

Erfassung von Wasserbewegung und Stofftransport in der ungesättigten Zone **durch tracer- und isopenhydrologische Untersuchungen**

Johann FANK

1 Einleitung und Problemstellung

Die Neubildungsmechanismen über die wasserungesättigten Deckschichten werden in Österreich erst seit wenigen Jahren unter Berücksichtigung regionaler meteorologischer und hydrogeologischer Faktoren untersucht. Arbeiten von P. NACHTNEBEL (1994); J. FANK & T. HARUM (1994); E. STENITZER (1995) und F. FEICHTINGER (1995) seien hier stellvertretend angeführt. 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 auch heute noch auf erhebliche meßtechnische Probleme stößt, sodaß die Ergebnisse von hydraulischen Berechnungen der Wasserbewegung 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.

2 Meßtechnische Rahmenbedingungen

Im Jahre 1991 wurde in Wagna, im westlichen Leibnitzer Feld (Steiermark) eine Forschungsstation errichtet, die es erlaubt unter ortsüblichen, natürlichen Bewirtschaftungssystemen die Sickerwasserbewegung und den Transport von Stoffen in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit der obersten Bodenschichten und der darunter folgenden gröberklastischen Sedimente vor allem auf Grundlage der hydrochemischen und isopenhydrologischen Analytik zu untersuchen (H. ZOJER et al., 1991). Eine Beschreibung der hydrogeologischen Rahmenbedingungen geben J. FANK & T. HARUM (1994), der Aufbau der Bodenprofile wird in M. EISENHUT et al. (1992) dargestellt.

Die meßtechnischen Voraussetzungen und Probennahmemöglichkeiten im Bereich der Forschungsstation Wagna sind in H. ZOJER et al. (1991), J. FANK & T. HARUM (1994) und J. FANK (1996) dargelegt und umfassen bezüglich der Probennahme insgesamt 26 Meßstellen,

an denen der Niederschlag, das Sickerwasser über keramische Saugkerzen und -platten tiefen- gestaffelt und auch das Grundwasser beprobt werden können. In Fig. 1 ist die Lage der Meßein- richtungen in Bezug zur Strömungsrichtung des Grundwassers im Grundriß dargestellt.

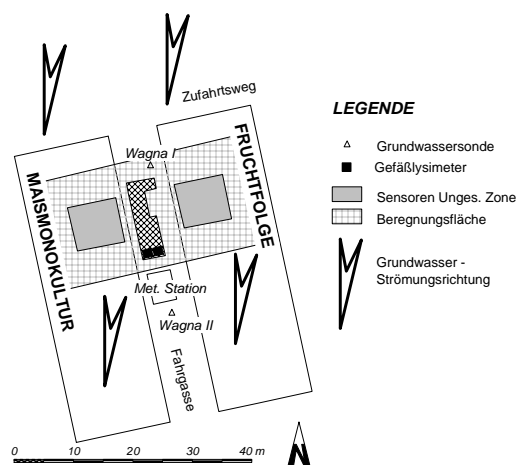


Fig. 1: Lage der Forschungsstation Wagna, der Meßsonden, der Grundwasserpegel und des beregneten Bereiches in Bezug zur Strömungsrichtung des Grundwassers.

An zwei Gefäßlysimetern wird das anfallende Sickerwasser kontinuierlich registriert. Die Befüllung mit 0.5 m Kies und 1 m Boden aus der Fahrgasse (vgl. Fig. 1) erfolgte schichtweise unter Einhaltung natürlicher Lagerungsbedingungen. Die Bewirtschaftung der beiden Gefäßlysimeter erfolgt in Anlehnung an jene der be-

nachbarten Versuchspartellen: LSGVR mit Maismonokultur, Schwarzbrache im Winter und herbstliche Ackerung, LSGVL mit einer vierjährigen Fruchtfolge, winterharter Gründেকে und seichter Grubberung.

3 Tracerversuche

An der Versuchsanlage Wagna wurden im Frühjahr 1993 mehrere kombinierte Markierungsversuche durchgeführt, die folgende Ziele verfolgten: (i) Vergleich von Sickergeschwindigkeiten in der ungesättigten Zone unter ungestörten und gestörten Bedingungen mehrere Jahre nach der Instrumentierung der Anlage, (ii) Vergleich des Transportes von Wasser und von gelösten Stoffen durch den Einsatz mehrerer Markierungsstoffe, (iii) Vergleich der unterschiedlichen Eigenschaften der eingesetzten Tracer hinsichtlich ihrer Mobilität, (iv) Vergleich des Verhaltens der eingesetzten Tracer mit dem Transportverhalten von Schadstoffen aus der Landwirtschaft und (v) Überprüfung bzw. Verifizierung von Modellkonzepten über Stofftransportprozesse in der ungesättigten Zone. Die Fragen (i) und (v) sollen hier kurz diskutiert werden.

3.1 Markierung mit Wasser unterschiedlicher ^{18}O -Konzentration

Am 17. März 1993 wurden beide Gefäßlysimeter mit je 60 l Wasser (60 mm) über die Dauer von mehr als 2 Stunden gleichmäßig mit Wasser aus dem Winterleitensee (mittlere Einzugsgebiets- höhe > 2000 müA) beregnet. Aufgrund des Höheneffektes bei der Isotopenfraktionierung (H. MOSER & W. RAUERT, 1980) existierte ein deutlicher Unterschied zwischen der Konzen- tration des Sauerstoffisotops ^{18}O im Bodenwasser der Gefäßlysimeter (-9 bis -8 ‰) und dem

Beregnungswasser (-11.41 ‰ ; Fig. 2). Das stabile Umweltisotop ^{18}O wird für hydrologische Untersuchungen verwendet, da dieses als chemisch gebundener Bestandteil des Wassermoleküls in hohem Maße die an einen idealen hydrologischen Tracer gestellten Anforderungen erfüllt (H. MOSER & W. RAUERT, 1980).

Zum Zeitpunkt des Experimentes war der Boden durchgehend nicht mehr gefroren, der Lysimeter LSGVR lag brach, am Lysimeter LSGVL war Raps aus der herbstlichen Pflanzung am Beginn der Vegetationsperiode. Die Zeit vor dem Markierungsversuch war durch extrem geringe Niederschläge gekennzeichnet (etwa 13 mm vom 1. Jänner bis 17. März 1993), die letzten 10 Tage vor dem Experiment waren niederschlagsfrei. Die Lysimeterabflüsse lagen konstant bei LSGVR bei 0.13 mm je Tag, bei LSGVL bei etwa 0.03 mm je Tag.

In Fig. 2 sind die Lysimeterabflüsse und die ^{18}O -Konzentration an den beiden Gefäßlysimetern während des Beobachtungszeitraumes zwischen 15.03.1993 und 16.04.1993 dargestellt. Beide Gefäßlysimeter zeigen als Folge der Beregnung eine Steigerung des Lysimeterabflusses¹ (J. FANK & T. HARUM, 1994 und J. FANK, 1995) und eine Veränderung der ^{18}O -Konzentration im Sickerwasser, wobei große Unterschiede in den Lysimetern auftreten.

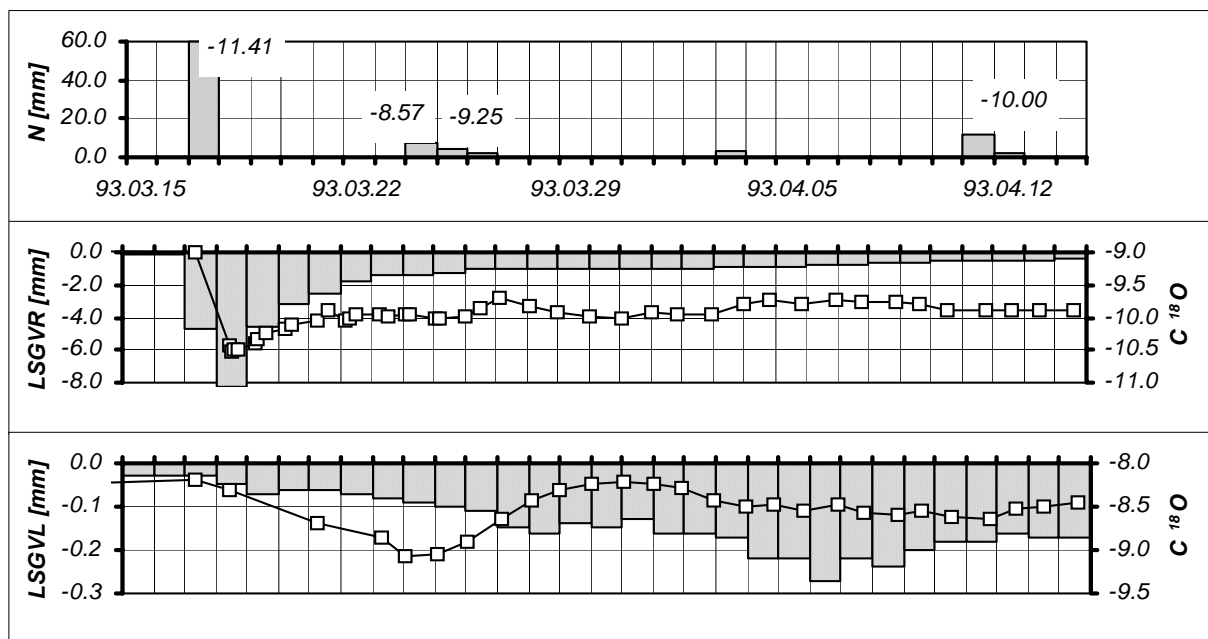


Fig. 2: Beregnungs- bzw. Niederschlagsmengen [N in mm] mit den ^{18}O Konzentrationen [‰] (Zahlenangaben bei den Summenstäben), Tagessummen der Lysimeterabflüsse [mm](Tagessummenstäbe) mit den Ganglinien der ^{18}O Konzentrationen [‰](Quadratsymbole) auf der Brache- [LSGVR] und auf der Rapsfläche [LSGVL] während des Beobachtungszeitraumes nach dem Markierungsversuch.

¹ Aus Gründen der Lesbarkeit der Diagramme wurde die Darstellung der Lysimeterabflüsse und auch der ^{18}O Konzentrationen in den Proben aus diesen unterschiedlich skaliert..

3.1.1 Ermittlung von ereignisbezogenen Wasserbilanzgrößen

Unter der Voraussetzung, daß die ^{18}O Konzentrationen des Lysimeterabflusses vor der Beregnung einem vollkommen durchmischten System entspricht (Konzentrationschwankungen unter 1 ‰ seit 01.07.1992), kann unter Anwendung der einfachen Mischungsgleichung der Anteil von Bodenwasser und der Anteil von Beregnungswasser am Gesamtabfluß der jeweiligen Lysimeter berechnet werden. Die anzuwendenden Gleichungen lauten für den gegenständlichen Fall:

$$(Gl. 1) \quad Q_R = \frac{Q_T \cdot (C_T - C_E)}{(C_R - C_E)}$$

$$(Gl. 2) \quad Q_E = Q_T - Q_R$$

wobei: Q_R Abflußanteil aus dem Bodenwasservorrat (Reservoirwasser)
 Q_T Gesamtabfluß gemessen am Lysimeterauslaß
 Q_E Abflußanteil aus der Beregnung (Ereigniswasser)
 C_R Konzentration des Wassers aus dem Bodenwasservorrat (gemessen im Lysimeterabfluß vor dem Beregnungsereignis)
 C_T Konzentration des Gesamtabflusses am Lysimeterauslaß (gemessen im Lysimeterabfluß während des Auswertzeitraumes)
 C_E Konzentration des Beregnungswassers (Ereigniswasser).

In Fig. 3 sind die Ergebnisse dieser Berechnung für die beiden Gefäßlysimeter LSGVR und LSGVL im Zeitraum 17.03.1993 bis 16.04.1993 gegenübergestellt.

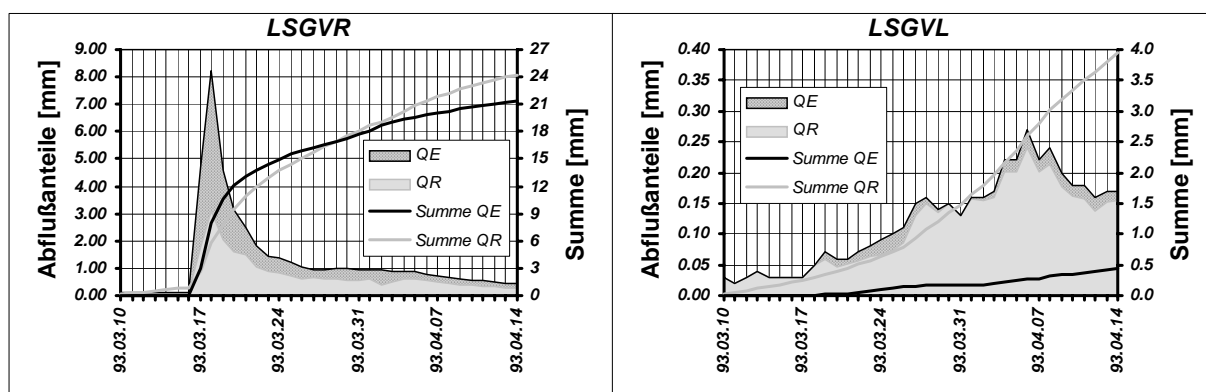


Fig. 3: Aufgliederung des Gesamtabflusses an den beiden Lysimetern LSGVR und LSGVL nach der Mischungsgleichung in einen Bodenwasseranteil und einen Beregnungswasseranteil im Auswertzeitraum (aufgrund der großen Wertunterschiede ist die Skalierung in den beiden Diagrammen unterschiedlich gewählt).

In Fig. 4 sind berechnete Wasserbilanzglieder dargestellt. Bei LSGVR gelangen etwa 23 %, bei LSGVL weniger als 1 % des Beregnungswassers innerhalb eines Monats zum Abfluß. Bei der vorhandenen Wassersättigung des Bodens erscheint ein Anteil von 23 % am Gesamtabfluß über Makroporensysteme jedenfalls sehr hoch, weshalb die Anwendbarkeit eines reinen Mischungsansatzes als konzeptionelles Modell der Wasserbewegung jedenfalls durch weitere Untersuchungen zu klären ist.

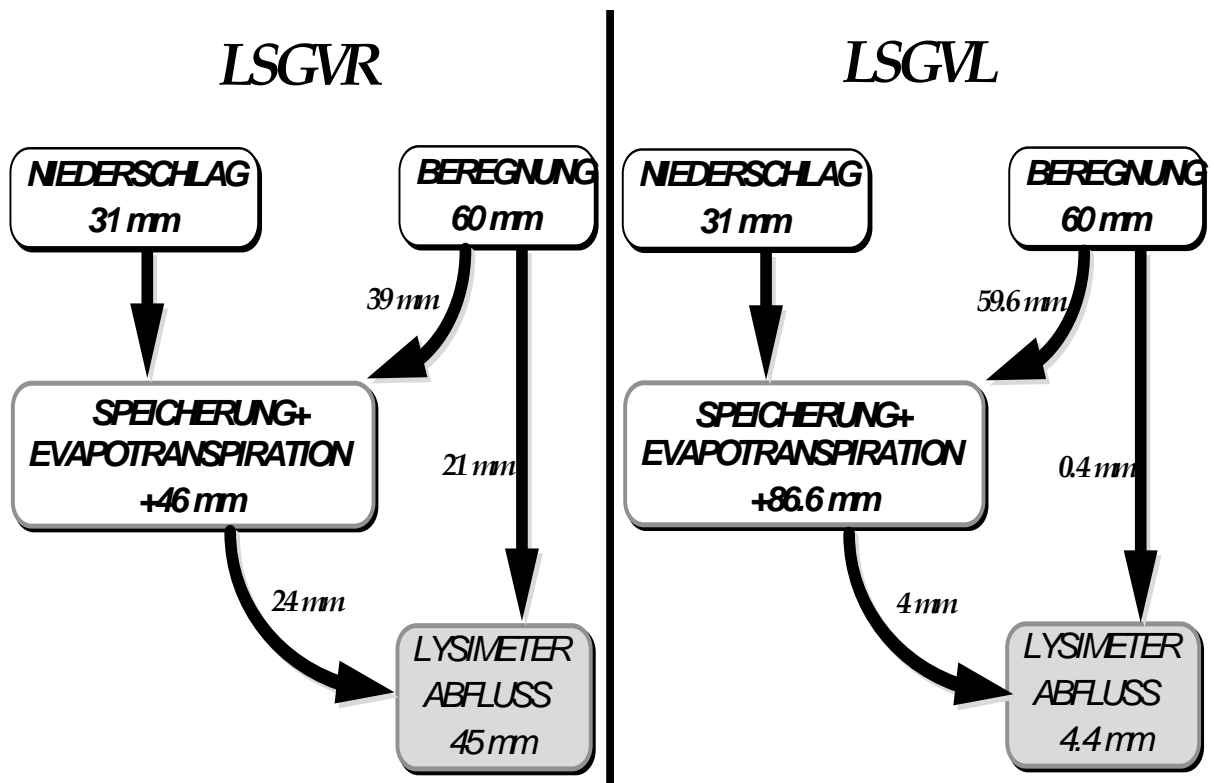


Fig. 4: Wasserbilanzgrößen für die beiden Gefäßlysimeter LSGVR und LSGVL aus dem Beregnungsereignis vom 17.03.1993 und der Beobachtung der Lysimeterabflüsse bis zum 16.04.1993 berechnet nach der Mischungsgleichung (Gl. 1) und der Bilanzgleichung (Gl. 2).

3.2 Bromidtracerversuch an zwei Lysimetergefäßen

Am 15. April 1993 wurden auf den beiden Gefäßlysimetern LSGVR und LSGVL der Forschungsstation Wagna jeweils 23297 mg Bromid gelöst in 2 l Wasser aufgebracht und danach 40 l Grundwasser in einem Zeitraum von mehr als 2 Stunden gleichmäßig verregnet. Die Ergebnisse dieses Markierungsversuches sind in Fig. 5 zusammengefaßt.

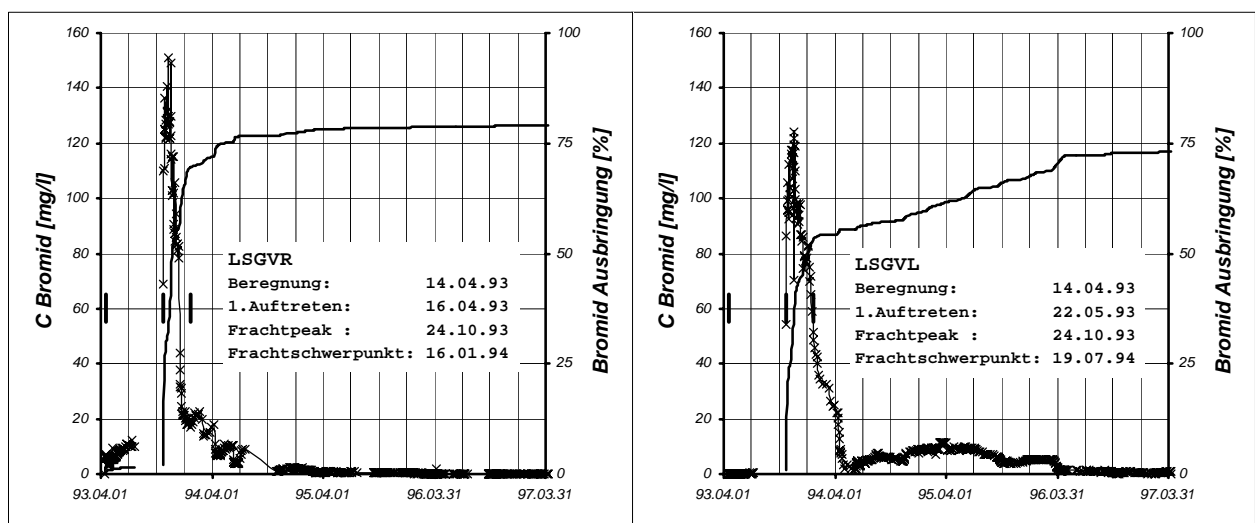


Fig. 5: Durchgangskurve der Bromidkonzentration, Summenkurve der Wiederausbringungsrate, Markierung der Zeitpunkte des 1. Auftretens des Tracers, des Peaks und des Schwerpunktes der Bromidfrachtkurve an den beiden Gefäßlysimetern LSGVR und LSGVL (Beregnung vom 14. April 1993).

Aufgrund des Vorversuches (Kap. 3.1) war der Sättigungsgrad in den Lysimeterkörpern recht hoch, die der Beregnung folgende Witterung war, wie auch der gesamte Sommer 1993 durch geringe Niederschläge gekennzeichnet (keine Niederschläge bis 29. April 1993). Der Bromidgehalt im Sickerwasser vor dem Markierungsversuch lag unter der Nachweisgrenze (<0.1 mg/l).

3.2.1 Verlagerungsgeschwindigkeit und Verweilzeit des Wassers in den Lysimeterkörpern

Der Markierungsversuch vom 14. April 1993 kann mit Ende März 1997 als abgeschlossen betrachtet werden. Von der aufgetragenen Bromidmenge konnten in den Lysimeterabflüssen zwischen 73 % (LSGVL) und 79 % (LSGVR) wiedergefunden werden. Der restliche Anteil wurde von den Pflanzen aufgenommen und mit der Ernte abtransportiert. Unter den herrschenden hydrometeorologischen Rahmenbedingungen während des Experimentes (trockenes Frühjahr und Sommer 1993, starke Niederschläge im Herbst und ein in der Niederschlagsverteilung normales Jahr 1994) können aus der Frachtkurve des Bromiddurchganges mittlere Verweilzeiten zwischen 278 Tagen (LSGVR) und 459 Tagen (LSGVL) berechnet werden. Während das Auftreten des Peaks in der Frachtkurve (dominierende Geschwindigkeit (H.D. SCHULZ, 1992) von 2.8 m/a) bei beiden Lysimetern am selben Tag erfolgt und durch das Einsetzen der Grundwasserneubildungsphase aufgrund der Herbstniederschläge bedingt ist, ist durch die dauernde Vegetationsdecke auf LSGVR eine deutliche Retention des Tracers zu erkennen, was zu einem signifikanten zweiten Anstieg des Bromidgehaltes im Jahr 1995 führt. Dementsprechend sind auch die Wiederausbringungskurven gestaltet.

Besonderes Interesse verdient der Zeitpunkt des 1. Auftretens von Bromid im Lysimeterabfluß. Wie bereits im Vorversuch angenommen, wird im Abfluß des brachliegenden Gefäßlysimeters der aufgetragene Tracer bereits zwei Tage nach der Beregnung angetroffen, was die Existenz eines Makroporensystems belegt. Allerdings liegt die Wiederausbringung nach einer Beobachtungsdauer von einem Monat nur bei etwa 1 %. Durch die vergleichbaren Bedingungen während beider Versuche (17. März und 15. April 1993) an LSGVR kann belegt werden, daß die Annahme eines vollkommen durchmischten Systems nicht zutreffen kann. Bestätigt wird dies auch durch die Tracerdurchgangskurve an LSGVL, wo das erste Auftreten des Tracers im Gegensatz zu den Berechnungen mittels der Mischungsleichung erst am 22. Mai erfolgt. Hier sind allerdings die Rahmenbedingungen aufgrund der Entwicklung des Rapses unterschiedlich.

3.2.2 Messungen von ^{18}O -Konzentrationen und der el. Leitfähigkeit im Sickerwasser zur Visualisierung dynamischer Prozesse

Während beider oben angesprochenen Tracerversuchen wurde sowohl die elektrische Leitfähigkeit als hydrochemischer Summenparameter, als auch die Ganglinie der ^{18}O -Konzentration an den Lysimeterabflüssen aufgezeichnet (Fig. 6). Die gemeinsame Betrachtung beider Ereignisse gibt einen Einblick in das Strömungssystem des Wassers in der ungesättigten Zone.

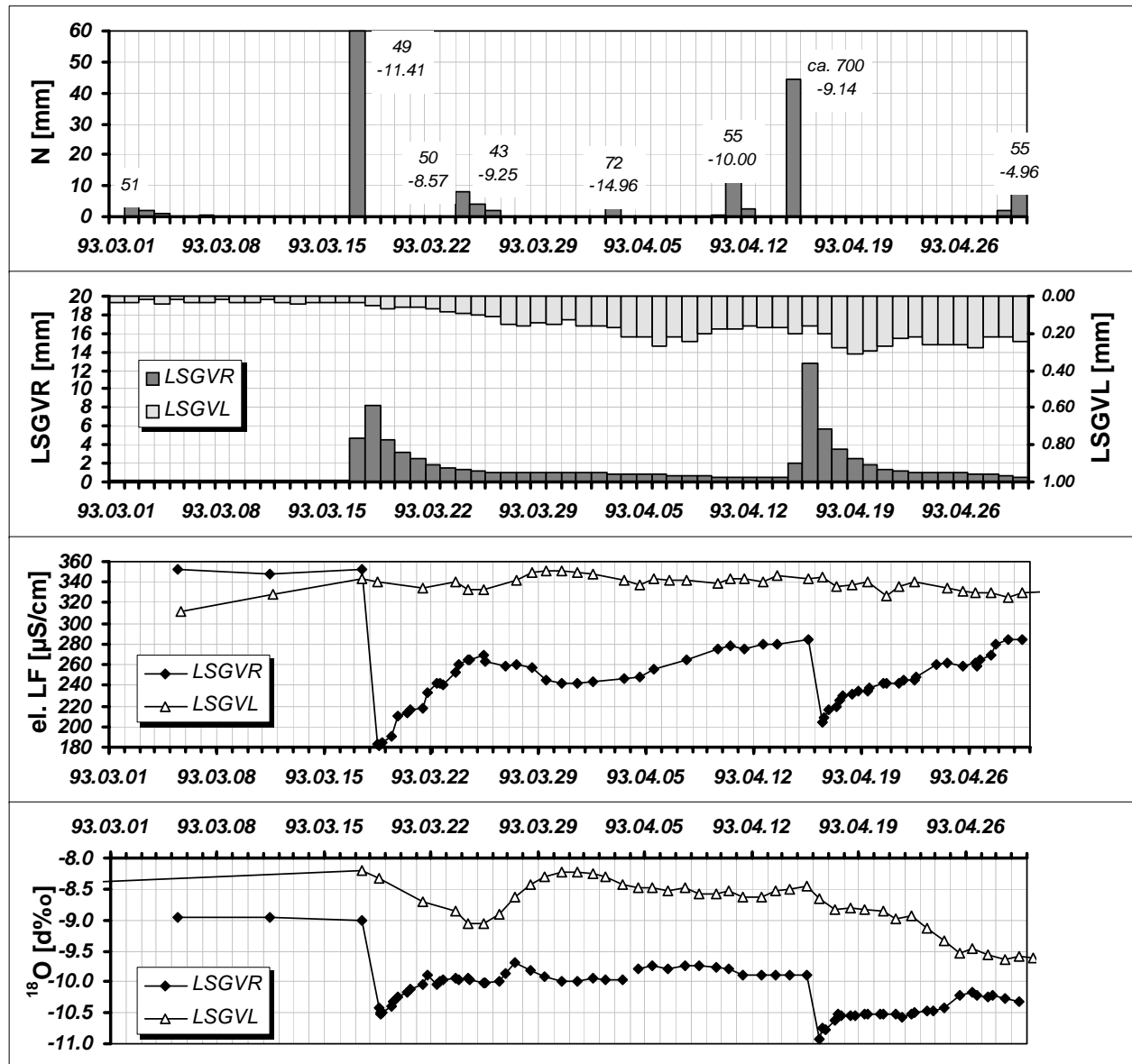


Fig. 6: Vergleich von Sickerwasserfluß, el. Leitfähigkeit und ^{18}O -Konzentration im Sickerwasser der beiden Gefäßlysimeter LSGVR und LSGVL als Reaktion auf die Markierungsversuche im März und April 1993.

Im obersten Teil der Fig. 6 sind die Niederschlags- bzw. Beregnungsmengen mit den zugehörigen elektrischen Leitfähigkeitswerten (obere Zeile) und den ^{18}O -Konzentrationen (untere Zeile) dargestellt. Die Reaktion des Sickerwasserflusses zeigt bei LSGVR einen schnellen und starken Anstieg auf beide Beregnungsereignisse, wobei aufgrund der höheren Sättigung im Bodenkörper die Reaktion auf das zweite, niedrigere Ereignis höher ausfällt. Bei LSGVL ist aufgrund des Wasserverbrauches durch die Pflanzendecke nur eine geringfügige, aber kontinuierliche Erhö-

hung des Sickerwasserflusses zu erkennen². Ähnlich sind auch die Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit und auf die ¹⁸O-Konzentration im Sickerwasser, wobei die Differenzen zwischen den Minimalwerten bei LSGVR und den Inputwerten auf eine Vermischung der beiden Wässer hinweisen. Von besonderem Interesse ist die Verminderung der Konzentrationen im Lysimeterabfluß auf das zweite Beregnungsereignis, wobei sowohl die elektrischen Leitfähigkeit als auch die ¹⁸O-Konzentration des Grundwassers deutlich höher lag als die gemessenen Werte im Lysimeterabfluß. Dies belegt sehr deutlich, daß auch bei LSGVR der Ansatz eines reines Mischungsmodells nicht gerechtfertigt ist. Aber auch die Anwendung eines reinen „Piston Flow“ Modelles scheitert, worauf die Unterschiede zwischen Input und Output hinweisen. Bei LSGVL sind schnelle Fließwege wesentlich weniger ausgeprägt (vgl. Kap. 3.2), aufgrund des Wasserverbrauches durch die Vegetationsdecke beginnt der Abfluß von Wasser aus dem ersten Beregnungsversuch erst etwa einen Monat nach dessen Durchführung.

3.3 Flächenmarkierung mittels Natriumbromid-Beregnung

Am 14. April 1993 wurde das gesamte mit Sensoren in der ungesättigten Zone bespickte Areal der Forschungsstation Wagna (Fig. 1) einem flächenhaften Markierungsversuch unterzogen. Die Parameter der Tracereinspeisung sind Tab. 1 zu entnehmen. Die Aufbringung des gelösten Tracers und des Grundwassers erfolgte mittels Schwenkberegner, die Verteilung der Beregnungsmenge wurde kontrolliert.

Tab. 1: Parameter der flächenhaften Tracereinspeisung vom 14. April 1993 an der Forschungsstation Wagna

Beregnungszeit:	93.04.14 17:00 bis 93.04.14 23:00		
Tracer:	Uranin	0.20 kg	
	Bromid	4.66 kg	
	Natrium	1.34 kg	
Lösungsmittel	400 l Wasser		
Beregnung	6826 l Wasser		
Gesamtmenge	7226 l Wasser		

Bezeichnung	Fläche [m ²]	Tracerlösung [mm]	Bromid [mg/m ²]	Uranin [mg/m ²]	Beregnung [mm]
LSGV	1.0	2.0	23297	1000	40
Mais	94.5	2.1	24406	1048	34
Raps	94.5	2.1	24406	1048	42

Durch dieses Beregnungsereignis wurden auf der Maismonokulturparzelle 34 mm, auf der Fruchtfolgeparzelle 42 mm Wasser nach erfolgter Beregnung der Tracerlösung (Natriumbromid

² Man beachte die unterschiedliche Skalierung zur Lesbarkeit des Diagrammes.

und Uranin) regelmäßig verteilt. Die Verlagerung von Bromid soll in der Folge als Parameter zur Beschreibung der Wasserbewegung in der ungesättigten Zone näher beleuchtet werden.

Die Reaktion des Matrixpotentials und des Wassergehaltes im Boden wurde durch die in Tiefenprofilen installierten Tensiometer und TDR-Sonden erfaßt. Die Änderung dieser bodenphysikalischen Parameter ist in Fig. 7 dargestellt.

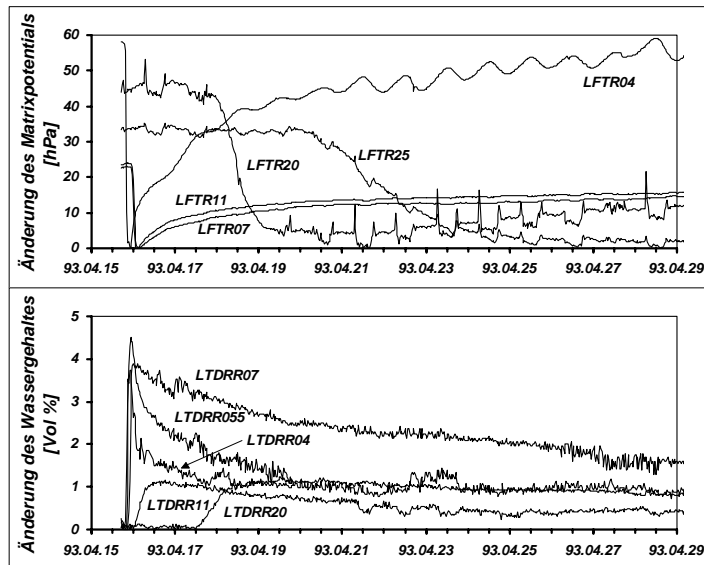


Fig. 7: Reaktion der Tensiometerwerte und des Wassergehaltes (gemessen mittels TDR-Sonden) in unterschiedlichen Tiefen (dm als letzte 2 bzw. 3 Zeichen in der Sondenbezeichnung) der Maismonokulturseite der Forschungsstation Wagna auf die Beregnung vom 14. April 1993 (≈ 40 mm).

Während die Sonden im Bereich des feinklastischen Bodens nahezu unabhängig von der Tiefe sehr rasch reagieren, ist im Bereich der gröberklastischen Schotter eine deutliche Verzögerung der Reaktion auf das Beregnungs-

ereignis erkennbar. In Summe sind die Ergebnisse der Tensiometer gut mit jenen aus den TDR-Sonden vergleichbar, Unterschiede im Detail (LFTR11 und LTDRR11) erklären sich aus der Inhomogenität der ungesättigten Deckschichten, da die Sonden der TDR-Profile nicht vertikal im Profil, sondern horizontal versetzt angeordnet sind. Die TDR-Sonden liegen auf einer Horizontaldistanz von etwa 15 m gestreut in denselben Einbautiefen wie die Tensiometer.

Die Auswertungsergebnisse aus den Tracerkurven der Meßstellen in der ungesättigten Zone und auch des Grundwassers sind in Tab. 2 zusammengefaßt. Beispielhafte Tracerdurchgangskurven sind in Fig. 5, in FANK & HARUM (1994), und in FANK (1995) dargestellt.

Tab. 2: Zusammenfassung der Ergebnisse des flächenhaften Markierungsversuches vom 14. April 1993 an der Forschungsstation Wagna

Meßstelle	Erstauftreten	Peak Konz.		Schwerpunkt Konz.		Schwerpunkt Fracht		Wiederausbringung [%]
		Datum	mg/l	Datum	mg/l	Datum	mg	
LSML04	16.Apr.1993 10:10	28.Aug.1993 14:10	150.00	30.Sep.1993 16:20	43.87	07.Okt.1993 15:56	63.78	22.10
LSML07	16.Apr.1993 10:10	18.Nov.1993 12:15	58.04	09.Dez.1993 00:47	14.28	13.Dez.1993 01:36	20.76	17.22
LSML11	23.Okt.1993 21:00	15.Dez.1993 11:25	33.13	17.Feb.1994 17:19	8.38	12.Feb.1994 03:17	26.88	25.00
LSWL15	28.Okt.1993 11:05	28.Jän.1994 12:20	23.86	17.Apr.1994 05:26	6.95	22.Apr.1994 11:16	22.59	15.96
LSWL30	25.Apr.1994 12:10	19.Dez.1994 12:30	16.57	06.Jän.1995 03:41	2.65	19.Feb.1995 22:33	9.11	2.77
LSSMR04	16.Apr.1993 09:50	23.Nov.1993 12:05	124.40	11.Nov.1993 16:40	33.13	18.Dez.1993 04:16	24.35	12.69
LSSMR06	16.Apr.1993 09:50	09.Nov.1993 09:20	73.42	12.Nov.1993 07:58	19.85	20.Dez.1993 09:45	41.62	24.83
LSSMR07	16.Apr.1993 09:56	14.Nov.1993 15:30	118.60	23.Nov.1993 13:37	26.09	23.Dez.1993 09:44	55.79	56.02
LSWR15	23.Apr.1993 20:20	04.Jän.1994 15:05	107.98	01.Feb.1994 20:27	23.98	03.Feb.1994 12:55	187.31	92.09
LSRR15	29.Okt.1993 10:05	16.Dez.1993 09:50	58.47	20.Feb.1994 05:05	16.06	03.Mär.1994 16:00	88.27	39.41
LSWR30	27.Dez.1993 14:30	17.Apr.1994 14:00	47.38	03.Sep.1994 03:24	11.62	25.Sep.1994 07:45	16.32	11.95
LSSL11	25.Okt.1993 10:20	22.Dez.1993 10:40	44.51	04.Jän.1994 01:43	10.31			
LSSR04	18.Apr.1993 11:05	11.Mai.1993 09:45	90.86	14.Okt.1993 11:10	31.50			
LSSR07	25.Apr.1993 14:35	04.Nov.1993 10:20	91.17	17.Nov.1993 22:47	23.16			
LSSR11	23.Apr.1993 11:30	10.Nov.1993 09:15	48.48					
LSSR20	23.Apr.1993 12:00	19.Nov.1993 10:50	57.82	05.Jän.1994 10:44	15.72			
LSGVL	22.Mai.1993 17:45	16.Nov.1993 12:05	124.30	30.Mai.1994 22:07	27.71	19.Jul.1994 04:50	153.95	73.05
LSGVR	16.Apr.1993 14:55	16.Nov.1993 10:30	149.10	04.Jän.1994 09:18	32.49	19.Jän.1994 00:58	230.36	78.96
GW	05.Jän.1996 16:40	11.Jul.1996 10:40	0.07					

Die Verschlüsselung der Meßstellenbezeichnung (deatillierte Erläuterungen siehe FANK & HARUM, 1994) bezeichnet neben der Entnahmeart (3. Zeichen: M = Monolith, W = Wanne [Sickerwassersammler], R = Rohr [Sickerwassersammler], S = Saugkerze, G = Gefäßlysimeter) auch die Versuchsparzelle (4. Zeichen: R = Rechts [Maismonokultur], L = Links [Fruchtfolge], bei Gefäßlysimetern 5. Zeichen) und die Meßtiefe (Zahlen am Ende der Meßstellenbezeichnung in dm Einbautiefe ab Geländeoberkante [fehlt bei Gefäßlysimetern; Tiefe hier 15 dm]). Die Grundwassermeßstelle Wagna II (Fig. 1) ist als GW bezeichnet und als Meßtiefe die mittlere Tiefenlage des Grundwasserspiegels unter GOK (4.5 m) angenommen.

3.3.1 Ermittlung von Verlagerungsgeschwindigkeiten und Verweilzeiten in der ungesättigten Zone

Aus den Ergebnissen des Markierungsversuches lassen sich durch Vergleich der Zeitpunkte des Auftretens charakteristischer Punkte in den Tracerdurchgangskurven (Tab. 2) mit dem Zeitpunkt der Tracereinspeisung (Tab. 1) Verweilzeiten bzw. Verlagerungsgeschwindigkeiten in der ungesättigten Zone berechnen. Diese Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefaßt.

Meßstelle	max. Geschwindigkeit		mittlere Geschwindigkeit		
	Tage	m/y	Tage	m/y	
LSML04	1.72	85.12	175.96	0.83	SP.Fracht
LSML07	1.72	148.96	242.36	1.05	SP.Fracht
LSML11	192.17	2.09	303.43	1.32	SP.Fracht
LSWL15	196.75	2.78	372.76	1.47	SP.Fracht
LSWL30	375.80	2.91	676.23	1.62	SP.Fracht
LSMR04	1.70	85.81	247.47	0.59	SP.Fracht
LSMR06	1.70	128.72	249.70	0.88	SP.Fracht
LSMR07	1.71	149.80	252.70	1.01	SP.Fracht
LSWR15	9.14	59.91	294.83	1.86	SP.Fracht
LSRR15	197.71	2.77	322.96	1.70	SP.Fracht
LSWR30	256.90	4.26	528.61	2.07	SP.Fracht
LSSL11	193.72	2.07	264.36	1.52	SP.Konz.
LSSR04	3.75	38.90	182.76	0.80	SP.Konz.
LSSR07	10.90	23.44	217.24	1.18	SP.Konz.
LSSR11	8.77	45.78	209.68	1.91	Peak Konz.
LSSR20	8.79	83.03	265.74	2.75	SP.Konz.
LSGVL	38.03	14.40	460.49	1.19	SP.Fracht
LSGVR	1.91	286.17	279.33	1.96	SP.Fracht
GW	995.99	1.65	1183.74	1.39	Peak Konz.

Tab. 3: Verweilzeiten und Sickergeschwindigkeiten im Bereich der Forschungsstation Wagna aus den Ergebnissen des Markierungsversuches vom 14. April 1993

Die Berechnung der maximalen Geschwindigkeit bzw. minimalen Verweilzeit erfolgte aus dem Erstauftreten des Tracers an der jeweiligen Meßstelle unter Berücksichtigung der Meßtiefe, die Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit bzw. Verweilzeit erfolgte - wo möglich - aus dem Schwerpunkt der Frachtkurve. Bei den Saugkerzen, an

denen eine Bilanzierung des Wasserflusses nicht möglich ist, wurde der Schwerpunkt der Konzentrationskurve für diese Ermittlung herangezogen. Ist die Durchgangskurve nicht abgeschlossen (GW) oder nur schlecht definiert (LSSR11) wurde der Zeitpunkt des Tracerpeaks zur Schätzung der mittleren Geschwindigkeit verwendet. Generell sind die Ergebnisse der Monolithe, Kleinlysimeter und Gefäßlysimeter aufgrund der größeren Einzugsgebietsfläche wesentlich aussagekräftiger als jene der Saugkerzen, die aufgrund des Fehlens einer definierten Auffangfläche nur Hinweise über die - meist - schnelleren Fließkomponenten liefern. Zudem sind die Durchgangskurven in ersteren durch die wesentlich höhere Probenanzahl deutlich besser definiert.

Unter den im Versuchszeitraum herrschenden Verhältnissen (April 1993 bis März 1997) liegt die mittlere Verweilzeit von Bromid in der ungesättigten Zone bei mehr als 3 Jahren. Die mittlere Geschwindigkeit in der ungesättigten Zone liegt bei 1.39 m/y. Der horizontale Fließweg von der Beregnungsfläche zur Grundwassersonde (10 bis 30 m [Fig. 1]) ist dabei unerheblich. Aus dem Erstauftreten des Tracers im Grundwasser errechnet sich eine Mindestverweilzeit von mehr als 2.5 Jahren.

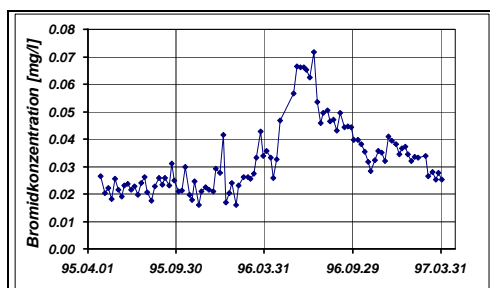


Fig. 8: Bromiddurchgang im Grundwasser (Meßstelle Wagna II) der Einspeisung vom 14. April 1993.

Die Erfassung des Bromiddurchganges im Grundwasser erfolgte am IC mittels amperimetrischer Detektion. Aufgrund des Verdünnungseffektes durch Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Sonde Wagna II liegt die

Maximalkonzentrationen von Bromid bei 0.07 mg/l (Tab. 2), der natürliche Background um 0.02 mg/l. Der Tracerdurchgang ist aber eindeutig (Fig. 8).

Die Tiefenverlagerung von Bromid in der ungesättigten Zone ist als Verlagerung des Tracerpeaks und des Schwerpunktes der Tracerkurven für unterschiedliche Bewirtschaftungsformen

und auch für unterschiedliche Meßstellen in Fig. 9 dargestellt. Die mittleren Geschwindigkeiten sind im Bereich des feinklastischen Bodens mit Werten zwischen 0.6 und 1.3 m/y signifikant geringer als im Bereich der unterlagernden Kiese und Sande (1.5 bis 2 m/y). In den mittleren Geschwindigkeiten sind auch nur geringe Unterschiede zwischen befüllten Lysimetern (LSGV?) mit Verlagerungsgeschwindigkeiten von 1.2 bzw. 2 m/y und den Verhältnissen unter natürlichen Rahmenbedingungen (LS??15) mit mittleren Geschwindigkeiten von 1.5 bis 1.8 m/y erkennbar.

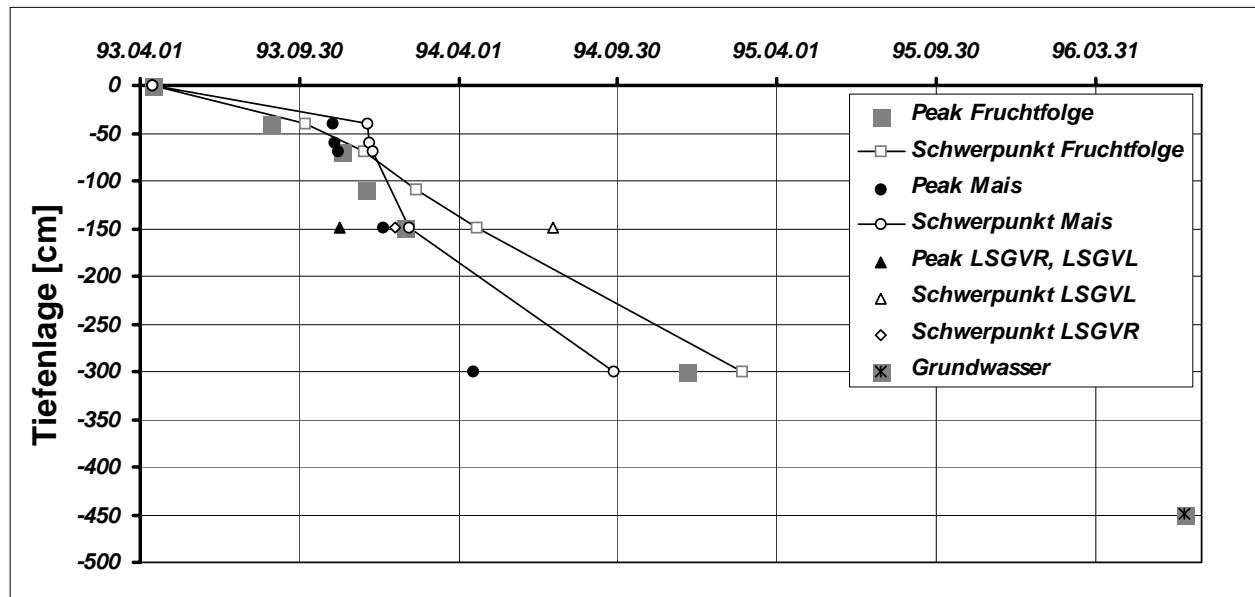


Fig. 9: Verlagerungsgeschwindigkeiten von Bromid in der ungesättigten Zone im Bereich der Forschungsstation Wagna als Ergebnis des Markierungsversuches vom 14. April 1993.

Etwas anders stellen sich die Verhältnisse bei Betrachtung des Erstauftretens des Tracers und damit der minimalen Verweilzeiten dar. Im Bereich des Bodens liegen hier die Maximalgeschwindigkeiten zwischen 85 und 150 m/y, bis in die unterlagernden sandig-kiesigen Schotter bei 2 bis 4 m/y. Allerdings zeigen hier einzelne Meßstellen durchaus auch das Vorhandensein von präferentiellen Fließwegen bis in den Schotterbereich hinein an. Die Maximalgeschwindigkeit für die Meßstelle LSWR15 liegt z.B. bei etwa 60 m/y, diejenige der Saugkerze LSSR20 bei über 80 m/y. Die kurzen minimalen Verweilzeiten im Oberboden ausschließlich als einen Einfluß des Meßstellenausbaues zu charakterisieren (FANK & HARUM, 1994) ist aber aus der Gesamtauswertung des Markierungsversuches nicht mehr haltbar, da die schnelleren Verlagerungsgeschwindigkeiten im Oberboden auch durch Saugkerzenauswertungen bestätigt werden. In Summe wird das Ergebnis der Tracerversuche an den Gefäßlysimetern (vgl. Kap. 3.2.1) bestätigt: Transportvorgänge von Stoffen, bei denen das Erstaufreten von Bedeutung hinsichtlich einer etwaigen Gefährdung des Grundwassers ist (wassergefährdende Stoffe, Pestizide etc.), können nicht allein durch den dispersiven Fluß beschrieben werden. Hier muß auch die Verlagerung der Stoffe in Makroporen in die Betrachtung einbezogen werden. Hohe Verlagerungsgeschwindigkeiten bis in die den Boden unterlagernden Sande und Kiese hinein können aus den gegen-

ständlichen Untersuchungen nur für die Maismonokultur abgeleitet werden und korrelieren damit sehr gut auch mit den Ergebnissen aus den Tracerversuchen an den Gefäßlysimetern. Inwieweit hier die Ausbildung eines großvolumigen Makroporensystems durch die jährliche tiefgreifende Bodenbewirtschaftung bei den herrschenden geringen Bodenmächtigkeiten von Bedeutung ist, kann nicht endgültig beantwortet werden, erscheint aber durchaus plausibel.

3.3.2 Bromidbilanz

Die aus der Auswertung der jeweiligen Frachtsummenkurven ermittelten Wiederfindungsraten des eingebrachten Bromid sind in Tab. 2 angeführt. Die im Abfluß der Gefäßlysimeter wiedergefundene Tracermenge liegt mit Werten von 73 bzw. 79 % deutlich über jenen der Meßstellen unter natürlichen Umgebungsbedingungen. Die wesentlich zu hohen Werte sind wahrscheinlich auf die in den Gefäßlysimetern doch deutlich schlechtere Pflanzenentwicklung zurückzuführen. Die trotzdem geringeren Sickerwasserraten erklären sich aus anderen Lysimeterfehlern (z.B. erhöhte Evaporation aufgrund von Unterschieden in der Temperaturverteilung gegenüber natürlichen Bedingungen).

Im Bereich der Fruchtfolgeparzelle liegen die Wiederfindungsraten zwischen 16 und 25 %. Der Wert von LSWL30 ist mit 2.77 % wesentlich zu gering und zeigt ein lokales Phänomen an, das mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den gestörten Einbau dieser Sickerwassersammler am Rande der offenen Baugrube im Zuge der Errichtung der Anlage zurückzuführen ist.

Im Gegensatz zur Fruchtfolgeparzelle zeigen die Ergebnisse auf der Maismonokulturparzelle mit Wiederfindungsraten zwischen 12 und 92 % eine wesentlich größere Inhomogenität. Tendentiell liegt die Tracerausbringung in der Maismonokulturparzelle aufgrund der fehlenden Vegetationsdecke und der geringeren Bodenmächtigkeit mit Werten von etwa 40 bis 50 % deutlich über jenen der Fruchtfolgeparzelle. Der im April (vor dem Anbau des Mais) ausgebrachte Tracer wird in einem wesentlich höheren Anteil in der Grundwasserneubildung wiedergefunden, als auf der durch eine Vegetationsdecke versehenen Fruchtfolgevariante. Auf mögliche ähnliche Auswirkungen von Stickstoffausbringung vor der Saat kombiniert mit darauffolgenden stärkeren Niederschlagsereignissen sei hier nur hingewiesen.

In der Meßstelle LSWR30 ist dasselbe Phänomen wie bei LSWL30 zu beobachten, die niedrige Wiederfindungsrate beim seichtesten Monolithlysimeter ist auf die geringe Tiefe (40 cm), das Pflügen des Oberbodens (25 cm) und das Fehlen einer entsprechenden Lysimeterberandung zurückzuführen (die begrenzende Kiesummantelung wurde nach dem Pflügen des Bodens nicht wieder aufgebaut). Durch diese Faktoren entspricht das Einzugsgebiet der Auffangplatte mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr dem Einzugsgebiet an der Geländeoberfläche.

Die Wiederfindungsrate von mehr als 92 % des Tracers in LSWR15 ist zu hoch und korreliert mit den für diese Meßstelle berechneten deutlich zu hohen maximalen Geschwindigkeiten. Ob dieses Phänomen durch ein hohes Makroporenvolumen in der überlagernden Bodenschicht oder auf tiefergreifende präferentielle Fließwege zurückzuführen ist, kann nicht geklärt werden, beide Ansätze führen allerdings zum selben Ergebnis: Bereits in der ersten Phase des Tracerversuches werden beim herrschenden hohen Sättigungsgrad große Anteile des eingebrachten Tracers über präferentielle Fließwege in solche Tiefen verlagert, daß diese Mengen in weiterer Folge für die Transpiration durch den Mais nicht mehr zur Verfügung stehen. Dazu ist es durchaus ausreichend, wenn dieses Makroporensystem bis an die Oberkante der unterlagernden Schotter reicht.

4 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

- Durch die Markierungsversuche an den Gefäßlysometern wird verdeutlicht, daß die Wasserbewegung in der ungesättigten Zone eine Mischung zwischen schnellen Fließbewegungen in Makroporen und einer schichtweisen Tieferverlagerung des Wassers in Abhängigkeit von den hydrometeorologischen Rahmenbedingungen darstellt. Die Anwendung eines Mischungsmodells führt zu einer Unterschätzung der mittleren Verweildauer, die Anwendung eines „Piston Flow“ Modelles berücksichtigt die präferentiellen Fließwege nur in eingeschränktem Maße.
- Unter gestörten Verhältnissen (befüllte Gefäßlysometer) liegen die mittleren Sickergeschwindigkeiten im Zeitraum zwischen April 1993 und April 1994 in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung zwischen 1.2 und 2 m pro Jahr.
- Die gemeinsame Betrachtung beider Markierungsversuche an den Gefäßlysometern zeigt die Abhängigkeit des Lysimeterabflusses vom Sättigungsgrad und von der Vegetationsbedeckung des Bodenkörpers. Diese Abhängigkeit zeigt sich auch an den Konzentrationsverläufen von Inhaltsstoffen, wobei durch deren Untersuchung das Vorhandensein von präferentiellen Fließwegen bestätigt und die Notwendigkeit der Anwendung von kombinierten Modellen zur Beschreibung von Stofftransportprozessen dokumentiert wird.
- Trotz der Verdünnung (Grundwasserneubildung im Anstromgebiet der Meßstelle) konnte der Tracer Bromid auch im Grundwasser selbst eindeutig in Form einer Durchgangskurve nachgewiesen werden.
- Die mittlere Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone liegt bei mehr als 3 Jahren entsprechend einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 1.4 m/y. Die Maximalgeschwindigkeit bis zum Grundwasser beträgt aus dem Markierungsversuch 1.65 m/y, entsprechend einer Mindestverweilzeit von mehr als 2.5 Jahren.

- Die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit von Bromid ist im überlagernden feinklastischen Boden signifikant geringer als in den ungesättigten Sanden und Kiesen. In den mittleren Verweilzeiten sind keine nennenswerten Unterschiede zwischen den befüllten Gefäßlysometern und den unter natürlichen Verhältnissen gewonnenen Daten zu erkennen. Der Fluß in präferentiellen Fließwegen hat dafür nur untergeordnete Bedeutung.
- Hinsichtlich der Maximalgeschwindigkeiten wird auch unter üblichen Bewirtschaftungsbedingungen das Ergebnis der Tracerversuche an den Gefäßlysometern bestätigt. Transportvorgänge von Stoffen, bei denen das Erstauftreten von Bedeutung hinsichtlich einer etwaigen Gefährdung des Grundwassers ist (wassergefährdende Stoffe, Pestizide etc.), können nicht allein durch den dispersiven Fluß beschrieben werden. Hier muß auch die Verlagerung der Stoffe in Makroporen in die Betrachtung einbezogen werden.
- Besondere Bedeutung hat die schnelle Stoffverlagerung dort, wo bei geringer Bodenmächtigkeit durch das herbstliche Pflügen ein großvolumiges Makroporensystem geschaffen, und durch die folgende Schwarzbrache bis zum Anbau (Frühjahr) aufrechterhalten wird.
- Eine Auswertung der Wiederfindungsraten des eingebrachten Tracers bestätigt die Ergebnisse der Auswertung der Tracerdurchgangskurven. Die Ergebnisse der Maismonokulturparzelle mit herbstlicher Ackerung und Schwarzbrache sind wesentlich heterogener als jene der Fruchtfolgeparzelle mit Grubberung und dauernder Begrünung. Generell liegen die Wiederfindungsraten an den Gefäßlysometern deutlich über jenen unter natürlichen Verhältnissen, was auf die wesentlich schlechtere Pflanzenentwicklung zurückzuführen ist.
- Die Annahme von homogenen Verhältnissen in der ungesättigten Zone und hier v.a. im Bereich des Oberbodens ist unzulässig. Die Ergebnisse von Wasserfluß- und Transportberechnungen mit eindimensionalen Modellen unter Annahme flächenhaft vorhandener Homogenität bzgl. Bodenaufbau und -mächtigkeit sind immer aus dem Blickwinkel einer inhomogenen und anisotropen Verteilung zu bewerten und derartige Berechnungsergebnisse durch weitere Plausibilitätsüberlegungen zu verifizieren.

Hinsichtlich der Ausweisung von Grundwasserschutzgebieten nach den derzeit gültigen Kriterien sind allein aus den Erfahrungen der hier vorgestellten Tracerversuche eine intakte ungesättigte Zone mit natürlich gelagerten Sanden und Kiesen von größerer Bedeutung als die darüber liegende Bodenbedeckung, da diese aufgrund von anthropogenen Einflüssen (Bewirtschaftung etc.) und auch aufgrund der natürlichen Verhältnisse (Wurzelausbildung, Bodenfauna etc.) in einem wesentlich höheren Ausmaß der Ausbildung von präferentiellen Fließwegen ausgesetzt ist. Bei einer modellhaften Betrachtung von wassergefährdenden Stoffen sind die unterschiedlichen

Fließvorgänge und dualen Porensysteme jedenfalls in die Berechnungen miteinzubeziehen. Die Erfassung von mittleren Verweilzeiten ist allein durch den Ansatz eines rein dispersiven Transportes in ausreichender Genauigkeit nachzuvollziehen.

5 Literatur

- EEISENHUT, M., J. FANK & P. RAMSPACHER (1992): Einfluß der Bodenbewirtschaftung auf die Temperaturverhältnisse in der ungesättigten Zone am Beispiel der Lysimeteranlage Wagna (Steiermark, Österreich). Mitt. d. Österr. Bodenkundlichen Gesellschaft, H. **45**, 25-44, Wien.
- FANK, J. (1995): Wasserbewegung und Stofftransport in Lockersedimenten des Leibnitzer Feldes. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. **47**, Heft **7/8**, 174-180, Wien.
- FANK, J. (1996): Forschungsstation Wagna: Hydrogeologische Rahmenbedingungen, meßtechnische Voraussetzungen und Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zur Frage der Stoffdynamik. - 6. Gumpensteiner Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ am 16. und 17. April 1996, 59-64, Gumpenstein.
- FANK, J. & T. HARUM (1994): Solute transport and water movement in the unsaturated zone of a gravel filled valley: tracer investigations under different cultivation types. - In: J. SOVERI & T. SUOKKO [Editors]: Future Groundwater Resources at Risk (Proceedings of the Helsinki Conference, June 1994). IAHS Publ. **222**, 341-354, (GALLIARD LTD) Great Yarmouth.
- FEICHTINGER, F. (1995): Landwirtschaftliche Nutzungsszenarien im Marchfeld aus wasserwirtschaftlicher Sicht. - Gewässerverträgliche Landbewirtschaftung, Konsequenzen für die Land-, Forst- und Wasserwirtschaft. Schriftenreihe des BA f. Wasserwirtschaft, Bd. 1, 196-215, Petzenkirchen.
- MOSER, H. & W. RAUERT (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. **8**, 400 S., (BORNTAEGER) Berlin, Stuttgart.
- NACHTNEBEL, H.P. [GESAMTPROJEKTLEITER] (1994): Hydrologie Österreichs - Schutz des Grundwassers in Tal- und Beckenlagen. - unveröff. zusammenfassender Endbericht in 4 Bänden, Wien.
- SCHULZ, H.D. (1992): Auswertung von Durchgangskurven. In: W. KÄSS: Geohydrologische Markierungstechnik. Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. **9**, 519 S., (BORNTAEGER) Berlin, Stuttgart.
- STENITZER, E. (1995): Auswirkungen landwirtschaftlicher Nutzungen auf die Grundwasserneubildung im Marchfeld. - Gewässerverträgliche Landbewirtschaftung, Konsequenzen für die Land-, Forst- und Wasserwirtschaft. Schriftenreihe des BA f. Wasserwirtschaft, Bd. 1, 186-195, Petzenkirchen.
- ZOJER, H., P. RAMSPACHER & J. FANK (1991): Die kombinierte Lysimeteranlage Wagna. - Bericht über die Gumpensteiner Lysimetertagung „Art der Sickerwassergewinnung und Ergebnisinterpretation“, 55-62, Gumpenstein.