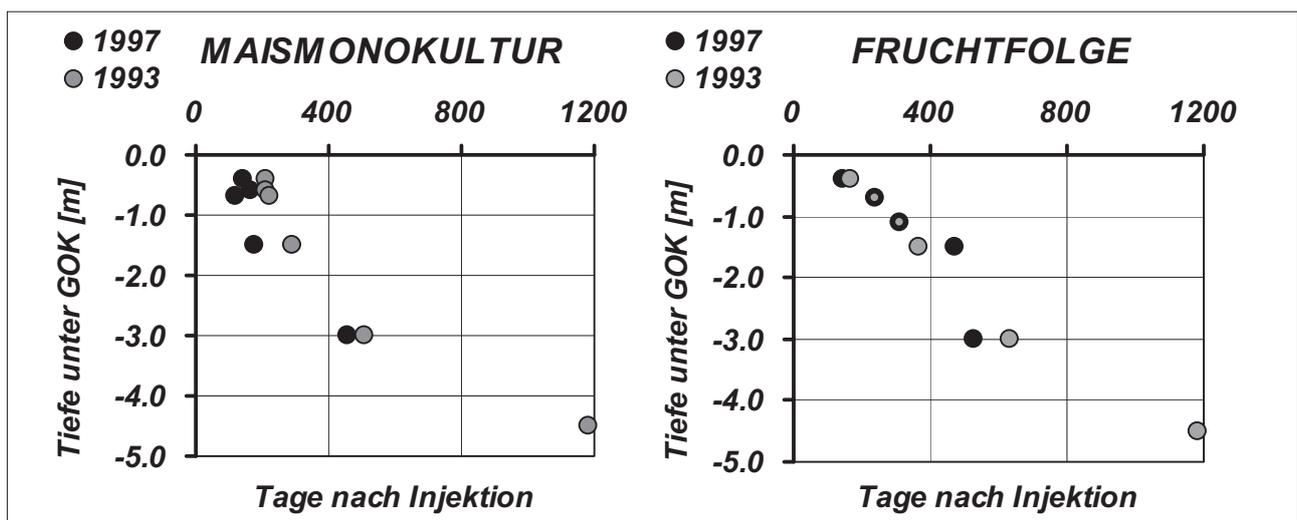


Abbildung 3: Ermittlung der mittleren Verlagerungsgeschwindigkeit des Wassers in der ungesättigten Zone aus der Schwerpunktkonzentration der Tracerdurchbruchskurven an Messstellen in unterschiedlichen Tiefen: Vergleich der Ergebnisse zweier Bromid-Tracerversuche unter unterschiedlichen hydrologischen Rahmenbedingungen.

Rahmenbedingungen: Während der Versuch 1993 im April bei beginnender Vegetationsperiode durchgeführt wurde, erfolgte die Tracerapplikation des Versuches 1997 im Dezember, um in erster Linie Evapotranspirationsverluste der Tracerlösung vermeiden zu helfen. Trotz dieser unterschiedlichen Bedingungen zeigt die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit in beiden Fällen nahezu identisches Verhalten – ein Indiz dafür, dass aufgrund der langen Dauer der Prozesse die im Detail großen Unterschiede im Transportverhalten in Abhängigkeit von den hydrometeorologischen Rahmenbedingungen bei Betrachtung mittlerer Verhältnisse in vielen Fällen wieder verloren gehen.

Als wesentliches Ergebnis der Versuche konnte auch klar dokumentiert werden, dass die mittlere Verweildauer eines konservativen Stoffes von der Geländeoberfläche bis in das

Grundwasser (Flurabstand im Mittel 4.5 m) bei etwa 3.2 Jahren liegt. Diese Verweilzeit ist in Summe unabhängig von den kurzfristigen unterschiedlichen hydrometeorologischen Verhältnissen unter den Klimabedingungen der südöstlichen Steiermark. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass jegliche Maßnahmen, die zur Verringerung des diffusen Stoffaustrages in das Grundwasser gesetzt werden, eine Verzögerung bis zu deren Auswirkung von zumindest 3 Jahren haben.

Naturgemäß ist in den oberflächennahen Schichten des Bodens und der ungesättigten Zone die Verweilzeit von Stoffen relativ stark von den aktuell herrschenden meteorologischen Verhältnissen, den unterschiedlichen Böden und den differenzierten Bewirtschaftungsbedingungen abhängig. In diesem Fall ist die Auswertung von Tracerversuchen in Form von Konzentrations-Zeitdiagrammen nur

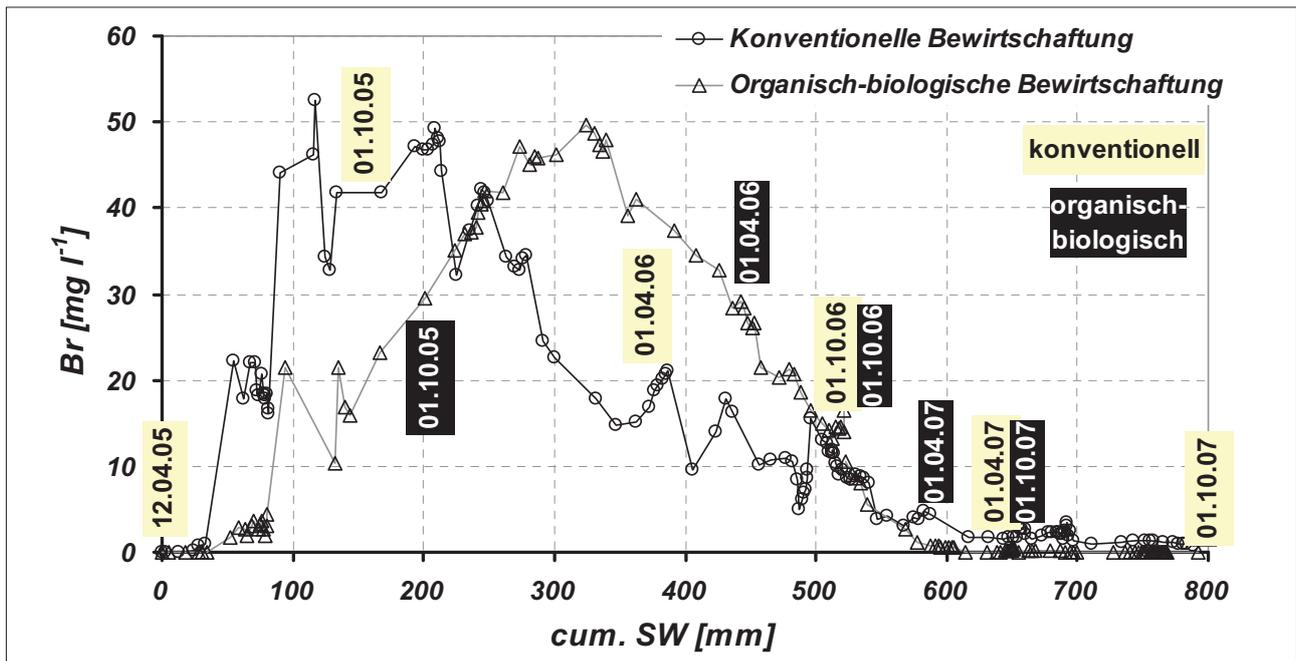


Abbildung 4: Tracerkonzentration in Relation zur kumulierten Sickerwassermenge mit Halbjahres-Zeitpunkten der Probenahme an zwei Präzisionslysimetern in Wagna.

wenig aussagekräftig, weil diese - bei zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführten Experimenten - ein unterschiedliches Ergebnis zeigen. Eine andere mögliche Art der Auswertung ist die Ermittlung des Verweilzeitvolumens von Lysimetern, wie dies in *Abbildung 4* dargestellt ist. Für zwei Präzisionslysimeter am Versuchsfeld Wagna wurde dabei die Bromidkonzentration aus einer Traceraufbringung am 12.04.2005 gegen die kumulierte Sickerwassermenge aufgetragen. Das Lysimeter unter konventioneller Bewirtschaftung weist eine Feinbodenmächtigkeit von 70 cm, das unter organisch biologischer Bewirtschaftung eine solche von 110 cm auf. Die beiden Lysimeter zeigen aufgrund der unterschiedlichen Bodenverhältnisse und der unterschiedlichen Bewirtschaftung deutliche Unterschiede, als gemeinsames Ergebnis ist aber abzuleiten, dass in beiden Lysimetern nach einer Sickerwassermenge von etwa 600 mm zu einem bestimmten Zeitpunkt eingetragene konservative Stoffe, die Lysimeter mit einer Tiefe von 190 cm wieder verlassen haben. Auf der Seite mit konventioneller Bewirtschaftung hat die Hauptmasse des Stoffes bereits nach etwa 100 bis 200 mm, auf der organisch-biologisch bewirtschafteten Seite nach etwa 300 mm Sickerwasser das Lysimeter wieder verlassen. Diese Ergebnisse werden dazu verwendet, gemessene Stoffkonzentrationspeaks (z.B. Nitrat) entsprechenden Inputereignissen (z.B. Düngung) zuzuordnen. Der Zeitraum zwischen Input und Output ist variabel und stark von den Witterungsverhältnissen abhängig. Die an den Durchbruchkurven markierten Halbjahres - Zeitpunkte zeigen die Auswirkung unterschiedlicher Bewirtschaftung und damit unterschiedlichen Wasserrückhalt der beiden Lysimeter an: die starke Verzögerung des Traceroutputs auf der organisch-biologischen Seite im Bereich ab einer Sickerwassermenge von 500 mm resultiert aus dem höheren Wasserbedarf des Futtergrünlandes im Vergleich zum Mais auf der konventionell bewirtschafteten Seite. Diese höhere

Verdunstungsleistung über die Vegetationsperiode führt naturgemäß zu einer Verringerung des Sickerwasserflusses.

### Überprüfung von Randflusseffekten durch die Monolithextraktion

Eine wesentliche Frage bei der Errichtung von monolithisch gestochenen Lysimetern ist üblicherweise die Ausbildung von präferentiellen Wasserwegigkeiten entlang des Lysimeterandes durch das jeweils gewählte Extraktionsverfahren. Um diese Frage an den im Jahre 2004 neu errichteten wägbaren monolithischen Präzisions-Unterdrucklysimetern am Versuchsfeld Wagna beantworten zu können, wurde am 12.04.2005 auf den beiden Lysimetern ein Doppel-Tracerversuch durchgeführt. Die Oberfläche des kreisförmigen Lysimeters wurde in zwei Kreisringsegmente zu je 50 % der Lysimeterfläche aufgeteilt. Im äußeren Kreissegment wurde Deuterium, im inneren Kreissegment Natriumbromid aufgebracht und die Verlagerung der beiden Tracer unter natürlichen Niederschlags- und Witterungsbedingungen am Lysimeterabfluss untersucht. Der Vergleich der Tracerdurchgangskurven zu den Probenahmeterminen für Deuterium für die beiden Lysimeter ist in *Abbildung 5* dargestellt.

Die Ergebnisse der Tracerversuchsauswertung zeigen, dass die beiden unterschiedlichen Tracer in beiden Fällen ein praktisch identes Verhalten zeigen: Mehr als einen Monat nach Aufbringen der Tracer ist bei beiden Tracern auf beiden Lysimetern ein Anstieg der Durchbruchkurven zu sehen. Da das aufgebrachte Deuterium im Vergleich zum Bromid keinesfalls schneller das untere Ende des Lysimeters erreicht, kann das Vorliegen von signifikanten präferentiellen Wegigkeiten an der Lysimeterwandung praktisch ausgeschlossen werden. Das v.a. am organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeter zu erkennende frühere Auftreten von Bromid im Vergleich zu Deuterium ist nicht auf eine raschere Trans-

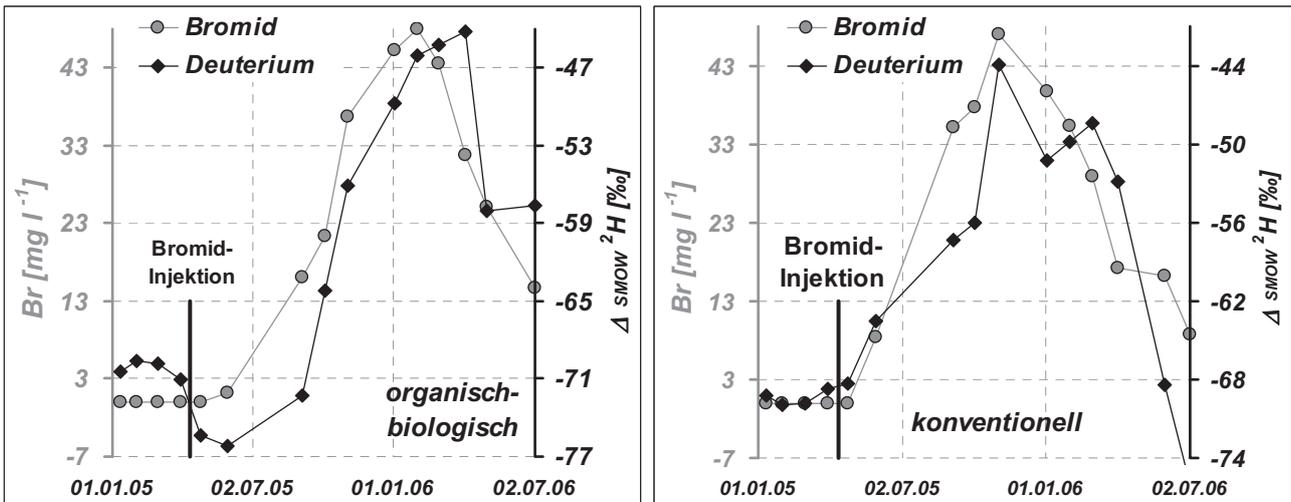


Abbildung 5: Vergleich der Tracer-Konzentrationskurven aus einem Doppel-Tracorexperiment an zwei unterschiedlich bewirtschafteten Präzisionslysimetern in Wagna.

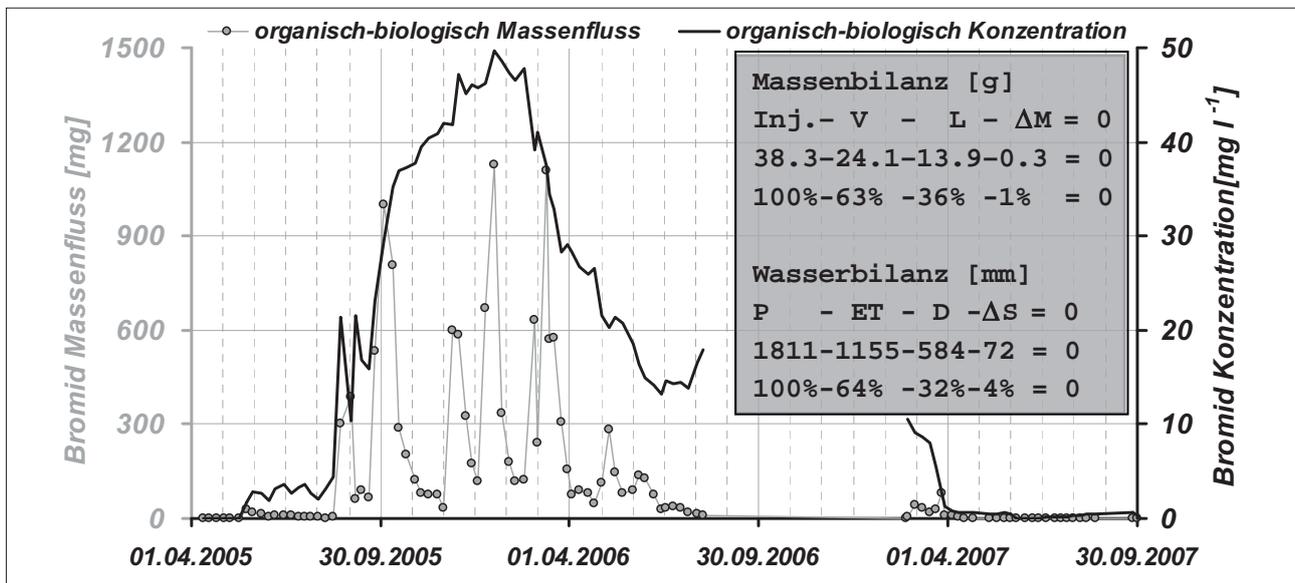


Abbildung 6: Wasser- und Bromid-Massenbilanz des organisch-biologisch bewirtschafteten Präzisionslysimeters in Wagna.

portgeschwindigkeit (Anionenausschluss) zurückzuführen, sondern resultiert aus der schwankenden, im Detail aber nicht bekannten Hintergrundkonzentration von Deuterium im Sickerwasser. Daraus ist auch deutlich der Vorteil von künstlichen Tracern im Vergleich zu natürlich im System vorhandenen Stoffen mit einer variablen aber im Detail unbekanntem Hintergrundkonzentration zu sehen.

### Erarbeitung von Massenflussbilanzen

Da ein Lysimeter ein geschlossenes System darstellt, eignen sich diese bei entsprechender Ausstattung und Beobachtung auch, um neben der Wasserbilanz die Massenflüsse im Lysimeter als Grundlage für die Validierung von Stofftransportmodellen zu berechnen.

In *Abbildung 6* ist die Wasser- und Bromid-Massenbilanz des organisch-biologisch bewirtschafteten Präzisionslysimeters am Versuchsfeld Wagna aus dem Tracerversuch vom 12.04.2005 dargestellt. Deutlich ersichtlich ist, dass trotz

der relativ homogenen Konzentrationskurve der Bromid-Massenfluss sehr stark von Sickerwasserereignissen und damit von Niederschlags-Inputereignissen gesteuert wird. Um eine geschlossene Massenbilanz erstellen zu können, wurde neben der Analyse des Sickerwassers auch die auf dem Lysimeter aufwachsende Pflanzendecke auf ihren Gehalt an Bromid analysiert. Entgegen den verfügbaren Literaturangaben war dabei festzustellen, dass signifikante Bromidmengen durch die Pflanzen aufgenommen worden waren. Das Ergebnis der Auswertungen nach Abschluss der Bromiddurchgänge im Lysimeterabfluss zeigte:

- Dass unter Berücksichtigung der Pflanzenaufnahme die Tracer-Wiederfindungsrate bei mehr als 97 % zu liegen kam;
- Dass die Pflanzenaufnahme von Bromid praktisch ident war der Evapotranspiration;
- Dass nur etwas mehr als 30 % der ausgebrachten Stoffmasse in Richtung Grundwasser abtransportiert wurde

und die nach Ende des Untersuchungszeitraumes im Lysimeter verbleibende Stoffmasse insgesamt weniger als 1 % der applizierten Menge ausmacht.

- Der Vergleich der Wasserbilanz mit der Bromid-Stoffbilanz zeigt eine praktisch idente Verteilung auf die einzelnen Bilanzglieder.

Die Wasserfluss- und Stoffverlagerungsdaten, deren Verhalten auch innerhalb des Lysimeters einerseits in Form von Aufzeichnungen des Wassergehaltes über TDR-Sonden, andererseits in Form von Saugkerzenproben in unterschiedlichen Messtiefen untersucht wird, bildet einen geschlossenen Datensatz zur Validierung von Wasser- und Stofftransportmodellen für die ungesättigte Zone. Aufgrund der klar definierten Randbedingungen muss ein Modell, das den Anspruch erhebt, auf der Punkt- bis Feldskala die Wasser- und Stoffflüsse abbilden zu können, in der Lage sein, derartige Messdaten einwandfrei abzubilden. Erste Modellrechnungen mit HYDRUS 1D zeigten dabei Defizite in der Definition der Wurzelverteilung einerseits und in der Behandlung von Zeiten mit Bodenfrost andererseits auf.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Tracerexperimente auch in der ungesättigten Zone von enormer Bedeutung sind und vor allem – wie an einigen Beispielen gezeigt werden konnte – für folgende Fragestellungen eingesetzt werden sollten:

- Zur Erfassung präferentieller Flüsse und zur Beurteilung ihrer Relevanz für eine modellhafte Bewertung von Wasser- und Stofffluss.
- Zur Bestimmung von Verweilzeiten und von Verweilzeitvolumina als Grundlage zur Transport – Parametergewinnung für die Modellkalibration.
- Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit von eingesetzten Messsystemen, dargestellt am Beispiel der Bewertung von Randflusseffekten.
- Zur Erarbeitung von geschlossenen Wasser- und Massenflussbilanzen unter Berücksichtigung der Pflanzenaufnahme. Auch diese Daten dienen als Grundlage für die Validierung von Modellen der Wasser- und Stoffbewegung in der ungesättigten Zone. Modelle sollten jedenfalls in der Lage sein den Transport konservativer Tracer unter genau bekannten Randbedingungen abzubilden.

Tracerversuche stellen somit eine wichtige Ergänzung zu Lysimetermessungen und zur Modellierung dar und sollten v.a. im Feldversuch wesentlich intensiver eingesetzt werden.

## Literatur

- BERG, W., B. CENCUR-CURK, J. FANK, F. FEICHTINGER, G. NÜTZMANN, W. PAPESCH, V. RAJNER, D. RANK, S. SCHNEIDER, K.-P. SEILER, K.-H. STEINER, E. STENITZER, W. STICHLER, B. TRCEK, Z. VARGAY, M. VESELIC and H. ZOJER, 2001: Tracers in the Unsaturated Zone. *Beiträge zur Hydrogeologie*, 52, 7-102, Graz.
- BERG, W., A. LEIS and J. FANK, 1999: Digitale Bildverarbeitung als Hilfsmittel zur Quantifizierung von bevorzugten Fließwegen in der ungesättigten Zone. - Bericht der BAL über die 8. Lysimetertagung "Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft" vom 13. bis 14. April 1999, 139-141, Gumpenstein.
- FANK, J. and W. BERG, 2001: Tracers in the unsaturated zone-results from experimental sites-test site Leibnitz, Styria, Austria. In: ATH (ed) *Tracer studies in the unsaturated zone and groundwater (investigations 1996-2001)*. *Beiträge zur Hydrogeologie* 52:25-38.
- FLURY, M. and N.N. WAI, 2003: Dyes as Tracers for Vadose Zone Hydrology. *Rev. Geophys.*, 41(1), 1002, 2:1-37.
- JABRO, J.D., E.G. LOTSE, D.D. FRITTON and D.E. BAKER, 1994: Estimation of preferential movement of bromide tracer under field conditions. *J Hydrol* 156:61-71.
- KOESTEL, J., A. KEMNA, M. JAVAUX, A. BINLEY and H. VEREECKEN, 2008: Quantitative imaging of solute transport in an unsaturated and undisturbed soil monolith with 3-D ERT and TDR, *Water Resour. Res.*, 44, W12411, doi:10.1029/2007WR006755.
- KUNG, K.J.S., T.S. STEENHUIS, E.J. KLADIVKO, T.J. GISH, G. BUBENZER and C.S. HELING, 2000: Impact of preferential flow on the transport of adsorbing and non-adsorbing tracers. *Soil Sci Soc Am J* 64:1290-1296.
- MACIEJEWSKI, S., P. MALOSZEWSKI, C. STUMPP and D. KLOTZ, 2006: Modelling of water flow through typical Bavarian soils (Germany) based on lysimeter experiments: 1. Estimation of hydraulic characteristics of the unsaturated zone. *Hydrol Sci J* 51(2):285-297.
- MAIL, N., J. URBANC and A. LEIS, 2006: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environ. Geol.* 41 (8), 1401-1412.
- MALOSZEWSKI, P., S. MACIEJEWSKI, C. STUMPP, W. STICHLER, P. TRIMBORN and D. Klotz, 2006: Modelling of water flow through typical Bavarian soils (Germany) based on lysimeter experiments: 2. Environmental deuterium transport. *Hydrol Sci J* 51(2):298-313.
- ÖHRSTRÖM, P., Y. HAMED, M. PERSSON and R. BERNDTSSON, 2004: Characterizing unsaturated solute transport by simultaneous use of dye and bromide. *J Hydrol* 289:23-35.
- SCHOEN, R., J.P. GAUDET and T. BARIAC, 1999: Preferential flow and solute transport in a large lysimeter, under controlled boundary conditions. *J Hydrol* 215:70-81.
- THEURETZBACHER, H., 1997: Die Inhomogenität natürlicher Böden - dargestellt am Kleineinzugsgebiet Höhenhansl / Pöllau. In: Bericht der BAL über die 7. Gumpensteiner Lysimetertagung "Lysimeter und nachhaltige Landnutzung", 51-54, Gumpenstein.
- VAN DER HOVEN, S.J., D.K. SOLOMON and G.R. MOLINE, 2002: Numerical simulation of unsaturated flow along preferential pathways: implications for the use of mass balance calculations for isotope storm hydrograph separation. *J Hydrol* 268:214-233.
- YASUDA, H., R. BERNDTSSON, H. PERSSON, A. BAHRI and K. TAKUMA, 2001: Characterizing preferential transport during flood irrigation of a heavy clay soil using the dye Vitasyn Blau. *Geoderma* 100:49-66.