

Vergleich von ^3H , Cl^- , Br^- und Li^+ als Tracer für die Wasserbewegung und den Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone

Comparison of ^3H , Cl^- , Br^- and Li^+ as Tracers for Water Movement and Solute Transport in the Unsaturated Soil Zone

H. JACOB & P. LÖFFELHARDT¹⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	151
2. Laborexperimente	152
2.1. Versuchsbedingungen.....	152
2.2. Theoretische Überlegungen.....	153
2.3. Ergebnisse	154
3. Geländeuntersuchungen	156
3.1. Versuchsbeschreibung.....	156
3.2. Tracerdiffusion im Boden	156
3.3. Diskussion der Meßergebnisse	158
4. Fazit und Ausblick	162
Zusammenfassung	162
Literatur.....	163
Summary	163
Dank	164

1. Einleitung

In der Hydrologie werden Markierungsmittel (Tracer) eingesetzt, um die Wasserbewegung in der gesättigten und in der ungesättigten Zone zu beobachten und zu quantifizieren. Wasserbilanzgrößen (Grundwasserneubildung, Gebietsverdunstung) können mit Hilfe von Tracern bestimmt werden. Zur Kalibrierung von Computer-Simulationsmodellen werden ebenfalls Daten aus Tracer-Experimenten herangezogen.

Der Stoffeintrag ins Grundwasser erfolgt im allgemeinen durch die ungesättigte Zone, weswegen eine Quantifizierung der Wasserbewegung und des daran ge-

¹⁾ Dr. H. JACOB, Dipl.-Phys. P. LÖFFELHARDT, Institut für Umweltp Physik der Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 366, D-6900 Heidelberg.

bundenen Stofftransports in diesem Bereich von besonderem Interesse ist. Es bieten sich neben Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen (^2H , ^3H und ^{18}O) eine Reihe von chemischen Tracern (eine Übersicht geben z.B. W. A. JESTER & D. C. RAUPACH, 1987 oder H. MOSER & W. RAUERT, 1980) sowie Farbstoff-Tracer an. Der isotopische Tracer ^3H (Tritium) wird bereits seit etwa 25 Jahren in Heidelberg verwendet (U. ZIMMERMANN et al., 1966), so daß genügend Erfahrungen damit vorliegen (s. auch K. O. MÜNNICH, 1983). Tritium wurde daher als Referenztracer für die Untersuchung der Eigenschaften von Chlorid (Cl^-), Bromid (Br^-) und Lithium (Li^+) benutzt. Der Vergleich der chemischen Tracer mit ^3H geschah sowohl in Geländeversuchen unter natürlichen Bedingungen als auch in Laborexperimenten, wo ungestörte Bodensäulen künstlich beregnet wurden.

In dieser Arbeit wird insbesondere auf die beobachteten Unterschiede im Verhalten der untersuchten Sickerwasser-Tracer eingegangen und die zugrundeliegenden Ursachen werden diskutiert.

2. Laborexperimente

2.1. Versuchsbedingungen

Die bei den Laborversuchen verwendeten ungestörten Bodensäulen stammen aus zwei bezüglich Bodenart und Nutzung sehr unterschiedlichen Gebieten:

- 1) Aus einem ungedüngten Waldgebiet in der Rheinebene etwa 7 km südwestlich von Heidelberg (Schwetzinger Hardt), wo die Bodenmatrix überwiegend aus feinsandigem Mittelsand, karbonatfrei, mit einem Tonanteil < 1 Gewichts-% besteht. Der Anteil des organischen Materials beträgt 25% in der Schicht von 0–5 cm Tiefe, 8% in 5–10 cm und $< 3\%$ darunter. Ausführliche Informationen über dieses Untersuchungsgebiet finden sich bei H. JACOB (1987) und W. REGENBERG (1987). Es wurden Bodensäulen mit einem Metallzylinder (Höhe: 45 cm, Durchmesser: 7 cm) ausgestochen. Die ungestörten Bodensäulen wurden im Labor in diesem Zylinder mit Raten zwischen 6,2 und 23,4 mm/h mit demineralisiertem Wasser beregnet.
- 2) Aus dem landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet des Weiherbachs im Kraichgau ca. 30 km südlich von Heidelberg. Hierbei handelt es sich um äolische Sedimente (toniger Schluff) mit einem Tonanteil um 10% und einem Anteil des organischen Materials von im Mittel 4,5% im Bereich bis 30 cm Tiefe. Aus diesem Gebiet wurden Bodensäulen mit 6,5 cm Durchmesser und 15 cm Höhe entnommen und mit einer Rate von maximal 3,6 mm/h beregnet.

Nachdem sich ein Gleichgewicht zwischen Beregnungsrate und Säulenabfluß eingestellt hatte, wurden jeweils 5 ml (entsprechend einer Regenmenge von 1,3 bzw. 1,5 mm) einer Tracerlösung (Konzentration: 3000 mg/l LiCl , 600 mg/l LiBr und ^3H in einer Konzentration von $5 \times 10^5 \text{ TU}^2$) aufgebracht. Anschließend wurde mit der ursprünglichen Rate weiterberegnet.

²⁾ Die Tritium-Konzentration 1 TU (Tritium Unit) entspricht einem $^3\text{H}/^1\text{H}$ -Verhältnis von 10^{-18} bzw. einer Tritium-Aktivität von knapp 0,12 Bq/l.

Die ^3H -Konzentration im Eluat wurde mit einem Szintillationsspektrometer bestimmt. Die chemische Analyse der Proben erfolgte mit Ionenchromatographie, womit ein schnelles und kostengünstiges Nachweisverfahren zur Verfügung stand. Die Bestimmungsgrenze für Br^- beträgt 0,25 mg/l (bei einer NO_3^- -Konzentration bis etwa 50 mg/l), für Li^+ beträgt die Bestimmungsgrenze 0,01 mg/l. Damit konnten auch noch kleine Konzentrationen dieser beiden Ionen nachgewiesen werden.

2.2. Theoretische Überlegungen

Eine Verbreiterung der Tracermarkierung in Fließrichtung kann sowohl durch molekulare Diffusion als auch durch mechanische Dispersion verursacht werden. Bei den meist relativ hohen Beregnungsraten während der Säulenversuche und der daraus folgenden kurzen Dauer eines Experiments kann die molekulare Diffusion im allgemeinen vernachlässigt werden. Man erhält dann für einen Advektions-Dispersions-Ansatz die Beziehung

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha v_a \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_a \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

mit

C = Tracer-Konzentration in der flüssigen Phase,
 v_a = Abstandsgeschwindigkeit des Advektionsstroms,
 α = Dispersivität.

Der volumetrische Wassergehalt wird bei der Ableitung als konstant angenommen. Unter der Anfangsbedingung $C(z, t = 0) = C_0 \delta(z)$ existiert eine analytische Lösung dieser Gleichung

$$C(z, t) = \frac{C_0}{2\sqrt{\pi\alpha v_a t}} \cdot \exp\left(-\frac{(z - v_a t)^2}{4\alpha v_a t}\right). \quad (2)$$

Die Tracer-Verteilung wird also durch eine Gauß-Kurve beschrieben, welche die Breite $\sigma = (2\alpha v_a t)^{1/2}$ hat und deren Maximum sich mit der Geschwindigkeit v_a verlagert. Diese symmetrische Gauß-Kurve erhält man, wenn man den Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit von der Tiefe zu einem festen Zeitpunkt t betrachtet, also ein **Tiefenprofil** aus einem Testfeld entnimmt. Bei Säulenversuchen wird hingegen der **zeitliche** Verlauf der Tracer-Konzentration im Sickerwasser am unteren Ende der Säule, d.h. in einer festen Tiefe $z = h$, gemessen. Man erhält dabei eine Tracer-Durchbruchskurve, die nicht symmetrisch ist:

$$C(t) = \frac{C_0}{2\sqrt{\pi\alpha v_a t}} \cdot \exp\left(-\frac{(h - v_a t)^2}{4\alpha v_a t}\right). \quad (3)$$

Bei den vorangegangenen Überlegungen wurde vorausgesetzt, daß eine geschichtete Wasserbewegung (piston flow) gegeben ist, daß also keine immobile Phase existiert, die an der Wasserbewegung nicht teilnimmt. Die Anwesenheit einer immobilen Phase führt zu einem verzögerten Anstieg und zu einem verlangsamten Abfall (tailing) der Durchbruchskurve aufgrund des diffusiven Austausches zwischen mobiler und immobilter Phase. Die Transportgleichung (1) reicht dann nicht mehr zur vollständigen Beschreibung des Systems aus (P. NKEDI-KIZZA et al., 1983; R. SCHULIN et al., 1985).

2.3. Ergebnisse

In Fig. 1 sind die Durchbruchskurven von ^3H , Cl^- und Br^- für eine Bodensäule aus der Schwetzingener Hardt aufgetragen. Die Anionen Chlorid und Bromid zeigen ein völlig identisches Verhalten, was nicht nur hier, sondern generell bei allen durchgeführten Versuchen beobachtet wurde. Aus der Tritium-Durchbruchskurve läßt sich demgegenüber eine um etwa 10% geringere Transportgeschwindigkeit ab-

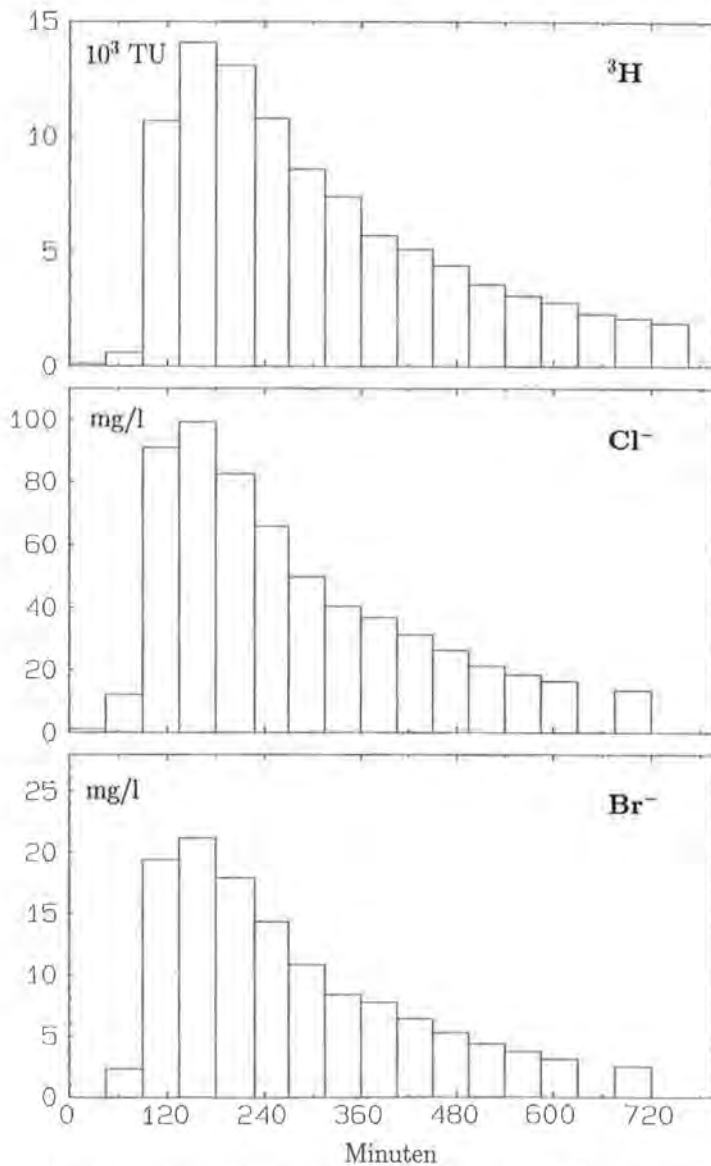


Fig. 1: Tracer-Durchgangskurven bei einer Bodensäule aus der Schwetzingener Hardt (Berechnungsrate: 6,2 mm/h).

leiten. Es kommen prinzipiell zwei Mechanismen als Erklärung für diesen Unterschied in Frage:

- 1) Die Existenz einer immobilen Phase. Wegen der schnelleren Tritium-Diffusion in der flüssigen Phase und zusätzlich in der Gasphase tauscht ^3H stärker mit der immobilen Phase aus und wird daher gegenüber den Anionen retardiert (s. Kapitel 3.2.).
- 2) Der Anionen-Ausschluß an Tonmineralen führt zu einer schnelleren Tiefenverlagerung von Cl^- und Br^- (s. z.B. S. M. RAO & S. K. JAIN, 1985). Er dürfte allerdings bei dem tonarmen Sandboden nur eine sehr geringe Rolle spielen.

Mit Hilfe des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts in der Bodensäule konnte berechnet werden, daß während des Versuchs eine immobile Phase existierte, die etwa 60% des gesamten Wasservolumens in der Säule umfaßte. Damit läßt sich die Verzögerung der ^3H -Tiefenverlagerung erklären. Diese immobile Phase zeigt sich auch in dem starken tailing der Kurven.

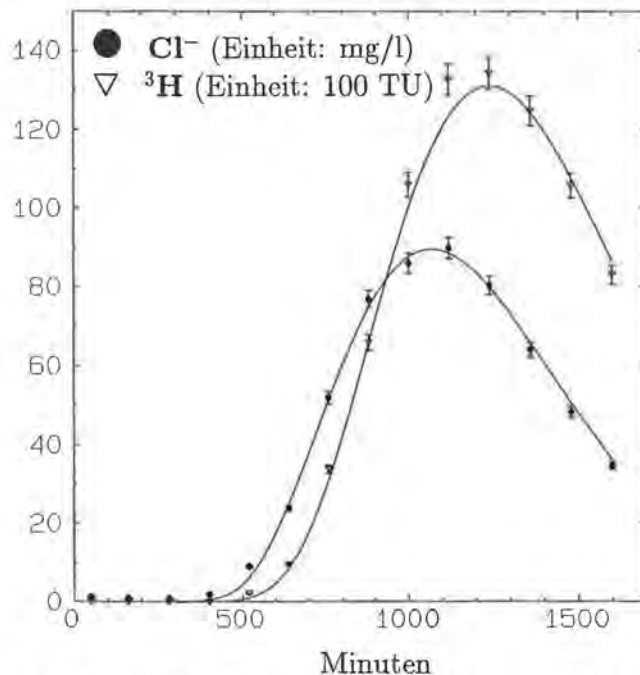


Fig. 2: Tracer-Durchgangskurven bei einer Bodensäule aus dem Weiherbach-Gebiet (Beregnungsrate: 3,6 mm/h). Die theoretischen Durchbruchkurven wurden an die Meßwerte angepaßt.

Bei den Experimenten mit Säulen aus dem Weiherbach-Gebiet war die Abstandsgeschwindigkeit für den Anionen-Transport um ca.15% größer als für ^3H (ein Beispiel zeigt Fig. 2). Hier konnte allerdings keine immobile Phase nachgewiesen werden. Daher stimmen auch die nach Gleichung (3) angepaßten theoretischen Durchbruchkurven gut mit den Meßwerten überein (Fitparameter: $v_a = 0,0136$ cm/min, $\alpha = 0,72$ cm für Cl^- und $v_a = 0,0118$ cm/min, $\alpha = 0,57$ cm für ^3H). Als Grund für die beobachteten Unterschiede zwischen den Tracern wird hier

der Anionen-Ausschluß an den Oberflächen der Tonminerale im Boden angenommen. Dasselbe Phänomen (Vorausseilen der Anionen) hat also zwei völlig verschiedene Ursachen.

Das mit der Tracerlösung aufgebrachte Li^+ wurde zu 85–90% (Schwetzinger Hardt) bzw. zu über 99,8% (Weiherbach-Gebiet) in den Bodensäulen sorbiert, was sich in jedem Fall vollständig durch Ionenaustausch erklären ließ. Äquivalent zum Lithium-Defizit stieg die Konzentration der anderen Kationen (hauptsächlich Ca^{2+}) im Eluat an.

3. Geländeuntersuchungen

3.1. Versuchsbeschreibung

Die Geländeversuche fanden alle in der Schwetzinger Hardt unter natürlichen Bedingungen, d.h. ohne zusätzliche künstliche Beregnung, statt. Während des Untersuchungszeitraums (Dezember 1988 bis Juni 1989) betrug der Grundwasserflurabstand etwa 4,5 m.

Auf einer Fläche von 4 m^2 wurden punktförmig (Abstand der Gitterpunkte: 20 cm) je 2 ml einer Tracerlösung (200 g/l LiCl und ^3H in einer Konzentration von 2×10^7 TU) mit einer Spritze in 5 cm Tiefe injiziert. Das Injektionsverfahren vermindert die Tritium-Verluste durch Verdunstung und Isotopenaustausch mit dem atmosphärischen Luftwasserdampf. Aufgrund der punktförmigen Impfung liegt zunächst eine inhomogene Tracerverteilung vor, die erst allmählich durch horizontale Diffusion und Dispersion ausgeglichen wird. Das gesamte Verfahren wird von K. O. MÜNNICH (1983) beschrieben und diskutiert. Die Probenahme erfolgte mit dem Pürckhauer-Bohrstock (Tiefenauflösung: 10 cm). Im Labor wurde zunächst in einer Destillationsapparatur das Bodenwasser quantitativ für die Tritium-Messung gewonnen, anschließend wurden die trockenen Bodenproben mit einer definierten Menge demineralisiertem Wasser versetzt, um das Chlorid wieder in Lösung zu bringen. Die Einzelheiten des Verfahrens finden sich bei P. LÖFFELHARDT (1990).

Eine weitere Testfläche ($1,5 \text{ m}^2$), auf der die Tracerlösung nach dem gleichen Verfahren ausgebracht wurde, befand sich direkt neben einer holzverschalteten Grube (Tiefe: 3,3 m), von der aus über Saugkerzen Bodenlösung aus sieben unterschiedlichen Tiefen zwischen 33 und 258 cm durch Anlegen eines Unterdrucks abgesaugt werden konnte. Das Verfahren der Probenahme ist ausführlich bei H. JACOB (1987) beschrieben. Damit war ein Vergleich zwischen der Probenahme mittels der Bohrstock-Methode und über Saugkerzen möglich.

Die Geländeversuche, bei denen Cl^- und Br^- miteinander verglichen wurden, werden hier nicht gesondert aufgeführt. Es sei nur erwähnt, daß beide Tracer – wie auch in den Laborexperimenten – ein völlig identisches Verhalten zeigten.

3.2. Tracerdiffusion im Boden

Bei den Freiland-Experimenten gewinnt die Diffusion der Tracer, vor allem aufgrund der wesentlich längeren Zeiträume (Monate oder sogar Jahre), erheblich an Bedeutung. Die Tritium-Diffusion unterscheidet sich in zwei Punkten von der Dif-

fusion von Chlorid, Bromid oder anderer Ionen in der Bodenlösung. Zum einen ist die Diffusionskonstante für ^3H größer als die Diffusionskonstante für die Ionen. Die letztere hängt auch von der jeweiligen Zusammensetzung der Lösung ab. Als Anhaltspunkt sei hier angegeben, daß für eine reine NaCl-Lösung in dem bei unseren Untersuchungen gegebenen Konzentrationsbereich bei $18,5^\circ\text{C}$ die Diffusionskonstante für Na^+ und Cl^- etwa $1,3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ beträgt, während die Selbstdiffusionskonstante des Wassers bei dieser Temperatur den Wert $2,1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ annimmt. Ein noch bedeutsamerer Unterschied ergibt sich aus der Tatsache, daß ^3H in der ungesättigten Zone auch über die Dampfphase diffundieren kann, während den Ionen trivialerweise nur die flüssige Phase zur Verfügung steht.

Nimmt man an, daß der ^3H -Transport ausschließlich durch Diffusion erfolgt, d.h., daß der Advektionsfluß verschwindet, dann erhält man aus der Kontinuitätsgleichung im porösen Medium für den eindimensionalen Fall (wenn der radioaktive Zerfall vernachlässigt wird)

$$\Theta \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial j}{\partial z} \quad (4)$$

Setzt man die Diffusionsstromdichte j nach dem 1. Fick'schen Gesetz

$$j = - D_{\text{eff}} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \quad (5)$$

in Gleichung (4) ein, dann ergibt sich das 2. Fick'sche Gesetz

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \hat{D} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \quad (6)$$

wobei

$$\hat{D} = \frac{D_{\text{eff}}}{\Theta} = \frac{D_{\text{F}}}{k} \left(1 + \xi \frac{P - \Theta}{\Theta} \right) \quad (7)$$

ist. Die Größe

$$\xi = \frac{D_{\text{D}} \rho_{\text{D}}}{D_{\text{F}} \rho_{\text{F}}} \cdot \frac{1}{\beta} \quad (8)$$

gibt das Verhältnis des Diffusionsstroms in der Gasphase zum Diffusionsstrom in der flüssigen Phase an, sofern beiden Phasen jeweils der gleiche Porenraum zur Verfügung steht (P. LÖFFELHARDT, 1990). Dabei ist

- $D_{\text{F}}, D_{\text{D}}$ die ^3H -Diffusionskonstante in der flüssigen bzw. in der Dampf-Phase,
- $\rho_{\text{F}}, \rho_{\text{D}}$ die Dichte von Wasser bzw. Wasserdampf,
- Θ der volumetrische Feuchtegehalt (wird als konstant angenommen),
- k die Tortuosität,
- P die Porosität,
- β der Isotopentrennfaktor für ^3H beim Übergang von der flüssigen in die Dampf-Phase.

Geht man von einer gaußförmigen Verbreiterung der ^3H -Markierung aus, dann ist $\sigma = (2\hat{D}t)^{1/2}$ die charakteristische Länge für diese Verbreiterung. Wegen seiner

größeren Diffusionskonstante in der flüssigen Phase und aufgrund der zusätzlichen Diffusion über die Gasphase breitet sich also Tritium schneller aus als die chemischen Tracer.

3.3. Diskussion der Meßergebnisse

In Fig. 3 sind Tiefenprofile der Cl^- und ^3H -Konzentration im Sickerwasser an drei Terminen zwischen Januar und April 1989 aufgetragen. Während sich am 11. Januar beide Tracer noch nahe an der Bodenoberfläche befinden, ist am 8. März das ^3H -Maximum deutlich in die Tiefe gewandert.

Am 5. April sind die Maxima beider Tracer jedoch wieder im gleichen Tiefenbereich (60–80 cm) zu finden. Die Erklärung für das zwischenzeitlich unterschiedliche Verhalten läßt sich aus den im Kapitel 3.2. diskutierten Unterschieden bei der Diffusion ableiten: Die Niederschläge in der Zeit zwischen dem 11. Januar und dem 8. März (insgesamt 40 mm) dienten nur dazu, den trockenen Boden anzufeuchten, und reichten nicht aus, um eine Sickerbewegung in Gang zu setzen. Während dieser Zeit entwich jedoch ^3H aufgrund von Verdunstung und Isotopenaustausch mit dem atmosphärischen Luftwasserdampf aus der obersten Bodenschicht (0–10 cm), während die Cl^- -Konzentration in dieser Schicht wegen der Verdunstung sogar anstieg.

Zugleich drang die ^3H -Markierung diffusiv in tiefere Schichten (20–40 cm) vor, was eine Tiefenverlagerung des Konzentrationsmaximums ohne eigentliche Sickerbewegung ergab. (Insbesondere in den obersten 20 cm des Bodens, wo P wegen des hohen Anteils an organischem Material 55–70% beträgt und Θ während unserer Untersuchungen zwischen 10–25% lag, steht ein großer freier Porenraum ($P - \Theta$) für die Gasphasendiffusion zur Verfügung.) Die größere Niederschlagsintensität im Zeitraum vom 8. März bis 5. April (insgesamt 39 mm) führte dann zu einer deutlichen Sickerbewegung, bei der die Unterschiede zwischen Cl^- und ^3H wieder ausgeglichen wurden.

Bei der über die Saugkerzen gewonnenen Bodenlösung ergeben sich in einer bestimmten Tiefe Tracer-Durchbruchskurven, die ähnlich wie bei den Säulenversuchen im Labor verlaufen.

Ein Beispiel für die Tiefe 45 cm zeigt Fig. 4. Dort ist die Cl^- - und die ^3H -Konzentration gegen die akkumulierte Niederschlagsmenge aufgetragen (Zeitraum: 15. Dezember 1988 bis 18. Mai 1989). Während der niederschlagsarmen Periode am Anfang erfolgt die Tracer-Verlagerung in die Tiefe weitgehend diffusiv. Hier eilt das ^3H deutlich voraus und erreicht auch die Maximalkonzentration vor dem Cl^- . Nach dem Einsetzen der Sickerbewegung verhalten sich dann beide Tracer vollkommen identisch (abfallender Teil der Kurven).

In Fig. 5 ist die Cl^- -Konzentration zusammen mit Ca^{2+} und Mg^{2+} gegen die Zeit aufgetragen. Parallel zum Anstieg der Cl^- -Konzentration steigen auch Ca^{2+} und Mg^{2+} in der Bodenlösung an. Diese ersetzen (zusammen mit anderen Kationen) das ursprünglich aufgegebene Li^+ , das zu über 99% auf dem Austausch (überwiegend organisches Material) sorbiert wurde. Bezüglich des Verhaltens von Li^+ wird damit der Befund der Laborversuche bestätigt. Li^+ ist trotz seiner Untergrundfreiheit als Tracer kaum geeignet. Seine Anwendung kann allerdings Informationen über den Ionenaustausch im Boden liefern.

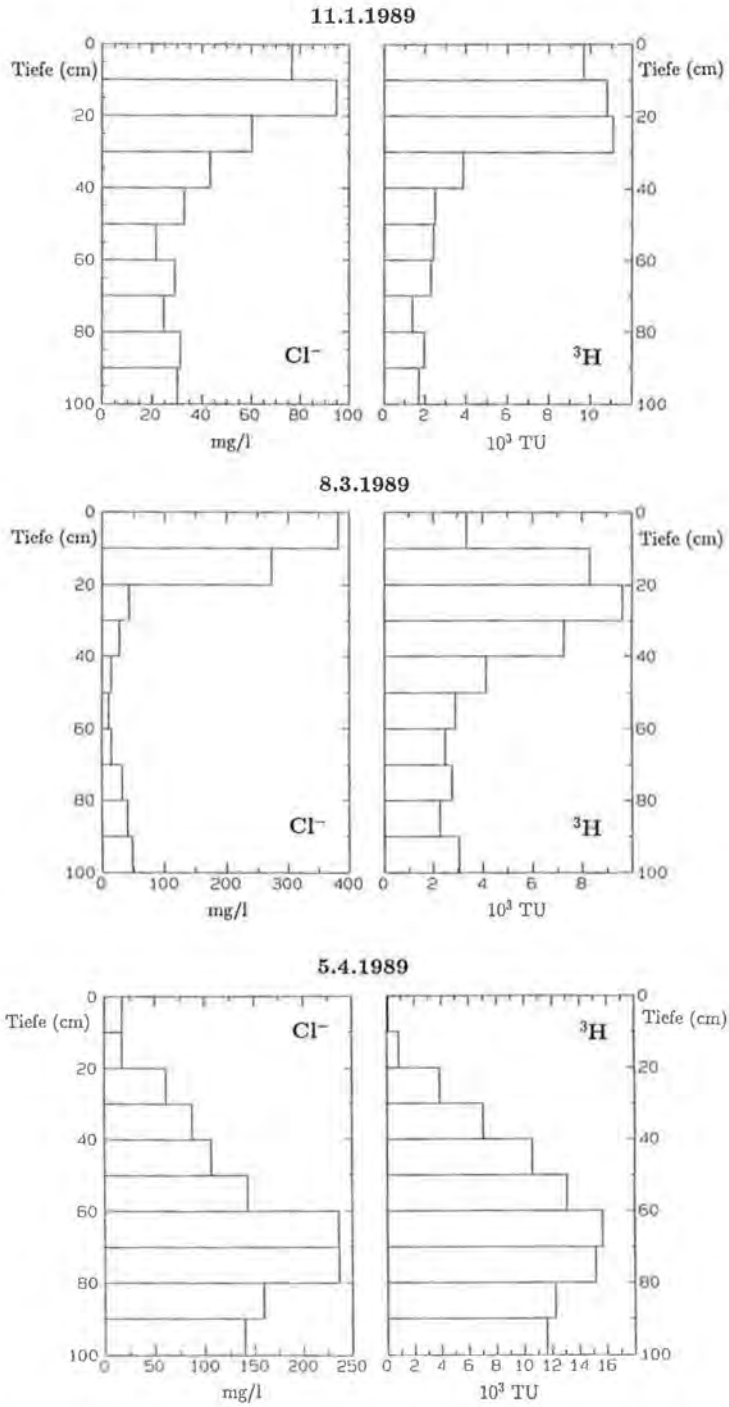


Fig. 3: Tiefenprofile der Konzentration von Chlorid und Tritium in der Bodenlösung (Untersuchungsgebiet Schwetzingen Hardt).

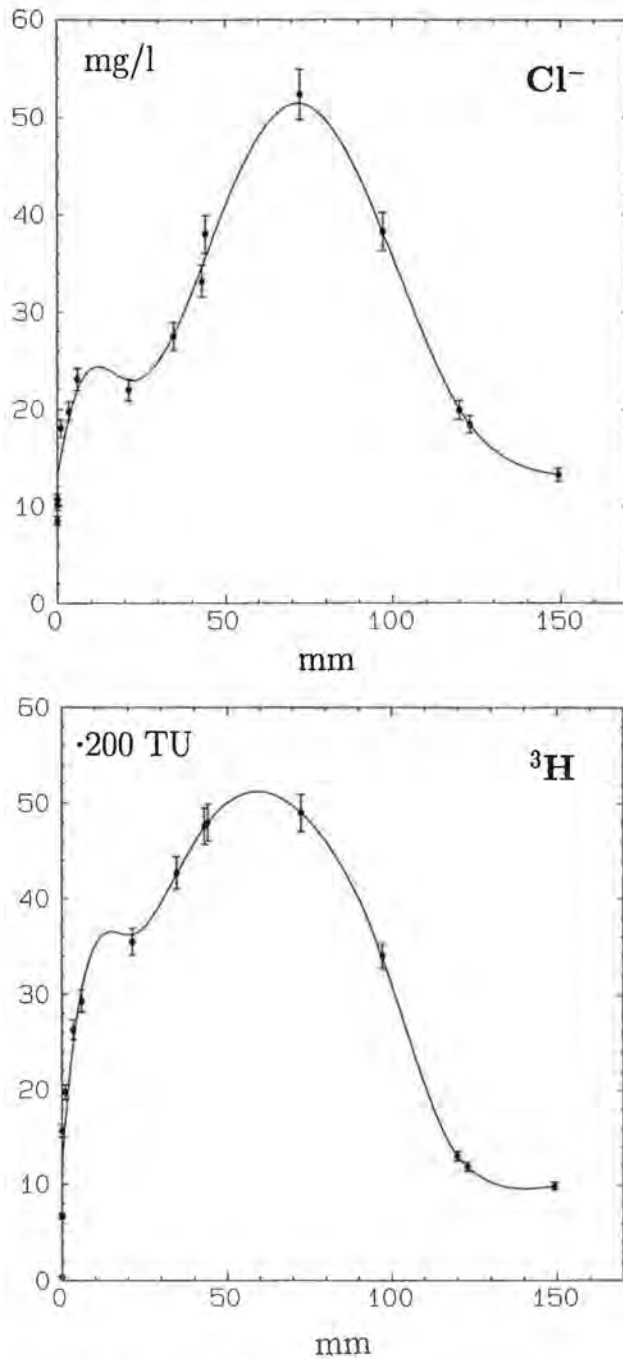
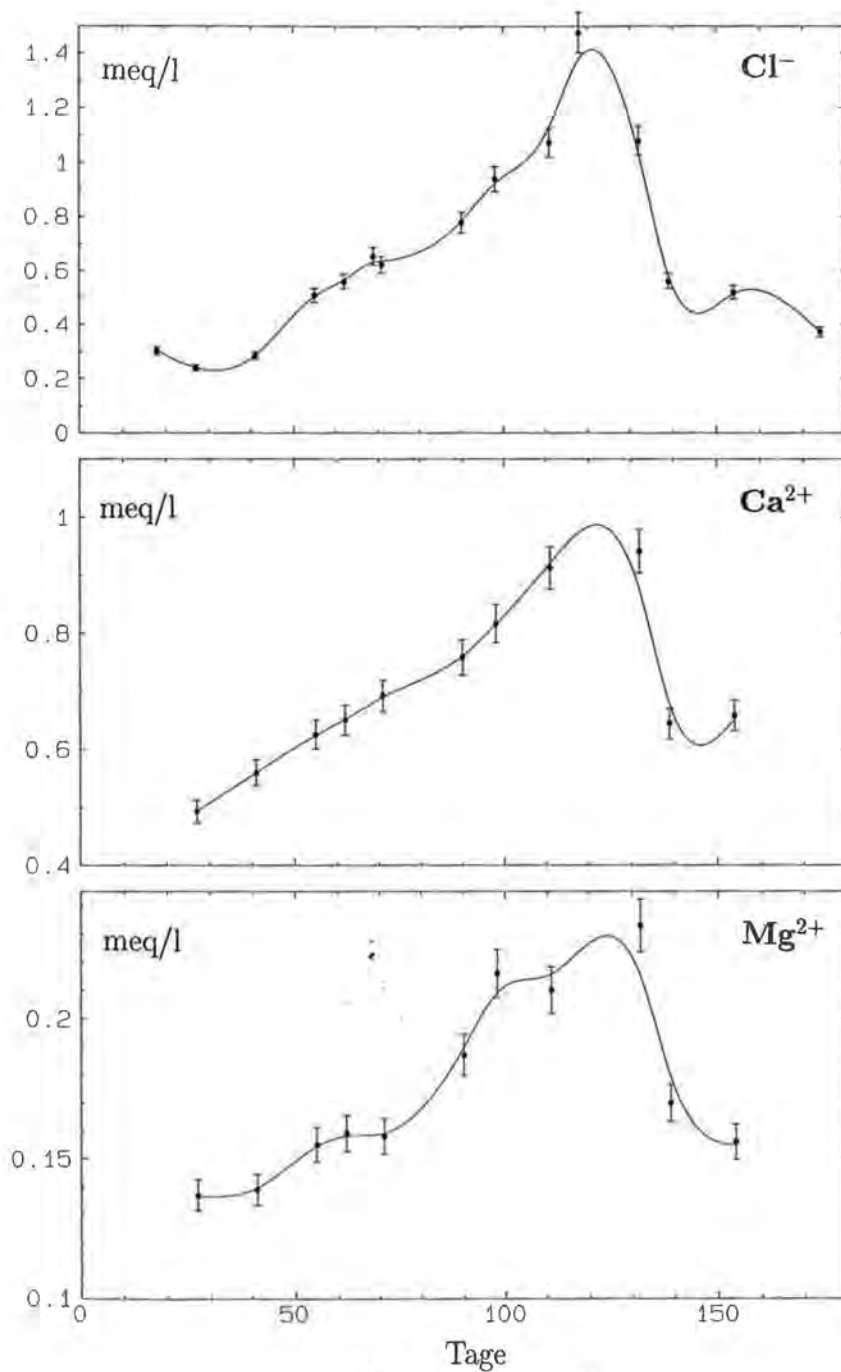


Fig. 4: Variation der Chlorid- und der Tritium-Konzentration im Sickerwasser in 45 cm Tiefe als Funktion der akkumulierten Niederschlagsmenge (die durchgezogene Kurve ist ein Spline-Fit der Meßdaten).



(Tag 1: 15.12.1988)

Fig. 5: Variation der Cl^- , Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Konzentration im Sickerwasser in 45 cm Tiefe als Funktion der Zeit (die durchgezogene Kurve ist ein Spline-Fit der Meßdaten).

4. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse des Vergleichs der benutzten Tracer lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) Cl^- und Br^- zeigen ein identisches Transportverhalten. Beide unterliegen dem Anionen-Ausschluß, der bei mehrfach geladenen Ionen sogar noch ausgeprägter sein kann (S. M. RAO & S. K. JAIN, 1985). Dieser Effekt wirkt sich allerdings nur in Böden mit einem höheren Tonanteil aus und war in dem untersuchten Sandboden der Schwetzingen Hardt vernachlässigbar.
- 2) Das Br^- besitzt den Vorteil, daß der natürliche Untergrund verschwindend gering ist, so daß man mit relativ kleinen Tracer-Mengen arbeiten kann. Wegen seiner toxikologischen Unbedenklichkeit selbst in höheren Konzentrationen kann Br^- auch großflächig eingesetzt werden (G. L. BUTTERS et al., 1989).
- 3) Der isotopische Tracer ^3H diffundiert schneller als die genannten chemischen Tracer, was insbesondere in Zeiten geringer Sickerbewegung oder bei der Existenz einer immobilen Phase zu Unterschieden führen kann.
- 4) Neben Br^- oder Cl^- , die als ideale Tracer für den Anionen-Transport (z.B. für NO_3^-) eingesetzt werden können, sollte auch ein isotopischer Tracer verwendet werden, damit zusätzlich die Wasserbewegung direkt verfolgt werden kann.

Im Rahmen des Verbundprojekts „Weiherbach“ ist ein Einsatz des radioaktiven Tracers ^3H wegen der landwirtschaftlichen Nutzung des Gebiets ausgeschlossen. Deshalb werden dort – ergänzend zur Ausbringung des chemischen Tracers NH_4Br – die natürlichen jahreszeitlichen Variationen der stabilen Isotope ^2H und ^{18}O im Niederschlag als Markierungen des Sickerwassers genutzt.

Zusammenfassung

In Geländeversuchen in der Rheinebene bei Heidelberg (Sandboden) sowie in Laborexperimenten mit ungestörten Bodensäulen aus demselben Gebiet und aus dem Kraichgau (toniger Schluff) wurde das Verhalten von ^3H , Cl^- , Br^- und Li^+ im Hinblick auf einen Einsatz als Sickerwasser-Tracer untersucht.

Während Cl^- und Br^- ein völlig identisches Verhalten zeigen, unterscheiden sich die beiden Anionen in ihrem Transportverhalten gegenüber dem isotopischen Tracer ^3H in zweierlei Hinsicht:

- 1) Die Diffusionskonstante von ^3H in der flüssigen Phase ist größer als die der Ionen, zusätzlich kann ^3H auch über die Gasphase diffundieren. Deswegen breitet es sich in Perioden mit geringer Sickerbewegung schneller aus. Andererseits wird es bei Existenz einer immobilen Phase stärker retardiert, weil der Transferfaktor zwischen der mobilen und der immobilen Phase größer ist.
- 2) Cl^- und Br^- unterliegen dem Anionen-Ausschluß, was in Böden mit höherem Tonanteil zu einem Vorseilen dieser beiden Tracer gegenüber ^3H führt.

Li^+ ist als Tracer kaum geeignet, da es durch Ionenaustausch stark sorbiert wird.

Die kombinierte Anwendung eines isotopischen Tracers (^3H , ^2H oder ^{18}O) und eines chemischen Tracers (Br^- oder Cl^-) liefert differenziertere Informationen über Wasserbewegung und Stofftransport.

Literatur

- BUTTERS, G. L., W. A. JURY & F. F. ERNST (1989): Field scale transport of bromide in an unsaturated soil. – *Water Resources Research*, **25**, 1575–1589, Washington.
- JACOB, H. (1987): Wasserhaushalt und Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone eines Waldökosystems: Untersuchungen in der Schwetzingener Hardt. – Dissertation, 138 S., Heidelberg.
- JESTER, W. A. & D. C. RAUPACH (1987): A survey of applications of non-radioactive but neutron activable groundwater tracers. – *Isotope Techniques in Water Resources Development*, 623–633, IAEA, Wien.
- LÖFFELHARDT, P. (1990): Der Vergleich von ^3H , Br^- , Cl^- und Li^+ als Tracer für die Sickerwasserbewegung. – Diplomarbeit, 71 S., Institut für Umweltp Physik, Universität Heidelberg.
- MOSER, H. & W. RAUERT (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. – 400 S., Berlin/Stuttgart (Bornträger-Verlag).
- MÜNNICH, K. O. (1983): Moisture movement in the unsaturated zone. – *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology*, 203–222, IAEA, Wien.
- NKEDI-KIZZA, P., J. W. BIGGAR, Th. VAN GENUCHTEN, P. J. WIERENGA, H. M. SELIM, J. M. DAVIDSON & D. R. NIELSEN (1983): Modeling tritium and chloride-36 transport through an aggregated oxisol. – *Water Resources Research*, **19**, 691–700, Washington.
- RAO, S. M. & S. K. JAIN (1985): Tracer transport modelling for unsaturated zone – effect of anion exclusion and immobile water. – *Isotopenpraxis*, **21**, 433–438, Berlin.
- REGENBERG, W. (1987): Hydrogeologie und Hydrochemie im Bereich der Schwetzingener Hardt. – Dissertation, 157 S., Heidelberg.
- SCHULIN, R., H. M. SELIM & H. FLÖHLER (1985): Bedeutung des Bodenskeletts für die Verlagerung und Verteilung von gelösten Stoffen in einer Rendzina. – *Z. dt. geol. Ges.*, **136**, 397–405, Hannover.
- ZIMMERMANN, U., K. O. MÜNNICH, W. ROETHER, K. KREUTZ, K. SCHUBACH & O. SIEGEL (1966): Tracers determine movement of soil moisture and evapotranspiration. – *Science*, **152**, 346–347, Washington.

Summary

The behaviour of ^3H , Cl^- , Br^- and Li^+ as artificial tracers was investigated under natural conditions in a forested area in the Rhine valley near Heidelberg (sandy soil) as well as in the laboratory with undisturbed soil-columns from the same area and from an agricultural region (Kraichgau, clayey silt).

While Cl^- and Br^- behave totally identical, there exist two differences between the anions and the isotope tracer ^3H :

- 1) The diffusion constant in the liquid phase is higher for ^3H than for the ions and the diffusion of ^3H via the vapour phase plays an important role. These two facts lead to a quicker propagation of ^3H during periods of small or even zero water movement. On the other hand, due to its higher transfer coefficient between the mobile and the immobile phase ^3H is more retarded if an immobile phase does exist.
- 2) In soils with a higher amount of clay Cl^- and Br^- are subject to anion exclusion, which leads to a faster movement of both ions as compared to ^3H .

Li^+ is to a very high degree adsorbed by ion exchange and, therefore, it is hardly suited as a tracer.

The combined application of an isotope tracer (^3H , ^2H or ^{18}O) and a chemical tracer (Br^- or Cl^-) delivers more detailed information about soil water movement and solute transport.

Dank

Die Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 02 WA 8905/5 finanziell unterstützt. Der Dank gilt auch dem Forstamt Schwetzingen für die Erlaubnis zur Durchführung der Geländeversuche.