

Lysimeter-Untersuchungen zur Sickerwasserbewegung in einem tertiären Sand und einem quartären Kies

*Investigations of infiltration water movement in lysimeters filled with tertiary sand
and quaternary gravel*

D. KLOTZ & P. TRIMBORN¹⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	17
2. Versuchsaufbau und -durchführung	18
3. Mathematische Modelle.....	18
4. Ergebnisse.....	22
4.1. Variabler Wasserfluß	22
4.2. Stationärer Sickerwasserfluß	22
Zusammenfassung.....	24
Literatur.....	24
Summary.....	24
Dank.....	25

1. Einleitung

Wasser in porösen Gesteinen bewegt sich immer von Orten höheren Potentials zu solchen niederen Potentials. Der Durchfluß pro Gesamtflußquerschnitt im porösen Medium ist proportional der Potentialdifferenz, Proportionalitätsfaktor ist der Durchlässigkeitsbeiwert (Darcysches Gesetz).

Für das wasserungesättigte System, also für die vertikale Sickerwasserbewegung, setzt sich das Gesamtpotential aus den einander entgegengesetzten Teilpotentialen Gravitationspotential und Matrixpotential zusammen. Das auf das Wassergewicht im Kraftfeld der Erde bezogene Gravitationspotential ist stets in die Tiefe gerichtet. Das Matrixpotential ist ein Maß für alle Kräfte, die vom porösen Gestein auf das Wasser ausgeübt werden und der vertikalen Wasserbewegung entgegen wirken. Es kann als negative Wasserspannung angesprochen werden und nimmt mit steigendem Wassergehalt ab. Unter unseren humiden Klimabedingungen entsteht im Jahresmittel ein abwärts gerichteter vertikaler Sickerstrom, da das Gravitationspotential das Matrixpotential übertrifft.

¹⁾ Dipl.-Phys. D. KLOTZ & Dipl.-Phys. P. TRIMBORN, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Hydrologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 Oberschleißheim.

Experimentell kann die Sickerwasserbewegung in kleinmaßstäbigen Säulenversuchen unter idealisierten Randbedingungen (siehe z. B. D. KLOTZ, 1980) und in aufwendigen Geländeversuchen untersucht werden. Ein Bindeglied zwischen Labor- und Geländeexperimenten stellen Lysimeter-Untersuchungen dar. Im folgenden wird über Wasserflüsse und Tracertransport durch die wasserungesättigte Zone von Lysimetersäulen unter Freilandbedingungen berichtet. Unsere Arbeiten beruhen auf der Analyse der zeitabhängigen Variationen des Deuteriumgehalts im Niederschlag und im Abfluß zweier Lysimeter, die mit Lockersedimenten des süddeutschen Raumes gefüllt sind, über einen Zeitraum von acht Jahren (1984–1991).

2. Versuchsaufbau und -durchführung

Die Lysimeteranlage im Institut für Hydrologie besteht aus acht Lysimetern (PVC-Säulen) von 390 mm Durchmesser und einer Länge von 2000 mm (Fig. 1). Diese Säulen stehen mit ihrem Sedimentinhalt in einer mit Styropor isolierten Metallummantelung, um Temperaturschwankungen aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien möglichst klein zu halten. Während des Winterhalbjahres wird das untere Ende jeder Lysimetersäule durch Heizschlangen künstlich auf ca. +5° C gehalten, um die natürliche Bodentemperatur in 2 m Tiefe zu simulieren und ein etwaiges Einfrieren des aus der Säule auslaufenden Wassers zu verhindern. Im Mittelteil der Lysimeteranordnung ist eine weitere Säule mit demselben Durchmesser wie die Lysimetersäulen (Länge: 500 mm) zum Sammeln des Niederschlags eingebaut.

Die Lysimeter wurden mit Sedimenten verschiedener bayerischer Standorte unter versuchstechnisch dichter Lagerung gefüllt: In sechs Lysimetersäulen sind Quarzsande und -kiese aus der Oberpfalz eingebaut, in je eine Säule quartäre Kiese aus der Gegend von Murnau („Kies-Lysimeter“ K) und tertiäre Sande aus der Gegend von Zinkmiltach („Sand-Lysimeter“ S). Im folgenden werden nur die Untersuchungen im Kies- (K) und Sand-Lysimeter (S) diskutiert.

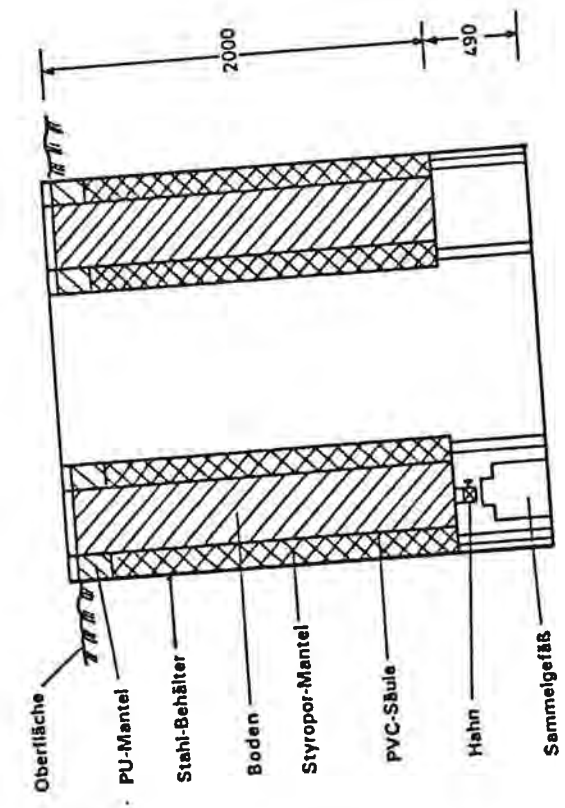
Zunächst wurden jeweils zwei Säulen mit dem gleichen Sediment gefüllt und dabei die totale Porosität als Maß für die Lagerung ermittelt. Unter wassergesättigten Bedingungen wurden dann die gesättigte Durchlässigkeit und nach freiem Auslauf des Wassers aus der Säule der verbleibende mittlere Wassergehalt bestimmt (Tab. 1). Sodann wurde eine der Säulen in die Lysimeteranordnung eingebaut, während die andere in Scheiben zerschnitten wurde, um über das Vertikalpotential mit gravimetrischen Methoden den Wassergehalt zu bestimmen (Fig. 2). Danach wurden die in die Anlage eingebauten Säulen den natürlichen atmosphärischen Bedingungen überlassen. Niederschlagswasser und Sickerwasser wurden am Niederschlagssammler bzw. am Ausfluß der Lysimetersäulen gesammelt und sowohl ihr Volumen als auch der jeweils zugehörige Deuteriumgehalt bestimmt (Fig. 3). Ab 1987 wurde in den oberen 20 cm der Lysimetersäule wöchentlich zusätzlich der Wassergehalt ermittelt.

3. Mathematische Modelle

Die Modellierung ist ausführlich in D. KLOTZ et al. (1995) dargestellt.

Zwei verschiedene mathematische Modelle wurden gewählt, um den Transport durch die wasserungesättigte Zone des Sand- bzw. Kies-Lysimeters zu beschreiben:

Aufriß



Grundriß

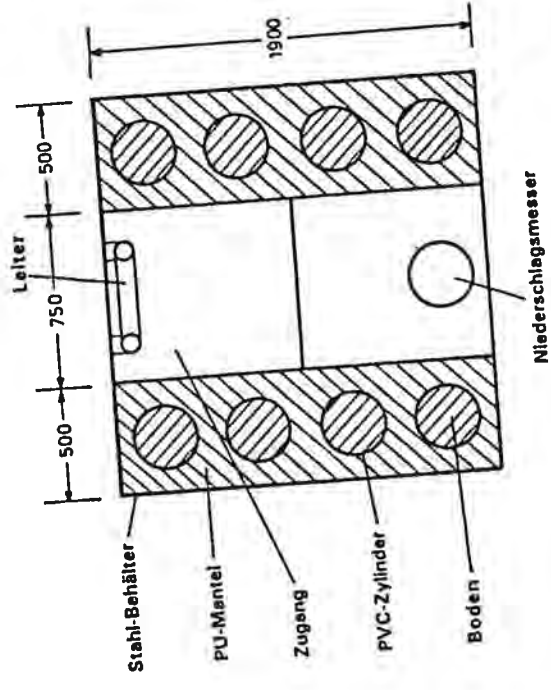


Fig. 1: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage des GSF-Instituts für Hydrologie (Maße in mm).
 Schematic layout of the lysimeters of the GSF-Institute for Hydrology (all dimensions in mm).

Tab. 1: Parameter zur Beschreibung der in die Lysimeter eingebauten Sedimente, der Lysimetersäulen sowie der Niederschlags- und Lysimeterabflußwerte.
 Parameters for the description of the sediments installed in the lysimeters, the lysimeter columns, the precipitation amount and lysimeter outflow.

Parameter	Sand-Lysimeter (S)	Kies-Lysimeter (K)
eingebautes Sediment:	tertiäre Sande, Zinkmiltach	quartäre Kiese, Murnau
Kennkorngrößen: wirksame Korngröße mittlere Korngröße Ungleichförmigkeit	0,11 mm 0,15 mm 1,5	0,7 mm 5,5 mm 8,5
Durchlässigkeit bei wassergesättigtem Fließen	$2,4 \times 10^{-4}$ cm/s	$1,6 \times 10^{-7}$ cm/s
mittlerer Wassergehalt: wassergesättigt nach freiem Auslauf	0,300 0,090	0,300 0,066
mittlere Werte Niederschlag: Niederschlagsmenge gewichtete $\delta^2\text{H}$ -Gehalte	19,3 mm/Woche -71,32 ‰	
mittlere Werte Lysimeter: Abfluß gewichtete $\delta^2\text{H}$ -Gehalte	16,8 mm/Woche -71,89 ‰	17,0 mm/Woche -73,14 ‰

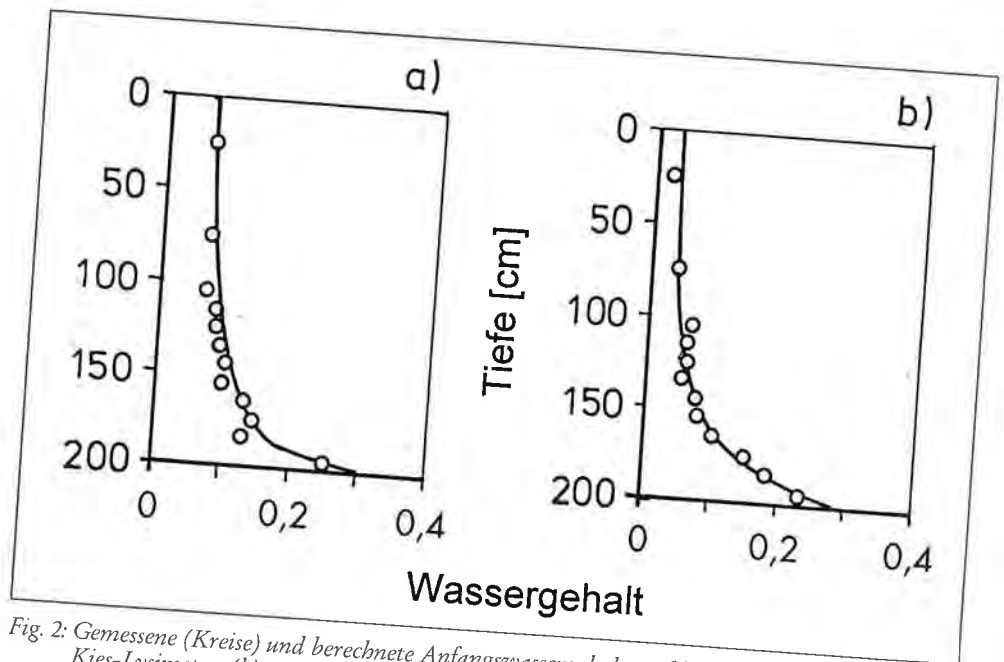


Fig. 2: Gemessene (Kreise) und berechnete Anfangswassergehaltsprofile (Linien) des Sand- (a) und Kies-Lysimeters (b), nachdem das Wasser frei ausgelaufen war.
 Measured (circles) and modeled (lines) initial water content profiles of the sand- (a) and gravel-lysimeters (b) obtained after free drainage.

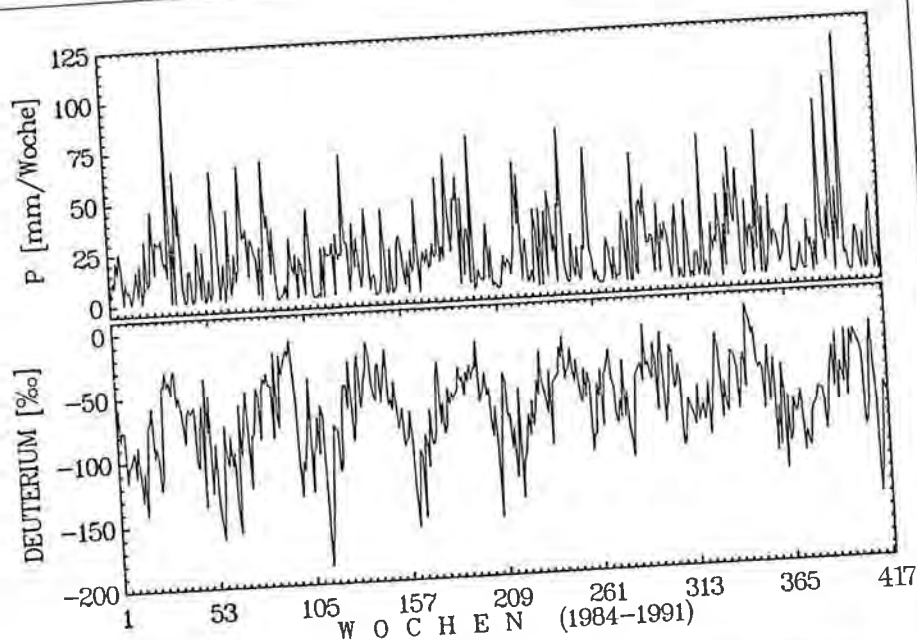


Fig. 3: Wöchentliche Niederschlagsmenge P (oben) und ^2H -Gehalte dieses Niederschlags (unten) an der Niederschlagsstation des GSF-Instituts für Hydrologie von Januar 1984 bis Dezember 1991. Weekly precipitation amount P (top) and ^2H contents (bottom) of weekly precipitation from the rain gauge at meteorological station of GSF-Institute for Hydrology (January 1984 to December 1991).

- Die erste Modellierung basiert auf der numerischen Lösung der Wasserfluß- und Massentransportgleichungen unter Berücksichtigung einer instationären Sickerbewegung (Variable Flow-Dispersions-Modell: VFDM).
- Die zweite Modellierung basiert auf einem einfachen Speicher-Durchfluß-Modell für einen stationären Sickerwasserfluß (Dispersions-Modell: DM).

Der Modellansatz VFDM besteht aus zwei Teilen:

- Lösung der Richard-Gleichung (F. DE SMEDT et al., 1986, R. A. FEDDES et al., 1988), um die Verteilung der Wasserflüsse in der Säule als Funktion von Zeit und Ort auf der Basis der vorliegenden hydraulischen Daten zu beschreiben.
- Diese Verteilungen der Wasserflüsse werden in ein Zwei-Phasen-Dispersionsmodell eingebracht, welches eine mobile und immobile Wasserphase berücksichtigt.

Der Modellansatz DM (P. MALOSZEWSKI & A. ZUBER, 1982) berücksichtigt weder die Verteilung der hydraulischen Parameter in der Säule noch die zeitlich veränderlichen Fließbedingungen, sondern basiert auf mittleren hydraulischen Werten und Transportparametern unter quasi-stationären Bedingungen.

4. Ergebnisse

4.1. Variabler Wasserfluß

Im Modellansatz VFDM werden Wasserfluß und Frachttransport separat modelliert. Die Fig. 2 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Werten der Wassergehaltsverteilungen in den Säulen nach dem freien Auslaufen.

In Tab. 2 sind die gefitteten Werte für die mittleren jährlichen Wassergehalte, die mittlere Verweilzeit sowie den mittleren Wochenabfluß aufgelistet und in Fig. 4 werden die Kenngrößen Saugspannung und Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt dargestellt.

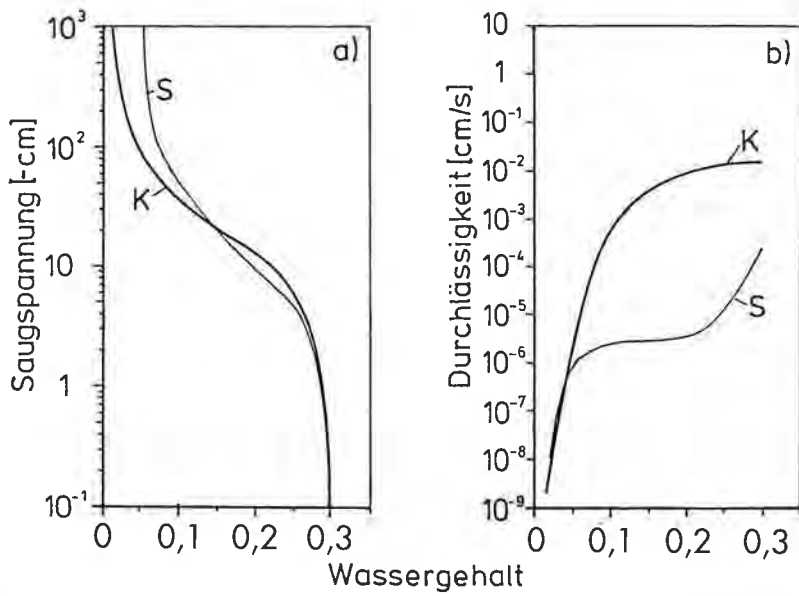
Die Ermittlung des Tracertransports war nur unter der Annahme möglich, daß kein mobiles Wasser existiert, und wurde mit der longitudinalen Dispersivität (3 cm für Sand, 5 cm für Kies) als einzigem Anpassungsparameter durchgeführt. Aus den in Fig. 5 dargestellten Anpassungen folgt, daß die berechneten mit den gemessenen ^2H -Gehalten gut übereinstimmen.

4.2. Stationärer Sickerwasserfluß

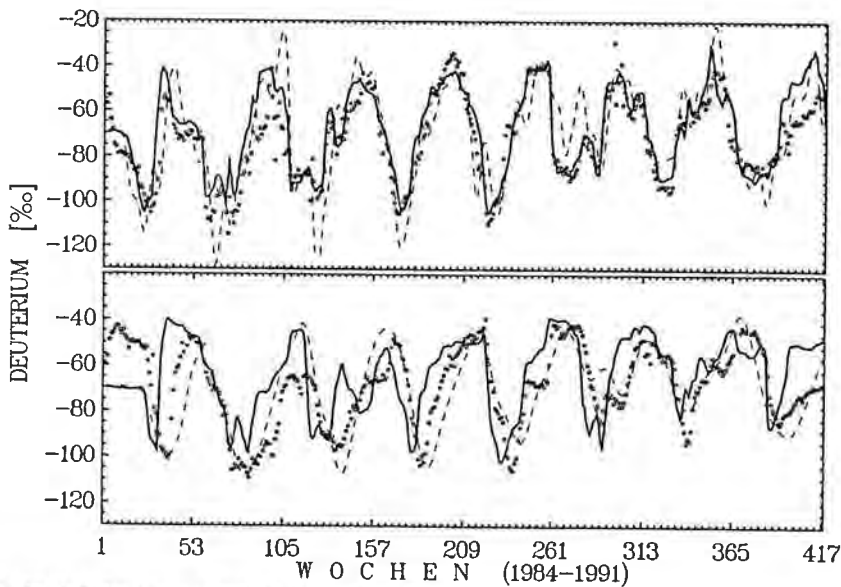
Der Modellansatz DM hat die Anpassungsparameter mittlere Verweilzeit und Dispersionsgrößen (Tab. 2). Die berechneten ^2H -Gehalte und die gemessenen Werte im Abfluß des Sand-Lysimeters stimmen gut überein (Fig. 5 unten). Für das Kies-Lysimeter (Fig. 5 oben) mit kleinen Durchflußzeiten ergibt die Modellrechnung einzelne

Tab. 2: Parameter des Variable-Flow-Dispersions-Modells (VFDM) und des Speicher-Durchfluß-Dispersions-Modells (DM) für die Jahre 1985–1991. Θ : mittlerer Wassergehalt; t^* : mittlere Verweilzeit (in Wochen); q : mittlerer Wochenabfluß (in mm/Woche).
Parameters of the Variable-Flow-Dispersion-Model (VFDM) and the Storage-Flow-Dispersion-Model (DM) for the years from 1985 to 1991. Θ : mean water content; t^* : mean residence time (in weeks); q : mean weekly outflow (in mm/week).

Jahr	VFDM		DM	
	Θ	t^*	q	Θ
Sand-Lysimeter				
1985	0,179	28,0	17,7	0,248
1986	0,163	26,5	14,3	0,189
1987	0,178	23,5	13,9	0,234
1988	0,173	23,5	19,7	0,231
1989	0,164	26,5	13,4	0,178
1990	0,175	28,0	17,0	0,238
1991	0,164	29,0	15,7	0,228
Kies-Lysimeter				
1985	0,083	12,0	16,8	0,100
1986	0,082	9,5	13,9	0,066
1987	0,083	9,5	20,5	0,037
1988	0,083	9,5	20,0	0,095
1989	0,083	9,0	14,3	0,064
1990	0,083	11,0	17,4	0,096
1991	0,083	12,5	16,1	0,100



4: Bodenkerngrößen, die sich aus der Anpassung des Wasserfließmodells an die vorhandenen hydraulischen Daten ergeben.
 Soil material characteristics resulting from the calibration of the water flow model to the available hydraulic data.



5: ^2H -Gehalte (Januar 1984 bis Dezember 1991) im Wasser des Abflusses aus dem Kies-Lysimeter (oben) und dem Sand-Lysimeter (unten): gemessen (Kreise) und berechnet mit dem VFDM (durchgezogene Linie) und DM (gestrichelte Linie).
 ^2H contents (January 1984 to December 1991) in the water flowing out from the gravel-lysimeter (top) and the sand-lysimeter (bottom): measured (circles) and calculated using VFDM (solid line) and DM (dashed line).

^2H -Gehalte, die sich signifikant von den gemessenen unterscheiden. Dieser Effekt beruht auf extrem hohen bzw. niedrigen ^2H -Gehalten während geringer Niederschlagsereignisse. Das DM berücksichtigt diese Extremwerte mit demselben Gewicht wie die anderen Werte. In Wirklichkeit jedoch beeinflussen sie wegen der geringen Niederschlagsmenge den Input und folglich auch das Outputsignal nur wenig.

Zusammenfassung

In zwei unbewachsenen Lysimetern mit einer Länge von 2 m und einer Querschnittsfläche von 0,12 m², die mit tertiären Sanden und quartären Kiesen aus Bayern verfüllt waren, wurden Wasserflüsse und Frachttransport durch die wasserungesättigte Zone unter Freilandbedingungen über einen achtjährigen Zeitraum untersucht. Der mittlere jährliche Niederschlag betrug 1004 mm. Als Tracer wurde das Umweltisotop Deuterium im Niederschlag und Lysimeterabfluß, das eine zeitabhängige Variation aufweist, beobachtet.

Die Sickerwasserbewegung wurde durch zwei unterschiedliche mathematische Modellansätze auf der Basis von Tracereintrags- und Traceraustragsmessungen modelliert:

- Das **Variable-Flow-Dispersions-Modell** fittet gemessene Daten im Detail sehr gut.
- Das **Dispersions-Modell** nähert die gemessenen Daten gut an, erfasst jedoch ereignisbezogene Details weniger präzise.

Literatur

- DE SMEDT, F., F. WAUTERS & J. SEVILLA (1986): Study of tracer movement through unsaturated sand.– J. Hydrol., **85**, 169–181, Amsterdam.
- FEDDES, R. A., P. KABAT, P. J. T. VAN BAKEL, J. J. B. BRONSWIJK & J. HALBERTSMA (1988): Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone – State of the art.– J. Hydrol., **100**, 69–111, Amsterdam.
- KLOTZ, D. (1980): Untersuchungen zur hydrodynamischen Dispersion in wasserungesättigten porösen Medien.– Deutsche Gewässerkundl. Mitt., **24**, 158–163, Koblenz.
- KLOTZ, D., S. MACIEJEWSKI, P. MALOSZEWSKI & P. TRIMBORN (1995): Modellierung des Transports von Deuterium in Freilandlysimetern.– In: SEILER, K.-P. & D. KLOTZ (Hrsg., 1995): Wanderung von Stoffen im unterirdischen Wasser.– GSF-Bericht, **29/95**, 152–174, Neuherberg.
- MALOSZEWSKI, P. & A. ZUBER (1982): Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, 1. Models and their applicability.– J. Hydrol., **57**, 207–231, Amsterdam.

Summary

Two not overgrown lysimeters (length: 2 m, cross-section area: 0,12 m²) were filled with tertiary sand and quaternary gravel from Bavaria and used to study water flow and tracer transport through the unsaturated zone under natural atmospheric conditions over a period of eight years. The mean annual precipitation in the area under investigation was equal to 1004 mm. The tracer used during the experiment was environmental deuterium, the concentration of which was measured in both the precipitation and the water flowing out of the lysimeter and which displays a time dependent variation.

The movement of the infiltration water was modeled applying two different mathematical models on the basis of tracer input and tracer output:

- Measured data were fitted by the **Variable-Flow-Dispersion-Model** in the detail very well.
- The **Dispersion-Model** approximates the measured data well, records however event related details less precise.

Dank

Dank gilt den Herren PD. Dr. Piotr MALOSZEWSKI, GSF-Institut für Hydrologie und Dr. Stanisław MACIEJEWSKI, Institute of Hydroengineering, Polish Academy of Sciences, Gdansk, Poland, für die Durchführung der mathematischen Modellierung.