# Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

Diplomarbeit für die Prüfung zum

## **Diplom-Hydrologen**

Vorgelegt bei der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Betreuende Dozenten: Prof. Christian Leibundgut Dr. Jens Lange vorgelegt von: Janusch Laule geb. am 25.07.1981 in: Rheinfelden

Abgabedatum: 22.09.2007

## Inhaltsverzeichnis

1.	Ein	leitung	<b>S.</b> 1					
	<u>1.1</u>	Entstehung des Aufschlusses	S. 2					
	1.2	Periglaziale Deckschichten	S. 2					
	<u>1.3</u>	Interflow	S. 5					
<u>2.</u>	Auf	Aufgabenstellung und Zielsetzung						
<u>3.</u>	Sta	nd der Forschung	S. 12					
<u>4.</u>	Ver	suchsgebiet und Methodik (Versuchsaufbau)	S. 17					
	<u>4.1</u>	Versuchsgebiet: Naturräumliche Lage, Topographie und						
		Morphologie	S. 17					
	4.2	Korngrössenanalyse	S. 21					
	<u>4.3</u>	Methodik und Versuchsaufbauten	S. 23					
		4.3.1 Standorte der Halbröhren zur Sickerwasserbeprobung						
		4.3.2 Systematik der Nummerierung der Beprobungsstellen						
		4.3.3 Detaillierte Beschreibung der einzelnen Standorte zur Probena	<u>lhme</u>					
		4.3.4 Technischer Aufbau der Halbröhren						
		4.3.5 Zeitliche Abfolge der Installation der Probenahmestellen						
	4.4	Bodenfeuchtemessungen	S. 31					
5	5. <u>F</u>	Experimenteller Teil	S. 32					
	5.1	Tracerversuche mit Natriumbromid	S. 32					
		5.1.1 <u>Tracerversuch am Standort "Insel"</u>	S. 33					

		5.1.2 <u>Tracerversuch am Mittelhang</u>	<b>S</b> . 34
	5.2	Tracerversuch mit Uranin	S. 38
	5.3	Experiment zur Sickerwasserbewegung in der Decklage	S. 45
	5.4	Bestimmung der Bodenfeuchte	S. 46
	5.5	Infiltrationsversuche	S. 50
		5.5.1 Erster Infiltrationsversuch: Standort "Insel"	S. 50
		5.5.2 Zweiter Infiltrationsversuch: Standort "Insel"	S. 52
		5.5.3 Dritter Zweiter Infiltrationsversuch: Standort "Insel"	S. 54
		5.5.4 Vierter Infiltrationsversuch: Standort "Birke"	S. 55
		5.5.5 Fünfter Infiltrationsversuch: Standort "Birke"	S. 58
<u>6.</u>	Erg	<u>ebnisse</u>	<b>S. 61</b>
<u>6.</u>	<b>Erg</b> 6.1	<u>ebnisse</u> <u>Tracerversuche mit Natriumbromid</u>	<b>S. 61</b> S. 61
<u>6.</u>	<b>Erg</b> 6.1	ebnisse Tracerversuche mit Natriumbromid 6.1.1 Tracerversuch am Standort "Insel"	<b>S. 61</b> S. 61 S. 61
<u>6.</u>	<b>Erg</b> 6.1	ebnisse         Tracerversuche mit Natriumbromid         6.1.1       Tracerversuch am Standort "Insel"         6.1.2       Tracerversuch am Mittelhang	<b>S. 61</b> S. 61 S. 61 S. 67
<u>6.</u>	<b>Erg</b> 6.1 6.2	ebnisse         Tracerversuche mit Natriumbromid.         6.1.1       Tracerversuch am Standort "Insel".         6.1.2       Tracerversuch am Mittelhang.         Tracerversuch mit Uranin.	<b>S. 61</b> S. 61 S. 61 S. 67 S. 77
<u>6.</u>	Erg 6.1 6.2 6.3	ebnisse         Tracerversuche mit Natriumbromid         6.1.1       Tracerversuch am Standort "Insel"         6.1.2       Tracerversuch am Mittelhang         Tracerversuch mit Uranin       Bodenfeuchtemessungen: Manuelle Thetasonde	<b>S. 61</b> S. 61 S. 67 S. 77 S. 87
<u>6.</u>	Erg 6.1 6.2 6.3 6.4	ebnisse         Tracerversuche mit Natriumbromid.         6.1.1       Tracerversuch am Standort "Insel"         6.1.2       Tracerversuch am Mittelhang.         Tracerversuch mit Uranin.         Bodenfeuchtemessungen: Manuelle Thetasonde.         Bodenfeuchtemessungen: Echo – Sonden.	<ul> <li>S. 61</li> <li>S. 61</li> <li>S. 67</li> <li>S. 77</li> <li>S. 87</li> <li>S. 95</li> </ul>
<u>6.</u>	Erg 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5	ebnisse         Tracerversuche mit Natriumbromid.         6.1.1         Tracerversuch am Standort "Insel".         6.1.2         Tracerversuch am Mittelhang.         Tracerversuch mit Uranin.         Bodenfeuchtemessungen: Manuelle Thetasonde.         Bodenfeuchtemessungen: Echo – Sonden.         Infiltrationsversuche .	<ul> <li>S. 61</li> <li>S. 61</li> <li>S. 67</li> <li>S. 77</li> <li>S. 87</li> <li>S. 95</li> <li>S. 98</li> </ul>
<u>6.</u>	Erg 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5	ebnisse         Tracerversuche mit Natriumbromid.         6.1.1         Tracerversuch am Standort "Insel"         6.1.2         Tracerversuch am Mittelhang.         Tracerversuch mit Uranin.         Bodenfeuchtemessungen: Manuelle Thetasonde.         Bodenfeuchtemessungen: Echo – Sonden.         Infiltrationsversuche         6.5.1         Erster Infiltrationsversuch: Standort "Insel"	<ul> <li>S. 61</li> <li>S. 61</li> <li>S. 67</li> <li>S. 77</li> <li>S. 87</li> <li>S. 95</li> <li>S. 98</li> <li>S. 98</li> </ul>
<u>6.</u>	Erg 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5	ebnisse         Tracerversuche mit Natriumbromid         6.1.1       Tracerversuch am Standort "Insel"         6.1.2       Tracerversuch am Mittelhang         6.1.2       Tracerversuch am Mittelhang         Tracerversuch mit Uranin       Tracerversuch mit Uranin         Bodenfeuchtemessungen: Manuelle Thetasonde       Manuelle Thetasonde         Infiltrationsversuche       G.5.1         Erster Infiltrationsversuch: Standort "Insel"       Standort "Insel"	S. 61 S. 61 S. 61 S. 67 S. 77 S. 87 S. 95 S. 95 S. 98 S. 98 S. 100

	6.5.4 Vierter Infiltrationsversuch: Standort "Birke"	S. 104
	6.5.5 Fünfter Infiltrationsversuch: Standort "Birke"	S. 105
7.	Diskussion	S. 107
<u>8.</u>	Zusammenfassung	<b>S. 133</b>
<u>9.</u>	<u>Literaturliste</u>	<b>S. 134</b>

## 1. <u>Einleitung</u>

Experimentelle Untersuchungen zu Fließprozessen innerhalb periglazialer Deckschichten wurden im Zastlertal, einem 18,4 km<sup>2</sup> grossen Einzugsgebiet im Südschwarzwald, durchgeführt. Als Versuchsgebiet diente ein durch ein Hochwasserereignis im Oktober 2006 entstandener Aufschluss, welcher sich an einem Steilhang ausgebildet hatte. Dort wurden die auf kristallinem Grundgestein aufliegenden periglazialen Deckschichten durch den über seine Ufer getretenen Angelsbach an manchen Stellen bis zu 4 m tief durch Erosion freigelegt. Das anstehende Grundgestein in Form von Metatexit ist allerdings nicht erkennbar.

Da in einigen Bereichen des Aufschlusses die verschiedenen charakteristischen Decklagen der periglazialen Schichtfolgen sehr gut erkennbar waren, wurden hier tracerhydrologische Markierversuche mit Natriumbromid und Uranin durchgeführt, um genauere Erkenntnisse über die Fließprozesse und Fließwege innerhalb der einzelnen Bodenschichten zu bekommen. Hierbei konnten mit Hilfe von Regenrinnen, die hangparallel in die Grabenflanken eingeführt wurden, Wasserproben aus den jeweiligen Erdschichten

gewonnen und später im Labor am Ionenchromatograph, bzw. Fluoreszenzspectrometer analysiert werden.

Zudem wurden momentane und kontinuierliche Bodenfeuchtemessungen durchgeführt, um genauere Aufschlüsse über die Bodenwasserverteilung innerhalb des Hangs zu erlangen.

Im Mai und Juni 2007 wurden außerdem noch insgesamt fünf Infiltrationsversuche durchgeführt, welche Fließwege und auch Fließgeschwindigkeiten innerhalb der drei periglazialen Schichtfolgen aufdecken sollten.

Im Rahmen der durchgeführten Experimente konnten folgende Ergebnisse erlangt werden: Interflow in der Basislage wurde mehrfach durch die Tracerversuche am Mittelhang nachgewiesen. Es konnten jedoch auch ausgeprägte laterale Fließprozesse innerhalb der Decklage beobachtet werden. Außerdem wurde bei einem der fünf durchgeführten Infiltrationsversuche auch laterales Fließen innerhalb der Hauptlage entdeckt.

Mit Hilfe von Infiltrationsversuchen in Verbindung mit umfangreichen Bodenfeuchtemessungen wurde zudem die Dominanz vertikaler Fließwege durch die Deck – und Hauptlage, sowie durch die oberen Bereiche der Basislage offengelegt. Außerdem konnten im Rahmen dieser Versuche die maximalen Fließgeschwindigkeiten des Sickerwassers in den einzelnen Schichtfolgen berechnet werden.

Zusätzlich wurden mit Hilfe von Bodenfeuchtemessungen Vertikalprofile der Bodenfeuchte an verschiedenen Standorten erstellt.

Eine Korngrössenanalyse von je einer Probe aus den einzelnen periglazialen Schichtfolgen leistete bei der Interpretation der Ergebnisse Hilfestellung.

## 1.1 Die Entstehung des Aufschlusses

Mederlehof während Der Angelsbach, welcher den Aufschluss am eines Hochwasserereignisses im Oktober 2006 verursachte, entwässert ein Seitental des Zastlerbaches. Der Angelsbach entspringt an den Hängen des 1298 m hohen Berges "Tote Mann". Einige hundert Meter oberhalb seiner Mündung in den Zastlerbach verläuft er verdohlt unter einem Waldweg hindurch durch eine Röhre mit ca. 1,5 m Durchmesser. Diese Röhre wurde während des Oktoberhochwassers durch Geschwemmsel verstopft, so dass der Angelsbach in der Folge über eine Strecke von annähernd 100 m einen Waldweg hinab entwässerte, diesen dann überquerte und einen unbewaldeten Steilhang hinab stürzte. An diesem Steilhang entstand dadurch ein teilweise fast 4 m tiefer Einschnitt, an welchem man die verschiedenen, charakteristischen Abfolgen der periglazialen Deckschichten zum Teil sehr gut erkennen kann.

## 1.2 Periglaziale Deckschichten

Der Begriff "Periglazial" kommt vom griechischen "peri" (um, herum) und dem lateinisch "glacies" (Eis). Damit ist gemeint, dass die Deckschichten oder Schuttdecken während der Eiszeit am Rand bzw. außerhalb der vergletscherten Regionen entstanden. Sie bestehen aus umgelagertem Material, das häufig aus Verwitterungsprodukten unterschiedlicher Gesteine besteht (URL 1).

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **3** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Die deutschen Mittelgebirge wurden im Pleistozän durch periglaziale Prozesse, in erster Linie Solifluktion, überformt. Die Eigenschaften der holozänen Mittelgebirgsböden, wie z.B. Bodenart, Steingehalt, Durchwurzelungstiefe und nFK, sind daher eng mit der räumlichen Verteilung und den Substrateigenschaften der Solifluktionsdecken (Periglaziale Lagen) verbunden, die als Lockersedimente großflächig das Ausgangssubstrat der holozänen Bodenentwicklung bilden (SCHOLTE, SCHOTTE, FELIX – HENNINGSEN, 2002).

Periglaziale Deckschichten entstanden in Mitteleuropa während der Kaltzeiten in den unvergletscherten Mittelgebirgslandschaften zwischen dem Inlandeis im Norden und den Alpengletschern im Süden.

Die Böden der Mittelgebirgslandschaften waren wegen der Kälte überwiegend vegetationsfrei und gefroren und auch im Sommer tauten nur oberflächennahe Schichten, sogenannte "active layer", auf. Weil die tieferen Bodenzonen ganzjährig gefroren blieben, bildeten sie eine für das Schmelzwasser undurchlässige Schicht. Dadurch wurde die oberflächliche Auftauschicht mit Wasser übersättigt und es kam schon bei geringen Hangneigungen ab etwa 2° zu hangabwärts gerichteten Bodenbewegungen, welche als sogenannte Gelifluktion oder auch Gelisolifluktion bezeichnet werden.

Außerdem trugen auch Denudationsprozesse, also Erosionsvorgänge am Bodenmaterial durch oberflächlich abfließendes Schmelzwasser, zur hangabwärts gerichteten Bodenbewegung bei.

Auch der Wechsel von Gefrieren und Auftauen verlagerte Bodenmaterial in tiefere Hanglagen, da beim Gefrieren die Bodenpartikel im rechten Winkel zur Hangneigung angehoben, beim Abschmelzen aber der Gravitation folgend unterhalb des Ausgangsorts wieder abgelagert wurden.

Durch das Zusammenwirken der oben beschriebenen Prozesse bildeten sich nach und nach periglaziale Lagen aus , die teilweise bis in die Gegenwart erhalten sind.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 4 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Abb.1: Idealisierter Aufbau einer periglazialen Deckschicht (nach LEIBUNDGUT & LANGE, 2006, aus REHFUESS, 1990).

In der Regel befindet sich direkt über dem anstehenden Gestein, welches im Zastlergebiet in Form von Gneis und Metatexit vorliegt, eine schuttreiche, lößfreie Basislage. Diese ist am Zastleraufschluss sehr gut erkennbar. Nach STAHR (1979) folgt darauf liegend dann mit der Hauptlage die oberste, jüngste periglaziale Lage, die Lößbeimengungen enthält und eine auffallend konstante Mächtigkeit von 40-60 cm erreicht. Vereinzelt tritt oberhalb 700-800 m.ü.m eine Oberlage auf, die aus Felsbrocken besteht und im Umfeld von Felsdurchragungen vorkommt. In Akkumulationsbereichen ist die Hauptlage von Kolluvien bedeckt.

Die oben bereits genannten Entstehungsprozesse der periglazialen Lagen werden, neben den Eigenschaften des Ausgangsgesteins, weitgehend von Relieffaktoren wie Exposition, Hangneigung und Wölbung bestimmt. Damit bietet die Auswertung digitaler Höhenmodelle eine Möglichkeit zur GIS - gestützten Regionalisierung der Verbreitung periglazialer Lagen und ihrer substratspezifischen Bodeneigenschaften.

Georadar\_zum Erfassen, sowie geomorphographische Reliefanalys<u>en</u> zur Regionalisierung der Eigenschaften periglazialer Lagen sind dabei von herausragenden Bedeutung.

Georadar ist eine geophysikalische Methode, mit deren Hilfe periglaziale Lagen schnell und zerstörungsfrei erkundet und hochauflösende Daten über deren Verbreitung und Gründigkeit erhoben werden können(SCHOLTEN, SCHOTTE, FELIX - HENINNGSEN, 2002).

## 1.3 Interflow

### **Definition des Interflows**

Als Interflow wird der Teil des Abflusses bezeichnet, der von einem Niederschlagereignis infiltriert und sich im Bodensubstrat geneigter Flächen hauptsächlich parallel zur Oberfläche zum Grundwasser hin oder direkt zum Vorfluter bewegt und dort etwas verzögert eintritt (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996; DIN, 1979).

Der Prozess Interflow hat unterschiedliche Bezeichnungen. In der englischsprachigen hydrologischen Fachliteratur wird er z.B. auch als subsurface stromflow, lateral flow, subsurface runoff, transient groundwater, throughflow oder soil water flow bezeichnet (WEILER ET AL., 2005). Im deutschen Sprachgebrauch wird er auch als hypodermischer Abfluss, Bodenabfluss und Zwischenabfluss bezeichnet. Hypodermischer Abfluss bezieht sich dabei auf die lateralen, physikalisch begründeten Fließvorgänge in der

oberflächennahen, ungesättigten Bodenzone, während Zwischenabfluss v. a. für den Anteil des Direktabflusses bei der Ganglinienseparation, der aus der ungesättigten Bodenzone stammt, verwendet wird (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996).

Da sich Interflow nahe der Erdoberfläche in Berghängen abspielt, wird er auch einfach als "oberflächennaher Abfluss" bezeichnet (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996, S. 492). Makroporenfluss und Pipeflow werden auch preferential flow genannt (WEILER ET AL., 2005), wobei aber zu beachten ist, dass mit diesen Begriffen auch vertikale Fließprozesse beschrieben werden.

Der Prozess des Interflows wird oftmals nicht eindeutig beschrieben. Auf der einen Seite wird er als ungesättigter Darcy-Fluss in der Bodenmatrix oder als Pipe-Fluss in Makroporen, der die ungesättigte Bodenzone durchquert, dargestellt. Andererseits zeigten viele Studien, dass es sich beim Interflow um einen gesättigten Wasserfluss handelt. So entsteht Interflow auch durch das Ansteigen eines Wasserspiegels in eine durchlässigere Bodenschicht, oder durch das kurzzeitige Stauen von Wasser über einer weniger durchlässigen Schicht, oder über dem Grundgestein (WEILER ET AL., 2005).

Von besonderer Bedeutung ist der Interflow in Böden, bei denen über einer weniger durchlässigen Schicht ein grobes Korngerüst bzw. eine skelettreiche Bodenschicht liegt (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996). Dies ist am Zastleraufschluss gegeben, wo die periglazialen Deckschichten auf undurchlässigem Metatexit aufliegen. Makroporen, welche am Aufschluss in den Grabenwänden teilweise sehr gut sichtbar sind, können lateral ausgebildet, oder vertikale Makroporen durch horizontale Verbindungen miteinander verknüpft sein. Hieraus wiederum können sich dann vernetzte Makroporensysteme ergeben, die besonders hohe Transportkapazitäten aufweisen.



Abb. 2: Schematische Darstellung der Fließwege in einem Hangboden. 1) Infiltration in Mikro und Makroporen; 2) Oberflächenabfluss; 3) schneller lateraler unterirdischer Abfluss (Abfluss im Makroporensystem, "preferential flow"); 4) Mikroporendurchfluss (Matrixfließen) (nach ZUIDEMA, 1985 in BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996).

Neben dem lateralen Fließen in Makroporen kann Interflow auch durch Mikroporenfluss gebildet werden (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996). Mit zunehmender Tiefe nimmt die Makroporosität in Böden ab und häufig auch die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix. Insbesondere in anisotropen Böden in Hanglagen kann dadurch eine hangabwärts gerichtete Fließkomponente innerhalb der Hangmatrix entstehen.

Wenn Wasser bereits im Boden gespeichert ist und gesättigte, sowie fast gesättigte Flächen miteinander verbunden sind, kann es beim Hinzukommen von Infiltrationswasser zu einer schnellen Abflussreaktion kommen. Dieses laterale Matrixfließen führt dazu, dass große Mengen von Vorereigniswasser in den Vorfluter gelangen, wobei eine kleine Menge Ereigniswasser ausreicht, um den hydraulischen Gradienten zu erhöhen (WEILER ET AL., 2005).

Die Fließzeiten des Interflows sind gegenüber denen des Oberflächenabflusses deutlich erhöht (BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996). Bei genauer Betrachtung von Ganglinien fällt auf, dass der Anstieg nicht so steil wie beim Oberflächenabfluss verläuft. Auch der Peak in der Abflussganglinie wird in kleineren Einzugsgebieten erst 1-2 Tage später erreicht, klingt aber im Vergleich zum jener des Oberflächenabflusses auch merklich langsamer ab. Aus diesem Grund sind in Abflussganglinien kleiner Einzugsgebiete als Reaktion auf Starkniederschläge oftmals zwei Abflusswellen zu erkennen. Die erste Welle gehört zu dem

Oberflächenabfluss, sie ist sehr steil und fällt schnell wieder ab. Die zweite, zeitlich verschobene Welle verläuft flacher und stammt entweder aus dem Zwischenabfluss, oder gehört zum Grundwasserabfluss. WEILER ET AL. (2005) gehen davon aus, dass Interflow in steilen, humiden Einzugsgebieten der Hauptmechanismus der Abflussbildung nach größeren Niederschlagsereignissen ist.

#### Die Chronologie der Erforschung des Interflows

Als einer der ersten bedeutenden Hydrologen im Bereich der Interflowforschung muss der Schweizer Engler genannt werden. Er erkannte die Bedeutung des Interflows auf den Abfluss und seine Beobachtungen wurden 1919 auch veröffentlicht (WEILER ET AL., 2005). Engler fand bereits damals heraus, dass das infiltrierende Wasser lateral in der Wurzelzone abfließt und führte des Weiteren auch detaillierte Untersuchungen zu bodenphysikalischen Eigenschaften durch.

In den 1940ern wurde bei den ersten quantitativen Messungen des Subsurface Stormflow in einem Einzugsgebiet festgestellt, dass der Abfluss nach einem Niederschlagsereignis aus zwei Hauptkomponenten besteht, dem Gerinneniederschlag und dem Subsurface Stromflow. In der internationalen hydrologischen Dekade wurden mehr Erkenntnisse zum Interflow gewonnen, wobei die wichtigsten Arbeiten aus der Zeit im Kontext mit dem "variable source area concept", das dem Konzept des Topmodels ähnelt (WEILER ET AL., 2005), in Verbindung standen.

Ende der 1970er konnte dann klar aufgezeigt werden, dass die Reaktionszeiten vom Interflow schnell genug sind, um einen großen Anteil des Gerinneabflusses eines Niederschlagereignisses auszumachen. Über die Herkunft und das Alter vom Interflow jedoch gab es viele Debatten, wobei die Studien im Mamai Einzugsgebiet in Neuseeland (MCGLYNN ET AL., 2002) ein klassisches Fallbeispiel darstellen.

Zunächst konnten Ende der 1970er mit Farbtracern Fließwege des Wassers im Boden sichtbar gemacht werden.

Etwa zehn Jahre später wurden Isotopenuntersuchungen durchgeführt, die zeigten, dass ein großer Teil des unterirdischen Abflusses aus altem Wasser besteht.

In den 1990ern wurden Isotopenuntersuchungen mit Tracerversuchen und Tensiometermessungen verbunden und die Ergebnisse konnten dann Theorien zum Makroporenfluss und zum Anteil von altem und neuem Wasser in Einklang bringen. Weitere vor etwa zehn Jahren durchgeführte Studien machten deutlich, dass die Topographie des Grundgesteins erheblichen Einfluss auf die räumliche Konzentration von Subsurface Flow hat (WEILER ET AL., 2005).

## 2. Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit

Auf der Basis des bis dato vorhandenem Wissens und den aktuell bestehenden hydrologischen Konzepten sollten Hangwasserdynamik und Stofftransport innerhalb typischer Hangsedimente kristalliner Mittelgebirge experimentell, mit Hilfe von Tracerversuchen und Bodenfeuchtemessungen, sowie Infiltrationsexperimenten beleuchtet werden. Substratanalysen dienten dabei als Hilfestellung.

Eventuell sollte im Anschluss eine prozessorientierte Modellierung durchgeführt werden, um damit einen Beitrag zur Verbesserung der Einzugsgebietsmodellierung zu leisten.

Ziel dieser Arbeit war es also, Fließwege und Fließprozesse innerhalb der einzelnen Lagen der periglazialen Deckschichten zu untersuchen und nachzuvollziehen. Da in dem Bereich der Hanghydrologie in Bezug auf die lateralen Fließprozesse noch vieles nur auf Vermutungen beruht und weiterhin Forschungsbedarf besteht, sollte diese Arbeit auf Basis der experimentellen Untersuchungen versuchen, neue Erkenntnisse zu erlangen. Die gewonnen Erkenntnisse sollten anschließend mit bisherigen Forschungsergebnissen anderer Arbeiten verglichen werden.

Die Beantwortung folgender genereller Fragen sollte durch die Experimente im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermöglicht werden:

- In welcher der drei periglazialen Schichtfolgen findet Interflow statt? Gibt es eine Schicht, in welcher vorwiegend schnelle laterale Fließprozesse auftreten und wenn ja, wie kann dies logisch begründet werden?
- Welche Fließwege bilden sich in den einzelnen Hangsedimenten aus, in welchen Schichten dominieren vertikale bzw. laterale Fließprozesse?
- Sind Trends in den Verläufen der Tracerkonzentrationen an den jeweiligen Probenahmestellen erkennbar und können diese anhand der Niederschlags- und Bodenfeuchtedaten nachvollzogen werden?

- An welchen Beprobungsstellen treten die höchsten Tracerkonzentrationen auf und wie kann dies logisch begründet werden?
- Wie stark bzw. wie schnell reagieren die einzelnen Schichtfolgen auf bestimmte Niederschlagsereignisse und welchen Einfluss hat die Vorfeuchte auf diese Reaktion?
- Welche maximalen Fliessgeschwindigkeiten herrschen in den einzelnen periglazialen Schichtfolgen vor?
- Gelangen die in den Hang eingespeisten Tracer in die umliegenden Vorfluter?
- Wie effektiv ist die Wasserspeicherung in den einzelnen periglazialen Schichten?
- Welchen Einfluss haben Bäume bzw. deren Wurzeln auf das Abflussverhalten der periglazialen Hänge?

Außerdem warfen die Wasserproben und deren Analysen noch einige zusätzliche Fragen auf, deren Beantwortung ebenfalls ein Ziel der vorliegenden Arbeit darstellte:

• Warum konnte im Beprobungszeitraum vom Januar bis Juli 2007 kein Wasser in den Proberinnen der Hauptlage aufgefangen werden?

Dabei ist zu beachten, dass anhand der Bromidanalysen eindeutig aufgezeigt werden konnte, dass Sickerwasser während des Versuchszeitraums von der Oberlage durch die Hauptlage bis hinab in die Basislage gelangt ist.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 11 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

- Gibt es bei den gewonnen Wasserproben eine Korrelation zwischen aufgefangener Wassermenge und Tracerkonzentration und wenn ja, wie verhält sich diese Korrelation im Vergleich der unterschiedlichen Beprobungsstandorte untereinander?
- Wieso konnten im Januar 2007 keine Wasserproben aus der Decklage gewonnen werden, während die Basislage schon Proben lieferte? Andererseits gilt es die Frage zu klären, warum die Regenrinnen in der Basislage zwischen dem 31. Januar und 27. März dann ihrerseits kein Wasser mehr lieferten.

Zu dieser Fragestellung wurde folgende Hypothese aufgestellt: Welche der Deckschichten Wasser liefert, dürfte, basierend auf bisherigen Erkenntnissen, in grossem Maße von den aktuellen Vorfeuchtebedingungen, sowie von der jeweiligen Niederschlagsintensität abhängen (WEILER & FLUHLER, 2004). Bei der Decklage könnte in den Wintermonaten aber auch die Temperatur wegen des möglichen Gefrierens oberflächennaher Bodenschichten eine entscheidende Rolle spielen. Ein solches Zufrieren könnte eine Wassergewinnung aus dieser Schicht verhindern.

Ein Problemfall der vorliegenden Arbeit war, dass nicht festgestellt werden konnte, bis in welche Tiefe die Basislage reicht, bzw. wo das anstehende, kristalline Grundgestein beginnt. Deshalb besteht Unklarheit darüber, ob die Probenahmestellen in der Basislage, welche alle innerhalb von 2,5 bis 3 m Tiefe installiert waren, als repräsentativ für laterale Wasserflüsse in dieser sandig-kiesigen Schicht angesehen werden können. Der Hauptanteil des Interflows könnte sich nach bisherigen Vermutungen nämlich vor allem direkt über dem anstehenden Festgestein abspielen (z. B. DIDSZUN, 2000) und dieser Bereich wird womöglich durch den beschriebenen Versuchsaufbau nicht erfasst. Diese Unklarheit sollte in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe mehrerer Infiltrationsexperimente ausgeräumt werden.

## 3. Stand der Forschung in der Hanghydrologie

Aufgrund der Tatsache, dass in den meisten mittelgebirgigen Forschungseinzugsgebieten Europas und Nordamerikas die Niederschlagsintensitäten durchweg deutlich niedriger liegen, als die maximalen Infiltrationsraten, führte in den 60er und 70er Jahren zur Widerlegung der Horton'schen Theorie (1933), wonach der Ereignisabfluss vor allem auf OF-Abfluss durch Infiltrationsüberschuss zurückzuführen war (BONELL, 1998). Angeführt von HEWLETT und HIBBERT (1967) und ihrem Konzept der variablen Beitragsfläche wurden zunehmend unterschiedliche Theorien von hochwasserwirksamen Abflussbildungsprozessen postuliert, welche zum Teil bis heute umstritten sind.

Nach den Oberflächenprozessen, wie dem vor allem auf verfestigten Wegen und offenen Felsflächen stattfindenden Horton'schen Oberflächenabfluss und dem Sättigungsflächenabfluss, also dem Abfluss von Niederschlagswasser oder austretendem Grundwasser (return flow) auf bereits gesättigten Flächen, traten zunehmend die unterirdischen Prozesse in den Mittelpunkt des Forschungsinteresses.

Dabei wurde die Bildung schneller unterirdischer Komponenten zunächst vor allem auf Makroporen zurückgeführt, wobei sich in diesem Kontext künstliche Tracer, wie sie auch im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit verwendet wurden, als sehr wirkungsvoll zum Nachweis unterirdischer Fließwege erwiesen. Durch Isotopen-Verfahren konnte aber mehrfach gezeigt werden, dass der Ereignisabfluss zu großen Teilen aus Vorereigniswasser besteht., wodurch weitere Prozesse benötigt wurden, um diese Tatsache zu erklären. Vorraussetzung für den hohen Vorereigniswasseranteil der Hochwasserwelle ist allgemein eine schnelle Mobilisierung von "altem" Hangwasser. Dieser Prozess kann durch Ausbildung aufgesetzter Grundwasserkörper auf weniger durchlässigen Schichten, durch Druckwellenausbreitung (TORRES et al. 1998), durch die vorfluternahe Ausbildung von "Grundwasserrücken" (ground water ridging), oder auch durch den so genannten "transmissivity feedback"-Effekt, also die deutliche Zunahme der lateralen Durchlässigkeit bei Ansteigen des Hangwasserspiegels in oberflächennähere Bereiche, erfolgen.

Dabei gilt es zu bedenken, dass einige dieser Prozesse nur in einzelnen Gebieten oder nur von einem Autor nachgewiesen wurden. Andere Erklärungsansätze, wie die Ausbildung aufgesetzter Grundwasserkörper, sind jedoch allgemein anerkannt.

Weiter wurden Fortschritte beim Prozessverständnis durch Abtrennung mehrerer unterirdischer Komponenten, häufig Bodenwasser und Grundwasser per Ganglinienseparation, oder durch das EMMA - Verfahren ermöglicht. Zusätzlich zeigten Untersuchungen zur hangparallelen Verteilung und Quantität des Hangwasserflusses, dass sich Bereiche verstärkten Fließens häufig nicht auf die Topographie der Erdoberfläche, sondern auf die der überdeckten Festgesteinsoberfläche zurückführen lassen (McDONNELL et al. 1998).

## Modellierung in der Hanghydrologie

Bis vor kurzem fehlten effektive hydrologische Modelle, die experimentell ermittelte Muster und dominante Prozesse der Hangwasser- und Stoffdynamik quantitativ umsetzen. In den letzten zwei Jahrzehnten dominierten hoch komplexe, physikalisch basierte Finite-Element-Modelle, die u.a. durch CALVER und CAMERAAT (1993) entwickelt wurden. Laut BRONSTERT (1999) lassen sich Abflussbildung, Erosion und selbst präferenzielle Fließwege in Makroporen abbilden, wenn räumlich hoch aufgelöste Daten des Untergrunds zur Verfügung stehen. Dies ist jedoch daten- und rechenintensiv und durch die Gebietsindividualität nur begrenzt auf experimentell ermittelte hydrologische Konzepte anpassbar. Besonders in typischen Hangsedimenten mit ihrer ausgeprägten Heterogenität in Übergangsbereichen, wie z.B. an Schichtgrenzen oder im Übergangsbereich zwischen ungesättigten und gesättigten Bereichen, kann es zu Modellierungsproblemen kommen. Des weiteren ergibt sich eine Vielzahl von Parametern, wodurch sich hohe Modellunsicherheiten ergeben und Modellergebnisse objektiv nur schwer zu testen sind. Eine neue, viel versprechende Lösung stellen flexible, flächendifferenzierte, aber relativ einfache Ansätze dar, wobei in engem Dialog zwischen "Experimentierer und Modellierer" (SEIBERT & McDONNELL, 2002) ein experimentell ermitteltes hydrologisches Konzept direkt physikalisch basiert umgesetzt wird. Dabei beschränkt man sich auf die dominanten

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 14 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Prozesse. HillVi, ein Konzept zur Modellierung von Wasser- und Stofftransport auf virtuellen Hängen (WEILER & McDONNELL, 2004), ist ein aktuelles Beispiel für einen solchen Ansatz. Dieses physikalisch basierte aber einfache Simulationsmodell für Wasserund Stofftransport wurde speziell für die Interflowdynamik in den periglazialen Hangsedimenten, sowie die Austauschprozesse zwischen Zersatzzone und Hangsedimenten konfiguriert. So lassen sich Hangwasserdynamik und vor allem Tracerexperimente effektiv modellieren. Zusätzlich bietet HillVi wegen seines relativ einfachen Aufbaus die Chance, Teile des Modells direkt für die konzeptionelle EZG - Modellierung zu verwenden.

Ein zusätzlicher Ansatz der physikalisch basierten Hangwassermodellierung und deren Regionalisierung zur konzeptionellen Einzugsgebietsmodellierung stellt HYDRUS 2-D dar.

Bei der Hanghydrologie werden die Hangfuß- und Bachrandbereiche (Riparian Zones) in Bezug auf den Stofftransport und die Hydrodynamik als Schlüsselstelle angesehen. Einen Hinweis darauf konnten HOOPER et al. (1998) zeigen, denn die Tracersignatur des Hangwassers war trotz dessen dynamischer Reaktion im Ereignisabfluss nicht nachzuweisen , was über die Volumenunterschiede zwischen Hangwasser und Talauengrundwasser begründet wurde. Eine echte Quantifizierung beider Komponenten gelang aber erst McGLYNN & McDONNELL (2003), die zusätzlich auch die zeitliche Dynamik der Abflussbildung experimentell ermittelten. So drückte das eintreffende Hangwasser zuerst das Grundwasser der Talaue aus, bevor es selbst über seine Tracersignatur im Abfluss nachweisbar war.

Erste Versuche mittels DGM-Analyse das Verhältnis von Hang- und Bachrandbereichen entlang der Gerinne zu untersuchen und dies zu einer Einzugsgebietscharakterisierung bzw. eines Einzugsgebietsvergleichs in Bezug auf den Ereigniswasseranteil, die Hydrochemie, die mittlere Verweilzeit oder die Dynamik von Ereignis- bzw. Basisabfluss zu nutzen, wurden von McGLYNN & SEIBERT (2003) publiziert. Um Parameterumfang und Modellinterpretierbarkeit beherrschbar zu halten, erscheint auch im Hangfuß- und Bachrandbereich die Modellierung mit vereinfachten, prozess-orientierten Ansätzen Ziel führend, sie ist jedoch bis heute nicht beschrieben worden.

## Durchgeführte Forschungsarbeiten in der näheren Umgebung des Zastleraufschlusses

Auch den Einzugsgebieten der Brugga und des Zastlerbachs waren die periglazialen Sedimente, bzw. deren hydrologische Wirkung bereits zentraler Forschungsgegenstand.

Es wurden jeweils ein oberirdisches und zwei unterirdische Fließsysteme entdeckt: Ein stark verzögertes innerhalb des Festgesteins mit einer mittleren Verweilzeit von sechs bis neun Jahren (Fließsystem-1) und ein oberflächennahes innerhalb der Hangsedimente mit einer mittleren Verweilzeit von ca. zwei bis drei Jahren (Fließsystem-2).

Über Tracerversuche im Brugga – Einzugsgebiet konnten Fliessgeschwindigkeiten in den zahlreich vorkommenden Blockschuttfeldern sowie im Vorfluter bestimmt werden (MEHLHORN, 1999). Ähnlich zu den vielen Literaturstudien, zeigte sich auch hier ein hoher Anteil an Vorereigniswasser in der Hochwasserwelle. Dabei ist das Fließsystem innerhalb der Hänge häufig die dominierende Komponente während der Ereignisse, was die Bedeutung der Hanghydrologie einmal mehr unterstreicht.

(DIDSZUN, 2004) ging insbesondere der Frage der Skalenabhängigkeit der Abflussbildungsprozesse nach und beprobte dabei gleichzeitig verschieden große Teileinzugsgebiete während zahlreicher Niederschlagsereignisse. Die Ergebnisse zeigten, dass die Hydrologie der Hangsedimente zu komplex ist, um sie mit einzelnen Beprobungen ausreichend genau entschlüsseln zu können.

Bereits davor waren Detailuntersuchungen an zwei Hangschuttquellen durch Ereignisbeprobungen und durch künstliche Tracerversuche (DIDSZUN, 2000, UHLENBROOK et al., 2003) durchgeführt worden. Für den schnellen Transport von Wasser hangabwärts wurden an beiden Quellhängen die Grenze zwischen Hangsedimenten und der Festgesteinsoberfläche verantwortlich gemacht. Zudem wurde beobachtet, dass sich Unterschiede im Hangsedimentaufbau deutlich im hydrologischen Verhalten abzeichnen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass trotz der Vorarbeiten weiterhin Forschungsbedarf im gesamten Dreisam-Einzugsgebiet besteht, denn die entwickelten Konzepte beruhen noch immer auf vielen Hypothesen. Dies liegt vor allem daran, dass einzelne Konzept-Kompartimente wie z.B. obere, durchwurzelte Bodenzone, verschiedene

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 16 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Hangsedimente, oder Zersatzzone des Anstehenden, nur gesamthaft und nicht im einzelnen mit ihren jeweiligen Wechselwirkungen beschrieben wurden.

Dies gilt sowohl für experimentelle als auch für modelltechnische Auswertungen, was unter anderem auf technische Schwierigkeiten (Materialheterogenität) und auf fehlende Erfahrungen bei der Hangsedimenterkundung zurückzuführen ist.

Auch generell herrscht im Bereich der Hanghydrologie trotz Fortschritten der hydrologischen Prozessforschung in den letzten Jahren weiterhin ein allgemeines Forschungsdefizit. Wasserbewegungen und Stofftransport in den typischen, schichtweise aufgebauten Hangsedimenten deutscher Mittelgebirge sind weiterhin nur unzureichend bekannt und insbesondere die genauen Fließpfade in Hangsedimenten und die Austauschprozesse zwischen Deckschichtauflage und der Zersatzzone des Grundgebirges sind noch völlig im Dunkeln.

Es fehlt an einer Systematisierung, Quantifizierung und Regionalisierung der Hangwasserdynamik, um die an einzelnen Standorten gewonnenen Erkenntnisse für eine verbesserte EZG - Modellierung nutzen zu können.

Der Mangel an detaillierten Einblicken in die Hangwasserdynamik und den Stofftransport von Hangsedimenten in Mittelgebirgsräumen begründet sich nach LEIBUNGUT & LANGE (2006) v.a. darauf, dass bisherige Studien meist nur von einem einzigen Fachbereich durchgeführt wurden. Daher wird in deren Bündelantrag eine Vereinigung von verschiedenen Fachrichtungen (Geographie, Hydrologie, Hydrogeologie und Geoinformatik) angestrebt, um dadurch ein tieferes Systemverständnis zu erlangen.

## 4. Versuchsgebiet und Versuchsaufbau

# 4.1 Untersuchungsgebiet: Naturräumliche Lage, Topographie und Morphologie

Das Untersuchungsgebiet liegt innerhalb des 18,4 km<sup>2</sup> großen Zastler - Einzugsgebiets im Bereich des kristallinen Grundgebirges des Südschwarzwalds. Der Aufschluss weist eine Länge von ungefähr 70 m auf, ist 2-6 m breit und an manchen Stellen fast 4 m tief in den Steilhang eingeschnitten. Die Hangneigung variiert zwischen 40-65%, wobei im oberen Bereich des Grabens der Hang am steilsten ist, während das Gefälle dann in Richtung Talboden kontinuierlich abnimmt. Der Graben beginnt in etwa 710 m. ü. M. direkt unterhalb eines Waldwegs und endet am Hangfuß in ca. 670 m. ü. M..

Der mittlere jährliche Niederschlag im EZG Zastler beträgt 1700 mm, wovon in den höheren Lagen etwa 2/3 und in den niederen Lagen etwa 1/3 als Schnee fallen. Daraus bildet sich ein mittlerer jährlicher Abfluss von ca. 1080 mm am Pegel Zastler und ein Verlust von 620 mm durch Evapotranspiration.

Das EZG ist zu 75% bewaldet und der Versieglungsgrad beträgt weniger als 2%. Lediglich die Talböden und Hochflächen sind beweidet (HOEG, LEIBUNDGUT, UHLENBROOK, 1998).



Laule - Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 18 Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in

Abb. 2: Lage des Aufschlusses innerhalb des gesamten Dresiameinzusgebiets.

Der Flächenanteil von periglazialem Hangschutt macht mit 48,7% fast die Hälfte der gesamtem EZG - Fläche aus. Im Gegensatz zum Nachbareinzugsgebiet Brugga weist das Zastler Einzugsgebiet mit fast 22% auch einen relativ großen Felsflächenanteil auf (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 2000).

Steilhänge, die Neigungen von bis zu 54° erreichen, dominieren mit 75% Flächenanteil das Gebiet. Kuppige Hochlagen mit geringem Gefälle machen 20% der Einzugsgebietsfläche aus und überwiegend schwach entwickelte Talböden lediglich 5% (LEIBUNDGUT, UHLENBROOK, LINDENLAUB, 1998).

Die Geologie im Bereich des Aufschlusses setzt sich wie folgt zusammen: Über dem anstehenden Gestein, welches im Zastlergebiet in Form von Gneis und Anatexit vorliegt, befinden sich periglaziale Deckschichten. Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 19 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>



Abb.3: Übersicht über die Geologie in der Umgebung des Aufschlusses. (me = Metatexit, Wm = Würmeiszeitliche Moräne).

Wie auf Abb. 3 zu erkennen ist, befindet sich der Aufschluss im Bereich des Metatexits. Allerdings verläuft in der direkten Umgebung auch eine würmeiszeitliche Moräne, die in Richtung des Angelsbachs gut sichtbar ist.

Die Abfolge der einzelnen perigalzialen Schichtfolgen sind im Folgenden in Abb. 4 dargestellt.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 20 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Abb.4: Abfolge der einzelnen periglazialen Schichtfolgen am Versuchshang.

## 4.2 Korngrössemanalyse

Im Rahmen einer Begehung mit Dr. Weinzierl am 2. März 2007 wurden bodenkundliche Besonderheiten der periglazialen Deckschichten besprochen. Bei dem Schichtenaufbau des Zastleraufschlusses handelt es sich um den Bodentyp Braunnerde.

Bei genauerer Betrachtung des Verlaufs der Schichtgrenzen konnte festgestellt werden, das die tonhaltige Decklage in hangaufwärtiger Richtung auskeilt. Sie ist bereits am Anschnitt durch den Waldweg im Bereich wo der Graben beginnt, kaum noch ausgebildet, wird dann jedoch hangabwärts langsam mächtiger.

Während der Begehung wurde aus jeder der drei Deckschichten eine Bodenprobe zur Korngrössenanalyse entnommen. Die Korngrössenanalyse wurde am 12. April 2007 in den Laboren des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau nach den Richtlinien der DIN 10683 Bl.2 durchgeführt.

Tab.1: Korngrössenanalyse, ausgeführt vom LGRB unter der Leitung von Dr. Weinzierl am 12.04.2007 (Messgüte bei 100%).

Tiefe			Schluff	<b>Schluff</b>	<b>Schluff</b>		Sand	Sand	Sand		
[cm]	Ton	Schluff	fein	mittel	grob	Sand	fein	mittel	grob	Humus	рΗ
	20,59										
0-20	%	24,60%	4,92%	8,35%	11,33%	54,81%	18,60%	24,61%	11,60%	0,00%	4,59
	10,60										
20-80	%	34,69%	7,41%	11,63%	15,65%	54,70%	19,99%	24,04%	10,67%	0,00%	4,79
80-											
>100	3,13%	17,77%	1,11%	5,25%	11,41%	79,11%	23,46%	31,36%	24,29%	0,00%	4,90



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 22 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Abb.6: Diagramm zur Korngrössenanalyse vom 12. April, 2007.

Anhand von Abb. 6 ist deutlich erkennbar, dass der Tongehalt mit der Tiefe signifikant abnimmt. In der Decklage liegt der Tongehalt noch 20,6 Volumenprozent, während in der Hauptlage noch 10,6 % und in der Basislage nur noch 3,1% erreicht werden.

Demgegenüber nimmt der Sandgehalt mit der Tiefe von 54,8 % in der Decklage und 54,7 % in der Hauptlage auf 79,1 % innerhalb der Basislage sichtbar zu.

Der Schluffgehalt ist mit 34,7 % in der Hauptlage am höchsten, während in der Decklage 24,6 % und in der Basislage 17,8 % erreicht werden.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 23 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

## 4.3 Methodik und Versuchsaufbau

## 4.3.1 Standorte der einzelnen Beprobungsrinnen

Um vertikale und laterale Fließprozesse innerhalb der periglazialen Hangsedimente des Zastleraufschlusses zu erfassen, wurde ein umfangreiches Messnetz errichtet.

Dabei wurde wie bereits beschrieben an zwei unterschiedlichen Stellen der Salztracer Natriumbromid eingespeist. Im Anschluss wurden in hangparalleler Richtung insgesamt 12 Tunnels gegraben, in welche Halbröhren unterschiedlichen Durchmessers eingebracht wurden. Wie in Abb.7 zu erkennen ist, sind die Probenahmestellen:

- 1. Auf Höhe der Einspeisestellen in senkrechter Anordnung installiert, um vertikale Wasserbewegungen erfassen zu können.
- Einige Meter hangabwärts von der Einspeisestelle angebracht, um laterale Fließbewegungen nachvollziehen zu können.

Dabei wurden jeweils ein Loch an der Horizontgrenze von Deck- und Hauptlage, ein weiteres am Übergang von Haupt- zur Basislage und ein drittes Loch im unteren Bereich der Basislage, also möglichst nahe am anstehenden Grundgestein, gegraben.

Die Probenahmestellen an der Grenze der tonhaltigen Decklage zur schluffig - tonigen Hauptlage sollten oberflächennahe Wasserbewegungen in der meist etwa 0,5 m mächtigen Decklage erfassen.

Über die Rinnen im Übergangsbereich von der Haupt- zur Basislage sollte die Nachbildung von Fließprozessen in der bis zu einem Meter mächtigen Hauptlage ermöglichen, während die Röhren in der Basislage den Wassertransport direkt oberhalb des undurchlässigen Deckgesteins abbilden sollten.

In der Basislage wurden dabei mit 16 cm Durchmesser die größten Halbröhren im Versuchsaufbau verwendet, da man in diesem Bodenhorizont die größte Wasserbewegung vermutete.

In der Deck- und Hauptlage wurden jeweils Halbröhren mit 10 cm Durchmesser verwendet.

Dabei wurden alle Halbröhren am Lochausgang mit Folien abgedeckt, um den direkten Eintrag von Regentropfen in die Rinnen zu verhindern. Hierbei verminderte sich die Auffangfläche natürlich etwas. Die genauen Werte der einzelnen Auffangflächen sind später unter 4.3.3 noch detailliert beschrieben.

Der genaue Aufbau zur Probenahme am Mittelhang ist auf Abb. 7 und 8 ersichtlich, während der Versuchaufbau für den Standort "Insel" in Abb. 9 dargestellt ist.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 25 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Abb. 7: Uebersicht der Probenahmestellen am Mittelhang.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 26 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Abb. 8: Üebersicht über die Abmessungen des Versuchsaufbaus am Mittelhang.





Abb. 9: Üebersicht des Versuchaufbaus am Standort "Insel".

## 4.3.2 Systematik zur Nummerierung der Probenahmestellen

Die erste Ziffer bezeichnet die Zugehörigkeit zum jeweiligen Versuchsaufbau, wobei 1 = Einspeisestelle "Insel" bedeutet und 2 für Einspeisestelle Hangmitte steht.

Die zweite Ziffer bezeichnet den Horizont, wobei 1 für Decklage, 2 für Hauptlage und 3 für Basislage steht.

Die dritte Ziffer beschreibt die Lage im Hangprofil, d h. 1 steht immer für diejenige Stelle, die von den jeweils 6 Probenahmestellen am weitesten hangaufwärts gelegen ist. Demnach bedeutet 2.3.1 z.B.: Einspeisestelle Hangmitte, Basislage, vertikal unter der Einspeisestelle gelegen.

#### 4.3.3 Detaillierte Beschreibung der einzelnen Standorte zur Probenahme

Im Folgenden wird beim Angeben der Länge der Röhren jeweils nur derjenige Bereich berücksichtigt, der nicht von Schutzplanen abgedeckt ist und demnach zum Auffangen von Tropfwasser innerhalb der Tunnels zur Verfügung steht.

#### Standort "Insel"

Stelle 1.1.1 und 1.1.2 wurden im Gegensatz zu den Beprobungsstandorten 1.2.1, 1.2.2, 1.3.1 und 1.3.2 nicht in der Westflanke sondern in der Ostflanke der Insel installiert (s. Abb. 9), da die Decklage an der Westflanke erst in über 2m Höhe über dem Grabenboden beginnt.

Probenahmestelle 1.1.1 steht für die Beprobung vertikaler Wasserbewegungen in der Decklage mit Hilfe einer 10 cm breiten und 55 cm langen Halbröhre 0,055 m<sup>2</sup> Auffangfläche zur Verfügung.

Bei 1.1.2 tritt die Verengung der spitz zulaufenden Insel auf weniger als einen Meter Breite als Problem auf. Daher kann diese Beprobungsstelle nur mit einer 40 cm langen Röhre ausgestattet werden, weil sonst die Gefahr eines Durchbruchs zur Westflanke besteht. Daher fällt die Auffangfläche für die Beprobung der lateralen Fließbewegung in der Decklage mit 0,04 m<sup>2</sup> relativ gering aus.

Für die Probenahmestelle zum Nachweis von vertikaler Sickerwasserbewegung in der Hauptlage (1.2.1) wurde am 12. Januar 2007 eine Plastikröhre mit 10 cm Durchmesser und 50 cm Länge installiert, was eine effektive Auffangfläche von 0,05 m<sup>2</sup> ergibt.

Für die Erfassung vertikaler Sickerströme in und durch die Basislage (1.3.1) wurde am gleichen Tag eine 10 cm breite und 60 cm lange Plastikröhre mit einer Auffangfläche von  $0,06 \text{ m}^2$  eingebracht.

In die Stelle 1.2.2 wurde am 19. Januar eine Stahlrinne mit 10 cm Breite und 55 cm Länge, also mit 0,055 m<sup>2</sup> Auffangfläche, eingesetzt.

In 1.3.2 wurde am gleichen Tag eine 10 cm breite und 60 cm lange Halbröhre aus Plastik mit 0,06 m2 Auffangfläche eingebaut.

### **Standort Mittelhang**

Die Probenahmestellen zum Nachweis von Wassertransport in der Hauptlage (2.2.1 und 2.2.2) wurden am 11. Januar jeweils mit 10 cm breiten und 60 cm langen Plastikröhren ausgestattet, woraus 0,06 m<sup>2</sup> Auffangfläche resultieren.

Die Stelle 2.3.1 zum Erfassen vertikaler Wasserströme von der Einspeisestelle in die Basislage, wurde am 11. Januar 2007 mit einer 10 cm Dm (Durchmesser) aufweisenden Plastikröhre ausgestattet. Diese Halbröhre wurde jedoch durch Steinschlag beschädigt, und somit am 19. Januar 2007 durch eine andere Halbröhre mit 15 cm Dm und 55 cm Länge ersetzt. Gleichzeitig wurde auch die halb volle Probeflasche ausgetauscht. Die aktuelle Auffangfläche für abtropfendes Sickerwasser beträgt in diesem Tunnel 0,0825 m<sup>2</sup>.

2.3.2. wurde von 5. bis 19. Januar 2007 mit einer Stahlrinne, deren Auffangfläche etwa 0,07 m<sup>2</sup> betrug, versehen. Auch hier konnte am 19. Januar eine bis zur Hälfte gefüllte Probeflasche entnommen werden. Danach wurde die Stahlrinne ersetzt durch eine Halbröhre aus Plastik mit 15 cm Dm und 60 cm Länge, was eine von 0,07 m<sup>2</sup> auf 0,09 m<sup>2</sup> erhöhte Auffangfläche im Tunnel ergibt.

In den Tunnel 2.3.3 wurde ab dem 11. Januar 2007 eine 10 cm breite und 60 cm lange Stahlrinne eingesetzt. Diese bot sich wegen der schmalen Form an, da an diesem Standort der Tunnelausgang wegen zweier aufeinander zulaufender Felsplatten stark verengt ist. Weiter im Tunnelinnern konnte dieser aber wieder breiter ausgehoben werden. Um die Auffangfläche zu erhöhen, wurde am 12. Januar nachträglich eine auf 40 cm verkürzte, jedoch 15 cm breite Plastikröhre etwa 40 cm im Tunnelinneren auf die Stahlrinne aufgesetzt. Dadurch konnte die Auffangfläche von ursprünglich 0,06 m<sup>2</sup> auf 0,08 m<sup>2</sup> erhöht werden. Am 22. Januar konnte dann auch an diesem Standort eine etwa viertel volle Probeflasche sichergestellt werden.

#### 4.3.4 Technischer Aufbau der Probenahmestellen

Die Beprobung der unterirdischen Fließprozesse soll mit Hilfe von Halbröhren aus Plastik ermöglicht werden, welche hangparallel in die gegrabenen Löcher eingebracht wurden. Die Röhren sind nach außen hin jeweils mit Planen abgedeckt um einen direkten Eintrag von Niederschlagswasser zu verhindern. An der aus der Hangwand ragenden Röhrenunterseite sind Ablaufröhrchen mit direkter Verbindung zu den Probefläschchen integriert. Angeklebte Plastikplättchen gewährleisten, dass das Sickerwasser innerhalb der Röhren nur durch den Plastikschlauch am Röhrenboden herausfließen kann (s. Abb.10).



Abb. 10: Typischer Aufbau einer Stelle zur Sickerwasserbeprobung.

## 4.3.5 Zeitliche Abfolge der Installation der Beprobungsstellen

Am 5. Januar 2007 konnte die erste Beprobungsstelle am Standort 2.3.2 fertiggestellt werden. Dabei wurde eine Stahlrinne mit 1m Länge und 10 cm Dm eingebracht, was einer effektiven Auffangfläche von 0,1 m<sup>2</sup> für das von der Tunneldecke abtropfende Hangwasser entspräche. Es musste jedoch der aus der Hangwand ragende Teil der Rinne zum Schutz vor Niederschlagswasser mit einer Plastikplane abgedeckt werden, wodurch die unteren 30 cm der Rinne verloren gehen und sich dann eine restliche, effektive Auffangfläche von 0,07 m<sup>2</sup> ergibt.

Am 11. Januar konnten die Auffangrinnen zur Kontrolle von Fließprozessen in der Basislage an den Standorten "Insel" (1.3.1 und 1.3.2), sowie im Bereich der Hangmitte (2.3.1 und 2.3.3) zusätzlich zur vorhandenen Stelle 2.3.2 komplettiert werden. Das

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **31** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Fertigstellen der Beprobung innerhalb der über dem anstehenden Festgestein befindlichen Basislage hatte Priorität, da man nach aktuellem Wissensstand davon ausgeht, dass in dieser Bodenschicht der größte Anteil des unterirdischen Hangwassers transportiert wird. Am 12. Januar 2007 wurden die Beprobungsstandorte 2.1.2 und 2.2.2 installiert.

Am 19. Januar konnten zusätzlich zu den sieben bereits fertiggestellten Probenahmestellen noch weitere 3 (1.2.1, 2.1.1 und 2.2.1) in Betrieb genommen werden.

Am 22. 01.2007 wurden dann nochmals zusätzlich 2 Röhren eingebracht (1.1.1 und 1.2.2) und somit waren zu diesem Zeitpunkt 12 Stellen zur Beprobung fertiggestellt. Die Stellen 1.3.1 und 1.2.1 wurden jedoch durch einen Erdrutsch beschädigt und mussten ersetzt werden. Aufgrund von Mangel an neuen Rohren und vorübergehenden Reparaturarbeiten an den beschädigten Röhren blieb die untere Probenahmestelle im Übergangsbereich Deck-Hauptlage an der Insel (1.1.2) bis zur Nachinstallation am 25. Januar 2007 ohne Beprobung.

#### 4.4 Bestimmung der Bodenfeuchte

Im Versuchsgebiet des Zastleraufschlusses hat man das Problem der Unkenntnis darüber, in welcher Tiefe das anstehende kristalline Grundgestein beginnt. Die Sohle des Grabens ist mit Geröll und von den Grabenflanken abstürzendem Hangschutt verfüllt. Daher ist es auch sehr schwierig, abzuschätzen, ob die Probenahmestellen in der Basislage in den Tiefenbereich hinein reichen, in welchem sich wahrscheinlich vorwiegend die lateralen Fließprozesse abspielen. Es ist aber eminent wichtig, dass die Beprobung diesen Fließbereich miteinschließt, denn nur dann können die komplexen Wasserbewegungen in den periglazialen Hangsedimenten gesamthaft nachvollzogen werden.

Daher bietet sich der Einsatz von TDR- oder FDR - Sonden zur Bestimmungen von Bodenfeuchteprofilen innerhalb der einzelnen Hangsedimente an. Generell entscheidet der Feuchtezustand eines Bodens darüber, wie viel Wasser oberflächennah abfließt und zu einem schnellen Abfluss führt (IHRINGER, BECKER, SCHÄEDEL, 2004).

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **32** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Die Time Domain Reflektometrie ist ein bereits lange etabliertes Verfahren zur Bodenfeuchtemessung, bei dem über elektromagnetische Wellen, bzw. deren Reflektion, die mittlere Bodenfeuchte entlang der Sonde bestimmt werden kann.

Ein neueres Verfahren namens Spatial TDR macht sogar eine Erstellung eines vertikalen Bodenfeuchteprofils mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung entlang der Sonden möglich (IHRINGER, BECKER, SCHÄEDEL, 2004). Das Verfahren besteht aus einer Kombination von speziellen Messgeräten, einem neuen Auswertelogarithmus zur Bestimmung von Bodenfeuchteprofilen anhand von gewonnen TDR - Daten, sowie geeigneten Bodenfeuchtesonden, sogenannten Sampling TDR.

Das Spatial TDR kam jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zum Einsatz, könnte aber für zukünftige Messungen einen weiteren, vielversprechenden Ansatz darstellen.

Welche Messgeräte bzw. Messmethoden am Zastleraufschluss angewendet wurden, ist im experimentellen Abschnitt genauer erläutert.

## **5. Experimenteller Teil**

## 5.1 Sickerwasserbeprobung

Die Beprobung der Halbröhren zur Sickerwassererfassung erfolgte in unregelmäßigen, zeitlichen Abständen und orientierte sich am Wetter. So wurde bei häufiger auftretenden Niederschlägen mehrmals pro Woche kontrolliert, ob neues Wasser in den Probefläschen angekommen war.

Die Witterung war bei den Probenahmen größtenteils trocken und die Temperaturen lagen immer über 0° Celsius. Sobald in den Flaschen mehr als 5 ml Wasser enthalten war, wurden sie durch neue, leere Behälter ersetzt.

Am 9. Januar 2007 konnte schließlich die erste Probe an Stelle 2.3.2 sichergestellt werden. Der weitere Verlauf der Beprobung ist im Abschnitt Ergebnisse ausführlich dargestellt.
#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **33** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Zusätzlich zur Kontrolle der Versuchsaufbauten im Graben wurde ab dem 27. Februar 2007 aus dem kleinen Bach, welcher unterhalb des Steilhangs in den Zastlerbach mündet, eine Probe gezogen. Außerdem wurde dem Zastlerbach unmittelbar vor der Einmündung des Angelbsbach, und dem Angelsbach direkt vor dessen Mündung in den Zastlerbach am Röhrenausgang je eine 100ml - Probe entnommen. Die Routinebeprobung am Aufschluss wurde um diese drei Beprobungsstellen erweitert, weil man dadurch den Nachweis ermöglichen wollte, ob sich das im Hang eingespeiste Bromid eventuell bis in den Vorfluterbereich ausbreiten konnte.

#### 5.1.1 Erster Tracerversuch mit Natriumbromid



Abb. 11: Einspeisegraben am Standort "Insel" beim 1. Tracerversuch mit Natriumbromid.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 34 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Natriumbromid ist als Tracer im Boden sehr gut geeignet, da Bromid als stark geladenes Anion von den selbst negativ geladenen Kornoberflächen der Bodenmatrix abgestossen wird und daher eine geringe Sorptivität aufweißt. Deshalb bewegen sich Bromidionen vor allem in der Porenmitte fort, was dazu führt, dass sie z.B. im Gegensatz zu Uranin, welches sich im

gesamten Porenraum fortbewegt, schneller durch den Boden gelangen.

Am Standort "Insel" wurde am 27. Dezember 2006 ein 40 cm breiter und langer, sowie 30 cm tiefer Graben ausgehoben und anschließend 1 kg Natriumbromid gelöst in 10 1 Bachwasser eingespeist. Die Tracerlösung infiltrierte innerhalb von 15 min vollständig.

#### 5.1.2 Zweiter Tracerversuch mit Natriumbromid am Mittelhang

Am 5. Januar 2007, wurde um 14 Uhr ein weiterer Markierversuch mit NaBr durchgeführt. Diesmal wurden aber insgesamt 10 kg NaBr gelöst in zwei 25 - 1 - Wasserkanistern eingebracht.

Die Einspeisestelle befand sich am Mittelhang, wo etwa einen Meter entfernt von der Abbruchkante ein 1 Meter breiter, 20 cm tiefer , hangparalleler Graben ausgehoben wurde (s. Abb. 12). Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 35 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>



Abb. 12: Einspeisestelle für die Tracerversuche am Mittelhang.

Die Tracerlösung wurde in kleinen Schüben eingegeben, damit es zu keinem oberflächigen Abfluss aus dem Graben kam. Nach einer halben Stunde war zwar noch nicht alles Wasser infiltriert, doch der Graben konnte wieder langsam zugeschüttet werden.

Der Versuchsaufbau zur Beprobung dieses Tracerversuchs wurde bereits ausführlich in Abschnitt 4 beschrieben.

Die Probeflaschen sollten in regelmäßigen Abständen, insbesondere nach intensiven oder länger andauernden Niederschlagsereignissen, ausgewechselt und der Inhalt auf die Konzentration an NaBr untersucht werden. Dadurch wird angestrebt, eine zeitlich hoch

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 36 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

aufgelöste Auskunft über den Transport des Tracers innerhalb der periglazialen Deckschichten zu erhalten.

Das generelle Ziel der Tracerversuche ist, laterale Fließprozesse innerhalb der periglazialen Deckschichten nachzuweisen und festzustellen, in welcher der drei Schichten das Wasser vorwiegend lateral transportiert wird.

#### Bromidnachweis mit Hilfe der Ionenchromatographie

Mit Hilfe der in die Flanken des Grabens sowie der "Insel" installierten 13 Beprobungsrinnen konnte Sickerwasser aufgefangen werden. Diese Proben wurden später im Labor mittels des Ionenchromatographen "AS40 Autosampler" auf Bromid getestet. Der AS40 Autosampler ist sensibel auf Wetteränderung. Dies konnte bei der Messreihe vom 22. März 2007 aber vernachlässigt werden, da die Wetterlage während der gesamten Messdauer stabil war.

Die Ionenchromatographie (IC) ist eine vielseitige Analysentechnik zur qualitativen und quantitativen Erfassung von überwiegend anionischen Spezies mit Hilfe von Trennsäulen und Detektoren. Für die Analyse kommen grundsätzlich nur wässrige Lösungen in Frage. Sie bilden zusammen mit dem Eluenten die mobile Phase. Die Verteilung der zu bestimmenden Ionen zwischen dieser mobilen Phase und der stationären Phase der Trennsäule stellt die Grundlage dieses Verfahrens dar. Die Affinität der einzelnen Ionen zur stationären Phase der Trennsäule bestimmt deren Retentionszeit, die dann für die analytische Auswertung herangezogen wird. Alle Ionen können in weniger als 20 Minuten simultan mit einer Nachweisgrenze von 1 ppm bestimmt werden. Die instrumentelle Nachweisgrenze liegt für die meisten Ionen zwischen 0,02 und 0,1 µg/ml.

Bei der IC macht man sich die Eigenschaft der Ionen zu nutze, an polaren festen Adsorbentien je nach Art und Größe verschieden stark gebunden zu werden. Die Adsorbentien sind entweder Ionenaustauscher niedriger Kapazität (HPIC = High Performance Ion Chromatography), total sulfonierte Kationenaustauscher hoher Kapazität (HPICE = High Performance Ion Chromatography Exclusion) oder neutrale Harze, die mit einer mobilen Trennphase versehen sind (MPIC = Mobile Phase Ion Chromatography). Bei der IC wird die Probelösung mit hohem Druck (ca. 9 Mpa) über die Chromatographiesäule geleitet. Je nach Austauscher können so Anionen, Kationen oder Ionenpaare adsorbiert

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **37** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

werden. Für die Elution der Ionen verwendet man unterschiedliche Elektrolyte, wobei wie bereits erwähnt die Retentionszeiten der jeweiligen Ionen durch deren Affinität zur stationären Phase bestimmt werden. Eine Suppressorsäule reduziert die hohe Hintergrundleitfähigkeit des Eluenten. Der Nachweis der Ionen erfolgte bei den Probenanalysen im Rahmen dieser Diplomarbeit über die Leitfähigkeit, kann aber auch über Lichtabsorbtion im sichtbaren oder ultravioletten Bereich durchgeführt wedern.

Ein Vorteil der IC sind u. a. die relativ geringen Analysenzeiten von in der Regel einigen Minuten je Probe. Bei den hier durchgeführten Analysen lag die Durchlaufszeit pro Probe zwischen ein und zwei Minuten. Ein weiterer Vorteil liegt in der hohen Richtigkeit und Reproduzierbarkeit der Analysenergebnisse bei Verwendung von Standardlösungen zur Kalibrierung des Analyseverfahrens. So wurde bei den Analysen nach jeder fünften Probelösung eine Standardlösung als Fehlerkontrolle zwischengeschaltet.

#### Analysen der Wasserproben vom 9. Januar bis 9. Juli 2007

#### Probenvorbereitung

Die am Zastleraufschluss gewonnen Proben wurden zunächst mit Hilfe von Cellulose Acetat Filtern abfiltriert und in fingergroße Probefläschen, sogenannte Vials, abgefüllt. Diese Vials enthalten jeweils etwa 5 ml Probenlösung und werden nach dem Auffüllen als Verdunstungsschutz mit sogenannten Caps verschlossen. Als Reserve wurden pro Probe zwei Vials gefüllt, da es vorkommen kann, dass Proben vom Chromatograph nicht richtig eingezogen werden, oder dass die Messung bei einzelnen Proben falsche Werte ergibt. Zwischen dem Befüllen der einzelnen Vials wurde der Filteraufbau mit destilliertem Wasser durchgespült, um die Inhaltsstoffe der einzelnen Proben nicht zu vermischen.

Die fertigen Vials wurden anschließend in Racks hineingestellt, wobei ein Rack je 6 Vials enthielt. Pro Rack wurde mindestens eine Standardlösung als Kontrolle und Werkzeug zur späteren Fehlerberechnung eingesetzt.

#### **19-Punkt-Eichung**

Vor den Analysen der eigentlichen Proben aus dem Versuchgebiet wurde zunächst eine 19-Punkt-Eichung durchgeführt. Dabei wurde zuerst ein Durchlauf mit Standardlösungen der

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **38** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

aa-Reihe, welche die Anionen Sulfat, Nitrat und Chlorid in Konzentrationen von 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 30, 40, 50, 75 und 100% enthält. Anschließend wurden zwei Probefläschchen mit destilliertem Wasser zwischengeschaltet und dann die Standardlösungen der ab-Reihe mit den Anionen Fluorid und Bromid in den Konzentrationen 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 30, 40, 50, 75 und 100 mg/L angehängt. Die durchgeführte Eichreihe verlief sehr zufriedenstellend und lieferte damit eine gute Basis für die späteren Probenanalysen.

Beim Bromidnachweis am Ionenchromatograph ist auffällig, dass die Retentionszeit von Bromid sehr nahe an der vom Nitrat liegt und dass sich dadurch die beiden Retentionskurven teilweise überschneiden. Diese Feststellung ist bei den Proben vom Zastleraufschluss zu beachten, weil der Versuchshang weidewirtschaftlich genutzt wird. Daher wurde vor den Messungen bereits eine bei der Ionenchromatographie deutlich messbare Nitratkonzentration der Proben vermutet, was durch die Analysen belegt werden konnte. Da der Ionenchromatograph aus der Fläche unter der Retentionskurve des jeweiligen Stoffes auf den Ionengehalt umrechnet, war zu überprüfen, ob durch eventuelle Überschneidungen der Retentionskurven der Ionen von Bromid und Nitrat vielleicht eine kleinere Fläche bzw. Ionenkonzentration berechnet wird, als tatsächlich vorliegt. Dies konnte dann jedoch ausgeschlossen werden.

#### 5.2 Tracerversuch mit Uranin am Mittelhang

Am 27. März um 11 Uhr wurde eine Lösung aus 35 Gramm Uranin gelöst in etwa 5 l Wasser, welches wie beim Bromidversuch aus dem am Hangfuß vorbei fließenden Bächle (Bezeichnung der Proben: "Kleines Bächle") entnommen wurde, in den Hang eingespeist. Zu diesem Zeitpunkt war der Versuchshang mit einer etwa 10 cm mächtigen Schneedecke überzogen, die jedoch bei einer Außentemperatur von 7°C schon wieder am Abschmelzen war. Zur Einspeisung wurde derselbe Graben im Mittelhang wie schon beim Bromidversuch genutzt. Nach dem Entfernen der Schneedecke wurde dieser Graben wieder bis in 20 cm Tiefe ausgehoben. Im Anschluss an das Einfüllen der Uraninlösung

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **39** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

wurde mit weiteren 5 l Bachwasser nachgespült und anschließend aufgrund der Lichtempfindlichkeit des Uranins der Graben wieder zügig mit Erdmaterial verfüllt.

#### Uraninnachweis über Fluoreszenzspektrometrie

Bei den Wasserproben vom Versuchsaufbau des Mittelhangs, wo nachträglich zum Bromid noch Uranin eingespeist worden war, wurde mit Hilfe des Fluoreszenzspektrometers Perkin Elmer LS 50 die Uraninkonzentration bestimmt.

#### **Fluoreszenztracer**

Fluoreszenztracer sind organische Farbstoffe, welche nach Anregung mit Licht einer bestimmten Wellenlänge ein Fluoreszenzlicht höherer Wellenlänge ausstrahlen. Da es sich bei Fluoreszenzfarbstoffen um organische Farbstoffe handelt, ist die überwiegende Zahl schlecht wasserlöslich, zeigt hydrophobes Verhalten und ist ungeeignet für einen wassergleichen Transport. Einige der gut löslichen Stoffe gehören jedoch andererseits aufgrund ihrer verhältnismäßig sehr tiefen Nachweisgrenzen (bis zu Verdünnungen von 10-12) bei gleichzeitig einfacher Analyse , zu den heutzutage am meisten verwendeten Tracer, wobei Uranin der Spitzenreiter ist.

**Uranin** hat eine sehr tiefe Nachweisgrenze, welche den Einsatz von äußerst geringen Tracermengen erlaubt. Beim Tracerversuch im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden 35 Gramm Uranin verwendet. Dies senkt Kosten und die angestrebten Konzentrationen von maximal 10 bis 20 mg/m3 (bzw. μg/l oder ppb) sind toxisch unbedenklich.

Uranin, auch Natrium - Fluoreszein genannt, ist zusätzlich zu seiner tiefen Nachweisgrenze auch wegen seiner geringen Sorptionsneigung erste Wahl unter den Tracern. In optisch reinen Molassequellwässern werden Nachweisgrenzen von 0.0005 ppb (0.5 ng/l) erreicht. Dies entspricht etwa 1 mg Uranin in einem Schwimmbad von  $3000 \text{ m}^3$ . Uranin wird im Untergrund bei pH-Werten im alkalischen oder neutralen Bereich kaum adsorbiert und eignet sich daher sehr gut für die Untersuchung von Wasserbewegungen in der ungesättigten Bodenzone und im Grundwasser. Es ist allerdings lichtempfindlich, was jedoch beim Einsatz im Unterboden keine bedeutende Rolle spielt. Trotzdem sollte beim Infiltrieren der Tracerlösung im Graben darauf geachtet werden, keine zu lange Lichtexposition (< ½ h) einzugehen, insbesondere nicht

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **40** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

bei sommerlicher Sonneneinstrahlung (WERNLI, 1994). Beim Tracerversuch im Rahmen dieser Diplomarbeit infiltrierte die Tracerlösung innerhalb von 20 Minuten vollständig.

#### Das Prinzip der Fluoreszenzanalyse

Werden zur Fluoreszenz fähige Stoffe mit Licht einer bestimmten Wellenlänge angeregt, so wird die aufgenommene Energie in Form einer höheren Wellenlänge wieder abgestrahlt. Zum Beispiel kann ein bestimmter Stoff mit Blaulicht angestrahlt werden und fluoresziert dann blaugrün. Dies geschieht im Gegensatz zur Phosphoreszenz, welche ein länger anhaltendes Nachleuchten ist, innerhalb von Nanosekunden nach der Anregung. Bei den im UV oder im sichtbaren Bereich stattfindenden Leuchterscheinungen spricht man von optischer Lumineszenz. Während jedoch Farbstoffe von Auge oder mit einem Fotometer nur bis zu Konzentrationen von 5 bis 10 mg/m detektiert werden können, lassen sich mit der Fluoreszenzmessung bis zu weniger als 1 ng/l erreichen. Dies liegt darin begründet, dass es sich bei der fotometrischen Messung um eine Absorptionsmessung handelt. So adsorbiert eine gelbe Lösung z. B. am stärksten die Komplementärfarbe blau: Die Messung der Adsorption des blauen Durchlichtes ist somit am empfindlichsten. Ist hingegen die Konzentration so tief, dass die Lösung farblos erscheint, lässt sich auch keine Absorption mehr messen. Bei fluoreszierenden Stoffen hingegen wird nicht eine Adsorption von Durchlicht, sondern emittiertes Licht gemessen. Bei sehr kleinen Konzentrationen ist dieses emittierte Licht von Auge nicht mehr sichtbar, kann aber mit empfindlichen Geräten noch bis zum ca. 5000- oder gar 10000fachen unter der Sichtbarkeitsgrenze gemessen werden. Die Nachweisgrenze wird von der Fluoreszenzintensität eines Stoffes und der analytischen Ausrüstung bestimmt, hängt aber in der Praxis auch vom störenden Streulicht des Messuntergrundes ab.

In der Durchlichtachse (Anregungslicht) ist das schwache Fluoreszenzlicht wegen der Stärke des Durchlichtes nicht messbar, obwohl das Fluoreszenzlicht eine höhere und somit andere Wellenlänge hat als das Durchlicht. Das Fluoreszenzlicht wird deshalb im rechten Winkel zur Durchlichtachse gemessen. Fluoreszenzspektrometer sind deshalb anders und aufwändiger gebaut als Fotometer (BEHRENS, 1986).

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **41** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Die Messung im rechten Winkel genügt aber noch nicht für eine Trennung des starken (kurzwelligen) Anregungslichtes vom schwachen (längerwelligen) Fluoreszenzlicht. Zusätzlich müssen die Wellenlängen durch Filter oder Gitter möglichst schmalbandig gehalten werden, damit z.B. gestreutes Anregungslicht nicht stört.

Fluoreszenzspektrometer besitzen drehbare Gittermonochromatoren. Diese Monochromatoren bzw. die Wellenlängen lassen sich mit einem Motor kontinuierlich verstellen, was ein Scanning ermöglicht. Durch das Scannen über einen grösseren Spektralbereich erkennt man vor und nach dem Bereich der Fluoreszenzwellenlänge auch den Verlauf des Messuntergrundes.

Dies ermöglicht die Abtrennung des Messuntergrundes vom Bruttomessignal mittels Interpolation des Messuntergrundes. Besonders selektiv ist das Doppelscanning-Verfahren bei welchem das Fluoreszenzsignal des Tracers am schmalbandigsten wird. Diese Methode wurde auch im Rahmen der durchgeführten Messreihen verwendet. Hierbei werden sowohl die anregungswie auch die emissionsseitige Wellenlängeneinstellungen gleichzeitig kontinuierlich verstellt. Bei den durchgeführten Messreihen wurde das Scanning bei EX = 400 nm gestartet und der Wellenlängenabstand, wie bei Uranin üblich, auf  $\Delta \lambda = 25$  nm gestartet. Das Scanning läuft unter Beibehalten dieses Abstandes bis 555 / 580 nm. Das maximale Fluoreszenzsignal tritt bei 491/516 nm auf. Der optimale Wellenlängenabstand zwischen Extinktion (Anregung) und Emission (Fluoreszenz) ist stoffspezifisch. Bei den durchgeführten Messreihen wurde jeweils bei 400 nm gestartet und das Scanning bei 600 nm beendet. Der Wellenlängenabstand wurde wie bei Uranin üblich auf 25 nm eingestellt (BEHRENS, 1986).

#### <u>Uranin ist pH – abhängig</u>

Uranin liegt je nach Wasserstoffionenkonzentration in verschiedenen prototropen Zuständen vor, weshalb sich bei pH - Werten unter 5,5 sich das sorptionsschwache Uraninanion sich zunächst in das Neutralmolekül und schließlich in das Kation umwandelt. Dieses weißt aufgrund seiner positiven Ladung eine höhere Sorptionsneigung an negativ geladenen Tonmineraloberflächen und Huminstoffen auf. Aus diesem Grund ist vor einer Anwendung des Uranins in sauren Wässern (z.B. Moore) abzuraten. Dieses verschlechterte Sorptionsverhalten äußert sich bei einem Feldversuch in sauren Wässern als

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **42** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Minderbefund. Auch das nachträgliche Alkalisieren bei der Analyse ändert daran dann nichts mehr. Dieser Tatsache muss im Versuchsgebiet große Beachtung geschenkt werden, da der pH-Werte innerhalb der einzelnen Deckschichten zwischen 4,5-4,9 schwankt. Damit liegen diese Werte noch deutlich unter dem Grenzwert von pH 5,5 bei Uranin.

Auch die Fluoreszenzintensität des Uranins ist pH – abhängig. Uranin fluoresziert zwar auch bei tiefen pH-Werten, allerdings bei tieferen Wellenlängen und viel schwächer als im alkalischen Bereich (WERNLI, 1994). Unterhalb pH 8 nimmt die Fluoreszenz ab, was bei pH-Werten von 4,5-4,9 innerhalb der einzelnen Deckschichten beachtet werden muss. Da der pH-Effekt reversibel ist, werden Lösungen von pH - empfindlichen Tracern zur genauen Fluoreszenzmessung gepuffert, was auch in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde.

#### Durchführung der Uraninanalysen im Labor

#### **Erstellung einer Eichkurve**

Bevor die Analyse der Wasserproben aus dem Versuchsgebiet in Angriff genommen wurde, musste zuerst eine Eichgerade erstellt werden. Dadurch kann später von der Fluoreszenzintensität auf den Bromidgehalt der Proben rückgerechnet werden.

Für die Eichlösungen wurde Leitungswasser verwendet, welches mit Hilfe von Stammlösungen bekannter Uraninkonzentration versetzt wurde. Dazu wurden geeignete Pipetten, sowie eine auf +/- 0,1 Gramm genaue elektrische Waage verwendet. Wie der unten aufgeführten Tabelle zu entnehmen ist, wurden insgesamt sechs Lösungen bekannter Konzentration angesetzt und anschließend gemessen. Durch die sechs Messwerte konnte eine Eichgerade angepasst werden. Der Messfehler fiel mit maximal 4,43% recht gering aus.

Uranin- Konzentration [µg/l]	Berechneter Wert aus der Eichgeraden	Gemessener Wert	Abweichung	Abweichung in Prozent
1	3,05	3,14	-0,09	2,95
5	15,257	15,13	0,127	0,83
10	30,514	31,865	-1,351	4,43
20	58,5451	58,805	-0,2599	0,44
40	119,5731	114,9	4,6731	3,91
60	180,6011	186,94	-6,3389	3,51

Tab.2: Messreihe zum Erstellen der Eichgerade.



Abb. 13: Eichgerade von Uranin mit Hilfe von sechs Messwerten aus Lösungen bekannter Uraninkonzentrationen.

#### Vorbereitung der Proben

Die Wasserproben mit sichtbarer Trübung wurden vor der Messung gefiltert, da sonst das Ergebnis verfälscht werden könnte.

Außerdem mussten zwei Proben von Stelle 2.1.1 verdünnt werden, da deren Uraninkonzentration so hoch war, dass die Fluoreszenzintensität deutlich über den maximalen Messbereich hinaus schoss.

Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass Standardlösungen und Wasserproben bei den Fluoreszenzanalysen jeweils Zimmertemperatur aufwiesen, da die Fluoreszenzintensität von Tracern von der Temperatur abhängig ist. Dies hat auf den Tracertransport im Wasser keine Auswirkung, bei der Analyse müssen jedoch Standardlösungen und Proben die gleiche Temperatur aufweisen.

Da die Fluoreszenzintensität auch vom pH – Wert abhängig ist, wurde der pH- Wert der einzelnen Wasserproben mit einem Messstreifen abgeschätzt. Dies ist genauer im Folgenden beschreiben.

### Experiment e zur pH – Abhängigkeit der Fluorszenzintensität des Uranins: Prüfung des pH – Wertes der Wasserproben

Beim Uranin ist die pH-Abhängigkeit der Fluoreszenz zu beachten: Alle Proben müssen daher auf den gleichen pH-Wert gebracht werden, um direkt untereinander vergleichbar zu sein.

Im Rahmen der Korngrössenanalyse vom 12.04.2007 wurden in allen drei Bodenproben saure pH -Werte von 4,5 bis 4,9 gemessen. Durch die Messreihe am 4. Juli 2007 sollte geprüft werden, ob durch Basenzugabe und damit der Erhöhung des pH -Wertes der Wasserproben in neutrale bzw. basische Bereiche die Fluoreszenzintensität zunimmt. Laut Literatur sinkt nämlich die Fluoreszenzintensität des Uranins von 100% bei ph >9 bis auf nur noch rund 25% der maximalen Rückstrahlung bei ph 5 (WERNLI, 1994). Es wurde vermutet, dass das Sickerwasser und demnach auch die gewonnenen Wasserproben ähnliche pH – Werte aufweisen, als die Bodenproben. Da die Proben aus allen drei periglazialen Schichtfolgen wie oben erwähnt unter pH 5 lagen, muss man mit einer mehr als vierfachen Minimierung der maximalen Rückstrahlung bei Uranin rechnen.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **45** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Um diese Annahme zu überprüfen, wurde mit der Probe von Stelle 2.1.2 vom 11. Juni 2007 eine Messreihe am Fluoreszenzspectrometer durchgeführt. Dazu wurde nach gründlichem Durchspülen des Geräts mit destilliertem Wasser zuerst der pH – Wert der Wasserprobe mit einem pH- Stäbchen bestimmt. Dieser lag zwischen 5 und 6. Dann wurde die Fluoreszenzintensität im Doppelscanning – Verfahren bestimmt. Anschließend wurde mehrmals mit destilliertem Wasser zwischengespült. Dann wurde ein Teil der Wasserprobe mit hochverdünnter Natronlauge gepuffert. Diese Natronlauge wurde nur tropfenweise zugegeben, um Verdünnungseffekte mit maximal 3 ml Pufferlösung auf 100 ml Probenvolumen, zu minimieren.

Zuerst wurde die Probelösung auf einen pH von 9-10 gepuffert und in der Folge durch den Fluoreszenzspectrometer geleitet. Im Anschluss wurden dann noch auf pH 10- 11, sowie auf pH 13-14 gepufferte Probenlösungen analysiert. Die Resultate sind im Ergebnissteil dargestellt.

#### 5.3 Experiment zur Sickerwasserbewegung in der Decklage

Während der Begehung mit Dr. Weinzierl wurde ein Experiment innerhalb der Decklage durchgeführt, um nachzuvollziehen, wie bei nassem Bodenzustand das infiltrierte Wasser von der Decke der Tunnels in die Halbröhren gelangen kann. Dabei nässte sich die Tunneldecke an und es bildete sich ein zusammenhängender Wasserfilm aus, der dazu führte, dass das Sickerwasser an den Tunnelwänden seitlich und vorbei an der Halbröhre abfloss. Einzig von der Decke abfallende übernässte Erdpartikel brachten Wasser in die Röhre, aber nicht abtropfendes Sickerwasser. Daher wurden nach diesem Versuch kleine Stöckchen in die Tunneldecke gesteckt, damit das Wasser daran in die Halbröhren abtropfen kann und mehr Sickerwasser aufgefangen werden kann.

#### 5.4 Bodenfeuchtemessungen

#### Bestimmung von Bodenfeuchteprofilen durch elektromagnetische Verfahren

Elektromagentische Verfahren wir TDR oder FDR beruhen auf der Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften des Bodens über welche dann auf den volumetrischen Wassergehalt im jeweiligen Boden umgerechnet wird. Die Sonden sind vom Dielektrikum Boden umgeben. Der Boden besteht aus Luft, welche eine dielektrische Leitfähigkeit, auch Permittivität genannt, von 1 besitzt, der Bodenmatrix (Permittivität ca. 5) und Wasser (Permittivität etwa 80). Daraus wird ersichtlich, dass die dielektrischen Eigenschaften des Bodens maßgeblich vom Wassergehalt bestimmt werden (IHRINGER, BECKER, SCHAEDEL, 2004).

Im Versuchsgebiet des Zastleraufschlusses hat man das Problem der Unkenntnis darüber, in welcher Tiefe das anstehende kristalline Grundgestein beginnt. Die Sohle des Grabens ist mit Geröll und von den Grabenflanken abstürzendem Hangschutt verfüllt. Daher ist es auch sehr schwierig, abzuschätzen, ob die Probenahmstellen in der Basislage in den Tiefenbereich hineinreichen, in welchem sich wahrscheinlich vorwiegend die lateralen Fließprozesse abspielen. Es ist aber eminent wichtig, dass die Beprobung diesen Fließbereich miteinschließt, denn nur dann können die komplexen Wasserbewegungen in den periglazialen Hangsedimenten gesamthaft nachvollzogen werden.

Um genauere Auskünfte über die Verteilung des Wassers innerhalb der periglazialen Deckschichten zu erlangen, bietet sich der Einsatz von TDR- oder FDR-Sonden zur Bestimmungen von vertikalen Bodenfeuchteprofilen an. Generell entscheidet der Feuchtezustand eines Bodens darüber, wie viel Wasser oberflächennah abfließt und zu einem schnellen Abfluss führt (IHRINGER, BECKER, SCHAEDEL, 2004).

Die Time Domain Reflektometrie ist ein bereits lange etabliertes Verfahren zur Bodenfeuchtemessung, bei dem über elektromagnetische Wellen bzw deren Reflektion die mittlere Bodenfeuchte entlang der Sonde bestimmt werden kann. Ein neueres Verfahren namens Spatial TDR macht sogar eine Erstellung eines vertikalen Bodenfeuchteprofils mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung entlang der Sonden möglich (IHRINGER, BECKER, SCHAEDEL, 2004). Das Verfahren besteht aus einer Kombination von

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **47** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

speziellen Messgeräten, außerdem einem neuen Auswertelogarithmus zur Bestimmung von Bodenfeuchteprofilen anhand von gewonnen TDR - Daten, sowie geeigneten Bodenfeuchtesonden. sogenannten Sampling TDR. Die Messwerte solcher Bodenfeuchtesonden liefern jedoch lediglich punktuelle Bodenfeuchtewerte oder Mittelwerte von Feuchten über bestimmte Strecken. Um den Zustand des Bodenwasserspeichers genauer zu beurteilen reichen solche Mittelwerte oft nicht aus, um für die Abflussbildung wichtige Prozesse wie z.B. lokale Sättigung bestimmter Bodenzonen. Auch die Stauung auf Schichten geringerer Durchlässigkeit, wie im Versuchsgebiet beispielsweise an der Schichtgrenze der Decklage zur weniger durchlässigen Hauptlage, oder die Aufsättigung von unten können durch wenige Einzelmessungen nicht differenziert werden. Daher sind Profilmessungen unabdingbar zur verlässlichen Erfassung der lokalen Abflussbereitschaft des Bodens.

Aus diesem Grund wurde im Versuchsgebiet des Zastleraufschlusses ein solches Feuchteprofil mit Hilfe zusammengesetzter Einzelmessungen auf zwei verschiedene Arten erstellt:

- Mit Hilfe von 5 Echo-Sonden des Typs EC-10 mit 10 cm Länge. Die 20 cm lange Version wurde aufgrund ihrer geringeren Stabilität bei den Messungen innerhalb der erfahrungsgemäss instabilen Grabenwänden nicht zum Einsatz gebracht. Diese plättchenförmigen Sonden sind mit einem Datalogger verbunden, der in 5-Minutenabständen die aktuellen Messwerte jeder einzelnen Sonde misst. Dadurch erhält man eine zeitlich hoch aufgelöste Vertikalverteilung der Bodenfeuchte. Ein weiterer Vorteil dieses Sondentyps geht aus der Bauweise hervor. So haben die Echo – Sonden beispielsweise gegenüber der zuvor eingesetzten Thetasonde ein durch das größere Messvolumen (10cm auf 3,2 cm) verbessertes Ansprechen auf Wassergehaltsänderungen. Außerdem reduziert eine spezielle Sensorummantelung die Sensibilität gegen Salze, was wegen des eingespeisten Bromids hilfreich sein könnte. Laut der Herstellerfirma UMS kann die Sonde EC-10 die Bodenfeuchte im Bereich von 0-40 Vol % mit einer Genauigkeit von +-4% erfassen. Die Genauigkeit kann durch einer bodenspezifische Kalibrierung auf +- 2% erhöht werden.
- 2. Durch manuelle Bodenfeuchtemessungen mit einer Thetasonde des Typs ML2x an drei verschiedenen Standorten. Hierbei wurden Vertikalprofile der Bodenfeuchte

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **48** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

erstellt. Die verwendete Thetasonde hat den Vorteil, dass sie robust und wartungsfrei ist und einen geringen Stromverbrauch hat. Thetasonden arbeiten nach der FD-Methode (Frequency Domain) und erreichen laut der Herstellerfirma UMS mit einer Genauigkeit von bis zu 1% volumetrischer Feuchte diejenige von TDR - Sonden. Der Genauigkeitsbereich wird von UMS mit +- 0,05 Vol % angegeben. Bei bodenspezifischer Kalibrierung, die aber am 27. März nicht vorgenommen wurde, kann man die Genauigkeit sogar auf +- 0,01 Vol % steigern. Allerdings muss beachtet werden, dass nur unterhalb ca. 55 Volumenprozent exakt gemessen werden kann. Der bisher gemessene Maximalwert der Bodenfeuchte lag mit 48 Vol % jedoch noch unter dieser Messgrenze.

#### Versuchaufbau der 5 Echo – Sonden am Mittelhang

Am 27. März wurden 4 Echo - Sonden in die Westflanke des Grabens auf Höhe der Beprobungsstelle 2.3.2 eingebracht. Eine Sonde wurde im Übergangsbereich von Deckund Hauptlage in etwa 70 cm Tiefe angebracht, da in dieser Zone bei den Einzelmessungen mit der Thetasonde zusammen mit den Werten aus der Hauptlage mit die höchsten Bodenfeuchten ermittelt wurden. Die nächste Echo-Sonde wurde in einer Tiefe von 105 cm eingeschoben und befindet sich damit etwa in der Mitte der Hauptlage. Dieser Standort wurde gewählt, weil hier die manuelle Thetasonde jeweils ein zweites Maxima angezeigt hatte. Die dritte Sonde wurde an der Grenze der Hauptlage zur Basislage in ungefähr 125 cm Tiefe integriert, wobei aufgrund des vielen Skeletts im Boden die Echo-Sonde nur etwa zur Hälfte eingeschoben werden konnte. Diese Messstelle wurde dann seitlich etwas versetzt installiert, damit sich aufgrund des nicht sachgemäßen Einbaus keine fehlerhaften Werte ergeben. Die vierte Echo-Sonde wurde im unteren Bereich der Basislage eingebaut, was sich aber in dieser kiesig-sandigen Schicht als äußerst schwierig erwies. Teile der Wand rutschten nach dem Einführen der Sonde immer wieder ab und es konnte keine Stelle gefunden werden, an der die Sonde auch nur zur Hälfte mit Erdmaterial ummantelt gewesen wäre. Daher wurde in 220 cm Tiefe ein kleines Loch gegraben, die Sonde hineingelegt und danach zugeschüttet. Deshalb ist auch hier kritisch zu prüfen, ob man angemessene Werte erhält. Dies wird im Ergebnissteil aufgeklärt.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **49** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Auch zu erwähnen ist, dass aufgrund des nicht unerheblichen Skelettanteils die Sonden nicht genau vertikal untereinander angeordnet werden konnte, sondern seitlich leicht versetzt zueinander in die Grabenwand integriert sind. Dies könnte den Vergleich der Messungen wegen der bei der Beprobung mit der Thetasonde nachgewiesenen zum Teil sehr hohen kleinskaligen Variabilität der Bodenfeuchte erschweren.

Ebenfalls ab dem 27. März wurden manuelle Messungen der Bodenfeuchte ins Beprobungsprogramm mit aufgenommen. Dabei wurden am 27.03.2007 mit Hilfe einer Thetasonde des Typs ML2x an drei verschiedenen Standorten Vertikalprofile der Bodenfeuchte erstellt.

Die verwendete Thetasonde hat den Vorteil, dass sie robust und wartungsfrei ist und einen geringen Stromverbrauch hat. Thetasonden arbeiten nach der FD-Methode (Frequency Domain) und erreichen laut der Herstellerfirma UMS mit einer Genauigkeit von bis zu 1% volumetrischer Feuchte diejenige von TDR - Sonden. Der Genauigkeitsbereich wird von UMS mit +- 0,05 Vol % angegeben. Bei bodenspezifischer Kalibrierung, die aber am 27. März nicht vorgenommen wurde, kann man die Genauigkeit sogar auf +- 0,01 Vol % steigern. Allerdings muss beachtet werden, dass nur unterhalb ca. 55 Volumenprozent exakt gemessen werden kann. Der gemessene Maximalwert der Bodenfeuchte lag mit 48 Vol % jedoch noch unter dieser Messgrenze.

Die Messungen am 27. März wurden am 11. und 25. April 2007 durch erneute Messreihen an den selben drei Standorten ergänzt.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **50** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

### 5.5 Infiltrationsversuche

## 5.5.1 Erster Infiltrationsversuch auf der "Insel" im Rahmen der Studenten-Exkursion am 5. Mai 2007

#### Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung:

Am 5. Mai wurde eine Exkursion mit 14 Studenten an den Zastleraufschluss durchgeführt. Nach einer generellen Besprechung des Versuchsgebiets, sowie der bisher durchgeführten Tracerversuche und den daraus resultierenden Ergebnissen und Erkenntnissen, wurde ein Infiltrationsexperiment auf dem Standort Insel in Angriff genommen. Dieser Standort wurde aufgrund seiner zentralen Lage im Graben und der damit verbundenen räumlichen Abgrenzung zu allen Seiten hin gewählt. Außerdem konnte bis dato an sämtlichen Probenahmestellen noch keine Wasserprobe zur Analyse gewonnen werden, was nun durch die künstliche Bewässerung ermöglicht werden sollte.

Bei dem durchgeführten Infiltrationsversuch sollten insbesondere laterale Fließbewegungen mithilfe der bereits vorhandenen Probenahmestellen zum Auffangen des Sickerwassers, sowie mit 7 an der Ostflanke der Insel integrierten Thetasonden nachgewiesen werden. Außerdem erhoffte man sich genauere Auskünfte über die Fließgeschwindigkeiten innerhalb der einzelnen Decklagen. Vorab wurde angenommen, dass sich das Sickerwasser in der tonhaltigen Decklage und der schluffigen Hauptlage im Vergleich zur sandigen Basislage deutlich langsamer bewegt. Dies würde also bedeuten, dass sobald Sonden im Grenzbereich von Hauptlage zur Basislage auf das Sickerwasser reagieren, sprich die Sickerwasserfront die Grenze zur Basislage überschreitet, die in tieferen Bereichen der Basislage befindlichen Sonden recht schnell reagieren müssten. Allerdings ging man davon aus, dass es verhältnismäßig lange dauern würde bis die Feuchtefront die Ober- und Hauptlage durchschritten hat.

Um diese Annahmen zu überprüfen, sollte die Insel intensiv bewässert werden. Dazu wurde vom Angelsbach mithilfe eines 100 m langen Gartenschlauchs Wasser abgezapft und in einen Tank mit regulierbarem Ablauf geleitet. Dann wurde ein 40cm tiefer und etwa 60 cm breiter Graben ausgehoben, der nachträglich sogar noch etwas weiter vertieft wurde. Dies sollte den negativen Einfluss der tonhaltigen Oberlage auf die Infiltrationsrate

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **51** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

minimieren. Um die Fließwege genauer zu beleuchten, wurden zusätzlich zu den 6 bereits vorhandenen Beprobungsrinnen noch 7 Thetasonden in die Ostflanke der Insel eingebracht, die mit einem Datalogger verbunden waren. Dabei wurden 2 Sonden in den Grenzbereich von Oberlage und Hauptlage eingebracht, eine vertikal leicht versetzt unter die Einspeistelle (1), die zweite 2m hangabwärts (7) um eventuelle laterale Wasserbewegungen zu erfassen. Weitere 2 Thetasonden befanden sich im Übergangsbereich von Haupt - und Basislage, wobei die eine etwa einen Meter (3) und die andere einen weiteren Meter in hangabwärtiger Richtung (4) eingebracht wurden. Die Sonde Nr.3 sollte eigentlich möglichst vertikal unter der Einspeisestelle installiert werden, was aber aufgrund des harten, trockenen Bodens und der vielen Steine nicht realisierbar war. Sonde Nr.4 wurden im hinteren Ende des Tunnels der Beprobungsstelle 1.2.1 vergraben, um einen tieferen Zugang in die Grabenwand zu erlangen. Die restlichen 3 Thetasonden wurden alle in die Basislage installiert. Eine Sonde (2) zum Nachweis von vertikalem Fließen wurde in 2,75 m senkrechtem Abstand zur Einspeisestelle im Tunnel der Beprobungsstelle 1.3.1 eingegraben Die nächste Sonde (5) wurde in die Beprobungsstelle 1.3.2 integriert. Einen weiteren Meter hangabwärts wurde der Grabenboden bis in 50 cm Tiefe entfernt, um möglichst die tiefer gelegenen Basislagenbereiche auch mit zu erfassen. Dann wurde die letzte Thetasonde (6) eingeschoben. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 14 dargestellt.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 52 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten



Abb. 14: Versuchaufbau beim 1. Infiltrationsversuch an der "Insel" 05. Mai 2007.

Im Anschluss wurde die konstante Bewässerungsintensität in den Graben so gewählt, dass der Wasserstand im Graben etwa gleich blieb. Dies entsprach während der ersten 90 min rund 1,5 l/min. In der Folge nahm die Infiltrationsrate zu und der Wasserstand sank, weshalb bis zum Ende der Bewässerung nach 4h auf 2,0 l/min erhöht werden konnte. Während der gesamten Versuchsdauer wurden die Werte der Bodenfeuchte für alle sieben Thetasonden im Minutenintervall notiert.

#### 5.6.2 Zweiter Infiltrationsversuch auf der "Insel" am 16. Mai 2007

Am 16. Mai 2007 wurde erneut ein Infiltrationsversuch auf dem Standort Insel durchgeführt. Dabei wurde der gleiche Graben als Einspeisestelle verwendet, wie beim ersten Versuch am 5. Mai. Allerdings wurde nicht mit einer konstanten Wassermenge eingespeist, sondern es wurde stoßweise nachgefüllt, sobald genug Wasser versickert war.

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 53 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Erneut wurde das Wasser des Angelsbach zur Einspeisung genutzt. Die Infiltration war im Vergleich zum 5. Mai deutlich geringer, was vermutlich auf die höhere Vorfeuchte im Versuchsgebiet zurückzuführen ist. So konnten während der Versuchszeit von 3h 36min nur 80 1 Bachwasser eingespeist werden, während es am 5. Mai noch beachtliche 420 1 waren. Weil am 5. Mai 2007 jedoch nur die Sonde im Tunnel 1.3.1 reagierte, wurde der Versuchsaufbau umgestellt (s. Abb. 15). Die Sonden wurden bei diesem Experiment nahezu senkrecht unter dem Einspeisegraben eingebaut. Dies ist als Folge des ersten Infiltrationsversuch zu betrachten, wo sich herausgestellt hatte, dass sich das Sickerwasser annähernd vertikal durch die oberen beiden Deckschichten bewegt. Daher wäre davon auszugehen, dass seitlich angebrachte Sonden wie schon beim ersten Experiment nicht auf die Bewässerung ansprechen würden.



Abb. 15: Versuchsaufbau des 2. Infiltrationsversuchs an der "Insel" am 16. mai 2007.

Sonde 1 wurde 0,85 m unter der Geländeoberkante der "Insel" und demzufolge 0,5 m unter dem Grund des Einspeisegrabens installiert. Diese Sonde Befand sich im Übergangsbereich von der Deck- zur Hauptlage.

Sonde 2 befand sich 0,8 m unter dem Grund des Einspeisegrabens in der oberen Hauptlage, während die Sonden 3 und 4 in 1,2 m vertikaler Distanz in der unteren Hauptlage installiert waren.

Sonde 5 wurde in die obere Basislage in 1,9 m Tiefe, Sonde 6 in die mittlere Basislage in 2,6 m Tiefe und die Sonde 7 in 3,0 m Tiefe unter dem Grund der Einspeisestelle eingesetzt. Die nahezu vertikale Anordnung der Sonden zueinander sollte eine separate Zuordnung maximaler Fliessgeschwindigkeiten des Sickerwassers zu den drei periglazialen Deckschichten ermöglichen.

Die Reaktionszeiten der einzelnen Sonden auf die Bewässerung sind im Ergebnissteil genau dargestellt.

#### 5.6.3 Dritter Infiltrationsversuch auf der "Insel" am 28. Mai 2007

Am 28. Mai 2007 wurde ein weiterer Infiltrationsversuch in Angriff genommen, um zusätzlich zu den vertikalen Fließzeiten des Sickerwassers auch Aufschluss über laterale Fließbewegungen zu erlangen. Dazu wurden 5 Thetasonden in der Basislage installiert und 2 weitere Feuchtesonden senkrecht unter der Einspeisestelle in den Übergangsbereichen Decklage-Hauptlage und Hauptlage-Basislage eingebaut. Leider war der Standort "Insel" durch die zwei vorherigen Infiltrationsversuche merklich instabiler geworden, was dazu führte, das die Westflanke während der Bewässerung einstürzte. Dadurch wurde der Versuchsaufbau zerstört und das Experiment musste abgebrochen werden.

Somit konnten am Standort "Insel" durch die Infiltrationsversuche nur vertikale Fließbewegungen gemessen werden. Laterale Wasserflüsse jedoch konnten durch die Experimente an diesem Standort nicht nachgewiesen werden.

Leider wurde durch den Einsturz der Ostflanke die "Insel" als Standort für Infiltrationsversuche unbrauchbar, da in der Folge zu wenig Fläche für einen Einspeisegraben zur Verfügung stand.

## 5.6.4 Vierter Infiltrationsversuch an der Westflanke des oberen Grabenbereichs, Standort "Birke" am 11. Juni 2007

Am 11. Juni wurde ein neuer Standort für Infiltrationsexperimente getestet. Dieser befindet sich an der Westflanke des oberen Grabenbereichs in unmittelbarer Umgebung einer Birke. Daher wird dieser Standort "Birke" benannt. Er sollte zusätzlich zu den lateraler Fließomponenten auch Aufschluss über den Einfluss tiefreichender Wurzeln auf den Wassertransport durch die Erdschichten geben.

Der Versuchsaufbau ist deckungsgleich mit jenem vom 18. Juni 2007 und ist im Folgenden genauer beschrieben.

Im Gegensatz zum darauf folgenden Versuch am Standort "Birke" wurde der Einspeisegraben einen halben Meter oberhalb der Birke ausgehoben. Der Einspeisegraben befand sich somit gegenüber der Sonden etwa 1,5 m weiter oben am Hang. Der Versuchsaufbau wurde so gewählt, weil die Wurzeln meist nicht senkrecht verliefen, sondern oft schräg in hangabwärtiger Richtung. Da sich entlang von Wurzeln häufig Makroporenfluss ausbildet, wurde angenommen, dass sich das Sickerwasser ebenfalls nicht rein vertikal bewegt, sondern vermehrt den Wurzeln folgend in lateraler Richtung.

Um die Annahme, dass die Wurzeln einen signifikanten Einfluss auf die Fließwege ausüben, zu überprüfen, schien oben beschriebener Versuchsaufbau geeignet zu sein.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 56 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Abb. 17: Waagrechte Abmessungen beim 4. Infiltrationsversuch.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 57 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Abb. 18: Senkrechte Abmessungen beim 4. Infiltrationsversuch.

## 5.6.5 Fünfter Infiltrationsversuch an der Westflanke des oberen Grabenbereichs, Standort "Birke" am 18. Juni 2007

Am 18. Juni 2007 wurde nochmals ein Infiltrationsversuch zum Nachweis lateraler Fließbewegungen innerhalb der Basislage durchgeführt.

Um Interflow erfassen zu können, erschien es angesichts der Erfahrungen aus den bisherigen Infiltrationsexperimenten als sehr wichtig, die Sonden in möglichst grosser Tiefe in die Basislage einzubauen. Dadurch sollte die Chance verbessert werden, die lateralen Fließprozesse, welche sich vermutlich nur wenig über dem anstehenden Festgestein abspielen, zu erfassen.

Als Versuchstandort wurde die Westflanke im oberen Bereich des Grabens etwa 10 m unterhalb des Waldwegs ausgewählt, weil dort der Graben mit fast 4 m seine größte Tiefe erreicht. Dies bildete die Grundlage für eine möglichst tiefe Installation der Thetasonden in der Basislage. Zusätzlich wurde der Grabenboden durch Abschaufeln um einen weiteren halben Meter vertieft, so dass die Sonden alle etwa 4 m tief unter der Erdoberfläche eingebaut werden konnten

Wie bei den vorherigen Infiltrationsversuchen waren wiederum 7 Thetasonden im Einsatz, welche mit einem Micromec Datalogger, der im 1-min-Intervall die Bodenfeuchte in Volumenprozent aufzeichnete, gekoppelt waren.

Bei den im Folgenden angeführten Tiefenangaben der einzelnen Thetasonden ist zu berücksichtigen, dass die Werte sich auf den Abstand von der Erdoberfläche beziehen. Zur Berechnung der Sickergeschwindigkeiten innerhalb der Deckschichten wurden daher die 40 cm Grabentiefe von der Gesamttiefe abgezogen.

Der Versuchsaufbau wurde so gewählt, dass eine umfangreiche Beprobung innerhalb der Basislage gewährleistet war. Lediglich die Sonden Nr.1, im Übergangsbereich von Deckund Hauptlage in 1m Tiefe, und Nr.2 in der Mitte der Hauptlage in 1,35 m Tiefe, waren oberhalb der Basislage angebracht worden.

Bei diesen oberen Sonden wurde darauf geachtet, dass sie sich nahezu senkrecht unter dem Einspeisegraben befanden, da bei seitlich versetztem Einbau nach den Erfahrungen der Vorversuche die Gefahr bestanden hätte, dass das Sickerwasser an den Sonden vorbeifließt. Zusätzlich wurden zwei weitere Thetasonden in die mittlere Basislage

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 59 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

eingebracht, eine davon senkrecht unter dem Infiltrationsgraben in 2,8 m Tiefe (Nr. 3) und die andere 1,4 m hangabwärts in 2m Tiefe (Nr. 7).

Um die lateralen Fließprozesse in der Basislage zu erfassen, wurden zudem im unteren Bereich dieser kiesig-sandigen Schicht nochmals drei Thetasonden installiert. Dazu wurden im Grabenboden 0,5m tiefe Löcher ausgehoben, um die Sonden in möglichst grosser Tiefe einschieben zu können. Sonde Nr. 4 wurde senkrecht unter der Einspeisestelle in 4,2 m Tiefe eingesetzt. Sonde Nr. 5 befand sich seitlich um 1,4 m hangabwärts versetzt in 3,5 m Tiefe und Sonde Nr. 6 um weitere 1,25m hangabwärts in 3,1 m Tiefe. Sonde Nr. 5 und 6 sollten die lateralen Wasserflüsse innerhalb der Basislage aufzeichnen und nahmen damit im Rahmen dieses Versuchs die Schlüsselrolle ein.



Abb. 19: Waagrechte Abmessungen beim 5. Infiltrationsversuch an der "Birke".

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **60** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten



Abb. 20: Senkrechte Abmessungen beim 5. Infiltrationsversuch an der "Birke".

#### **Fließgeschwindigkeiten**

Sonde 1 wurde am Übergang von der Deck- zur Hauptlage installiert, um der Decklage eine maximale Fließgeschwindigkeit zuordnen zu können.

Sonde 2 befand sich im mittleren Bereich der Hauptlage und konnte zur Berechnung der maximalen Fließgeschwindigkeit im oberen Hauptlagenbereich herangezogen werden.

Sonde 3 wurde in die mittleren Basislage eingesetzt , wodurch die maximale Sickergeschwindigkeit durch den oberen Teil der Basislage abgeschätzt werden sollte. Sonde 4 befand sich in der unteren Basislage. Dadurch sollte auch dem unteren Bereich dieser Schichtfolge eine maximale Fließgeschwindigkeit zugeordnet werden.

Die nahezu vertikale Anordnung der Sonden untereinander machte die oben beschriebene Unterteilung der periglazialen Deckschichten möglich. Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 61 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Tracerversuche Natriumbromid:

#### 6.1.1 Bromidversuch am Standort "Insel"

An der "Insel", an welcher bereits am 27. Dezember 2006 1kg Natriumbromid gelöst in 9 Litern Bachwasser eingespeist wurde, war bis zum 25. April 2007 kein Sickerwasser in den Auffangrinnen der Beprobungsstellen angekommen. Dann war an Stelle 1.3.2 zur lateralen Beprobung der Basislage 1ml in der Flasche. Die Analyse ergab jedoch, dass darin kein Bromid enthalten war.

Aufgrund der ausbleibenden Wasserproben wurde die "Insel" am 5. Mai 2007 im Rahmen einer Studentenexkursion intensiv bewässert. Daraufhin konnten noch am gleichen Tag zwei Proben aus der vertikalen Beprobungsstelle 1.3.1 entnommen werden. Die erste Wasserprobe mit einem Volumen von 100 ml wurde 190 min nach Beginn der Bewässerung sichergestellt und enthielt 244,3 mg Bromid pro Liter. Die zweite Wasserprobe nach 230 min Bewässerung aus der Stelle 1.3.1 lieferte 110 ml mit einer gegenüber der ersten Probe angestiegenen Bromidkonzentration von 645,1 mg/l.

Datum	Probestelle	Wasser- menge [ml]	Bromid [mg/l]	Rückerhalt Bromid [mg]
25. Apr 07	1.3.2	1	0	0
05. Mai 07	1.3.1,190min	100	244,3	24,43
05. Mai 07	1.3.1, 230min	110	645,4	70,994
11. Mai 07	1.3.1	82	361,6	29,6512
11. Mai 07	1.1.1	16	0,49	0,00784
16. Mai 07	1.1.1	87	0,14	0,01218
29. Mai 07	1.1.2	6	0,23	0,00138
31. Mai 07	1.3.1	54	2,89	0,15606
11. Jun 07	1.1.2	6	0,46	0,00276
11. Jun 07	1.3.2	25	0,28	0,007
11. Jun 07	1.3.1	7	0,84	0,00588

Tab. 3: Wassermenge, Bromidkonzentration und Rückerhalt am Standort "Insel"

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **62** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

18. Jun 07	1.3.1	10	0	0
18. Jun 07	1.3.2	20	0,05	0,001
09. Jul 07	1.3.1	15	0,58	0,0087
09. Jul 07	1.3.2	20	0	0
				125,278

6 Tage darauf, am 11.05.2007, zeigten 1.1.1, sowie wiederum 1.3.1 eine Reaktion auf die Bewässerung, wobei an 1.1.1 lediglich 16 ml mit 0,49 mg Bromid pro Liter ankamen, während an 1.3.1 82 ml mit einer Bromidkonzentration von 361,6 mg/l zu verzeichnen waren. Damit war die Tracerkonzentration an Beprobungsstelle 1.3.1 gegenüber dem Vorwert vom 05.05.2007 (645,1 mg/l) deutlich abgesunken.

Am 16. Mai 2007 waren an 1.1.1 sogar 87 ml Wasser in der Probeflasche, wobei die Bromidkonzentration auf 0,14 mg/l zurückgegangen war.



Abb. 21: Verlauf der Bromidkonzentration an den einzelnen Beprobungsstellen am Standort "Insel" vom 25.04 – 09.07.2007.

Bis am 29. Mai 2007 waren dann am Standort "Insel" keine weiteren Wasserproben zu verzeichnen, dann konnte an Stelle 1.1.2 mit 6 ml die erste Wasserprobe gewonnen werden. Die Bromidkonzentration lag mit 0,23 mg/l im Bereich derer von der anderen Stelle in der Decklage (1.1.1).

Am 31.05.2007 lieferte 1.3.1 die nächste Wasserprobe mit einem Volumen von 54 ml und einem stark abgesunkenen Tracergehalt von nur noch 2,89 mg Bromid pro Liter.

11 Tage später, am 11. Juni 2007, wurden an 1.1.2, sowie an 1.3.1 und 1.3.2 Wasserproben gewonnen. Dabei lag das Volumen an 1.12 bei 6 ml, während die Bromidkonzentration mit 0,46 mg/l leicht angestiegen war. An 1.3.1 waren 7 ml mit 0,84 mg Bromid pro Liter angekommen. Die Bromidkonzentration war also gegenüber dem 31.05.2007 noch weiter zurückgegangen. Die Stelle 1.3.2 lieferte 25 ml mit einer Bromidkonzentration von 0,28 mg/l, wobei dies den ersten Bromidnachweis an dieser Probenahmestelle darstellte.

Eine Woche später, am 18.06.2007, kamen an 1.3.1 10 ml an, in denen jedoch kein Bromid mehr nachweisbar war. 1.3.2 lieferte an diesem Tag 20 ml, wobei die Bromidkonzentration nur noch 0,05 mg/l erreichte.

Beim letzten Beprobungstermin waren wiederum 1.3.1 mit 15 ml und 1.3.2 mit 20 ml aktiv. Jedoch war an beiden Probenahmestellen zu dieser Zeit kein Bromid mehr nachweisbar.



Abb. 22: Verlauf der Bromidkonzentration und Wasservolumen der Proben von Stelle 1.1.1 vom 25. April bis 9. Juli 2007.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **64** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten



Abb. 23: Verlauf der Bromidkonzentration und Wasservolumen der Proben von Stelle 1.1.2 vom 25. April bis 9. Juli 2007.



Abb. 24: Verlauf der Bromidkonzentration und Wasservolumen an Stelle 1.3.2 vom 25. April bis 9. Juli 2007.





Abb. 25: Verlauf der Bromidkonzentration und Wasservolumen der Proben vom 25. April bis 9. Juli 2007.

Am 5. Mai 2007 konnte mit Hilfe der intensiven Bewässerung im Rahmen des ersten Infiltrationsversuchs Proben aus der vertikalen Beprobungsstelle 1.3.1 entnommen werden. Dabei wurde eine maximale Bromidkonzentration von 645,1 mg/l, wobei dies den Höchstwert sowohl an Stelle 1.3.1, als auch am gesamten Beprobungsstandort "Insel" darstellte. In der folgenden Woche war eine Abnahme des Bromidgehalts um fast 50% auf 361,6 mg/l zu verzeichnen, welche jedoch im obigen Diagramm aufgrund der logarithmischen Skalierung nicht sehr deutlich erkennbar ist.

Im weiteren Verlauf ist auf Abb.. die kontinuierliche Abnahme der Tracerkonzentration gut ersichtlich. Am 18. Juni 2007 war dann an der Probenahmestelle 1.3.1 kein Bromid mehr nachweisbar.

Ebenso wie der Rückgang der Bromidkonzentration, ist auch die tendenzielle Abnahme des Wasservolumens zu erkennen, wobei Ende Juni dieses aufgrund weiterer Infiltrationsversuche nochmals leicht anstieg. Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **66** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten



#### Rückerhalt des Bromids am Standort "Insel"

Abb. 26: Rückerhalt des Bromids am Standort "Insel" im Zeitraum vom 25.April bis 9. Juli 2007.

Aus dem obigen Diagramm ist deutlich ersichtlich, dass die Stelle 1.3.1 zur vertikalen Beprobung in der Basislage den mit Abstand höchsten Rückerhalt an Bromid aufweist. Insgesamt kamen an diesem Standort 125,24 mg Bromid an.

Auch 1.1.1 liegt mit 0,09 mg noch mehr als 10 - bzw. 20 mal so hoch wie 1.3.2 (0,008) und 1.1.2 (0,004).

### 6.1.2 Bromidversuch am Standort Mittelhang

#### Wasserproben und Bromidgehalt vom 9. Januar bis 9. Juli 2007

Im Januar 2007 lieferten lediglich die Probenahmestellen in der Basislage Wasserproben, während jene in der Deck- und Hauptlage trocken blieben. In den Monaten Februar und März dagegen konnten ausschließlich aus der Decklage Wasserproben gewonnen werden, während in den Probestellen in der Haupt- und Basislage in diesem Zeitraum kein Wasser aufgefangen werden konnte. Somit lieferten Deck- und Basislage in unterschiedlichen Zeiträumen Wasserproben. Die in der Hauptlage integrierten Beprobungsstellen hingegen blieben über den gesamten Beprobungszeitraum vom 9. Januar bis 9. Juli 2007 trocken.

Am 9. und 10. Januar konnte je eine Probe aus der Stelle 2.3.2 gewonnen werden, wobei dieser Beprobungsstandort zum damaligen Zeitpunkt auch der einzig fertiggestellte war. Die Probe vom 9. Januar lieferte eine Wassermenge von 10 ml bei einer Bromidkonzentration von 0,76 mg/l und dementsprechend eine Netto-Bromidmenge von 0,0076 Gramm. Am 10. Januar konnten 8 ml Wasser mit einem Bromidgehalt von 0,58 mg/l und einem Nettogehalt von 0,00464 Gramm Bromid aufgefangen werden.

Trotz der Fertigstellung der anderen sechs Probenahmestellen bis zum 12. Januar, konnte die nächste Wasserprobe erst am 19. Januar an den Stellen 2.3.1 und 2.3.2 gewonnen werden. Die Wassermenge am Beprobungsstandort 2.3.1 für vertikale Sickerströme lag bei 48 ml, der Bromidgehalt erreichte 0,35 mg/l, was einen Gesamtgehalt von 0,0168 Gramm Bromid ergab. Stelle 2.3.2 zur Erfassung der lateralen Ausbreitung des Tracers lieferte 34 ml bei einem Bromidgehalt von 0,2 mg/l. Dies entspricht einem Gesamtgehalt von 0,0068 Gramm Bromid in dieser Probe.

An der dritten Beprobungsstelle 2.3.3 zum Nachweis lateraler Fließprozesse in der Basislage, welche mit 7,8 m am weitesten von der Einspeisestelle entfernt liegt, waren bis zu diesem Zeitpunkt nur wenige Tropfen in der Flasche und sie wurde deshalb nicht durch eine neue Probeflasche ersetzt. Dafür war an Stelle 2.3.3 am 29. Januar 2007 die Probeflasche mit etwa 25 ml Wasser gefüllt und wurde daher abgeschraubt und sichergestellt. Bei einer Wassermenge von 25 ml lag der Bromidgehalt 1,14 mg/l, was

einen Gesamtgehalt der Probe von 0,0285 Gramm Bromid ergibt. Damit erreichte diese Probe den bis dato höchsten Wert der Beprobungsstellen in der Basislage.

Am 31. Januar 2007 waren der unteren Beprobungsstelle 2.3.3 für laterales Fließen in der Basislage bereits wieder 18 ml zugeflossen. Die Entnahme der Probe erfolgte um 15 Uhr bei trockenen Wetter und etwa 5°C. Der Bromidgehalt war gegenüber dem 29. Januar deutlich auf von 0,25 mg/l gesunken. Der Gesamtgehalt an Bromid sank auf 0,0045 Gramm.

## Bromidkonzentrationen und Wassermengen an den Beprobungsstellen der Basislage im Januar 2007



Abb. 27: Bromidkonzentrationen (obere Grafik), sowie aufgefangene Wassermengen (untere Grafik) im Januar 2007 an den drei Probenahmestellen in der Basislage.
### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **69** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Am 7. Februar konnte zum ersten Mal eine Wasserprobe aus der Decklage gewonnen werden. An Stelle 2.1.1 war die Probeflasche mit 100 ml randvoll, der Bromidgehalt erreichte mit 4,33 mg/l der derzeitigen Spitzenwert. Dies entsprach einer Gesamtmenge von 0,433 mg Bromid.

Am 13. Februar lieferten erneut 2.1.1 und 2.1.2 Wasserproben. In 2.1.1 befanden sich 30 ml, aus Probenahmestelle 2.1.2 konnten sogar 50 ml entnommen werden.

Dabei ist zu beachten, dass Stelle 2.1.1 am Rinnenausgang durch Abrutschen des darüber liegenden Hangteils verschüttet wurde und dadurch theoretisch für direkten Niederschlagseintrag freigelegt war. Dies wurde dann durch eine umfangreichere Abdeckung mittels Planen wieder verdeckt. Die restlichen Rinnen waren alle trotz der vorhergehenden Niederschlagsereignisse und des Abschmelzens der etwa 10 cm mächtigen Schneedecke trocken.

Ab dem 27. Februar 2007 wurde das Routinebeprobungsprogramm im Graben um drei weitere Messpunkte erweitert. Es wurden aus dem kleinen Bächle im Bereich des Unterhangs, sowie aus dem Zastlerbach vor der Einmündung des Angelbsbach, und dem Angelsbach direkt vor dessen Mündung in den Zastlerbach je eine 100ml-Probe entnommen. Dadurch kann man nachweisen, ob sich das im Hang eingespeiste Bromid eventuell bis in den Vorfluterbereich ausbreiten konnte. Es ist aber zu beachten, dass es sich dabei nur um eine Momentaufnahme handelt und somit die Chance Bromid nachzuweisen klein ist, selbst wenn geringe Mengen des Tracers in den umliegenden Gewässern ankommen.

Am 27. Februar lieferte 2.1.2, die zweite Beprobungsstelle in der Decklage, erstmalig eine Wasserprobe. Auch diese Probeflasche war mit 100ml voll angefüllt und erreichte mit 72,84 mg/l Bromid und folglich 7,284 mg Bromid in der gesamten Probe den absoluten Rekordwert bis zum Ende der ersten Messreihe. Direkter Eintrag von fallendem Niederschlag in die Rinne konnte ausgeschlossen werden. Alle sonstigen Probestellen waren trocken.

## Bromidkonzentrationen und Wassermengen an den Beprobungsstellen der Decklage im Februar 2007



Abb. 28: Bromidkonzentrationen (obere Grafik), sowie aufgefangene Wassermengen (untere Grafik) im Februar 2007 an den zwei Probenahmestellen in der Decklage.

Am 1. März waren den beiden in der Decklage angebrachten Stellen 2.1.1 und 2.1.2 Wasser zugeflossen. Bei Stelle 2.1.1 waren es 40 ml Wasser mit einem Bromidgehalt von 0,65 mg/l (Bromidmenge 0,026 mg), was damit gegenüber dem 7. Februar einem starken Rückgang entsprach. Stelle 2.1.2 enthielt 62 ml mit einem Bromidanteil von 22,07 mg/l und damit einer Bromidmenge von 1,368 mg. Die ab dem 7. Februar ins Beprobungsprogramm integrierten Proben aus dem kleinen Bächle am Fuß des Steilhangs, dem Zastlerbach, sowie dem Angelsbach ergaben bis zur Analyse am 22. März keinerlei Spuren von Bromid.

Am 2. März konnten an 2.1.2 100ml Wasser sichergestellt werden. Der Bromidgehalt dieser Probe lag bei 34,29 mg/l, was eine Bromidmenge von 3,429 mg ergibt.

Am 16. März waren in der Flasche von Stelle 2.1.2 7 ml Wasser mit einem im Vergleich zu den vorherigen Proben aus diesem Standort leicht zurückgegangen Bromidanteil von 26,32 mg/l (Bromidmenge 0,184 mg).

Ebenfalls am 16. März 2007 lieferte Stelle 2.1.1 eine Wasserprobe mit 22ml, wobei der Bromidgehalt im Vergleich zu den zwei vorangegangenen Proben dieser Stelle mit 7,4 mg/l erhöht war (Bromidmenge 0,1628 mg).



Abb. 29: Bromidkonzentrationen (obere Grafik), sowie aufgefangene Wassermengen (untere Grafik) im März 2007 an den zwei Probenahmestellen in der Decklage.

Am Standort Insel waren bis zum Ende der ersten Messreihenanalyse am 22. März 2007 sämtliche Flaschen trocken. Nur an 1.3.2 waren lediglich wenige Tropfen enthalten, so dass die Flasche auch an diesem Standort noch nicht ausgetauscht wurde.

Wichtig zu erwähnen ist, dass an Stelle 1.2.1 Schmutzringe an den Seitenwänden der leeren Flasche zu erkennen waren, was auf Verdunstungsprozesse und damit verbundenen Wasserverlust aus der Flasche hindeuten könnte. Diese Vermutung konnte jedoch bei genauerer Beobachtung im Rahmen der folgenden Beprobungstage nicht bestätigt werden. Die Probenahmen bis einschließlich 9. Juli 2007 sind nicht einzeln beschrieben, da in diesem Zeitraum keine besonderen Vorkommnisse zu verzeichnen waren. Die Wassermenge, sowie deren Bromidkonzentration und Bromidgehalt in mg sind der unten aufgeführten Tabelle zu entnehmen.

		Wasser-	Bromid	Rückerhalt
Datum	Probestelle	[ml]	[mg/l]	Bromid [g]
09. Jan 07	2.3.2	10	0,76	0,0076
10. Jan 07	2.3.2	8	0,58	0,00464
19. Jan 07	2.3.1	48	0,35	0,0168
19. Jan 07	2.3.2	34	0,2	0,0068
29. Jan 07	2.3.3	25	1,14	0,0285
31. Jan 07	2.3.3	18	0,25	0,0045
07. Feb 07	2.1.1	100	4,33	0,433
07. Feb 07	Angelsbach	100	0	0
07. Feb 07	kl. Bächle	100	0	0
07. Feb 07	Zastlerbach	100	0	0
27. Feb 07	Angelsb	100	0	0
27. Feb 07	kl. Bächle	100	0	0
27. Feb 07	Zastlerbach	100	0	0
27. Feb 07	2.1.2	100	72,84	7,284
01. Mrz 07	2.1.1	40	0,65	0,026
02. Mrz 07	2.1.2	62	22,07	1,36834
02. Mrz 07	2.1.2	100	34,29	3,429
16. Mrz 07	2.1.2	7	26,32	0,18424
16. Mrz 07	2.1.1	22	7.4	0.1628

Tab. 4: Wasserproben und Bromidgehalt vom 9. Januar bis 9. Juli 2007.

19. Mrz 07	Zastlerbach	100	0	0
19. Mrz 07	kl. Bächle	100	0	0
19. Mrz 07	Angelsbach	100	0	0
27. Mrz 07	2.3.3	45	0	0
27. Mrz 07	Angelsbach	100	0	0
27. Mrz 07	kl. Bächle	100	0	0
27. Mrz 07	Zastlerbach	100	0	0
28. Mrz 07	2.3.3	10	0	0
28. Mrz 07	kl. Bächle	100	0	0
03. Apr 07	Angelsach	100	0	0
03. Apr 07	Zastlerbach	100	0	0
04. Apr 07	2.1.1	35	989,93	34,623
04. Apr 07	kl. Bächle	100	0,1	0,01
11. Apr 07	Zastlerbach	100	0	0
11. Apr 07	Angelsbach	100	0,06	0,006
11. Apr 07	kl. Bächle	100	0	0
18. Apr 07	Angelsbach	100	0,22	0,022
18. Apr 07	Zastlerbach	100	0	0
25. Apr 07	2.3.2	1	0	0
25. Apr 07	Angelsbach	100	0	0
25. Apr 07	kl. Bächle	100	0	0
25. Apr 07	Zastlerbach	100	0,08	0,008
02. Mai 07	kl. Bächle	100	0	0
02. Mai 07	Zastlerbach	100	0	0
02. Mai 07	Angelsbach	100	0	0
11. Mai 07	2.1.2	5	7,76	0,0388
11. Mai 07	2.3.3	42	0,29	0,01218
16. Mai 07	2.3.3	51	0,27	0,01377
23. Mai 07	2.3.3	49	0,12	0,00588
23. Mai 07	Angelsbach	100	0	0
23. Mai 07	2.1.2	34	1,69	0,05746
23. Mai 07	kl. Bächle	100	0	0
23. Mai 07	Zastlerbach	100	0	0
29. Mai 07	Zastlerbach	100	0	0
29. Mai 07	Angelsbach	100	0	0
29. Mai 07	kl. Bächle	100	0	0
31. Mai 07	2.3.3	12	0	0
11. Jun 07	2.1.2	300	0,8	0,24
11. Jun 07	2.1.1	82	145,17	11,90394
11. Jun 07	Zastlerbach	100	0	0

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 73 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 74 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

11. Jun 07	Angelsbach	100	0	0
11. Jun 07	kl. Bächle	100	0	0
18. Jun 07	2.1.2	210	0	0
18. Jun 07	2.3.2	5	0	0
18. Jun 07	2.3.3	10	0	0
26. Jun 07	2.1.2	35	0,08	0,0028
09. Jul 07	2.3.3	15	0,07	0,00105
				<u>59,9011</u>

Obige Tabelle verdeutlicht, dass in an allen Beprobungsstellen Bromid nachgewiesen werden konnte.

Auch fast alle Wasserproben enthielten Bromid, wobei ab Juni 2007 die Konzentrationen stark nachließen oder zum teil auch gar kein Bromid mehr vorhanden war.

Auffallend hohe Bromidkonzentrationen traten anllen voran an Stelle 2.1.1 auf., aber auch bei Stelle 2.1.1 lagen sie signifikant über denen der drei Beprobungsstandorten in der Basislage. Dieses Resultat ergab sich einerseits aus der höheren in den Halbröhren aufgefangenen Wassermenge der Stellen in der Decklage und andererseits dadurch, dass diese zusätzlich auch eine wesentlich höhere Bromidkonzentration aufwiesen.

Am 4. April 2007 wurde an Stelle 2.1.1 mit 0,989 g/l die mit Abstand höchste Bromidkonzentration und gemessen und mit 34,623 mg auch der deutlich höchste Rückerhalt bei den Einzelproben registriert.

Die genauen Ergebnisse des Rückerhalts für jede einzelne Probenahmestelle, in Verbindung mit den Wassermengen, sowie den durchschnittlichen Bromidgehalten sind im Folgenden grafisch dargestellt und kurz beschrieben.





Abb. 30: Rückerhalt Bromid und aufsummierte Wassermengen der Einzelproben am Mittelhang vom 9. Januar bis 9. Juli 2007, geordnet nach den einzelnen Beprobungsstandorten.





Abb. 31: Rückerhalt Bromid am Mittelhang vom 9. Januar bis 9. Juli 2007, geordnet nach den einzelnen Beprobungsstandorten.

Aus der Hauptlage tropfte bis zum Ende der Messungen am 9. Juli 2007 gar kein Sickerwasser in die Halbröhren.

Beim Standort "Insel" ist zu beachten, dass außer der 1 ml- Probe von Stelle 1.3.2 am 25. April 2007, erst nach den drei Infiltrationsversuchen vom 5., 16. und 28. Mai 2007 Wasserproben aus den Beprobungsrinnen gewonnen werden konnten.

### 6.2 Tracerversuch Uranin am Mittelhang

### Ergebnisse der Uraninanalysen vom 27. März – 9. Juli 2007

Bereits 24 Stunden nach der Einspeisung konnte Uranin an Stelle 2.3.3, welche 8 m von der Einspeisestelle entfernt liegt, nachgewiesen werden. Hier konnte eine Uraninkonzentration von 256,75  $\mu$ g/l und einer Wassermenge von 10 ml gemessen werden. Dies ergibt einen gesamten Uraningehalt von 2,57  $\mu$ g in dieser Probe.

6 Tage nach der Einspeisung konnte lediglich an Stelle 2.1.1, welche direkt vertikal in 60-70 cm Tiefe unter dem Einspeisegraben liegt, eine Wasserprobe gewonnen werden. In diesem Zeitraum war auch nur eine Niederschlagsmenge von 2,0 l/m<sup>2</sup> gefallen. An der auffälligen gelblichen Färbung war sofort vor Ort erkennbar, dass der Tracer Uranin bereits den Weg bis in die Auffangrinne 2.1.1 gefunden hatte. An sämtlichen anderen Beprobungsstellen, auch an jenen mit einigen Tropfen in den Probeflaschen, war zu diesem Zeitpunkt noch keine Gelbfärbung zu erkennen. Die 35 ml - Wasserprobe von Stelle 2.1.1 am 4. April, also eine Woche nach der Einspeisung des Uranins, enthielt 184,43 mg/l , was einen Rückerhalt von 6,46 mg ergibt.

Am 25. April 2007 war an der Beprobungsstelle 2.3.2 nur 1 ml Sickerwasser angekommen. Dieses Wasservolumen war aber für die Analysen im Labor zu gering und wurde daher mit destilliertem Wasser auf 10 ml verdünnt und anschließend gemessen. Es war jedoch kein Uranin in dieser Probe enthalten.

Im April 2007 gab es aufgrund der sehr geringen Niederschlagsmengen kaum Wasserproben an den einzelnen Messpunkten am Mittelhang zu verzeichnen.

Erst am 11.05.2007 konnte an Stelle 2.33 die nächste Wasserprobe gewonnen werden. Die 42 ml- Probe hatte eine Uraninkonzentration von 32,76 µg/l und dementsprechend einen Rückerhalt von 1,38 µg. Am\_gleichen Tag\_lieferte\_auch\_Stelle\_2.1.2 eine\_Probe. Ihr Volumen betrug 5ml, es konnte darin jedoch kein Uranin nachgewiesen werden.

Am 16.05.2007 waren an den Stellen 2.3.1 zur vertikalen Beprobung in der Basislage 87 ml und an 2.3.3 zur lateralen Beprobung der Basislage 51 ml angekommen. Dabei erreichte die Probe von 2.3.1 eine Uraninkonzentration von 115,12  $\mu$ g/l (Rückerhalt 10,02  $\mu$ g) und an 2.3.3 wurden 37,84  $\mu$ g/l (Rückerhalt 1,93  $\mu$ g) gemessen.

Kommentar [H1]:



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **78** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> <u>periglazialen Decksedimenten</u>

Abb. 32: Verlauf der Uraninkonzentration an den einzelnen Beprobungsstellen, sowie des Niederschlags im Zeitraum 27. März bis 9. Juli 2007.

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **79** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Innerhalb einer Woche, bis zum am 23. Mai 2007, kamen 34 ml Sickerwasser an Stelle 2.1.2 und 49 ml am Beprobungsstandort 2.3.3 an. Die Uraninkonzentrationen betrugen an 2.1.2 46,76  $\mu$ g/l (Rückerhalt 1,59  $\mu$ g), und an 2.3.3 14, 48  $\mu$ g/l (Rückerhalt 0,71  $\mu$ g). Am 31. Mai 2007 reagierte mit einer Wasserprobe von 12 ml erneut 2.3.3, wobei die Uraninkonzentration bei 17,61  $\mu$ g/l lag, was einen Rückerhalt von 0,21  $\mu$ g Uranin ergibt. Innerhalb der Woche bis zum 6. Juni 2007 kam kein Wasser a 'n den Beprobungsstellen am Mittelhang an.

Am 11. Juni konnten an den zwei Standorten in der Decklage (2.1.1, 2.1.2) Wasserproben entnommen werden. Dabei lieferte 2.1.1 82 ml Wasser mit einer Uraninkonzentration von 5665,11  $\mu$ g/l (Rückerhalt 464,54  $\mu$ g), während an 2.1.2 sogar 300 ml gewonnen werden konnten. An 2.1.2 erreichte die Uraninkonzentration jedoch nur 19,59  $\mu$ g/l, woraus sich ein Rückerhalt von 5,88  $\mu$ g Uranin berechnen lässt.

Innerhalb der folgenden 7 Tage waren bis zum 18.06.2007 an 2.1.2 210 ml, an 2.3.1 5ml und an 2.3.3 10 ml Sickerwasser angekommen. An der Lateralbeprobung in der Decklage (2.1.2) wurde eine Uraninkonzentration von 0,42  $\mu$ g/l gemessen (Rückerhalt 0,09  $\mu$ g), an 2.3.1 lag der Wert bei 59,31  $\mu$ g/l (Rückerhalt 0,30  $\mu$ g) und an 2.3.3 bei 26,45  $\mu$ g/l (Rückerhalt 0,26  $\mu$ g).

Bis zum 22. Juni, 2007 waren noch keine weitere Wasserproben zu verzeichnen.

Am 26. Juni waren dann jedoch an 2.1.2 wieder 35 ml angekommen, wobei die Uraninkonzentration sich wieder leicht auf 4,54  $\mu$ g/l erhöht hatte (Rückerhalt 0,16  $\mu$ g).

Bei der Beprobung am 29.06.2007 waren alle Stellen am Mittelhang trocken.

Am 9. Juli konnten bei der letzten Beprobung im Rahmen dieser Diplomarbeit eine 15 ml – Wasserprobe an 2.3.3 entnommen werden. Die Uraninkonzentration erreichte  $7,39\mu g/l$ , was einem Rückerhalt von 0,11  $\mu g$ .

Wie auf der Abb. 32 sichtbar, reagierten 4 der 7 Probenahmestellen auf die Uranineinspeisung. Die Stelle 2.3.2 lieferte bis auf die 1 ml – Probe vom 25.April, 2007, welche kein Uranin enthielt, keine weiteren Sickerwasserproben. An den Stellen 2.2.1 und 2.2.2 in der Hauptlage tropfte während des gesamten Beprobungszeitraums von 6 Monaten kein Sickerwasser in die Halbröhren.

Kommentar [H2]:

Kommentar [H3]: Kommentar [H4]: Kommentar [H5]: Kommentar [H6]:

Kommentar [H7]: Kommentar [H8]: Kommentar [H9]:

### Die maximalen Uraninkonzentrationen an den einzelnen

### **Probenahmestellen**

Auf Abb. 33 ist erkennbar, dass die mit Abstand höchste Uraninkonzentration (184,43 mg/l) an Stelle 2.1.1 am 4. April 2007 auftraten. Auch der zweithöchste Wert mit 5,67 mg/l wurde am 11. Juni 2007 ebenfalls an 2.1.1 registriert.

In der lateralen Beprobung der Basislage an Stelle 2.3.3 lag die höchste Uraninkonzentration bei 256,75  $\mu$ g/l.

Die Stellen 2.1.2 mit 47,76  $\mu$ g/l und 2.3.1 mit 59,31  $\mu$ g/l erreichten noch niedrigere maximale Uraninkonzentrationen.

Im Folgenden sind die gemessenen Uraninkonzentrationen und deren Trend, sowie die Wassermengen separat für die einzelnen Probenahmestellen grafisch dargestellt und kurz beschrieben. Direkt darunter ist jeweils der Niederschlagsverlauf abgebildet.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **81** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten



Abb. 33: Uraninkonzentrationen an Stelle **2.1.1** vom 27.03 – 09.07.2007. Die rote Linie stellt den Trend der Uraninkonzentration dar.

Es ist ersichtlich, dass nach dem Maximum mit 184,43 mg/l am 4. April 2007, bis zum 11. Juni eine deutliche Abnahme der Uraninkonzentration auf 5,67 mg/l zu verzeichnen war. Nach diesem Datum konnte an der Stelle 2.1.1 keine weitere Wasserprobe mehr gewonnen werden. Somit war es auch nicht möglich, den Konzentrationsverlauf des Tracers weiter zu verfolgen.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **82** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten



Abb. 34: Uraninkonzentrationen an Stelle **2.1.2** vom 27.03 – 09.07.2007. Die gelbe Gerade stellt den Trend der Uraninkonzentration dar.

Bei der lateralen Beprobung in der Decklage an Stelle 2.1.2 war bis zum 11. Mai 2007 noch kein Uranin angekommen. Dies zeigte die zu diesem Zeitpunkt entnommene 5 ml – Wasserprobe, in welcher kein Uranin nachgewiesen werden konnte.

Erst am 23. Mai wurde in der 49 ml –Probe eine Uraninkonzentration von 46,76 µg/l gemessen. Dies war zugleich der Maximalwert an diesem Standort.

### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **83** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Am 11. Juni war die Uraninkonzentration bereits wieder am Absinken und erreichte nur noch 19,59  $\mu$ g/l, wobei jedoch das Probenvolumen mit 300 ml sehr hoch war. Eine Woche später wurden dann am 18.06.2007 an 2.1.2 lediglich noch 0,42  $\mu$ g Uranin pro Liter bei einem Probenvolumen von 210 ml registriert. Am 26. Juni 2007 war die Uraninkonzentration dann nochmals etwas angestiegen auf 4,54 mg/l, wobei aber die Wassermenge mit 35 ml viel geringer ausfiel, als in den vorigen Messungen. Danach lieferte dieser Standort bis zum 9. Juli 2007 keine weitere Wasserproben mehr.



Abb. 35: Uraninkonzentrationen an Stelle **2.3.1** vom 27.03 – 09.07.2007. Die gelbe Gerade stellt den Trend der Uraninkonzentration dar.

An Stelle 2.3.1 zur vertikalen Beprobung in der Basislage kam das Uranin am 16. Mai 2007 erstmals an, wobei die 87 ml – Wasserprobe eine Konzentration von 115,12  $\mu$ g Uranin pro Liter aufwies. Gut 4 Wochen später, am 18. Juni 2007, wurde die letzte Probe an 2.3.1 im Rahmen dieser Diplomarbeit gewonnen. Dabei sank die Uraninkonzentration in den 5 ml der Probe auf 59,31  $\mu$ g/l ab.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **84** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Abb. 36: Verläufe der Uraninkonzentration an den Stellen 2.3.1 und 2.3.2. Die gelbe Gerade zeigt den Trend der Uraninkonzentration an.

### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **85** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Am Standort für die laterale Beprobung in der Basislage 2.3.3 kam bereits am 28.03.2007, einen Tag nach der Einspeisung Uranin an. Die Konzentration in den erhaltenen 10 ml betrug 256,75 mg/l.

Erst am 11. Mai 2007 konnte die nächste Wasserprobe an diesem Standort gewonnen werden. Deren Volumen betrug 42 ml, wobei die Uraninkonzentration auf 32,76  $\mu$ g/l gesunken war. Bis zum 16.05.2007 waren 51 ml an Stelle 2.3.3 angekommen. Die Uraninkonzentration war gegenüber der Vorwoche wieder leicht auf 37,84  $\mu$ g/l angestiegen.

Am 23.05.2007 erreichten die erhaltenen 49 ml nur noch eine Konzentration von 14,48  $\mu$ g Uranin pro Liter. Am 31. Mai 2007 konnten 12 ml mit 17mg/l Uranin entnommen werden. Innerhalb der darauffolgenden 3 Wochen, also bis zum 18.06. 2007, waren weitere 10 ml Sickerwasser an 2.3.3 angekommen, wobei der Uraningehalt auf 26,45  $\mu$ g/l angestiegen war. Bei der letzten Beprobung im Rahmen dieser Diplomarbeit am 9. Juli 2007 konnte eine 15 ml – Wasserprobe an 2.3.3 entnommen werden, deren Uraninkonzentration mit 7,39  $\mu$ g/l gegenüber den Vorwochen deutlich abgesunken war.

### Ergebnisse des Experiments zur pH – Abhängigkeit der

### Fluoreszenzintensität bei Uranin anhand der Probe 2.1.2 (11. Juni, 2007)

Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abb. 37 grafisch dargestellt. Es bestätigte sich, dass durch Erhöhen des pH – Wertes von sauren in basische Bereiche, die Fluoreszenzintensität zunimmt. Die Wasserprobe wurde durch Pufferung mit Natronlauge vom ursprünglichen pH 5-6 auf 9-10, bzw. 10-11 und 13-14 gebracht.

Bei pH 5-6 erreichte die Fluoreszenzintensität 35,33, während sie bei pH 9-10 auf 55,35 angestiegen war. Damit erreichte Fluoreszenzintensität bei dem sauren Ausgangs – pH knapp 64% der maximal gemessenen Werte im basischen pH – Bereich. Bei Pufferung in noch basischere Bereiche blieb die Fluoreszenzintensität mit 54,58 bei pH 10-11 und 55,39 bei pH 13-14 nahezu konstant. Der Schwankungsbereich dieser Messreihe lag bei +/- 8,44 %.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **86** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Abb. 37: Verlauf: Kurven der Fluoreszenzintensität der Probe 2.1.2 (11.Juni 2007) bei unterschiedlichen pH – Werten.

## 6.3 Bodenfeuchtemessungen mit der manuellen Thetasonde

Bei einer ersten Messreihe Ende März 2007 wurden sehr grosse Schwankungen bei der Bodenfeuchte innerhalb weniger Zentimeter festgestellt. Bei der darauffolgenden zweiten Messreihe am 11. April wurden daher mehrere Messungen in der gleichen Tiefe vorgenommen und dann ein Mittelwert gebildet. Die zweite Messreihe ist in Tab. 5 genau aufgeführt.

Standort1: gegenüber von 2.3.3 (zum Messzeitpunkt im Schatten)				
Tiefe [cm]	Mittelwert		N/ 17 1	
	Bodemedchie [vol%]	Wert 20 cm links	Wert Zentral	Wert 20 cm rechts
10	18	14	20	
20	24	22	26	
30	22	20	24	
40	30	28	32	
50	32	36	15	28 Übergang DL-HL
60	36	38	38	32 Übergang DL-HL
70	28	29	28	27
80	29	30	28	29
90	35	35	35	35
100	28	28	29	27
110	36	34	34	39 Übergang HL-BL
120	26	27	22	29 Übergang HL-BL
130	18			
140	14			
150	12			
160	10			

Tab. 5: Messreihe mit der manuellen Thetas	sonde vom 11.April
--	--------------------

Standort 2: 2 m oberhalb Einspeisestelle (bei den Messungen in der Sonne)		
Tiefe [cm]	Bodenfeuchte [Vol%]	
10	28	
20	28	
30	28	
40	25	
50	23	Übergang DL-HL
60	28	Übergang DL-HL
70	19	
80	21	
90	27	
100	23	
110	25	Übergang HL-BL
120	14	
130	12	
140	12	
150	10	
160	10	
170	10	
180	9	
190	9	
200	7	

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **88** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Standort 3: Gegenüber Standort 2 (bei Messungen im Schatten)

Messungen in der Basislage

Tiefe [cm] Bodenfeuchte [Vol%]

- 200 12
- 210 11

220	10	
230	8	
240	8	
250	20	etwa 30 cm mächtige Sandschicht mit feinen Partikeln,
260	35	sehr feucht angefühlt und ausgeschaut
270	25	darüber und darunter jeweils ähnliche sandig-kiesige BL
280	16	_
290	16	
300	12	
310	10	
320	10	
330	9	
340	10	
350	8	
360	8	
370	7	

### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **89** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Dabei ist erkennbar, dass sich die Vertikalprofile der Bodenfeuchteverteilung vom Prinzip her ähnlich sind. Bei allen erstellten Vertikalprofilen steigt die Bodenfeuchte jeweils in den Übergangsbereichen der einzelnen Decklagen an, während sie darüber und darunter immer wieder zurück geht.

Eine weitere Erkenntnis war, dass die Bodenfeuchte ihre Maximalwerte jeweils im mittleren Bereich der Hauptlage erreichte, wobei auch in Teilbereichen der Decklage annähernd hohe werte gemessen wurden. Die mit Abstand niedrigsten Werte zwischen 6 und 15 Volumenprozent erbrachten stets die Messungen in der sandig-kiesigen Basislage, wobei diese mit zunehmender Tiefe tendenziell bis zum absoluten Minima von 6 Vol % abnahmen. Die einzige Ausnahme stellten die Messungen an der Ostflanke 2 m oberhalb der Einspeisestelle dar. Hier wurde versucht, den Graben zu vertiefen und dadurch die Möglichkeit zu erlangen, auch unterhalb von 2 m Tiefe die Bodenfeuchte in der Basislage zu erfassen. Dabei wurde eine interessante Entdeckung gemacht. Bis 2,5 m Tiefe war die Bodenfeuchte wie rückläufig, ab 2,5 m Tiefe jedoch stieg sie enorm an. Dies könnte durch

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **90** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

das Vorhandensein einer feinsandigen Zwischenschicht, die im Tiefenbereich von etwa 2,5 bis 2,8 m in die Basislage eingelagert ist, erklärt werden.

Die erste Profilmessung wurde gegenüber der Beprobungsstelle 2.3.3 an der Ostflanke des Grabens vorgenommen. Dabei ist erkennbar, dass die Bodenfeuchte in der Decklage zuerst nach unten hin deutlich von 18 Vol % auf maximal 36 Vol % im Übergangsbereich von Deck- und Hauptlage ( in Abb. 38 als gelbe Raute gekennzeichnet) zunimmt. Nach dieser Übergangszone nimmt die Bodenfeuchte wieder leicht ab, wobei in der Hauptlage meist höhere Werte im Vergleich zur Decklage gemessen wurden. Erneut steigt die Feuchte dann am Übergang zwischen zwei Schichtfolgen an. Der Wert erreichte in der Grenzzone von Haupt- und Basislage, welche in der Abb. 38 durch den grünen Punkt hervorgehoben ist, 36 Vol %. In der Basislage sank die Bodenfeuchte dann jedoch rapide ab, bis sie in 1,6 m Tiefe nur noch 10 Vol % erreichte.



Abb. 38: Vertikalprofil der Bodenfeuchte am Standort 1 vom 11.04.2007.

Anhand der Abb. 39 sieht man, dass die Bodenfeuchten am 25. April 2007 generell etwas höher liegen, was an ergiebigeren Niederschlägen im Vorfeld der Messungen lag. Der prinzipielle Verlauf, mit den Maxima an den Schichtgrenzen blieb jedoch erhalten.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 91 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>

Abb. 39: Vertikalprofil der Bodenfeuchte am Standort 1 vom 25.04.2007.

Am zweiten Standort, welcher sich innerhalb der Westflanke des Grabens, 2 Meter oberhalb der Beprobungsstelle 2.1.1 befand, zeigte sich ein ähnlicher Verlauf der Bodenfeuchte. Auch hier stieg der Wert in der Decklage mit der Tiefe stetig an. An den Schichtgrenzen, dargestellt wieder durch die gelbe Raute bzw. den grünen Punkt (s. Abb...), war ebenso eine merkliche Erhöhung der Bodenfeuchte zu verzeichnen. In der Basislage sank wie auch schon an Standort 1 die Feuchte sehr schnell ab, wobei am 11. April 2007 in 2 m Tiefe nur noch 7 Vol % gemessen wurden. Am 25.04.2007 wurden in 1,4 m Tiefe sogar nur 4 Vol % gemessen (s. Abb. 40).



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **92** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Abb. 40: Vertikalprofil der Bodenfeuchte am Standort 2 am 25. April 2007

An Standort 3, welcher sich an der Ostflanke des Grabens, direkt gegenüber Standort 2 befand, wurden die Messungen in erst in 1,5 m Tiefe begonnen. An diesem Standort war der Graben mit fast 4 m besonders tief und daher konnte man hier auch den Verlauf der Bodenfeuchte in den unteren Bereichen der Basislage genauer untersuchen. Bei diesen Messungen viel auf, dass ab 1,5 m Tiefe die Bodenfeuchte wieder anstieg, bis in 2 m Tiefe ein Maximum erreicht wurde. Danach vielen die Werte bis etwa 3m Tiefe wieder deutlich ab. Ab dieser Tiefe unterschieden sich die Messungen vom 11. und 25. Aprill 207. Am 11.04.2007 fielen die Werte unterhalb 3m weiter ab, während sie am 25.04.2007 dann nochmals deutlich anstiegen (s. Abb. 41).



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 93 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Abb. 41: Vertikalprofil der Bodenfeuchte am Standort 3 vom 11.04.2007.

Bei genauerer Betrachtung der Bodenbeschaffenheit im Tiefenbereich zwischen 2 und 4 m, konnte man deutlich zwei feinsandige Zwischenschichten entdecken, die in die sandigkiesige und wesentlich grobkörnigere Basislage im Tiefenbereich von 2,5 bis 2,8 m bzw 3,4 bis 3,7 m eingelagert waren. Diese Sandschichten, die etwa 30 cm mächtig waren, fühlten sich im Vergleich zur umliegenden Basislage auch sehr viel feuchter an. Unterhalb und oberhalb der Sandschichten wurde der Boden sofort wieder grobkörniger und stärker verdichtet, und die Bodenfeuchte erreichte sofort wieder die üblichen Werte zwischen 8 und 12 Vol %.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **94** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Abb. 42: Vertikalprofil der Bodenfeuchte am Standort 3 vom 25.04.2007.

## <u>6.4 Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen mit den Echo –</u> <u>Sonden</u>

Wie bereits im experimentellen Teil beschrieben, befanden sich ab dem 29. März 2007 in der Westflanke des Mittelhangs 5 Echo – Sonden, welche die Bodenfeuchte in 5 min – Intervallen aufzeichneten. Die Abb. 43 zeigt den Verlauf der Bodenfeuchte als Tageswerte, wobei aus den fünfminütigen Einzelwerten ein Mittelwert über 24 Stunden errechnet wurde. Dabei wurde die Sonde in der Basislage nicht in der Abbildung berücksichtigt, da ihre Werte extrem schwankten und teilweise sogar in den negativen Bereich abrutschten und daher als Messfehler interpretiert werden mussten.



Abb. 43: Verlauf der Bodenfeuchte in den drei periglazialen Deckschichten im 5-Minutentakt.

### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **96** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Welche Sonde wie schnell auf Niederschlagsereignisse reagierte, wird im Folgenden untersucht. Dafür wurden für ein ausgewähltes Niederschlagsereignis Bodenfeuchte – und Niederschlagsdaten im 10 min –Intervall beobachtet.

### Verlauf der Bodenfeuchte während ausgewählter Niederschlagsereignisse

Mit Hilfe der Daten der Echo – Sonden, welche die Bodenfeuchte in Volumenprozent jeweils im Intervall von 5 Minuten aufzeichneten, sowie mit den 10– Minuten – Werten des Niederschlags von der Klimastation Schweizerhof, wurde die Reaktion der einzelnen Echo – Sonden während verschiedener Niederschlagsereignisse untersucht. Zusätzlich wurde beobachtet, an welchen Beprobungsrinnen, bzw. in welcher der drei periglazialen Deckschichten in Folge des jeweiligen Niederschlagsereignisses Sickerwasser angekommen war. Dabei wurde auch die aufgefangene Wassermenge mit dem Niederschlagsvolumen verglichen. Das Niederschlagsvolumen wurde als Summe der 10 – Minutenwerte aus dem Zeitraum zwischen zwei Beprobungsrundgängen im Versuchsgebiet berechnet. Am Beispiel des ersten ausgewählten Niederschlagsereignisses wird dies nun veranschaulicht: Der letzte Beprobungsrundgang im Zastleraufschluss vor dieser Niederschlagsperiode fand am 11. Mai 2007 statt, der darauffolgende dann am 16. Mai 2007. Somit wurden die einzelnen Niederschlagswerte innerhalb dieses Zeitraums addiert, wobei dies in der Summe 34,4 1/m<sup>2</sup> ergab.

Bei genauer Betrachtung des Verlaufs der Bodenfeuchte fällt auf, dass die Niederschlagssummen vom 11.05.2007 (0,6 l/m<sup>2</sup>), 12.05.2007 (1,6 l/m<sup>2</sup>)und 13.05.2007 (0,4 l/m<sup>2</sup>) zu gering waren, um eine sichtbare Reaktion an den Echos hervorzurufen. Daher sind in der Abb..., welche den zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchten in den drei periglazialen Schichtfolgen anhand der 4 Echo – Sonden darstellt, nur die Tage 14.05.2007 (19,4 l/m<sup>2</sup>) und 15.05.2007 (13,0 l/m<sup>2</sup>) berücksichtigt.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 97 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Abb. 44: Verlauf Niederschlag und Reaktionen der Echo – Sonden vom 13. – 16.05.2007.

Die Sonde in der Decklage, die ziemlich genau 3 Stunden nach dem Einsetzen des ersten stärkeren Niederschlagimpulses reagierte, war die einzige Sonde, welche auf den ersten Niederschlagspeak ansprach.

### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **98** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Beim zweiten stärkeren Niederschlagimpuls stieg die Bodenfeuchte in der Decklage bereits nach 2,5 Stunden an. Nach 5,6 Stunden war auch im Grenzbereich der Deck- und Hauptlage ein signifikanter Anstieg zu verzeichnen.

In der Hauptlage und im Grenzbereich von Haupt- und Basislage war innerhalb von 24 Stunden nach dem zweiten Niederschlagspeak keine Reaktion zu beobachten.

35,9 Stunden nach dem zweiten stärkeren Niederschlagsimpuls stieg dann die Bodenfeuchte in der mittleren Hauptlage deutlich an, während sich die Werte an der Schichtgrenze von Haupt- und Basislage kurze Zeit später, nach 37,1 Stunden, erhöhten.

## 6.5 Infiltrationsversuche

### 6.5.1 Erster Infiltrationsversuch: Standort "Insel"

In den ersten 165 Minuten änderten sich die Werte der Sonden kaum, und wenn, dann fielen sie erstaunlicherweise lediglich leicht ab. Dann jedoch kam es an der Sonde zur Erfassung des vertikalen Wassertransports in die Basislage zu einem regelmäßigen Ansteigen der Bodenfeuchte vom Ausgangswert 6,4 Vol % um jeweils rund 0,5 Vol % pro Minute auf bis maximal 24,6 Vol %. Hier pendelte sich der Wert dann ab 230 Minuten Versuchsdauer ein. Die senkrechte Entfernung von Einspeisegraben und Sonde 2 betrug 2,75 m, wovon noch die Grabentiefe von etwa 45 cm abgezogen werden muss. Daraus ergibt sich dann eine maximale Sickergeschwindigkeit von rund 1,39 cm/min bzw. 0,89m /h. Alle anderen 6 Thetasonden zeigten keinen Anstieg der Bodenfeuchte an. Für die Sonden in der Ober- und Hauptlage konnte dies durch die optisch sichtbare Feuchtefront, welche in der Oberlage sehr schmal war und auch nach unten hin bis in die Basislage nur wenig breiter wurde, nachvollzogen werden, denn lediglich Sonde Nr.2 lag in ihrem Ausdehnungsbereich. Demnach scheint also nahezu die komplette Bewässerungsmenge von rund 425 l ziemlich senkrecht durch die periglazialen Deckschichten, zumindest durch Deck – und Hauptlage, abgeflossen zu sein. Da aber auch die weiter hangabwärts

### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 99 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

gelegenen Sonden in der Basislage keinerlei Anstieg in der Bodenfeuchte verzeichneten, ist am Standort Insel davon auszugehen, dass auch in den oberen Bereichen der Basislage keine lateralen Fließprozesse stattgefunden haben.

Als positiver weiterer Effekt konnten durch das Infiltrationsexperiment die ersten Wasserproben vom Standort "Insel" gewonnen werden. Dadurch war es parallel zur Registrierung der Bodenfeuchte durch die Sonden auch möglich, die Ausbreitung des am 27. Dezember 2006 eingespeisten Tracers Bromid nachzuverfolgen. Somit konnte der Infiltrationsversuch auch in der Hinsicht Hilfestellung leisten, dass Sickerwasser in der Halbrinne im Tunnel 1.3.1 aufgefangen werden konnte.



Abb. 45: Verlauf der Bodenfeuchte in unterschiedlichen Tiefen des Hangprofils, sowie Infiltrationsrate im Einspeisegraben beim ersten Infiltrationsversuch am Standort "Insel".

### 6.5.2 Zweiter Infiltrationsversuch Insel

**Sonde 1** reagierte am schnellsten auf die Bewässerung. Bereits nach 6 min stieg die Bodenfeuchte an.

**Sonde 2** zeigt den stärksten Anstieg der Bodenfeuchte von 39 auf 47 Vol%. Auch diese in der oberen Hauptlage eingebrachte Sonde reagierte bereits nach 13 min Bewässerung und damit noch vor dem zweiten Infiltrationsimpuls.

Nur die **Sonden 1 und 2** reagierten bereits auf den ersten Infiltrationsimpuls von 20 Litern. An der **Sonde 3** in der Mitte der Hauptlage konnte nach dem zweiten Infiltrationsimpuls und 24 min nach Beginn des Versuchs ein Anstieg verzeichnet werden. Diese Erhöhung der Bodenfeuchte verlief im Vergleich zu den anderen Sonden langsamer, blieb jedoch bis zum Ende des Versuchs nach 216 min gleichmäßig ansteigend bei einer Zunahme von 0,1 Vol% innerhalb einer Zeitspanne von 10-30min.

**Sonde 4**, die auch in der mittleren Hauptlage eingebaut war, jedoch 0,6 m in hangabwärtiger Richtung zur Einspeisestelle sprach erst nach 39 min an. Das infiltrierte Wasser brauchte demnach trotz gleicher Einbautief im Vergleich zu dritten Sonde 15 min länger bis zum Erreichen der Sonde 4.

Sonde 5, integriert in der Mitte der Basislage, verzeichnete nach 107min den ersten Anstieg.

Der Anstieg an Sonde 5 verlief anfangs mit 0,1 Vol % / 5min, erhöhte sich aber 25 min nach der ersten Reaktion auf 0,1 Vol % / 2min.

**Sonde 6** reagierte nach 118 min. Die Bodenfeuchte erhöhte sich alle 3min um 0,1 Vol % und fiel bereits nach 15 min wieder ab.

**Sonde 7**, integriert in die Beprobungsstelle 1.3.1 in der unteren Basislage, verzeichnete innerhalb des Versuchszeitraums als einzige Sonde keine ansteigende Bodenfeuchte.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **101** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten</u>



Abb. 46: Verlauf der Bodenfeuchte während des zweiten Infiltrationsversuch am Standort "Insel" vom 16.05.2007.







Die im Folgenden beschriebenen maximalen Fliessgeschwindigkeiten wurden auf Basis der Fließzeit bis zur jeweiligen Sonde und deren vertikalem Abstand zum Grund des Einspeisegrabens berechnet.

Bis zur Sonde 1 am Übergang von der Deck- zur Hauptlage erreichte das Sickerwasser mit 5,00 m/h die deutlich höchste maximale Fliessgeschwindigkeit.

Bis zur Sonde 2 in der mittleren Hauptlage war die maximale Fliessgeschwindigkeit bereits auf 3,69 m/h abgesunken.

Bis zu den Sonden 3 und 4, die beide in 1,2 m vertikaler Entfernung zum Grund des Einspeisegrabens nebeneinander in der unteren Hauptlage installiert wurden, legte das Sickerwasser nur noch maximale 2,67 m/h bezogen auf Sonde 3 und 3,00 m/h bis zur Sonde 4 zurück.

Nach 167 Minuten war das Sickerwasser zur Sonde 5 in der oberen Basislage vorgedrungen, was bei einem vertikalen Abstand zum Grabengrund von 1,9m eine maximale Fliessgeschwindigkeit von lediglich 0,68 m/h ergibt.

### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **103** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Bis zur Sonde 6, welche sich in der Mitte der Basislage befand, stieg die maximale Fliessgeschwindigkeit mit 0,88 m/h gegenüber Sonde 5 wieder leicht an. An Sonde 7 in der unteren Basislage konnte mit 0,94 m/h nochmals ein leichter Anstieg im Vergleich zur Sonde 6 verzeichnet werden.





Basierend auf den Abständen zwischen den in der Vertikalen aufeinanderfolgenden Sonden einerseits, sowie der Fließzeit des Sickerwassers von einer zur nächsten Sonde, konnten die maximalen Fließgeschwindigkeiten für einzelne Abschnitte des senkrechten Hangprofils berechnet werden.

Mit Hilfe von Sonde 1, welche sich an der Grenze von der Deck- zur Hauptlage befand, konnte die maximale Fliessgeschwindigkeit innerhalb der Decklage mit 5,00 m/h ermittelt werden.

Sonde 2 lieferte die maximale Geschwindigkeit im oberen Bereich der Hauptlage, welche 3,69 m/h betrug.

### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **104** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

In der unteren Hauptlage wurden nur noch 3 m/h erreicht, während jedoch im oberen Bereich der Basislage wieder eine Zunahme auf 3,82 m/h zu verzeichnen war. Die mit Abstand niedrigste maximale Fliessgeschwindigkeit mit 0,29 m/h wurde in der mittleren Basislage berechnet.

In der unteren Basislage stieg der Wert dann wieder auf 1,5 m/h.

## 6.5.3 Dritter Infiltrationsversuch: Standort "Insel"

Am 18. Mai 2007 wurde der dritte Infiltrationsversuch am Standort "Insel" in Angriff genommen. Ergebnisse blieben aber aufgrund des Einsturzes der Westflanke der "Insel" aus.

## 6.5.4 Vierter Infiltrationsversuch: Standort "Birke"

Es zeigte keine der acht installierten Sonden eine Reaktion.


### 6.5.5 Fünfter Infiltrationsversuch: Standort "Birke"

Abb. 49: Verläufe der Bodenfeuchte in den einzelnen Deckschichten beim Infiltrationsversuch am Standort "Birke" vom 18.06.2007.





Abb. 50: Fließgeschwindigkeiten des Sickerwassers durch die einzelnen periglazialen Deckschichten beim Infiltrationsversuch am Standort "Birke" vom 18. Juni, 2007.

An Sonde 2, eingebaut im Bereich der unteren Hauptlage, ist zu erkennen, dass sich das Sickerwasser bei diesem Infiltrationsexperiment am schnellsten durch die Hauptlage bewegte.

Wenn man Sonde 1 betrachtet, bis zu welcher das Sickerwasser die Decklage durchdringen musste, und diese mit Sonde 2, bis zu der die Deck- und Hauptlage zu durchfließen waren, vergleicht, fällt folgendes auf: Die maximale Fließgeschwindigkeit des Sickerwassers bis zu Sonde 2 lag mit 3,05 m/h deutlich über derjenigen bis Sonde 1 mit 2,05 m/h. Geht man nun nach der berechneten maximalen Fließgeschwindigkeit von Sonde 1 davon aus, dass das Hangwasser mit maximal 2,05 m/h die Decklage durchdringt, ergibt sich mit Hilfe des Werts von Sonde 2 eine maximale Fließgeschwindigkeit von 4,05 m/h durch die Hauptlage. Da Sonde 1 nahezu vertikal über Sonde 2 installiert war, konnte dieser Rechenschritt durchgeführt werden. Das Hangwasser durchfließt demnach am Standort "Birke" die Hauptlage mehr als doppelt so schnell als die Decklage.

Bis Sonde 3 in der mittleren Basislage ergab sich eine maximale Fließgeschwindigkeit von 1,62 m/h, während an Sonde 4 in der unteren Basislage nur noch 1,50 m/h erreicht wurden.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **107** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Sonde 3 befand sich nahezu senkrecht unter den Sonden 1 und 2, wobei der vertikale Abstand zu Sonde 2 1,3 m betrug. Sonde 3 reagierte erst 72 min nach Sonde 2, was bedeutet, dass das Sickerwasser die ersten 1,3 m durch die Basislage nur mit einer maximalen Fließgeschwindigkeit von 1,08 m/h zurücklegte. Es kam also während dieses Infiltrationsexperiments an der Grenze der Haupt- zur Basislage zu einem sehr starken Rückgang der Fließgeschwindigkeit.

An Sonde 4 in der unteren Basislage lag die maximale Fließgeschwindikeit bei 1,5 m/h. Dieses Sonde wurde nahezu senkrecht unter Sonde 2 in 2,7 m vertikaler Entfernung eingebracht. Sie reagierte 131 min später als Sonde 2, was eine maximale Fließgeschwindigkeit von 1,24 m/h innerhalb der Basislage ergab.

### 7. Diskussion

Auf der Basis des bis dato vorhandenem Wissens und den aktuell bestehenden hydrologischen Konzepten sollten Hangwasserdynamik und Stofftransport innerhalb typischer Hangsedimente kristalliner Mittelgebirge experimentell, mit Hilfe von Tracerversuchen und Bodenfeuchtemessungen, sowie Substratanalysen beleuchtet werden. Eine prozessorientierte Modellierung konnte im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht durchgeführt werden, da man keinen geeigneten Output aus dem Versuchshang ausfindig machen konnte. Eine Quelle am Hangfuß wäre dazu ideal gewesen, war aber nicht auffindbar.

Ziel dieser Arbeit ist es, Fließwege und Fließprozesse innerhalb der einzelnen Lagen der periglazialen Deckschichten zu untersuchen und nachzuvollziehen. Dabei gilt die Aufmerksamkeit insbesondere dem Interflow.

Da in dem Bereich der Hanghydrologie in Bezug auf die lateralen Fließprozesse noch vieles nur auf Vermutungen beruht und weiterhin Forschungsbedarf besteht, soll diese Arbeit auf Basis der experimentellen Untersuchungen versuchen, neue Erkenntnisse zu erlangen. Dies sollte durch den Einsatz von künstlichen Tracern, sowie durch

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **108** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> <u>periglazialen Decksedimenten</u>

umfangreiche Bodenfeuchtemessungen und zahlreiche Infiltrationsversuche ermöglicht werden. Die gewonnen Erkenntnisse werden in diesem Abschnitt im Anschluss an die Aufarbeitung der einzelnen Fragestellungen mit bisherigen Forschungsergebnissen anderer Arbeiten verglichen.

Die Beantwortung folgender Fragestellungen sollte durch die Experimente im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermöglicht werden:

### • <u>In welcher der drei periglazialen Schichtfolgen konnte Interflow</u> <u>nachgewiesen werden und kann man dies logisch begründen?</u>

Durch die Tracerversuche bzw. die lateralen Beprobungsstellen am Mittelhang konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass innerhalb der Deckschichten im Versuchgebiet laterale Fließprozesse stattfinden. Dabei lieferte Stelle 2.1.2 den Beweis für, nach den hohen Probenvolumina und dem mit Abstand höchsten Rückerhalt von Bromid im Rahmen der ersten Messreihe vom 9. Januar bis 27. März 2007 im Vergleich zu den restliche Beprobungsstellen zu urteilen, sehr ergiebige laterale Fließwege innerhalb der tonigen Decklage.



Abb. 51: Schematische Darstellung der Fließwege in einem Hangboden. 1) Infiltration in Mikro und Makroporen; 2) Oberflächenabfluss; 3) schneller lateraler unterirdischer Abfluss (Abfluss im Makroporensystem, "preferential flow"); 4) Mikroporendurchfluss (Matrixfließen) (nach ZUIDEMA, 1985 in BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996).

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **109** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Mit Hilfe der Stellen 2.3.2 und 2.3.3 zur lateralen Beprobung in der Basislage, konnte Interflow auch im unteren Bereich dieser sandig – kiesigen Schicht nachgewiesen werden. Hier werden nach bisherigen Erkenntnissen auch vorwiegend die lateralen Fliessprozesse in Hangsedimenten vermutet (s. Abb. 52).



Abb. 52: Modell zum Interflow in periglazialen Hangsedimenten (nach LEIBUNDGUT & LANGE, 2006).

Dabei sticht insbesondere die Probenahme an Stelle 2.3.3 vom 28. März 2007 heraus. Hier konnte bereits einen Tag nach Einspeisung des Uranins, welche in knapp 8 m Entfernung hangaufwärts zur Beprobungsstelle vorgenommen wurde, der Tracer in der Wasserprobe nachgewiesen werden. Anhand der Infiltrationsversuche konnte festgestellt werden, dass

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **110** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

das Sickerwasser bis zum Erreichen der unteren Bereiche der Basislage nicht mehr als maximal 3 Stunden benötigt. Unterhalb der Basislage gelangt das Sickerwasser vermutlich in einen Bereich höherer Durchlässigkeit, in welchem der Wassertransport hangabwärts dann wahrscheinlich noch deutlich schneller erfolgt. Nach bisherigem Kenntnisstand wird für den schnellen Transport von Wasser in hangabwärtiger Richtung die Grenze zwischen Hangsedimenten und der Festgesteinsoberfläche verantwortlich gemacht.

Der Infiltrationsversuch am Standort "Birke" zeigte jedoch auf, dass auch in der schluffigen Hauptlage laterales Fliessen stattfinden kann. In dieser Schicht zeigte nämlich eine über 2m seitlich zum Einspeisegraben versetzt installierte Theatasonde eine deutliche Reaktion auf die Bewässerung.

Die Infiltrationsversuche auf der "Insel" wiederum zeigten, dass versickerndes Niederschlagswasser an diesem Standort nahezu vertikal durch die Deck – und Hauptlage hindurch nach unten abfließt. Dieser Effekt wird in der Bearbeitung der Frage, welche Fliesswege sich in den einzelnen Hangsedimenten ausbilden und ob es dabei Schichten gibt, in denen vertikale bzw. laterale Fliessprozesse dominieren, genauer beleuchtet.

Im Bezug auf den Interflow waren die Infiltrationsversuche trotzdem aufschlussreich, denn es konnte anhand der ausbleibenden Reaktion der gegenüber dem Infiltrationsgraben seitlich in hangabwärtiger Richtung versetzten Feuchtesonden in der Basilsage festgehalten werden, dass sich im oberen und mittleren Bereich dieser Schicht keine lateralen Fließprozesse abspielten. Demgegenüber konnte jedoch durch die Tracerversuche am Mittelhang laterales Fliesen innerhalb der Basislage eindeutig nachgewiesen werden. Daher ist anzunehmen, dass sich Interflow am Standort "Insel" vermutlich in tieferen Regionen der Basislage abspielt, als dort, wo sich die installierten Thetasonden befanden. Die Dreistabsonde, welche direkt vertikal unter dem Einspeisegraben in der mittleren Basislage eingebracht worden war, zeigte nach etwa 3h Versuchsdauer eine sehr deutliche Reaktion. Während des Versuchs konnten zwei volle Probefläschchen aus der Stelle 1.3.1, wo diese Sonde installiert worden war, gewonnen werden. Dies zeigt also deutlich auf, dass das infiltrierte Wasser die Basislage erreichte, sich dann aber in den oberen Bereichen dieser Schicht weiter ausschließlich in vertikaler und nicht in lateraler Richtung fortbewegte.

### • <u>Welcher der drei periglazialen Schichten können vorwiegend</u> laterale bzw. vertikale Fließbewegungen zugeordnet werden?

Die Infiltrationsversuche auf der "Insel" zeigten, dass versickerndes Niederschlagswasser an diesem Standort nahezu vertikal durch die periglazialen Schichtfolgen nach unten abfließt. Zumindest bis zum Grund des Grabens in 3 m Tiefe konnte an diesem Standort kein Interflow nachgewiesen.

Die Dominanz vertikaler Fliessbewegungen in der Deck – und Hauptlage wurde anhand der Theta - Feuchtesonden deutlich, die im Tiefenbereich dieser zwei Schichtfolgen seitlich sowohl hangabwärts als auch hangaufwärts um weniger als 50 cm versetzt gegenüber dem Einspeisegraben eingebracht waren. Diese Sonden verzeichneten überhaupt keine Veränderung in den Bodenfeuchtewerten während des gesamten Versuchs. Folglich muss dass eingespeiste Bachwasser ziemlich senkrecht durch die oberen beiden periglazialen Schichten hindurch und an den seitlich installierten Sonden vorbei geflossen sein.

Des Weitern konnte anhand der ausbleibenden Reaktion der gegenüber dem Infiltrationsgraben seitlich in hangabwärtiger Richtung versetzten Feuchtesonden in der Basilsage festgehalten werden, dass sich im oberen und mittleren Bereich dieser Schicht keine lateralen Fließprozesse abspielten. Dadurch konnte nachgewiesen werden, dass am Standort "Insel" in der Deck – und Hauptlage, sowie im oberen und mittleren Bereich der Basislage vertikale Fließprozesse dominieren.

## • <u>Wie stark bzw. wie schnell reagieren die einzelnen Schichtfolgen</u> auf bestimmte Niederschlagsereignisse, und welchen Einfluss hat <u>die Vorfeuchte auf diese Reaktion?</u>

Zur Bearbeitung dieser Fragestellung wurde der Verlauf der Bodenfeuchte während ausgewählter Niederschlagsereignisse genauer untersucht.

Mit Hilfe der Daten der Echo – Sonden, welche die Bodenfeuchte in Volumenprozent jeweils im Intervall von 5 Minuten aufzeichneten, sowie mit den 10– Minuten – Werten des Niederschlags von der Klimastation Schweizerhof, wurde die Reaktion der einzelnen Echo – Sonden während verschiedener Niederschlagsereignisse untersucht. Zusätzlich

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **112** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

wurde beobachtet, an welchen Beprobungsrinnen, bzw. in welcher der drei periglazialen Deckschichten in Folge des jeweiligen Niederschlagsereignisses Sickerwasser angekommen war. Dabei wurde auch die aufgefangene Wassermenge mit dem Niederschlagsvolumen verglichen. Das Niederschlagsvolumen wurde als Summe der 10 – Minutenwerte aus dem Zeitraum zwischen zwei Beprobungsrundgängen im Versuchsgebiet berechnet. Am Beispiel des ersten ausgewählten Niederschlagsereignisses wird dies nun veranschaulicht: Der letzte Beprobungsrundgang im Zastleraufschluss vor dieser Niederschlagsperiode fand am 11. Mai 2007 statt, der darauffolgende dann am 16. Mai 2007. Somit wurden die einzelnen Niederschlagswerte innerhalb dieses Zeitraums addiert, wobei dies in der Summe 34,4 l/m<sup>2</sup> ergab.

Bei genauer Betrachtung des Verlaufs der Bodenfeuchte fällt auf, dass die Niederschlagssummen vom 11.05.2007 (0,6 l/m<sup>2</sup>), 12.05.2007 (1,6 l/m<sup>2</sup>)und 13.05.2007 (0,4 l/m<sup>2</sup>) zu gering waren, um eine sichtbare Reaktion an den Echos hervorzurufen. Daher sind in der Abb. 54.., welche den zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchten in den drei periglazialen Schichtfolgen anhand der 4 Echo – Sonden darstellt, nur die Tage 14.05.2007 (19,4 l/m<sup>2</sup>) und 15.05.2007 (13,0 l/m<sup>2</sup>) berücksichtigt.

Die genauen Reaktionszeiten sind im Ergebnissteil 6.4 unter den Echo – Sonden einsehbar. Es sei aber nochmals erwähnt, dass die untere Decklage in ca. 40 cm Tiefe bei den untersuchten Niederschlagsereignissen etwa 3 Stunden nach dem ersten stärkeren Niederschlagsimpuls reagierte. Die Bodenfeuchte im Bereich der Schichtgrenze von Deckund Hauptklage in etwa 60 cm Tiefe sprach erst 6,5 Stunden nach dem zweiten intensiveren Niederschlagsimpuls an, während die mittlere Hauptlage in gut einem Meter Tiefe erst nach 35,9 Stunden reagierte. Die Schichtgrenze von Haupt- und Basislage reagierte nach 37,1 Stunden.

Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass die Decklage eindeutig am schnellsten auf den Niederschlag reagiert, dass jedoch auch dieser Tiefenbereich nach einigen trockenen Tagen erst eine gewisse Regenmenge braucht um hydrologisch aktiv zu werden.

Der Grenzbereich von Deck – und Hauptlage ist in seiner Reaktion deutlich träger. Er benötigte zwei stärkere Niederschlagsimpulse bevor die Bodenfeuchte anstieg.

Mehr als einen Tag dauerte es, bis die mittlere Hauptlage bzw. die Schichtgrenze von Haupt- und Decklage aktiv wurden.



Abb. 54: Verlauf der Bodenfeuchte und des Niederschlags als 10 – min- Wert 13. – 16.05.2007.

Generell sind die oben beschriebenen Beobachtungen ein Hinweis darauf, dass je nach Vorfeuchte und Niederschlagsmenge bzw. Niederschlagsintensität, bestimmte Schichtfolgen innerhalb des Hangs hydrologisch aktiv sind bzw. werden, während andere nicht aktiv sind.  Wieso konnten im Januar 2007 keine Wasserproben aus der Decklage gewonnen werden, während die Basislage schon Proben lieferte? Andererseits gilt es die Frage zu klären, warum die Regenrinnen in der Basislage zwischen dem 31. Januar und 27. März kein Wasser mehr lieferten.

Zu diesen Fragestellungen wurde folgende Hypothese aufgestellt:

Welche der Deckschichten Wasser liefert, könnte, basierend auf bisherigen Erkenntnissen, in grossem Maße von den aktuellen Vorfeuchtebedingungen, sowie von der jeweiligen Niederschlagsintensität abhängen. Diese Vermutung wurde schon durch die Untersuchung der vorherigen Fragestellung bekräftigt.

Bei der Decklage könnte in den Wintermonaten aber auch die Temperatur wegen des möglichen Gefrierens oberflächennaher Bodenschichten eine entscheidende Rolle spielen. Ein solches Zufrieren könnte eine Wassergewinnung aus dieser Schicht verhindern. Da die Temperaturen aber meist über 0°C lagen, kann dies für die Beantwortung der vorliegenden Fragestellung nicht herangezogen werden. Nur im Zeitraum zwischen dem 23. und 28.01.2007 lag die Temperatur konstant unter 0°C, ansonsten gab es nur nachts einmal Minustemperaturen. Oftmals blieb der Wert sogar nachts über dem Gefrierpunkt.

Auch der Verlauf des Niederschlags zeigt keine besonderen Veränderungen vom 27.12 – 27.03 2007. Auch bei genauerer Betrachtung der 10 min – Werte des Niederschlags waren in dieser Zeitspanne keine Auffälligkeiten zu verzeichnen.

Leider waren zu dieser Zeit noch keine Bodenfeuchtesonden im Versuchshang installiert, denn allein anhand des Niederschlags- und Temperaturverlaufs, sowie der Beprobungen an den Auffangrinnen konnte obige Fragestellung nicht beantwortet werden.

Die zeitlich versetzten Reaktionen der Probenahmestellen in der Deck- bzw. Basislage auf den Niederschlag wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit anhand des Verlaufs der Uraninkonzentrationen, sowie der Bodenfeuchtemessungen am Mittelhang später noch genauer untersucht.

## • <u>Sind Trends in den Verläufen der Tracerkonzentration an den</u> jeweiligen Probenahmestellen erkennbar und können diese anhand <u>der Niederschlagsdaten nachvollzogen werden?</u>

Diese Fragestellung wird im Folgenden mithilfe der drei durchgeführten Tracerversuche bearbeitet.

Sowohl bei den Beprobungsstellen der "Insel" als auch an denen des Mittelhangs ersichtlich, dass nach dem der ersten Bromidnachweis, welcher auch die maximale Bromidkonzentration darstellt, der Tracergehalt tendenzielle abnahm.



Abb. 55: Verläufe der Bromidkonzentrationen am Mittelhang vom 09.01 – 09.07.2007.

Am Mittelhang steigt lediglich an Stelle 2.1.1 die Bromidkonzentration nach dem ersten Nachweis an den beiden Folgemessungen weiter an, bis am 4. April, 2007 ein Maximum erreicht wurde.



Abb. 56: Verläufe der Bromidkonzentrationen am Mittelhang vom 09.01 – 09.07.2007.

Dies deckt sich mit dem Maximum des Uranins (s. Abb. 57). Vermutlich wurde durch die Einspeisung der Uraninlösung am 27.03.2007 eine beachtliche Menge Bromid mobilisiert, was zum Maximum eine Woche später führte. Als alleinige Begründung kann die Uranineinspeisung aber nicht dienen, da bereits am 19.03.2007 eine Erhöhung der Bromidkonzentration zu verzeichnen war. Auch anhand der Volumen der Wasserproben, welche zwischen 20 und 100 ml lag, kann man keinen Anhaltspunkt für den Bromidanstieg erkennen.

Der Verlauf der Uraninkonzentrationen am Mittelhang unterscheidet sich nicht wesentlich von denen des Bromids. Beim Uranin stellt der erste Nachweis sogar ausnahmslos das Konzentrationsmaximum dar.



Abb. 57: Uraninkonzentration und deren Trend (rot) an Stelle 2.1.1 vom 27.03 – 09.07.2007

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **117** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten



Abb. 58: Uraninkonzentrationen an den Stellen 2.1.2, 2.3.1 und 2.3.3 vom 27.03 – 09.07.2007

Auch hier ist an allen 4 Beprobungsstellen erkennbar, dass ab diesem Maximum die Uraninkonzentration an allen Stellen tendenziell abnimmt, wobei beim Uranin 2.3.3 eine besondere Stellung einnimmt. An diesem Beprobungsstandort liegen immer wieder kleine Anstiege zwischen dem tendenziell abnehmenden Konzentrationsverlauf. Dies könnet ein Hinweis auf die Aktivierung unterschiedlicher Fliesswege sein. Wenn man die Verläufe der Bodenfeuchte in den einzelnen periglazialen Schichtfolgen auf Abb...betrachtet, so fällt auf, dass die Zwischenanstiege der Uraninkonzentration mit einer deutlich sichtbaren Erhöhung der Bodenfeucht in der Decklage einhergehen.



Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **118** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Abb. 59: Verlauf von Uraninkonzentration an 2.3.3, sowie Bodenfeuchte und Niederschlag im Mai 2007.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **119** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Da der Tracer in die Decklage eingebracht wurde, ist dort auch eine höhere Uraninkonzentration zu vermuten. Wenn nun die Bodenfeuchte in dieser Schichtfolge ansteigt, könnte eine grössere Tracermenge mobilisiert werden, als in den anderen Schichten. Dies würde die kleinen Zwischenpeaks, wie z.B. am 16.05.2007, erklären. Für obige Annahme spricht ebenfalls, dass dem Absinken der Tracerkonzentration ein Ansteigen der Bodenfeuchte in der mittleren Hauptlage, sowie im Grenzbereich von Haupt- und Basislage vorausgeht. In Diesen beiden Schichten dürfte die Tracerkonzentration aufgrund der grösseren Entfernung zur Einspeisestelle geringer ausfallen, als in der Decklage. Dies würde den Rückgang der Uraninkonzentration erklären.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch, dass die vertikalen Beprobungsstellen nach deren Maximum einen stetigen Rückgang der Uraninkonzentration ohne Zwischenpeaks verzeichneten. Diese Zwischenanstiege traten am Mittelhang ausschließlich an den lateralen Beprobungsstellen auf.

Generell sind die oben beschriebenen Beobachtungen ein Hinweis darauf, dass je nach Vorfeuchte und Niederschlagsmenge bzw. Niederschlagsintensität, bestimmte Schichtfolgen bzw. bestimmte Fließtypen innerhalb des Hangs hydrologisch aktiv sind bzw. werden, während andere nicht aktiv sind. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von WEILER & FLÜEHLER (2004), welche bei Versuchen in Rietholzbach in der Nordschweiz aufzeigten, dass es von der Vorfeuchte und der Niederschlagsintensität abhängt, welcher Fließtyp sich innerhalb eines Hangs ausprägt.

Die Probenahmestelle 2.3.3 , von der die meisten Messungen vorliegen, wird nun noch genauer beleuchtet. An diesem Standort zur Beprobung lateraleren Fliessens in der Basislage gab es einige Besonderheiten. 2.3.3 reagierte bereits 24 Stunden nach der Einspeisung des Tracers mit einer Konzentration von 256,75  $\mu$ g/l. Es muss also innerhalb eines Tages definitiv Wasser von der Einspeisestelle in die knapp 8 m entfernte Probenahmestelle geflossen sein. Dabei gilt es zu beachten, dass keine der anderen Beprobungsstandorte auf die Einspeisung reagierte. Selbst an Stelle 2.1.1, welche sich mit 0,4 m vertikalem Abstand in unmittelbarer Nähe zum Einspeisegraben befand, war kein Hangwasser zu verzeichnen. Daher muss die eingebrachte Tracerlösung in besagter 24 h-Zeitspanne seitlich an 2.1.1 und den anderen Stellen vorbei geströmt sein, bevor sie 2.3.3

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **120** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

erreichte. Die Schnelligkeit an sich überrascht nicht, denn wenn man die Infiltrationsversuche betrachtet, so fällt auf, dass das im Oberboden versickerte Wasser nie länger als 3 Stunden brauchte, um die unteren Bereiche der Basislage zu erreichen. In diesem Tiefenbereich wird nach aktuellem Kenntnisstand der Hanghydrologie davon ausgegangen, dass sich das Hangwasser hier im Vergleich zum Durchdringen der periglazialen Deckschichten wesentlich schneller in lateraler Richtung fortbewegt. Daher verwundert die kurze Zeitspanne, welche die Tracerlösung für den Fliessweg bis zur Stelle 2.3.3 benötigte, nicht sonderlich.

## • <u>An welchen Beprobungsstellen treten die höchsten</u> <u>Tracerkonzentrationen auf und wie kann dies logisch</u> <u>nachvollzogen werden?</u>

Die maximalen Konzentrationen waren am Mittelhang an der Beprobungsstelle für vertikales\_Fliessen durch die Decklage eindeutig am höchsten.

Dieses Resultat ergab sich einerseits aus der höheren Wassermenge, welche in den Halbröhren in der Decklage aufgefangenen worden war, und andererseits dadurch, dass diese zusätzlich auch eine wesentlich höhere Bromidkonzentration aufwiesen. Diese wesentlich höhere Tracerkonzentration der Wasserproben aus der Decklage im Vergleich zur Basislage ist höchstwahrscheinlich zurückzuführen auf geringere dreidimensionale Ausbreitung und Vermischung des Tracers mit Hangwasser aufgrund der viel kleineren Entfernung zur Einspeisestelle.

Die mit Abstand höchsten Tracerkonzentrationen an den vertikalen Beprobungsstellen der Decklage deuten auf ausgeprägte preferentielle Fließwege in vertikaler Richtung innerhalb dieser Schichtfolge hin. • <u>Gibt es eine Korrelation zwischen den Verläufen der Bodenfeuchte</u> <u>innerhalb der jeweiligen Schichten und den aus ihnen gewonnenen</u> <u>Wasserproben?</u>

Kann man daraus charakteristische Schwellenwerte der Bodenfeuchte innerhalb der einzelnen perglazialen Deckschichten in Bezug auf eine Aktivierung der Hangwasserdynamik ableiten?

Wenn man den zeitlich hoch aufgelösten Verlauf des Niederschlags und der Bodenfeuchten innerhalb der einzelnen periglazialen Deckschichten verfolgt, kann man hier leider keine direkte Verbindung zwischen den Bodenfeuchteverläufen und den gewonnen Wasserproben entdecken.

Anhand der folgenden Abbildungen wurde versucht anhand von Tageswerten der Bodenfeuchten, sowie mit Hilfe der gewonnenen Wasserproben zu überprüfen, ob es doch eine sichtbare Korrelation zwischen den beiden Messwerten gibt.



Abb. 60: Verlauf der Bodenfeuchte und der Probenahmen in der Decklage vom 29.03. – 09.07.2007.

In der Decklage kann man sogar eine Verbindung erkennen, denn nach einem signifikanten Anstieg der Bodenfeuchte innerhalb der Decklage folgten eine gute Woche später auch Wasserproben mit insgesamt 382 ml Volumen. Allerdings lieferte die Decklage Anfang Juli keine weiteren Proben, obwohl die Bodenfeuchte auf hohem Niveau blieb. Daher kann diese Korrelation nicht zufriedenstellend bestätigt werden. Ein charakteristischer Schwellenwerte der Bodenfeuchte innerhalb der einzelnen periglazialen Deckschichten in Bezug auf eine Aktivierung der Hangwasserdynamik konnte daher aus diesen Beobachtungen auch nicht abgeleitet werden.



Abb. 61: Verlauf der Bodenfeuchte und der Probenahmen in der Basislage vom 29.03. – 09.07.2007.

Betrachtet man Abb. zur Überprüfung der Korrelation innerhalb der Basislage, so fällt auf, dass am 11.05.2007 die Bodenfeuchte in diesem Tiefenbereich am Absinken war. Trotzdem erhielt man zu diesem Zeitpunkt eine Wasserprobe, was gegen eine direkte Korrelation spricht.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **123** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Allerdings gilt es bei dieser Fragestellung zu bedenken, dass die Probenahme mit Abständen von 3 bis zu maximale 7 Tagen durchgeführt wurde und daher die zeitliche Auflösung zur Überprüfung dieser Korrelation wohl zu gering ausfällt.

### <u>Gelangen die in den Hang eingespeisten Tracer in die umliegenden</u> Vorfluter?

Die subterranen Fliesswege innerhalb der periglazialen Hangsedimente sind nach bisherigem Forschungsstand sehr komplex und daher auch für das Versuchsgebiet nur schwer vorherzusagen. Zudem blieb im Rahmen dieser Diplomarbeit ungeklärt, in welcher Tiefe die Basislage endet, bzw. das anstehende Festgestein beginnt. Daher wäre es durchaus möglich, dass sich die eingespeisten Tracer an den Probenahmestellen vorbei bewegen und in den Vorfluter gelangen, bevor sie in den Beprobungen direkt im Aufschluss nachgewiesen werden können. Dieser Effekt sollte durch die Zusatzbeprobungen in den drei Bächen, in welche das Hangwasser des Versuchsgebiets entwässern, erfasst werden. Bei den Stichproben aus den Bächen konnte jedoch weder Bromid noch Uranin nachgewiesen werden. Im Beprobungszeitraum vom 5. Januar bis 9. Juli 2007 konnten weder Bromid, noch Uranin in den umliegenden Vorflutern nachgewiesen werden. Dabei wird allerdings darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um Stichproben im einwöchigen Rhythmus handelte und somit ein Vordringen der Tracer in die Vorfluter nicht sicher ausgeschlossen werden konnte.

### <u>Wie effektiv ist die Wasserspeicherung in den einzelnen</u> periglazialen Schichten?

Hier sticht die Hauptlage hervor, von welcher kein Wasser in die Halbröhren abtropft. Außerdem wies diese Schichtfolge, welche einen sehr hohen Schluffanteil hat, bei Messungen mit der manuellen Thetasonde immer die höchsten Bodenfeuchten auf. Der Unterschied in der Bodenfeuchte im Vergleich zur Deck – und Basislage trat nach Trockenperioden besonders deutlich zu Tage. Diese Beobachtungen deuten auf eine viel höhere Wasserspeicherfähigkeit der Hauptlage im Vergleich zur Deck – und Basislage hin.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **124** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

So wurden z. B. nach einer einwöchigen Trockenperioden im April 2007 in der Hauptlage die mit Abstand höchsten Bodenfeuchten gemessen, während die zuvor schon deutlich niedrigeren Werte in der Deck- und Basislage im Vergleich zur Hauptlage nochmals stärker abgesunken waren. Dieser Effekt beruht wahrscheinlich auf der Fähigkeit des Schluffs, durch dessen Kapillarität das Hangwasser verhältnismäßig stark binden zu können.

### • <u>Warum konnte kein Wasser in den Proberinnen der Hauptlage</u> <u>aufgefangen werden?</u>

Dabei ist zu beachten, dass anhand der Bromidanalysen eindeutig aufgezeigt werden konnte, dass Sickerwasser während des Versuchszeitraums von der Oberlage durch die Hauptlage bis hinab in die Basislage gelangt ist. Auch die Bodenfeuchtesonden in der Hauptlage zeigten während der Infiltrationsversuche zum Teil deutliche Reaktionen. Der Grund, dass in den Halbrinnen der Hauptlage kein Wasser aufgefangen werden konnte, ist vermutlich als Folge der hohen Wasserspeicherfähigkeit dieser schluffig -lehmigen Schicht zu betrachten. Diese Vermögen, gegenüber den anderen Schichten verhältnissmäsig viel Wasser speichern zu können, wurde mithilfe von Bodenfeuchtemessungen entdeckt. So wurden z. B. nach einer einwöchigen Trockenperioden in der Hauptlage die mit Abstand höchsten Bodenfeuchten gemessen, während die zuvor schon deutlich niedrigeren Werte in der Deck- und Basislage im Vergleich zur Hauptlage nochmals stark abgesunken waren. Es könnte sein, dass das Wasser, welches durch den Schluff fließt, durch dessen Kapillarität so stark gebunden ist, dass es nicht in die Halbröhren abtropfen kann.

Es könnte aber auch viel Zufall im Spiel sein, v. a. wegen des Vorkommens präferentieller Fließwege, welche in Form von Makroporen an Grabenwänden gut sichtbar sind. Bei solchen Bodenbedingungen ist es mit einer 20 cm breiten und 60 cm langen Auffangfläche wahrscheinlich eine Lotterie, ob man über einen Abschnitt von etwa 3 m einige bevorzugte Fließpfade erwischt, oder ob das Hangwasser seitlich an den Beprobungsrinnen vorbei abfließt.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 125 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Zudem wurde angenommen, dass die schluffige Hauptlage eine kleinere hydraulische Leitfähigkeit als die humushaltige Decklage und die kiesig-sandige Basislage aufweist und deshalb aus ihr weniger Sickerwasser herausfliesen könnte. Dies kann aber anhand der über die Infiltrationsversuche berechneten Fließgeschwindigkeiten des Sickerwassers in den drei periglazialen Schichten nicht bestätigt werden.

Trotz der Tatsache, dass kein Sickerwasser in den Halbröhren der Hauptlage angekommen ist, wurde durch den Bromidnachweis in der Basislage eindeutig nachgewiesen, dass Sickerwasser von der Einspeisestelle durch Deck- und auch Hauptlage hindurch bis in die Basislage gelangt ist.

Eine Erklärungsmöglichkeit dafür wäre, dass je nach Anfangsbedingungen, welche aus den Niederschlags- und Temperaturdaten resultieren, ein Wassertransport durch die mittlere Schicht hauptsächlich über Makroporen wie Wurmgänge oder Wurzelkanäle stattfinden könnte. Wenn dies zutrifft, beruht es auf Zufall, ob man diese preferentiellen Fließpfade mit den zwei Probenahmestellen erfasst, oder, wie es in den Versuchen im Rahmen dieser Diplomarbeit höchstwahrscheinlich abgelaufen ist, dass das Sickerwasser die Halbröhren umfließt. Um eine statistisch aussagekräftige Angabe machen zu können, erscheint es sinnvoll, mehrere Halbröhren in der Hauptlage miteinander zu vergleichen. Dabei fällt jedoch auf, dass auch am Standort keinerlei Wasser in der Hauptlage aufgefangen werden konnte. Die Vertikalprofile der Bodenfeuchte, welche mit einer manuellen Thetasonde erstellt wurden, zeigen, dass im Übergangsbereich von der Haupt- zur Basislage die höchsten Bodenfeuchten vorherrschen. Daher kann die Einbautiefe der Halbröhren in diesem Übergangsbereich nicht als Grund für das Ausbleiben von Sickerwasser herangezogen werden und die Möglichkeit müsste in den höher gelegenen Bereichen der Hauptlage sogar noch geringer sein.

Zu beachten ist jedoch, dass an jedem Standort nur zwei Halbröhren vorhanden waren um diesen Tiefenbereich abzudecken. Ein virtuelles Feldexperiment der ETH Zürich zu dieser Thematik , bei welchem in einem strukturierten Boden ohne Makroporen ein Stofftransportexperiment simuliert wurde, zeigte auf, dass je nach Bodenstruktur zu wenige Messungen zu einer völlig falschen Vorhersage des Transportes führen können (URL 2).

Es könnte sich aber auch um eine Kombination von beiden Lösungsansätzen handeln.

## Diskussion weiterer Fragestellungen mit Hilfe der Infiltrationsversuche

Die Zielsetzung des Infiltrationsversuchs war, insbesondere laterale Fließbewegungen mithilfe der bereits vorhandenen Probenahmestellen, sowie mit 7 an der Ostflanke der Insel integrierten Theta - Bodenfeuchtesonden nachzuweisen.

Leider konnten bei den Infiltrationsversuchen am Standort "Insel" jedoch nur vertikale Sickerströme durch die Bodenfeuchtesonden erfasst werden. Die Sonden zum Nachweis von Interflow in der Basislage zeigten während der Experimente keine Reaktion.

Da beim ertsen Versuch nur eine Sonde auf die Bewässerung ansprach, konnte dieses Infiltrationsexperiment auch nicht die erhofften Auskünfte über die Fließgeschwindigkeiten innerhalb der einzelnen Decklagen liefern. Lediglich die maximale Fließgeschwindigkeit vom Grund des Einspeisegrabens bis zur Sonde 2 im Tunnel 1.3.1 konnte mit 1,94 cm/min bzw. 1,16 m/h ermittelt werden. Damit liegt sie im Vergleich zu dem 11 Tage später durchgeführten Infiltrationsversuch an der "Insel", bei dem die maximale Fließgeschwindigkeit nur 0,94 m/h erreichte, etwas höher. Dies ist vermutlich eine Folge der geringeren Aufsättigung der "Insel" am 5. Mai 2007 gegenüber dem 16. Mai 2007. Messungen mit der manuellen Thetasonde zeigten beim hier beschriebenen ersten Infiltrationsversuch eine deutlich niedrigere Vorfeuchte über das gesamte vertikale Profil der Inselflanke im Vergleich zum zweiten Experiment. Als Folge war die Infiltrationsrate am 5. Mai sehr viel höher und so konnten an diesem Tag beachtliche 420 l versickert werden, wobei es beim zweiten Versuch nur noch 80 l waren.

## <u>Bewegt sich das Sickerwasser in der tonhaltigen Decklage und der</u> schluffigen Hauptlage im Vergleich zur sandigen Basislage deutlich langsamer?</u>

Die Ergebnisse des zweiten Infiltrationsversuchs zeigten auf, dass das Gegenteil der Fall ist. Das Sickerwasser durchdringt die Deck- und Hauptlage nämlich schneller als die Basislage.

Es konnte festgehalten werden, dass sich das Sickerwasser mit 5,00 m/h am schnellsten durch die tonhaltige Decklage bewegte. In der schluffigen Hauptlage wurden dann noch Werte von bis zu 3,00 m/h erreicht, während in den mittleren und unteren Bereichen der sandig, kiesigen Basislage nur noch maximal 1,5 m/h ermittelt wurden.

Dies zeigt auf, dass man die maximalen Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen periglazialen Deckschichten auf Basis der Bodenarten nicht abschätzen kann. Dies ist wohl einerseits begründet durch die am Standort "Insel" mehrfach sichtbaren Makroporen in der Deck- und Hauptlage, sowie das ausgeprägte Wurzelnetz in der Decklage. Zum anderen spielt hier auch die deutlich höhere Verdichtung des Bodens in der Basislage nach den Ergebnissen zu urteilen eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Die obigen Beobachtungen stimmen mit denen der Literatur überein. Laut BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) nimmt mit der Tiefe die Makroporosität in Böden ab und häufig auch die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix.

#### Diskussion des zweiten Infiltrationsversuch: Standort "Insel"

**Sonde 1** reagierte aufgrund des geringsten vertikalen Abstands zum Einspeisegraben erwartungsgemäß am schnellsten. Bereits nach 6 min stieg die Bodenfeuchte an.

**Sonde 2** zeigt den stärksten Anstieg der Bodenfeuchte von 39 auf 47 Vol %. Auch diese in der oberen Hauptlage eingebrachte Sonde reagierte bereits nach 13 min Bewässerung, und damit noch vor dem zweiten Infiltrationsimpuls.

Nur die **Sonden 1 und 2** reagierten bereits auf den ersten Infiltrationsimpuls von 20 Litern. An der **Sonde 3** in der Mitte der Hauptlage konnte nach dem zweiten Infiltrationsimpuls und 24 min nach Beginn des Versuchs ein Anstieg verzeichnet werden. Diese Erhöhung der Bodenfeuchte verlief im Vergleich zu den anderen Sonden langsamer, blieb jedoch bis zum Ende des Versuchs nach 216 min konstant ansteigend bei einer Zunahme von 0,1 Vol % innerhalb einer Zeitspanne von 10-30min.

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **128** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> <u>periglazialen Decksedimenten</u>

**Sonde 4**, die auch in der mittleren Hauptlage eingebaut war, jedoch 0,6 m in hangabwärtiger Richtung zur Einspeisestelle sprach erst nach 39 min an. Das infiltrierte Wasser brauchte also trotz gleicher Einbautief im Vergleich zu Sonde 3 15 min länger bis zum Erreichen der Sonde 4. Dieses Ergebnis bestätigt eine im ersten Infiltrationsversuch deutlich beobachtete Dominanz des nahezu vertikalen Vordringens des Sickerwassers.

Sonde 5, integriert in der Mitte der Basislage, verzeichnete nach 107min den ersten Anstieg.

Der Anstieg an Sonde 5 verlief anfangs mit 0,1 Vol % / 5min eher gemächlich. Er erhöhte sich 25 min nach Beginn auf 0,1 Vol % / 2min.

**Sonde 6** reagierte nach 118 min. Die Bodenfeuchte erhöhte sich alle 3min um 0,1 Vol% und fiel bereits nach 15 min wieder ab.

Die vergleichsweise sehr geringe Infiltrationsmenge von nur 801 ist wahrscheinlich auch der Grund dafür, dass **Sonde 7**, integriert in die Beprobungsstelle 1.3.1 in der unteren Basislage, innerhalb des Versuchszeitraums als einzige Sonde keine ansteigende Bodenfeuchte verzeichnete. Beim ersten Infiltrationsexperiment am 5. Mai 2007 zeigte die Sonde an 1.3.1 im Gegensatz zum hier durchgeführten zweiten Versuch noch die einzige Reaktion. Es gilt aber zu bedenken, dass das Sickerwasser bis zum erreichen dieser Sonde 2,3 m Luftlinie durch die periglazialen Deckschichten zurücklegen muss. D. h., dass die Feuchtefront auf dieser Fließstrecke auch ein recht grosses Bodenvolumen durchdringen muss. Augenscheinlich waren 801 Wasser zu wenig, um während der Dauer des Versuchs eine Reaktion an der Sonde im Tunnel 1.3.1 hervorzurufen.

Der zweite Infiltrationsversuch bestätigte die Erkenntnis aus dem ersten Experiment, dass sich das Sickerwasser vorwiegend vertikal fortbewegt. Die nahezu senkrecht unter der Einspeisestelle eingebauten Sonden 1 bis 6 reagierten alle auf die Bewässerung. Dadurch konnte nun auch jeder der drei periglazialen Deckschichten eine maximale Fliessgeschwindigkeit zugeordnet werden.

### • <u>Welche maximalen Fliessgeschwindigkeiten herrschen in den</u> einzelnen periglazialen Schichtfolgen vor?

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **129** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Bis zum Grenzbereich von Deck- und Hauptlage in 50 cm Luftlinie vom Grund des Einspeisegrabens entfernt, erreichte das infiltrierte Wasser mit 5,00 m/h die deutlich höchste maximale Fließgeschwindigkeit. Das Sickerwasser durchfloss also die Decklage am schnellsten, obwohl diese im Vergleich zur Haupt- und Basislage einen höheren Tongehalt aufweist. Hier spielen wohl die zahlreichen Wurzeln, welche die Decklage durchziehen und dann meist beim Beginn der Hauptlage enden beim schnellen Sickerwassertransport eine entscheidende Rolle.

Bezogen auf das Durchdringen der ersten 80 cm der Hangsedimente sank die maximale Fließgeschwindigkeit bereits auf 3,69 m/h. Diese Abnahme der Sickergeschwindigkeit stützt die Annahme, dass die Wurzeln einen bedeutenden Einfluss auf das infiltrierte Wasser haben.

Im unteren Bereich der Hauptlage sank die maximale Sickergeschwindigkeit bezogen auf Sonde 3 sogar bis auf 2,67 m/h ab, während sie an Sonde 4 noch 3,00 m/h erreichte. Beim Übergang in den oberen Abschnitt der Basislage wurden sogar nur noch 0,68 m/h ermittelt, während sich in der mittleren und unteren Basislage wieder etwas höhere Werte von 0,88 bzw. 0,94 m/h ergaben.

Betrachtet man jedoch die einzelnen Abschnitte zwischen den jeweils vertikal aufeinanderfolgenden Sonden 3 bis 7, dann können dem Übergangsbereich von der Hauptzu Basislage folgende maximale Fliessgeschwindigkeiten zugeordnet werden:

Zwischen den Sonde 4 und 5 wurde ein Wert von 3,82 m/h ermittelt. Damit war in der Grenzzone von Haupt- und Basislage wieder eine Zunahme der maximalen Fliessgeschwindigkeit zu verzeichnen. Betrachtet man das vertikale Profil bzw. die abschnittsweise errechneten maximalen Fliessgeschwindigkeiten, so fällt mit Ausnahme dieser Übergangszone Haupt- und Basislage eine Abnahme mit zunehmender Tiefe auf. Diese zwischenzeitliche Zunahme könnte auf die geringere Verdichtung in der oberen Basislage gegenüber den tieferen Bereichen dieser Schichtfolge

In der mittleren Basislage sank die maximale Sickergeschwindigkeit extrem ab und erreichte nur noch 0,29 m/h. Somit konnte die mittleren Basislage als der Bereich identifiziert werden, in welchem das sich Sickerwasser deutlich am langsamsten fortbewegt. Dies könnte, wie oben bereits erwähnt, auf die höhere Verdichtung des Erdmaterials, zurückzuführen sein. Aber auch die zahlreichen Steine, die vom Sickerwasser zuerst umflossen werden mussten, könnten einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Fließzeiten gehabt haben.

In der unteren Basislage stieg der Wert dann wieder auf 1,5 m/h, was aber immer noch deutlich unter den Werten von Deck- und Hauptlage zurückbleibt. Auch dies deckt sich mit den von BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) formulierten Beobachtungen, dass mit der Tiefe die Makroporosität in Böden abnimmt und häufig auch die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix.

# Diskussion der maximalen Fliessgeschwindigkeiten beim vierten Infiltrationsversuch am Standort "Birke"

Die Sonde in der oberen Hauptlage reagierte aufgrund des geringsten Abstands zum Infiltrationsgraben erwartungsgemäß am schnellsten auf die Bewässerung. Bei jedem Infiltrationsstoß ist ein deutlicher Anstieg im Kurvenverlauf erkennbar.

Dabei sank die Reaktionszeit von 19 min beim ersten Infiltrationsstoß auf 14 bzw. 12 min bei der zweiten respektive dritten Bewässerung, was höchstwahrscheinlich auf die höhere Vorfeuchte und die dadurch erhöhte hydraulische Leitfähigkeit im Boden zurückzuführen ist. Beim letzten Infiltrationsstoß war die Reaktionszeit mit 16 min vermutlich wegen der starken Aufsättigung des Hangbodens im Umkreis des Einspeisegrabens wieder leicht erhöht. Bei einem vertikalen Abstand zum Grund des Einspeisegrabens von 1 m ergibt dies Fließgeschwindigkeiten von 5,26 bis 8,34 cm/min bzw. 3,16 bis 5,00 m/h.

Die in der mittleren Hauptlage installierte Sonde sprach mit 3 bis 6 minütiger Verzögerung gegenüber der Sonde 1 auf die Bewässerungsschübe an.

Die Reaktionszeit lag beim ersten Infiltrationsstoß bei 23 min und nahm ähnlich wie bei Sonde 1 bei der zweiten und dritten Bewässerung auf 17 bzw. 14 min ab.

Beim vierten Bewässerungsschub nahm die Reaktionszeit ebenso wieder zu und betrug dann 20 min. Dies ergibt Fließgeschwindigkeiten von 4,35 bis 8,33 cm 7min bzw. 2,61 bis 5m/h.

Erstaunlicherweise reagierte Sonde 7, welche 1,4 m seitlich in hangabwärtiger Richtung zur Einspeisestelle angebracht worden war, schneller auf die Bewässerung als die beiden vertikalen Sonden 3 und 4 in der Basislage.

Es bestehen also vermutlich preferentielle Fliesswege in lateraler Richtung, über welche das Sickerwasser schneller zu Sonde 7 als zu Sonde 3 und 4 gelangt.

# Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **131** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

Dadurch kann das Hangwasser trotz des längeren Fließwegs von 3,13 m vom Einspeisegraben zur Sonde 7gegenüber 2,86 m zur Sonde 3, die 7-er 29 min schneller erreichen.

Diese Beobachtung dient als Beweis dafür, dass sich auch in der Deck- und Hauptlage, sowie der oberen Basislage laterale Fließprozesse abspielen.

Damit brachte dieser Infiltrationsversuch im Vergleich zu den 2 Infiltrationsversuchen an der "Insel" eine neue Erkenntnis, denn dort waren lediglich vertikale und keinerlei laterale Fließwege Jedoch blieben auch bei den Infiltrationsversuchen am Standort "Birke" die lateral angebrachten Sonden in der unteren Basislage ohne jegliche Reaktion nachweisbar. Demnach war auch hier, wie schon bei den Experimenten an der "Insel", der Einbau der Sonden nicht in genügender Tiefe erfolgt.

Denn dass Interflow in der unteren Basislage stattfindet, konnte bereits durch die beiden Tracerversuche am Mittelhang eindeutig nachgewiesen werden.

Bei Betrachtung des Installationsorts von Sonde 7 und in Anbetracht der Tatsache, dass diese Sonde auf die Bewässerung reagierte, ist es auch möglich, dass das Sickerwasser die Sonden 5 und 6 in lateraler Richtung umflossen hat.

Sicher erscheint zumindest, dass das in nahezu vertikaler Richtung fließende Wasser, welches die Sonden 1 bis 4 erreichte, tiefer als bis zum Grabengrund in die Basislage eingesickert ist.

Hier stellt sich wieder das Problem der Unkenntnis über die Mächtigkeit der Basislage und damit auch darüber, in welcher Tiefe das anstehende Gestein beginnt.

Im Übergangsbereich von der Basislage zum anstehenden Festgestein, wo eine abrupte Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit geschieht, wird aber nach bisherigem Forschungsstand das hauptsächliche Vorkommen von Interflow vermutet.

Diese Vermutung wird durch die ausbleibende Reaktion der vermutlich nicht genug tief eingebauten lateralen Sonden 5 und 6 in der unteren Basislage gestärkt, wenn man den Hintergrund berücksichtigt, dass Interflow bereits in der Basislage mit Hilfe der Tracerversuche am Mittelhang nachgewiesen wurde.

Es zeigte sich also auch bei diesem Infiltrationsexperiment wie schon zuvor bei den zwei Versuchen an der "Insel", sowie dem ersten Infiltrationsversuch an der Birke, dass Sickerwasser die Deck- und Hauptlage vorwiegend in nahezu vertikaler Richtung durchdringt. Dies entspricht der Abb. 52 nach LEIBNUNDGUT & LANGE (2006). Allerdings wurde hier noch eine zusätzliche laterale Komponente beobachtet, welche die laterale Sonde in der oberen Basislage (7) erreichte.

Dieses seitliche Ausbreiten des Sickerwassers könnte auf die vielen Steine und Felsen in der untersuchten Hangflanke zurückzuführen sein, welche mit Durchmessern von teilweise mehr als einem Meter den vertikalen Sickerstrom signifikant ablenken könnten.

Aber auch die Wurzeln der Birke, die oftmals hangabwärts gerichtet sind, könnten diese laterale Fließkomponente begünstigt haben.

Es gilt dabei zu berücksichtigen, dass am Standort "Insel" sowohl wesentlich kleinere Steine als auch deutlich weniger Wurzeln mit geringerer Tiefenausbreitung vorhanden waren.

Zudem waren jene Wurzeln nicht seitlich hangabwärts orientiert, sondern verliefen nahezu senkrecht.

### • <u>Welchen Einfluss haben Bäume bzw. deren Wurzeln auf das</u> <u>Abflussverhalten der periglazialen Hänge?</u>

Welchen Einfluss Bäume bzw. deren Wurzeln auf das Abflussverhalten der periglazialen Hänge haben, sollte durch die Infiltrationsversuche bei der Birke am Oberhang untersucht werden.

Nur beim vierten Infiltrationsversuch deutet sich eine Beeinflussung durch die Wurzeln der Birke, die oftmals hangabwärts gerichtet sind an. Denn nur bei diesem Experiment wurden in der Hauptlage laterale Fließkomponenten beobachtet. Dieses laterale Fliessen könnte durch die schräg in hangabwärtiger Richtung verlaufenden Wurzeln hervorgerufen worden sein. Laut WEILER et al. (2005) kann lateraler Makroporenfluss in einer Umgebung dominieren, in welcher Makroporen durch Pflanzenwurzeln oder Tiere verursacht wurden. Am Standort "Insel" waren z. B. keine lateralen Flüsse in der Hauptlage registriert worden. Hier gibt es auch deutlich weniger Wurzeln mit geringerer Tiefenausbreitung und zudem waren diese Wurzeln nicht seitlich hangabwärts orientiert, sondern verliefen nahezu senkrecht.

### 8. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit konnte Interflow in der Basislage durch Tracerversuche am Mittelhang zweifelsfrei nachgewiesen werden. Dabei wurde dieser laterale Fliessprozess sowohl mit dem Salztracer Natriumbromid, als auch mit Hilfe des Fluoreszenztracers Uranin mehrfach nachvollzogen. Dies deckt sich mit verschiedenen Studien, welche ebenfalls laterale im Bereich des Übergangs von Erdschichten zum Festgestein feststellten, wie z. B. PETERS et al. (1995) in Kanada, TANI (1997) in Japan, FREER et al. (1997) in den USA, sowie McDONNELL et al. (1998) in Neu Seeland und DIDSZUN (2000) in Deutschland.

Zusätzlich zum Interflow in der Basislage konnten mit Hilfe der beiden Tracer aber auch laterale Fliessbewegungen in der Decklage beobachtet werden.

Durch Infiltrationsversuche in Verbindung mit kontinuierlichen Bodenfeuchtemessungen an zwei verschiedenen Standorten konnten zusätzlich zu den Fliesswegen auch maximale Fliessgeschwindigkeiten innerhalb der einzelnen periglazialen Schichtfolgen aufgezeigt werden. In Bezug auf die Fliesswege wurde dabei die Dominanz vertikalen Fliessens in der Deck- und Hauptlage, sowie in der oberen Basislage offengelegt. Es konnten jedoch bei einem der Bewässerungsexperimente auch laterale Fliessprozesse in der Hauptlage beobachtet werden. Hierbei war am Versuchstandort ein ausgeprägtes Wurzelnetz vorhanden, welches diesen lateralen Fließprozess verursacht haben könnte. Nach WEILER et al. (2005) kann lateral orientierter Makroporenfluss dominieren, wo Makroporen durch Pflanzenwurzeln oder Tiere entstehen.

Bei den maximalen Fliessgeschwindigkeiten lag die Decklage mit bis zu 5 m/h klar vor der Hauptlage mit maximal 3,5 m/h, während in der Basislage nur noch 1- 2 m/h erreicht wurden. Diese Beobachtungen stimmten mit jenen von BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) überein, wonach mit der Tiefe die Makroporosität in Böden abnimmt und häufig auch die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix.

#### Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 134 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

Interflow konnte anhand der Infiltrationsexperimente nicht nachvollzogen werden, was vermutlich an der Installation der Bodenfeuchtesonden in nicht ausreichender Tiefe zusammenhing.

Mit Hilfe manueller Bodenfeuchtemessungen mit einer Thetasonde konnten Vertikalprofile der Bodenfeuchte erstellt werden. Dabei war auffällig, dass jeweils im Bereich der Schichtgrenzen die Feuchte anstieg, um darunter wieder abzufallen. Generell war die Bodenfeuchte in der Hauptlage am höchsten, während in der Basislage klar die niedrigsten Werte zu verzeichnen waren. Außerdem konnte bei diesen Messungen jeweils die sehr hohe Heterogenität in Bezug auf die Bodenfeuchte innerhalb weniger Zentimeter offengelegt werden.

### 9. Literatur

BAUMGARTNER, A. & LIEBSCHER, H.J. (Hrsg.), 1996: Allgemeine Hydrologie – quantitative Hydrologie. 2. Auflage. 694 S. Borntraeger. Berlin. Stuttgart.

BEHRENS, H., 1986: Water tracer chemistry - A factor determining performance and analytics of tracers, aus Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing, S. 121 - 133. Athens 1986 (Institute of Geology and Mining Exploration).

BONELL, M., 1998: Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale, aus J. American Wat. Resour. Association, 34, 4, S. 765-785.

BRONSTERT, A., 1999: Capabilities and limitations of detailed hillslope hydrological modelling, aus Hydrological Processes, Vol. 13, S. 21-48.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 135 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

CALVER A., CAMMERAAT, L. H., 1993: Testing a physically-based runoff model against field observations on a Luxembourg hillslope, aus Catena 20, S. 273–288.

DIDSZUN, J., 2000: Abflussbildung an Hängen. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie, Freiburg.

DIDSZUN, J., 2004: Experimentelle Untersuchungen zur Skalenabhängigkeit der Abflussbildung, aus Freiburger Schriften zur Hydrologie, Bd. 19, Freiburg i. Br..

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1979): DIN 4049. Teil 1. Hydrologie. Bergriffe quantitativ. Beuth Verlag GmbH. Berlin. Köln.

HEWLETT, J.D. & HIBBERT, A.R., 1967: Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, aus SCOPPER, W.E. & LULL, H.W.: Forest Hydrology, Pergamon, New York, USA.

HOEG, S., LEIBUNDGUT, Ch., UHLENBROOK, S., 1998: Hydrograph separation in a mountainous catchment- combining hydrochemical and isotopic tracers; aus Hydrological Processes 14, S. 1199-1216, 2000.

HOOPER, R.P., AULENBACH, B.T., BURNS, D.A., MCDONNELL, J.J., FREER, J., KENDALL, C., BEVEN, K., 1998: Riparian control of stream-water chemistry: implications for hydrochemical basin models, aus Hydrology, Water Rescources and Ecology in Headwaters (Proceedings of the HeadWater'98 Conference held at Meran/Merano, Italy, April 1998), IAHS Publikation Nr. 248, 1998, S. 451-458.

IHRINGER, J., BECKER, R, SCHÄDEL, W., 2004: Entwicklung eines Verfahrens zur Hochwasserfrühwarnung in kleinen und mittleren Einzugsgebieten auf der Grundlage von verteilten Online – Bodenfeuchtemessungen, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, S. 4-20. www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/fofaweb/berichte/BWC21014/BWC21014.html Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **136** Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in periglazialen Decksedimenten

LEIBUNDGUT, Ch., UHLENBROOK, S., LINDENLAUB, M., 1998: Tracerhydrologisch gestützte Bestimmung und Modellierung von Abflusskomponenten im mesoskaligen Bereich. DFG – Projekt, Bericht 086, Freiburg i. Br., 1998, S.4.

LEIBUNDGUT, Ch., LANGE, J., 2006: Tracerhydrologische Untersuchung und Modellierung der Hangwasserdynamik zur Verbesserung der EZG-Modellierung in kristallinen Mittelgebirgen. Forschungsantrag bei der DFG; Institut für Hydrologie, Freiburg i. Br., 2006.

MCDONNELL, J.J., 1997: Comment on "the changing spatial variability of subsurface flow across a hillslide" by Ross Woods and Lindsay Rowe. Journal of Hydrology, New Zealand, 36(1), S. 97–100.

MCDONNELL, J.J., BRAMMER, D.D., KENDALL, C., HJERDT, N., ROWE, L.K., STEWART, M., WOODS, R.A., 1998: Flow pathways on steep forested hillslopes: The tracer, tensiometer, and trough approach, aus Tani (Ed.), Environmental Forest Science. Kluwer Academic Publishing, Boston, S. 463-474.

MCGLYNN, B.L., MCDONNELL, J.J., BRAMMER, D.D., 2002: A review of the evolving perceptual model of hillslope flowpaths at the Maimai catchment, New Zealand, aus J. Hydrol. 257, S. 1-26.

MCGLYNN, B.L., MCDONNEL J.J. (2003): Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff, aus Water Resourource Research, Vol. 39, S. 1310.

MCGLYNN, B.L. & SEIBERT, J., 2003: Distributed assessment of contributing area and riparian buffering along stream networks, aus Water Resource Research, Vol. 39, S.1082.

MEHLHORN, J. (1999): Tracerhydrologische Ansätze in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung, aus Freiburger Schriften zur Hydrologie, Bd. 8, Freiburg i. Br.. Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg 137 <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

PETERS, D.L., BUTTEL, J.M., TAYLOR, C.H., LAZERTE, B.D., 1995: Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian Shield basin. Water Resources Research, 31(5), 1291–1304.

SCHOLTEN, T., SCHOTTE, M. & FELIX - HENNINGSEN, P., 2002: Pleistozäne periglaziäre Lagen (Deckschichten) als bodenkundliche Planungsgrundlage in Mittelgebirgsregionen - Beispiele aus dem Lahn-Dill- Bergland. Trierer Geogr. Stud. 25: 77-89.

SEIBERT, J. & MCDONNELL, J.J., 2002: On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration. Water Resources Research. 38(11). S. 23.

STAHR, K., 1979: Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standorteigenschaften im Südschwarzwal; aus Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Freiburg im Breisgau: 1979, Heft 9.

TANI, M. (1997) Runoff generation processes estimated from hydrological observations on a steep forested hillslope with a thin soil layer. Journal of Hydrology, 200, 84–109.

TORRES, R., DIETRICH, W. E., MONTGOMERY, D. R., ANDERSON, S. P., LOAGUE, K., 1998: Unsaturated zone process and the hydrological response of a steep, unchanneld catchment, aus Water Resource Research, Vol. 34, Nr. 8, S. 1865-1879.

UHLENBROOK, S., LEIBUNDGUT, Ch., 2000: Process-oriented catchment modelling and multiple-response validation; aus HYDROLOGICAL PROCESS 16, S. 423-440, 2002.

WEILER, M. & FLÜHLER, H. (2004): Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. Geoderma 120. 137–153.

Laule – Hydrologisches Institut, Uni Freiburg **138** <u>Experimentelle Untersuchungen zum Interflow in</u> periglazialen Decksedimenten

WEILER, M., MCDONNELL, J.J., TROMP VAN MEERVELD, I., UCHIDA, T., 2005. Subsurface Stormflow Runoff Generation Processes. In: Encyclopedia of Hydrological Sciences. M.G. Anderson, Editor. Wiley. Pp. 1719-1732.

WERNLI, H.R., 1994: Markierversuche in der Molasse; aus Gas, Wasser, Abwasser (gwa) 1/1994, S. 15 – 22.

URL 1: http://www.ahabc.de/schichten/schichten.html

URL 2: http://www.ito.ethz.ch/filep/inhalt/index.php?seite=7200