

FANK^{*}, J., W. STICHLER^{} & H. ZOJER^{*}: Die Schneeschmelze 1996 als
¹⁸O-Tracerversuch an der Lysimeteranlage in Wagna**

ABSTRACT

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 isotopenhydrologischen Analytik zu untersuchen. Die meßtechnischen Voraussetzungen umfassen bezüglich der Probennahme insgesamt 26 Meßstellen, an denen der Niederschlag, das Sickerwasser über keramische Saugkerzen und -platten tiefengestaffelt und auch das Grundwasser beprobt werden können.

Flächenhaft durchgeführte Markierungsversuche ergaben im Beobachtungszeitraum April 1993 bis März 1997 eine mittlere Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone von mehr als 3 Jahren entsprechend einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 1.4 m/y. Die maximale Verlagerungsgeschwindigkeit bis zum Grundwasser liegt aus diesem Markierungsversuch bei 1.65 m/y.

Die Verwendung des ¹⁸O-Isotops als natürlicher Tracer repräsentiert in idealer Weise die Bewegung des Wassers. Die Schneeschmelze nach einem schneereichen Winter im März 1996 wurde durch ein starkes Niederschlagsereignis von 85.6 mm zwischen 2. und 5. April 1996 in der ungesättigten Zone tieferverlagert. Diese Verlagerung ist in den Verläufen der ¹⁸O-Konzentration im Sickerwasser in den unterschiedlichen Meßtiefen nachvollziehbar. Die Verlagerung ist an Neubildungsereignisse gekoppelt, wobei Schneeschmelzvorgänge eher einen dispersiven Fluß, Niederschlagsereignisse einen „piston flow“ Effekt auslösen. Die Winterniederschläge erreichen Mitte April eine Tiefe von 60 bis 70 cm. Die Dämpfung des ¹⁸O-Gehaltes zeigt bevorzugte Fließcharakteristika in den unterschiedlichen Kompartimenten der ungesättigten Zone (feinklastischer Boden, Kiese und Sande).

* Inst. f. Hydrogeologie und Geothermie, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16, A-8010 Graz

** Inst. f. Hydrologie, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH, Neuherberg, D-85758 Oberschleißheim

1 Einleitung, Problemstellung Meßkonfiguration

Die Fließbewegung und damit die Verweilzeit des Sickerwassers wird vom schichtspezifischen Wassergehalt und den herrschenden hydraulischen Potentialen gesteuert, 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. Ein Mittel dazu stellt die Verwendung von Markierungsmitteln dar.

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 isotopehydrologischen Analytik zu untersuchen [1]. Eine Beschreibung der hydrogeologischen Rahmenbedingungen geben FANK & HARUM [2], der Aufbau der Bodenprofile wird in [3] dargestellt.

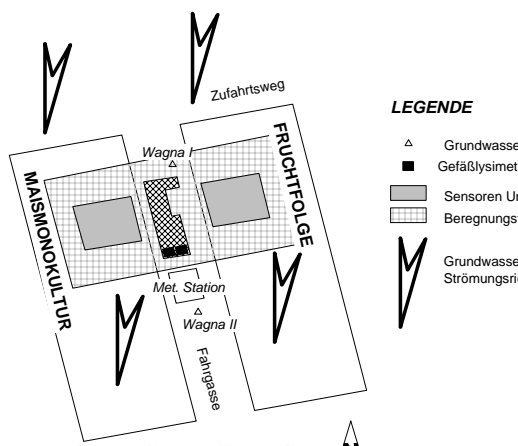


Fig. 1: Lage der Forschungsstation Wagna, der Meßsonden und der Grundwasserpegel.

Die meßtechnischen Voraussetzungen und Probenahmemöglichkeiten im Bereich der Forschungsstation Wagna sind in [1], [2] und [4] dargelegt und umfassen insgesamt 26 Meßstellen, an denen der Niederschlag, das Sickerwasser über keramische Saugkerzen und -platten tiefengestaffelt (zwischen 40 und 300 cm unter GOK) und auch das Grundwasser (450 bis 600 cm unter GOK) beprobt werden können. In Fig. 1 ist die Lage der Meßeinrichtungen in Bezug zur Strömungsrichtung des Grundwassers im Grundriß dargestellt. Zwei Gefäßlysimeter, an denen das anfallende Sickerwasser kontinuierlich registriert wird, sind mit 0.5 m Kies und 1 m Boden aus der Fahrgasse (Fig. 1) befüllt. Die Bewirtschaftung zeigt einerseits eine Maismonokultur mit Schwarzbrache und herbstlicher Ackerung, andererseits eine vierjährige Fruchtfolge mit winterharter Gründecke und seichter Grubberung.

2 Grundlagen zur Verwendung von ^{18}O als Tracer

Das ^{18}O -Sauerstoffisotop als Bestandteil des Wassermoleküls repräsentiert in seiner Eigenschaft einen „quasi idealen“ Tracer, der die Wasserbewegung aufzeigt. Die ^{18}O Gehalte werden in $\delta^{18}\text{O}$ Werten als ‰ Abweichung von einem internationalen Standard (V-SMOW) angegeben. Die unterschiedlichen Temperaturverhältnisse in der Atmosphäre während des Jahres erzeugen in den ^{18}O -Gehalten der Niederschläge aufgrund von temperaturabhängigen Fraktionierungseffekten einen ausgeprägten Jahresgang mit Maximalwerten in den Sommer- und Minima in den Winterniederschlägen. Einzelne Niederschlagsereignisse selbst können aufgrund der Herkunft und Geschichte des Wasserdampfes Schwankungsbreiten in der Größenordnung des Jahresganges aufweisen.

3 Untersuchungsdurchführung und Ergebnisse

Flächenhaft durchgeführte Markierungsversuche (Beregnungsfläche siehe Fig. 1) unter Verwendung des konservativen Tracers Bromid ergaben im Beobachtungszeitraum April 1993 bis März 1997 eine mittlere Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone von mehr als 3 Jahren entsprechend einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 1.4 m/y. Die maximale Verlagerungsgeschwindigkeit bis zum Grundwasser liegt aus diesem Markierungsversuch bei 1.65 m/y.

Seit 1992 werden an allen 26 Meßstellen Proben gezogen und auf deren ^{18}O -Gehalt untersucht. Die Verwendung des ^{18}O -Isotops als natürlicher Tracer repräsentiert in idealer Weise die Bewegung des Wassers in der ungesättigten Zone. Die Schneeschmelze nach einem schneereichen Winter im März 1996 wurde durch ein starkes Niederschlagsereignis von 85.6 mm zwischen 2. und 5. April 1996 in der ungesättigten Zone tieferverlagert. Diese Verlagerung ist außerordentlich gut in den Verläufen der ^{18}O -Konzentration im Sickerwasser in den unterschiedlichen Meßtiefen nachvollziehbar.

3.1 Input, Neubildung

In Fig. 2 ist die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge und deren ^{18}O -Gehalte im Zeitraum 1.10.1995 bis 30.9.1996 dargestellt. Die Niederschläge des Dezember 1995 fielen in Form von Schnee und weisen besonders niedrige ^{18}O -Konzentrationen auf (-18 bis -23 ‰).

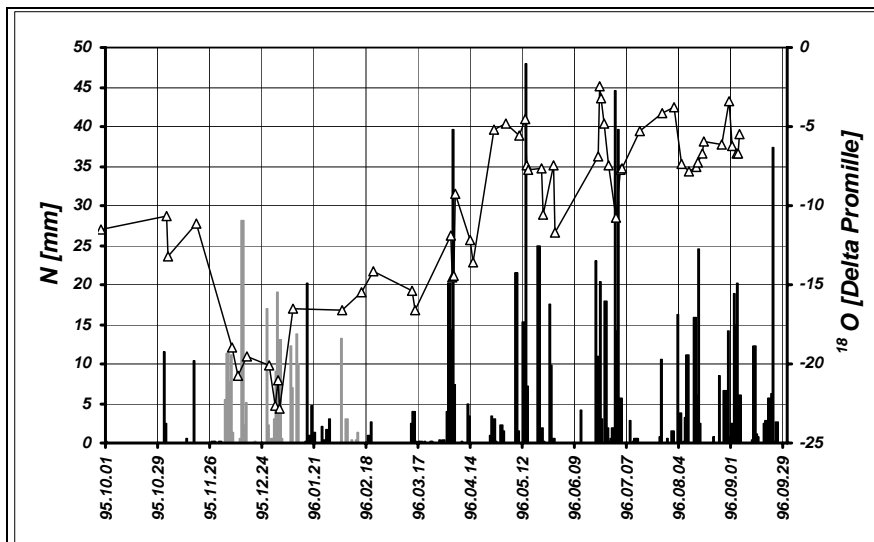


Fig. 2: Niederschlagsmengen (graue Stäbe = Schneefall) und zugehörigen ^{18}O -Konzentrationen im Zeitraum 1. Oktober 1995 bis 30. September 1996

Diese Werte unterscheiden sich deutlich von den Werten davor und auch danach, so daß die Niederschläge aus diesem Zeitraum ein deutliches Inputsignal darstellen. Die intensiven Frühjahrsniederschläge Anfang April 1996 zeigen ^{18}O -Gehalte zwischen -15 und -10 ‰. Erst die Niederschläge ab Mai weisen ein für Sommerniederschläge typisches Niveau auf.

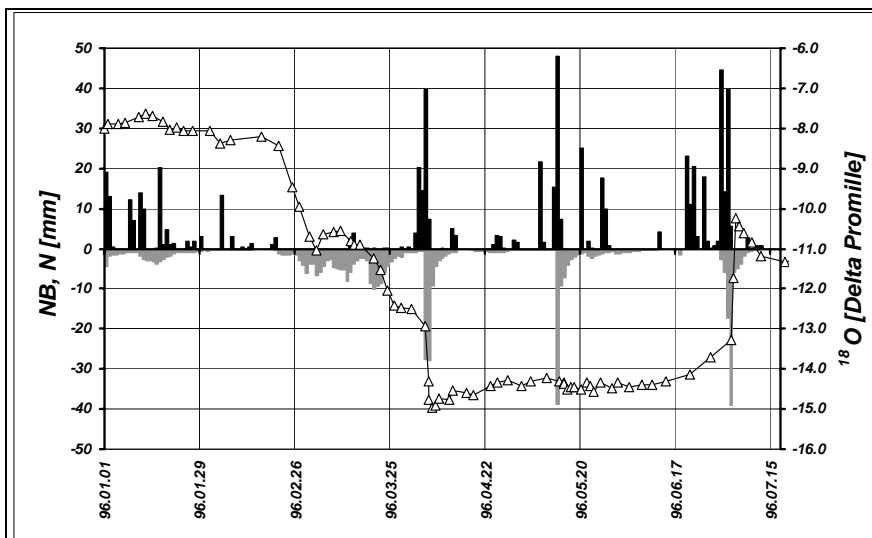


Fig. 3: Abhängigkeit des Isotopengehaltes im Sickerwasser von Neubildungsimpulsen (graue Stäbe) bzw. Niederschlagsereignissen (schwarze Stäbe) unterschiedlicher Ausprägung am Beispiel des Gefäßlysimeters mit Maismonokultur.

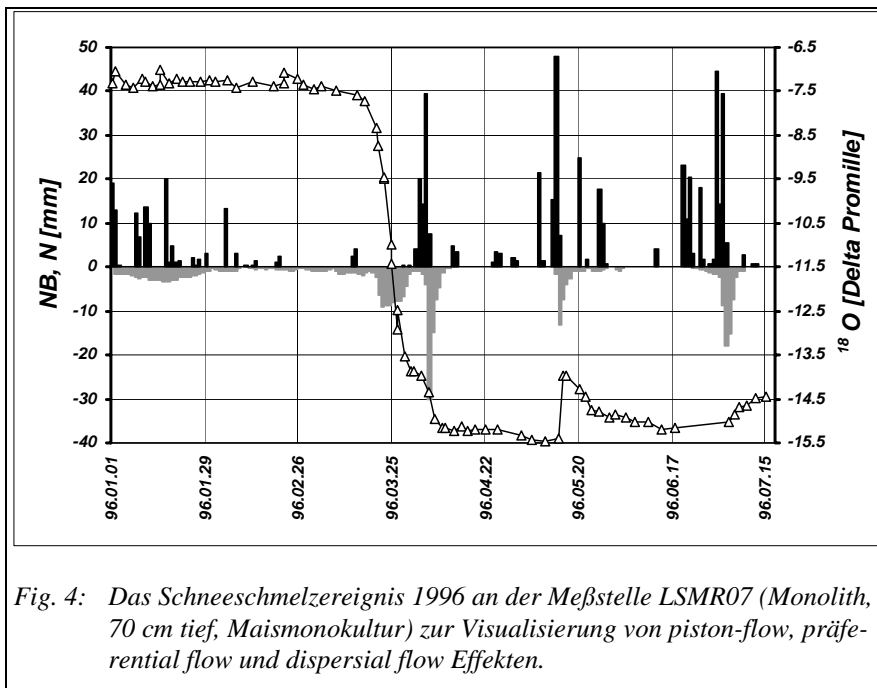
Anhand der Meßdaten an einem Gefäßlysimeter (Fig. 3) ist erkennbar, daß die Neubildungsvorgänge von den Niederschlägen und den Schneeschmelzereignissen gesteuert werden. Charakteristisch dafür ist der Verlauf der ^{18}O -Gehalte aus den Sickerwasserproben:

langsam einsickerndes Schneeschmelzwasser (20.2. bis 30.3.1996) zeigt einen relativ langsamen aber stetigen Abfall der ^{18}O -Konzentration, das darauf folgende intensive Niederschlagsereignis zwischen 2. und 5.4.1996 verlagert das im Boden gespeicherte Wasser in einem charakteristisch plötzlichen Schub. Durch den hohen Anteil an Winterniederschlagswasser sinkt die ^{18}O -Konzentration deutlich ab. Das darauf folgende Neubildungsereignis Mitte Mai 1996 ist von ähnlicher Intensität, in der Isotopengangleinie ist allerdings kaum eine Veränderung zu erkennen, da das hier zum

Abfluß gelangende Wasser sich in seiner Konzentrationsverteilung nicht von dem vorher abgeflossenen unterscheidet. Erst die Lysimeterabflüsse von Anfang Juli 1996 zeigen einen deutlichen Anstieg der ^{18}O -Werte, ein Hinweis darauf, daß zu diesem Zeitpunkt in etwa die Niederschlagswässer vom April 1996 und teilweise auch bereits vom Mai 1996 abfließen.

3.2 Die Schneeschmelze 1996 als Neubildungsereignis

In Fig. 4 ist der Durchgang des Winterniederschlagswassers in einer Tiefe von 70 cm unter der Geländeoberkante im Vergleich zur Niederschlags- und Neubildungsverteilung dargestellt. Die Neubildungsverteilung nach der Zeit wurde nach der in [5] vorgestellten Methode aus der Ganglinie des Grundwasserspiegels an der Grundwassermeßstelle Wagna I [vgl. Fig. 1] ermittelt.



Durch das Abschmelzen der Schneedecke im nahezu niederschlagsfreien März sickert isotopisch leichtes Winterniederschlagswasser in 70 cm Tiefe durch. Der Durchmischungsprozess mit dem gespeicherten Bodenwasser mit höheren ^{18}O -gehalten schreitet in dieser Zeit bereits so weit fort, daß das durch das Neubildungsereignis Anfang April hervorgerufene schubweise Fortbewegen des Wassers im Vergleich zur Lysimeterganglinie in Fig. 3 wesentlich schwächer ausgeprägt ist. Nach Ende dieses Neubildungsereignisses ist das Minimum der ^{18}O -Konzentration erreicht. Der folgende Teil der ^{18}O -Ganglinie zeigt das Vorbeiströmen von Mischwasser aus Winterniederschlägen und längerfristig gespeichertem Bodenwasser in der Meßtiefe mit praktisch gleichbleibenden Konzentrationen.

Im Neubildungsereignis von Mitte Mai wird deutlich die Existenz präferentieller Fließwege dokumentiert. Die ^{18}O -Konzentration im Sickerwasser steigt signifikant um

1.5 ‰ an. Kurzfristig kommt Wasser aus den Niederschlägen Anfang April zum Abfluß, danach sinken die ^{18}O -Werte wieder annähernd auf das Niveau von -15 ‰ ab. Dem im Boden gespeicherten Wasser wird aufgrund des hydraulischen Druckes ausgelöst durch die Niederschläge kurzfristig über bevorzugte Wasserpfade Wasser aus höheren Bodenschichten zugeführt, was in der Isotopenganglinie in dem deutlich erkennbaren kurzzeitigen Anstieg der Konzentrationen zu erkennen ist (Fig. 4).

3.3 Das Schneeschmelzwasser in der Tiefenverlagerung

Fig. 5 zeigt die Tiefenverlagerung des Sickerwassers im Oberboden und in den ungesättigten Sanden und Kiesen der quartären Talfüllung am Verlauf der ^{18}O -Gehalte in den Analysen des Sickerwassers aus unterschiedlichen Entnahmetiefen.

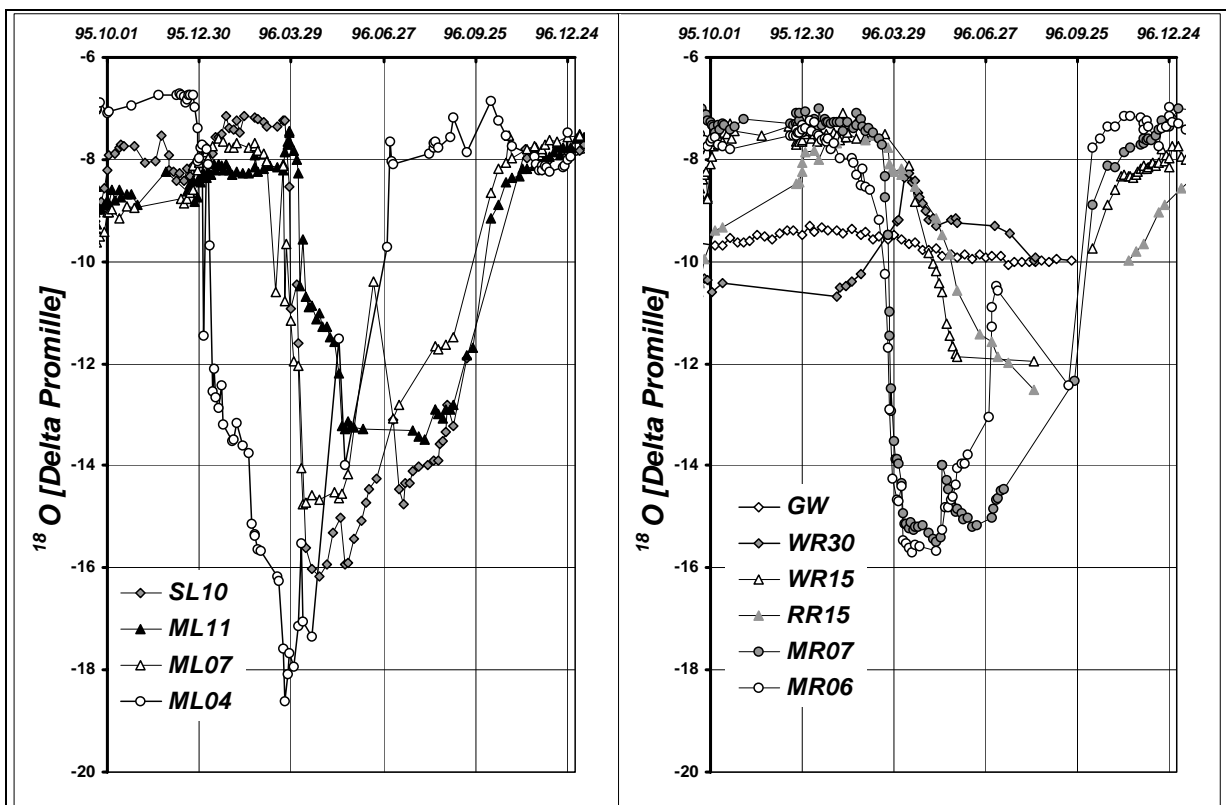


Fig. 5: Die Tiefenverlagerung des Sickerwassers in der ungesättigten Zone detektiert an den Analysen der ^{18}O -Gehalte in den Schichten des Oberbodens (linkes Diagramm) und in den ungesättigten Sanden und Kiesen (rechtes Diagramm). Die beiden letzten Ziffern in der Bezeichnung repräsentieren die Entnahmetiefe in dm unter der Geländeoberkante, die Buchstaben bezeichnen die Entnahmearart.

In dieser Tiefenverlagerung, bei der durch die Dämpfung des Inputsignals auch die dispersive Komponente des Flußes deutlich sichtbar wird, sind Auffälligkeiten zu beobachten, die die Wasserbewegung in den unterschiedlichen Schichten beschreiben und in folgenden Punkten zusammengefaßt werden können:

- Die Bewegung durch die feinklastischen Schichten des Oberbodens (sie wird durch die Monolithlysimeter ML04, ML07 und ML11 erfaßt) zeigt sehr akzentuierte Reaktionen des ^{18}O -Gehaltes auf Neubildungsvorgänge. Piston flow Effekte stehen hier im Vordergrund. Einzelne Spitzen in der Ganglinie sind eindeutig in ihrer Tiefenverlagerung zu erfassen. Die Durchmischung des Infiltrationswassers mit dem Bodenwasser zeigt sich in einer Verringerung der Amplitude mit zunehmender Tiefe.
- Der Vergleich der Ganglinien des Monolithlysimeters ML07 und der Saugkerze SL10 zeigt den Unterschied in den Probennahmesystemen. Während im Monolithlysimeter aufgrund seiner Konstruktion das durch einen Quader mit der Grundfläche von $50 * 70$ cm einsickernde Wasser aufgefangen und beprobt wird, repräsentiert das Probenmaterial aus der Saugkerze den eher kurzfristigen Wasserfluß im Zuge von Ereignissen. Da Saugkerzen eher den bevorzugten Wasserfluß repräsentieren, ist die Abminderung des ^{18}O -Gehaltes im Wasser der Saugkerze signifikant geringer. Winterniederschläge erreichen nach geringerer Durchmischung mit dem Bodenwasser die Saugkerzen, als dies im Falle von Lysimeterbeobachtungen der Fall ist.
- Der Wasserfluß, der über die Saugkerze detektiert wird, ist demgemäß auch schneller als derjenige, der in den monolithischen Lysimetern erfaßt werden kann. Dies verdeutlicht das frühere Eintreffen des Winterniederschlags in der Saugkerze SL10 im Vergleich mit dem Monolithen ML11 in annähernd gleicher Einbautiefe und auch gleichem Profilaufbau.
- Auch in den Monolithlysimetern auf der Maismonokulturseite (MR06 und MR07) zeigen sich die unterschiedlichen am Wasserfluß beteiligten Prozesse: Die Winterniederschläge erreichen aufgrund der herrschenden hohen Sättigung praktisch gleichzeitig die beiden in ihrer Einbautiefe um 10 cm unterschiedlichen Meßstellen Anfang April 1996. Die Niederschläge im Mai 1996 mit bereits höheren ^{18}O -Werten bewirken an der seichteren Meßstelle einen anhaltenden Anstieg der Konzentrationen, während bis in 70 cm Tiefe nur geringe Anteile der Frühjahrsniederschläge über präferentielle Fließwege eindringen.
- Der Wasserfluß in den ungesättigten Sanden und Kiesen (WR15 und RR15: Saugplatten-Kleinlysimeter) unterhalb einer Tiefe von mehr als 70 cm zeigt die gegenüber dem feinklastischen Oberboden größere Bedeutung des dispersiven Flu-

ßes einerseits in einer Verminderung der Amplitude, andererseits in einem signifikant geringeren Gradienten der Ganglinie.

- Die lokale Variabilität wird an den ^{18}O -Ganglinien der beiden in 150 cm unter Gelände im Sand-Kiesbereich eingebauten Kleinlysimeter erkennbar. Die Meßstelle RR15 zeigt eine deutliche Verzögerung des Flußes gegenüber WR15, obwohl diese Meßstellen in einer Horizontalentfernung von nur 2 m eingebaut sind.
- Die Winterniederschläge aus dem Dezember 1995 sind im September 1996 in einer Tiefe von 1.5 m erfaßbar. Die Verlagerungsgeschwindigkeit in der ungesättigten Zone bis in diese Tiefe liegt bei hohen Sättigungsgraden im gesamten Frühjahr bei etwa 2 m/y.

Der Vergleich der Verlagerung der Winterniederschläge aus dem Dezember 1995 durch die ungesättigte Zone mit den Ergebnissen des Markierungsversuches im April 1993 [6] zeigt, daß die Verlagerungsgeschwindigkeit bis in eine Tiefe von 1.5 m in einem eher feuchten Jahr von etwa 1.5 bis 1.8 m/y auf ca. 2 m/y ansteigt. Die Verweilzeit bis in eine Tiefe von 1.5 m liegt im Jahr 1996 bei etwa 9 Monaten.

- Die Analyseergebnisse der Sickerwässer aus der Meßstelle WR30 (Kleinlysimeter in 3 m Tiefe) zeigen das Auftreten der Neubildung aus den Sommerniederschlägen im Frühjahr und die tiefsten Werte im September. Wie aus flächenhaften Markierungsversuchen und der Auswertung der Nitratverlagerung bekannt ist, können die Sickerwasserproben des September 1996 nicht die Winterniederschläge von 1995/96, sondern nur jene aus 1994/95 repräsentieren.
- Die große Bedeutung des dispersiven Flußes in den Kiesen und Sanden der ungesättigten Zone verdeutlicht sich auch in der nur noch schwach ausgeprägten Amplitude im ^{18}O -Gehalt des Grundwassers (Meßstelle GW) von etwa 0.5 ‰.

4 Schlußfolgerungen

Aus der Auswertung von ^{18}O -Analysen in Sickerwasserproben unterschiedlicher Tiefen lassen sich wertvolle Schlüsse über die vertikale Verlagerung des Niederschlagswassers ziehen:

- Der Fließvorgang in der ungesättigten Zone ist eine Mischung aus präferentielltem Fluß über Makroporensysteme, einer Weiterbewegung durch piston flow Effekte und dem dispersiven Matrixfluß. Eine korrekte numerische Nachbildung kann nur unter Einbeziehung aller Fließprozesse erreicht werden.
- Makroporenfluß und piston flow Effekte sind im feinklastischen Boden deutlich signifikanter ausgeprägt als in den ungesättigten Sanden und Kiesen, in denen der dispersive Fluß dominiert.
- Die treibenden Kräfte für die Fließbewegung in der ungesättigten Zone sind einerseits Schneeschmelzereignisse, die sich in eher dispersiven Verlagerungen spiegeln und andererseits Neubildungsvorgänge aufgrund von Niederschlagsereignissen, die den dominanten Charakter der „schiebenden“ Wasserbewegung dokumentieren.
- Aufgrund der Heterogenität des Sedimentaufbaues sind hohe Variabilitäten in der horizontalen Verteilung der Neubildung und auch der Verlagerungsgeschwindigkeiten zu erkennen. Es müssen Möglichkeiten gesucht werden, die dafür maßgeblichen Parameter (Schichtmächtigkeiten, bodenphysikalische Eigenschaften der Schichtglieder) flächenhaft zu erfassen, um Inputdaten ausreichender Qualität für eine numerische Modellierung zu erhalten.
- Mittlere Verlagerungsgeschwindigkeiten von 2 m/y zeigen eine hohe und bis heute zu wenig beachtete Schutzfunktion von natürlich gelagerten ungesättigten Deckschichten für das Grundwasser, wobei deren Ausbildung in Form von Kiesen und Sanden aufgrund der geringeren Bedeutung präferentieller Flüsse auch für die Aufenthaltszeit von Schadstoffen und der daraus abzuleitenden Reaktionszeit auf Schadensfälle eine neue Bewertung erfahren muß. Die Schutzfunktion hinsichtlich bakteriologischer Belastungen wäre durch Untersuchungen des Transportes von Keimen und Bakterien durch die ungesättigte Zone zu hinterfragen.

5 Literatur

- [1] ZOJER, H., P. RAMSPACHER & J. FANK (1991): Die kombinierte Lysimeteranlage Wagna. - Bericht über die Gumpensteiner Lysimetertagung „Art der Sickerwassergewinnung und Ergebnisinterpretation“, 55-62, Gumpenstein.
- [2] 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.
- [3] EISENHUT, 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.
- [4] 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.
- [5] FANK, J. (1997): Abschätzung der Grundwasserneubildung aus dem zeitlichen Verlauf des Grundwasserspiegels. Hilmar Zetinigg Festschrift zum 60. Geburtstag. Berichte der wasserwirtschaftlichen Planung, **81**, 227-243, Graz.
- [6] FANK, J. (1997): Erfassung von Wasserbewegung und Stofftransport in der ungesättigten Zone durch tracer- und isopenhydrologische Untersuchungen. Vortrag im Rahmen des ÖWAV Seminars „Grundwasserdynamik“ am 9. 12. 1997 in Wien.