

# Tracerversuche mit Bromid auf verschiedenen Lysimetern in der Schweiz

Volker Prasuhn<sup>1\*</sup>, Ernst Spiess<sup>1</sup> und Clay Humphrys<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Zwischen 2009 und 2012 wurden auf zwei unterschiedlichen Lysimeteranlagen in vier verschiedenen Versuchen mit fünf verschiedenen Böden und vier Kulturen auf insgesamt 27 Lysimetern Tracerversuche mit Bromid durchgeführt. Die Pflanzentzüge von Bromid mit den abgeführten Ernteprodukten waren gering (2-12%) und können die teilweise hohen Massenbilanzdefizite nicht erklären. Die Wiederfindungsraten im Sickerwasser schwankten stark und lagen zwischen 12% und 80%. Diese Unterschiede wurden vor allem durch den Bromid-ausbringungszeitpunkt, die Evapotranspiration und die Bodeneigenschaften bestimmt. Anzeichen von schnellem Wasser- und Stofftransport über präferentielle Fließwege konnten nachgewiesen werden. Der Bromidtransport durch das Bodenprofil dauerte insgesamt 1 bis 2 Jahre bzw. es waren 600 bis 1200 mm Sickerwasser dazu nötig.

*Schlagwörter:* Bromid, Tracer, Lysimeter, Wiederfindung, Pflanzentzug

## Summary

Tracer experiments with bromide were performed between 2009 and 2012 at two Swiss lysimeter facilities on 27 lysimeters. Four different trials with five different soils and four different crops were conducted. The removal of bromide by plant uptake and harvesting was generally low (2-12% of the applied bromide) and is, thus, not the explanation for the partly high deficits of bromide mass balances. The recovery rate of bromide in the seepage water varied strongly with values between 12 and 80%. This variation in recovery rates could be explained by varying dates of bromide application, evapotranspiration rates, and soil properties. Our findings provide evidence that a fast transport of water and dissolved substances through preferential flow has occurred. The transport of bromide through the soil profile lasted all in all 1 to 2 years and required 600 to 1200 mm seepage water.

*Keywords:* bromide, tracer, lysimeter, recovery, macropores, plant uptake

## Einleitung

Tracerversuche auf Lysimetern helfen, die Wasserbewegung und Stoffverlagerungsprozesse im Boden besser zu verstehen (FANK 2009). Mittels Tracer wie Bromid kann die Verlagerungsgeschwindigkeit leicht löslicher Stoffe erfasst werden und es können Rückschlüsse auf die Nitratverlagerung sowie möglichen Makroporenfluss gezogen werden. Tracer unterliegen wie alle anderen gelösten Wasserinhaltsstoffe den Prozessen des Stofftransportes. Für den konservativen Tracer Bromid spielen neben der Advektion vor allem die hydrodynamischen Transportvorgänge eine entscheidende Rolle. Die hydrodynamische Dispersion ist für die räumliche Ausbreitung der im Wasser gelösten Stoffe verantwortlich. Die Grundlage dieses Vorganges bilden die Prozesse der molekularen Diffusion und der mechanischen Dispersion (WERNLI 2011).

Bromid wurde schon häufig als Tracer in Lysimeterversuchen eingesetzt. Die berichteten Wiederfindungsraten schwanken in Abhängigkeit von Lysimetern und Versuchsanstellung sehr stark (siehe z.B.: DRESSEL (2003) 86-90%; FANK (2000) 73-79%; GROENEWEG et al. (2007) 10-50%; LISSNER et al. (2012) 8-66%; REINKEN (2004) 95-98%).

## Material und Methoden

### Lysimeteranlage A

Die ältere der beiden Lysimeteranlagen in Zürich-Reckenholz umfasst 12 wägbare, nichtmonolithische Lysimeter von 3,14 m<sup>2</sup> Oberfläche und 2,5 m Tiefe (PRASUHN et al. 2011, VÖGELI ALBISSER und PRASUHN 2013). Sie enthält zwei verschiedene Böden: sechs Lysimeter mit einer sandig lehmigen Braunerde auf Schotter (**LysS1-LysS6**) und sechs Lysimeter mit einer lehmigen Braunerde auf Moränenlehm (**LysM7-LysM12**). Die Anlage ist seit 2010 mit einem Folientunnel überdacht, so dass der Wasserhaushalt über künstliche Beregnung gesteuert werden kann. Beide Versuche wurden in zweifacher Wiederholung durchgeführt.

### Lysimeteranlage B

Die neuere Lysimeteranlage umfasst 72 monolithische Lysimeter von 1 m<sup>2</sup> Oberfläche und einer nutzbaren Tiefe von 1,35 m (sowie einer zusätzlichen Quarzsandschicht von 0,15 m über dem Auslass, die als Sickerhilfe dient). Drei verschiedene Böden existieren: pseudogleyige Braunerde aus Lehm bis tonigem Lehm über Grundmoräne aus Reckenholz (**LysReck**), Parabraunerde aus sandigem Lehm bis Lehm

<sup>1</sup> Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften (INH), Reckenholzstraße 191, CH-8046 ZÜRICH

\* Ansprechpartner: Dr. Volker Prasuhn, volker.prasuhn@agroscope.admin.ch



über Schotter aus Schafisheim (**LysSchaf**) und schwach pseudogleyige Braunerde aus sandigem Lehm über Grundmoräne aus Grafenried (**LysGraf**) (PRASUHN et al. 2009 und 2011). 12 Lysimeter sind wägbar und mit zusätzlichen Messsonden ausgestattet. Mittels Saugkerzen konnten in 10, 30, 60 und 90 cm Tiefe zusätzliche Wasserproben aus dem Bodenprofil gewonnen werden. Beide Versuche wurden in dreifacher Wiederholung durchgeführt.

### Versuch A1

Im Jahr 2010 wurde Silomais (SM) auf der Lysimeteranlage A im Rahmen eines Projektes zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadstoffverfrachtung ins Grundwasser angebaut (VÖGELI ALBISSER und PRASUHN 2013). Auf je zwei Lysimetern der beiden Böden wurde Bromid zeitgleich mit der ersten N-Düngung am 23.06.10 appliziert. Die Bewässerung war mit 680 mm/Jahr sehr niedrig, ein Trockenjahr wie 2003 sollte simuliert werden. Vom 7.-9.9.10 beendete mit 60 mm ein lang anhaltender Dauerniederschlag die Trockenperiode. Am 27.9.10 wurde der Silomais geerntet. Stängel und Kolben wurden abgeführt. Über den Winter war Stoppelbrache, gefolgt von Kartoffeln (KA) im Jahr 2011.

### Versuch A2

Im Jahr 2012 wurden Broccoli-Setzlinge (BROC) am 23.5.12 auf acht Lysimetern der Anlage A gepflanzt. Auf beiden Böden wurde Bromid am 13.8.12 zeitgleich mit einem Fungizid appliziert. Zwei Tage später wurde ein Starkregenereignis mit hoher Intensität simuliert (57 mm), gefolgt von einem weiteren Starkregen mit 25 mm. Auf beiden Böden wurde ein optimal bewässertes (Jahresniederschlag ca. 1300 mm) und ein übermäßig bewässertes Verfahren (Jahresniederschlag ca. 1800 mm) simuliert. Nach der Ernte wurden die Strünke und Blätter oberflächlich eingearbeitet und eine Klee graswiese angesät.

### Versuch B1

Auf allen drei Böden der Lysimeteranlage B wurde auf jeweils drei Lysimetern am 31.10.09 Winterweizen (WW) angesät. Am 12.11.09 wurde Bromid appliziert. Nach der Ernte wurde das Stroh auf die Lysimeter zurückgeführt und oberflächlich eingearbeitet. Nach einer Zwischenkultur (Phacelia) folgten Eiweißerbse (EE).

### Versuch B2

Auf den Lysimetern LysGraf der Anlage B wurden am 22.3.11 auf sechs Lysimetern Zuckerrüben (ZR) gesät. Ein Verfahren erhielt 70% der N-Normdüngung, ein Verfahren 130% (je drei Wiederholungen). Zeitgleich mit der N-Düngung wurde am 6.5.11 Bromid appliziert. Nach der Ernte der Zuckerrüben wurde das Rübenlaub zurückgeführt und eingearbeitet. Die Folgekultur war Futterweizen (FW).

### Probennahme und Analytik

Bromid wurde als Natriumbromid jeweils zu 50 g/m<sup>2</sup> (= 38,8 g Br), gelöst in einem Liter deionisiertem Wasser,

mit einer Handspritze und Abdriftschutz gleichmäßig auf die Bodenoberfläche aufgebracht. Die Sickerwassermenge wurde bei beiden Anlagen mit 100 ml-Kippwaagen erfasst. Mischproben wurden 14-täglich für die Laboranalyse entnommen. Bei den Saugkerzen wurden Mischproben aus zwei Wiederholungen je Tiefe alle 14 Tage entnommen. Bromid wurde mittels Ionenchromatographie (IC) analysiert. Beim Erntegut wurde die Trockensubstanz ermittelt und der Bromidgehalt nach Extraktion mit IC bestimmt.

## Ergebnisse und Diskussion

### Bromidentzug der Pflanzen

Die Br-Aufnahme der Pflanzen unterscheidet sich je nach Kultur, Pflanzenteil (Körner, Stroh, Knollen etc.), Ertrag, Jahreszeit und Witterungsbedingungen. Die höchsten Gehalte wurden in den Blättern der Sommerkulturen ZR und BROC mit rund 30 g Br/kg TS gefunden (Tabelle 1). Im Stroh von WW lagen die Gehalte bei 4-7 g Br/kg/TS. Sowohl die Blätter von ZR und BROC als auch das WW-Stroh wurden aber nicht weggeführt, sondern wieder in den Boden eingearbeitet, so dass dieses Bromid - rund 30 bzw. 10% der applizierten Menge - wieder freigesetzt werden

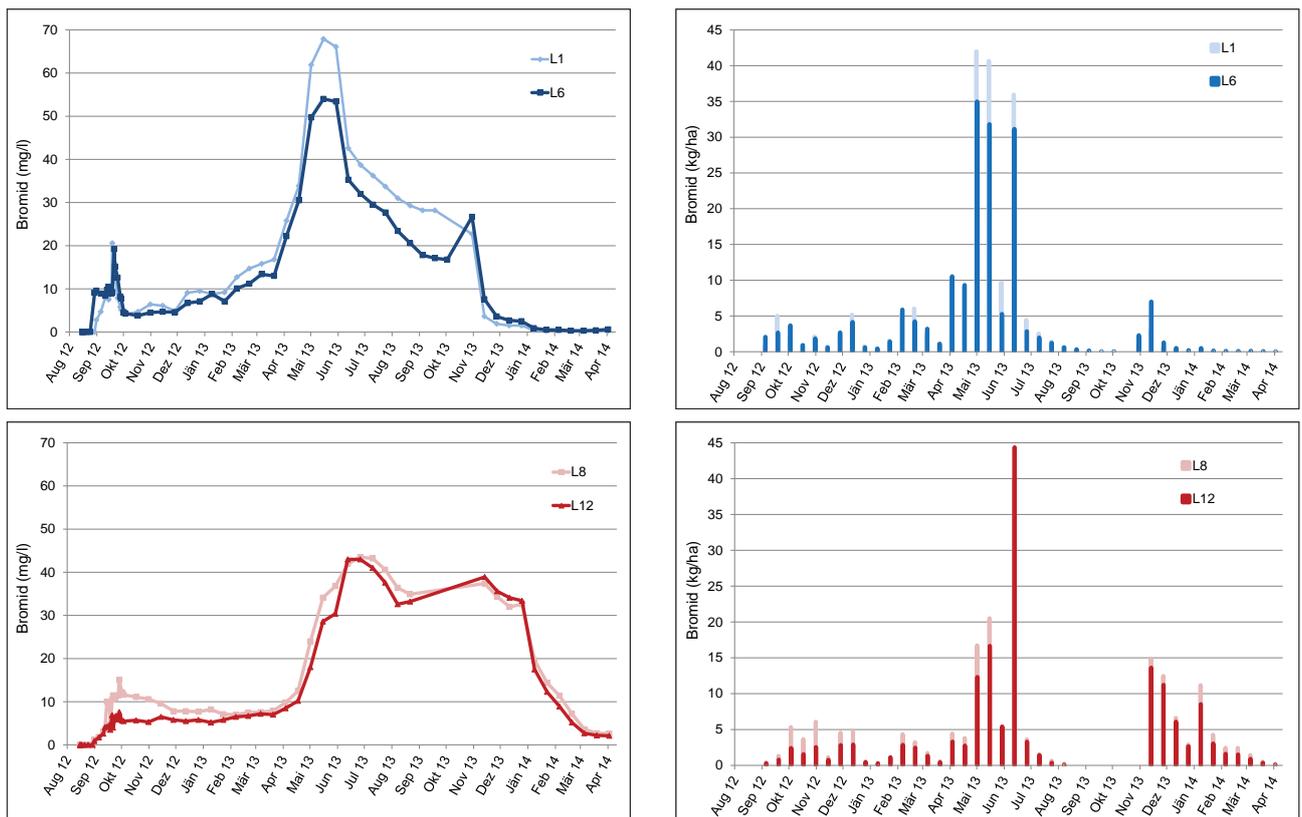
**Tabelle 1: Bromidgehalte, Trockensubstanzerträge und Bromidentzüge (in Prozent der applizierten Br-Menge) der Ernteprodukte der verschiedenen Versuche (jeweils Mittelwerte aus zwei (Versuche A1, A2) bzw. drei (Versuche B1, B2) Wiederholungen).**

Versuch / Lysimeter	Kultur / Produkt	Gehalt Br (g/kg TS)	Ertrag TS (dt/ha)	Entzug Br (%)
A1 LysS3, S5	SM Stängel	3,59	33	3,1
A1 LysS3, S5	SM Körner	0,25	51	0,3
A1 LysS3, S5	SM Spindel	2,04	2	0,1
A1 LysM9, M11	SM Stängel	2,94	44	3,4
A1 LysM9, M11	SM Körner	0,15	57	0,2
A1 LysM9, M11	SM Spindel	1,76	7	0,3
A1 LysS3, S5	KA Knollen	3,43	83	7,3
A1 LysM9, M11	KA Knollen	3,43	84	8,1
A2 LysS1-6	BROC Röschen	1,84	40	1,9
A2 LysS1-6	BROC Blätter	31,46	n.b.	n.b.
A2 LysM7-12	BROC Röschen	1,41	37	1,3
A2 LysM7-12	BROC Blätter	22,43	n.b.	n.b.
B1 LysReck	WW Stroh	7,74	55	11,0
B1 LysReck	WW Körner	0,79	33	0,7
B1 LysSchaf	WW Stroh	7,32	54	10,2
B1 LysSchaf	WW Körner	0,71	38	0,7
B1 LysGraf	WW Stroh	3,52	54	4,9
B1 LysGraf	WW Körner	0,65	43	0,7
B1 LysReck	EE Körner	0,44	90	1,0
B1 LysSchaf	EE Körner	0,34	75	0,7
B1 LysGraf	EE Körner	0,26	68	0,4
B2 LysGraf70%	ZR Blätter	34,50	36	32,0
B2 LysGraf70%	ZR Rüben	0,62	260	4,2
B2 LysGraf130%	ZR Blätter	28,73	41	30,4
B2 LysGraf130%	ZR Rüben	0,43	270	3,0
B2 LysGraf70%	FW Stroh	2,08	55	2,9
B2 LysGraf70%	FW Körner	0,61	52	0,8
B2 LysGraf130%	FW Stroh	1,88	76	3,7
B2 LysGraf130%	FW Körner	0,57	79	1,2

**Tabelle 2: Zusammenstellung von charakteristischen Bromid-Kenndaten aller Versuche.**

Lysimeteranlage/Versuch	Kultur	Br- Applikation Datum	Br-Durchbruch			Br-Verlauf			Br-Wiederfindungen im Sickerwasser				
			Tage	Nieder- schlag (mm)	Sicker- wasser (mm)	Dauer bis Br-Peak Tage	Sickermenge bis Br-Peak (mm)	Sickerwasser am Ende (mm)	nach 3 Monaten (%)	nach 6 Monaten (%)	nach 12 Monaten (%)	total (%)	nach 500 mm Sickerwasser (%)
A1 LysS3 wenig bewässert	SM	23.06.10	147	185	36	609	537	740	0	4	19	57	41
A1 LysS5 wenig bewässert	SM	23.06.10	147	190	60	609	524	700	0	5	21	62	48
A1 LysM9 wenig bewässert	SM	23.06.10	147	170	29	599	465	670	0	3	12	38	29
A1 LysM11 wenig bewässert	SM	23.06.10	147	165	33	609	521	730	0	2	11	49	32
A2 LysS2 optimal bewässert	BROC	13.08.12	18	250	98	275	666	900	11	25	73	79	31
A2 LysS4 optimal bewässert	BROC	13.08.12	18	220	84	289	699	900	6	13	58	61	17
A2 LysM7 optimal bew.	BROC	13.08.12	18	220	84	289	715	1000	2	7	37	46	7
A2 LysM10 optimal bew.	BROC	13.08.12	18	250	90	317	870	1100	2	6	40	57	6
A2 LysS1 übermässig bew.	BROC	13.08.12	18	220	125	275	806	1000	3	8	50	51	6
A2 LysS6 übermässig bew.	BROC	13.08.12	18	230	107	275	830	1050	3	8	43	46	5
A2 LysM8 übermässig bew.	BROC	13.08.12	18	230	118	317	994	1250	5	9	35	50	7
A2 LysM12 übermässig bew.	BROC	13.08.12	18	260	107	317	882	1150	2	5	29	42	5
B1 LysReck*	WW	12.11.09	34	127	5	202	259	610	12	26	55	69	61
B1 LysSchaf*	WW	12.11.09	34	127	42	202	259	630	12	28	58	73	63
B1 LysGraf*	WW	12.11.09	34	127	46	174	243	655	25	40	62	80	65
B2 LysGraf70%*	ZR	06.05.11	236	614	46	236	46	800	0	0	9	12	11
B2 LysGraf130%*	ZR	06.05.11	236	614	21	236	21	680	0	0	9	12	12

\*Mittelwerte von drei Wiederholungen



**Abbildung 1: Verlauf der Bromid-Konzentration (links) und -Fracht (rechts) im Versuch A2 für die Lysimeter mit übermäßiger Bewässerung. Oben Schotterbraunerde (LysS1, LysS6), unten Moränenlehmbrauerde (LysM8, LysM12).**

kann. Zusätzlich (nicht analysiert) ist mit Br-Gehalten in den nicht geernteten Stoppeln und Wurzeln zu rechnen. Die Br-Gehalte in den weggeführten Pflanzenteilen waren deutlich geringer. Im Versuch A1 wurde mit SM rund 4% des applizierten Bromids weggeführt. Im Folgejahr wurden

mit KA weitere 8% entzogen. Im Versuch A2 lag der Entzug durch BROC bei rund 2%. Im Versuch B1 wurde knapp 1% durch WW im ersten Jahr und 1% durch EE im Folgejahr entzogen. Bei Versuch B2 entzogen ZR knapp 4% und der nachfolgende FW 1%.

## Bromiddurchbruch

Der Br-Durchbruch erfolgte im Versuch A2 mit 18 Tagen am schnellsten (Tabelle 2). Hier war der Boden vor der Applikation bereits relativ feucht und es folgte direkt auf die Applikation ein Starkregenereignis. Die Sickerwassermenge bis zur Erstdetektion von Bromid war mit 84-125 mm in diesem Versuch auch am höchsten. Dies zeigt einerseits, dass der Boden schon gesättigt war und noch viel altes Wasser ausfließen konnte, andererseits aber auch, dass Makroporenfluss nur bis in eine bestimmte Tiefe geflossen ist und nicht direkt bis zum Auslass führte. Im Versuch B2 erfolgte der Br-Durchbruch dagegen nach einem trockenen Sommer erst nach 236 Tagen mit einsetzender Sickerwasserbildung im Dezember. Die Sickerwassermengen bis zur Erstdetektion von Bromid lagen in den Versuchen A1, B1 und B2 zwischen 5 und 60 mm.

## Bromidverlauf

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Br-Konzentration im Sickerwasser des Versuches A2 für die beiden Wiederholungen mit übermäßiger Bewässerung auf den beiden unterschiedlichen Böden. Eine mehrgipflige Tracerdurchgangskurve ist erkennbar. In allen Lysimetern ist unmittelbar nach dem Br-Durchbruch Ende August 2012 eine erste, kurze Konzentrationsspitze zu erkennen. Dieser erste Schub ist auf schnellen Br-Transport über präferentielle Fließwege zurückzuführen. Danach erfolgte überwiegend Matrixfluss mit langsam steigender Br-Konzentration. Der Br-Konzentrationspeak wurde in der Schotterbraunerde nach 275 Tagen Mitte Mai 2013, in der Moränenlehmbraunerde sechs Wochen später erreicht (Tabelle 2). Die hohen Br-Konzentrationen sanken bei der Schotterbraunerde schneller wieder ab als bei der Moränenlehmbraunerde und waren ab Dezember 2013 auf sehr niedrigem Niveau ( $< 5$  mg/l). Auch die Br-Fracht stieg im Mai/Juni 2013 markant an, auch hier wurde der Peak bei der Moränenlehmbraunerde sechs Wochen später erreicht. Nach der Sommertrockenheit wurde mit einsetzender Sickerwasserbildung in der Schotterbraunerde nur noch wenig Bromid ausgewaschen, während in der Moränenlehmbraunerde noch rund 30% der Jahresfracht ausgewaschen wurden. Der Br-Transport durch die Schotterbraunerde erfolgte also deutlich schneller als in der Moränenlehmbraunerde.

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Br-Durchgangskurven im Versuch B1 für die drei verschiedenen Böden in verschiedenen Bodentiefen. Die Verlagerung von Bromid erfolgte in allen drei Böden nach dem gleichen Muster, allerdings mit kleineren zeitlichen Verschiebungen. In allen drei Böden wurden in 10 cm Bodentiefe nach 20 Tagen bzw. bei der zweiten Probenahme nach der Br-Applikation extrem hohe Br-Konzentrationen von über 500 mg/l gemessen. Diese flachten aber sehr rasch wieder ab. In 30 cm Tiefe war der Br-Konzentrationspeak mit 348-412 mg/l zwei (LysSchaf, LysGraf) bis vier (LysReck) Wochen später. Bis der Konzentrationspeak 60 cm Tiefe mit Werten von 167-258 mg/l erreicht hatte, vergingen weitere zwei (LysSchaf), vier (LysGraf) und sechs Wochen (LysReck). In 90 cm Tiefe wurden nach weiteren 10 (LysGraf, LysReck)

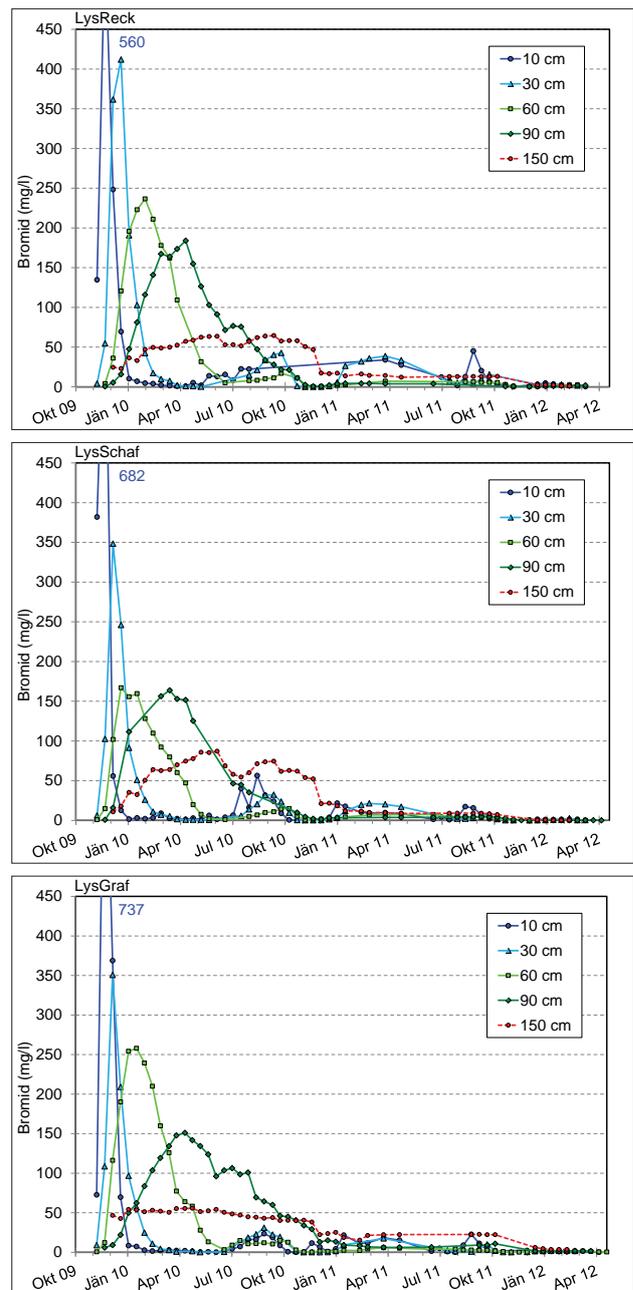


Abbildung 2: Bromidkonzentrationen in verschiedenen Bodentiefen (10, 30, 60, 90, 150 cm) im Versuch B1 der Lysimeter LysReck, LysSchaf und LysGraf.

bzw. 14 (LysGraf) Wochen noch Maximalkonzentrationen von 151-184 mg/l erreicht. Mit zunehmender Tiefe nahmen die Konzentrationen ab und verflachten sich die Kurvenverläufe. Im Lysimeterauslass in 150 cm Tiefe zeigte nur noch LysSchaf einen leichten Peak, während bei LysGraf von der Erstdetektion an mehr als ein Jahr lang eine fast konstante Konzentration zu verzeichnen war. Die Br-Konzentrationen in LysReck und LysGraf waren zu Beginn in 150 cm höher als in 90 cm Tiefe, ein eindeutiger Hinweis auf die Heterogenität des Bodens und Makroporenfluss. Während durch die punktuelle Messung der Saugkerzen überwiegend Matrixfluss erfasst wurde, gelangte an anderen Stellen im

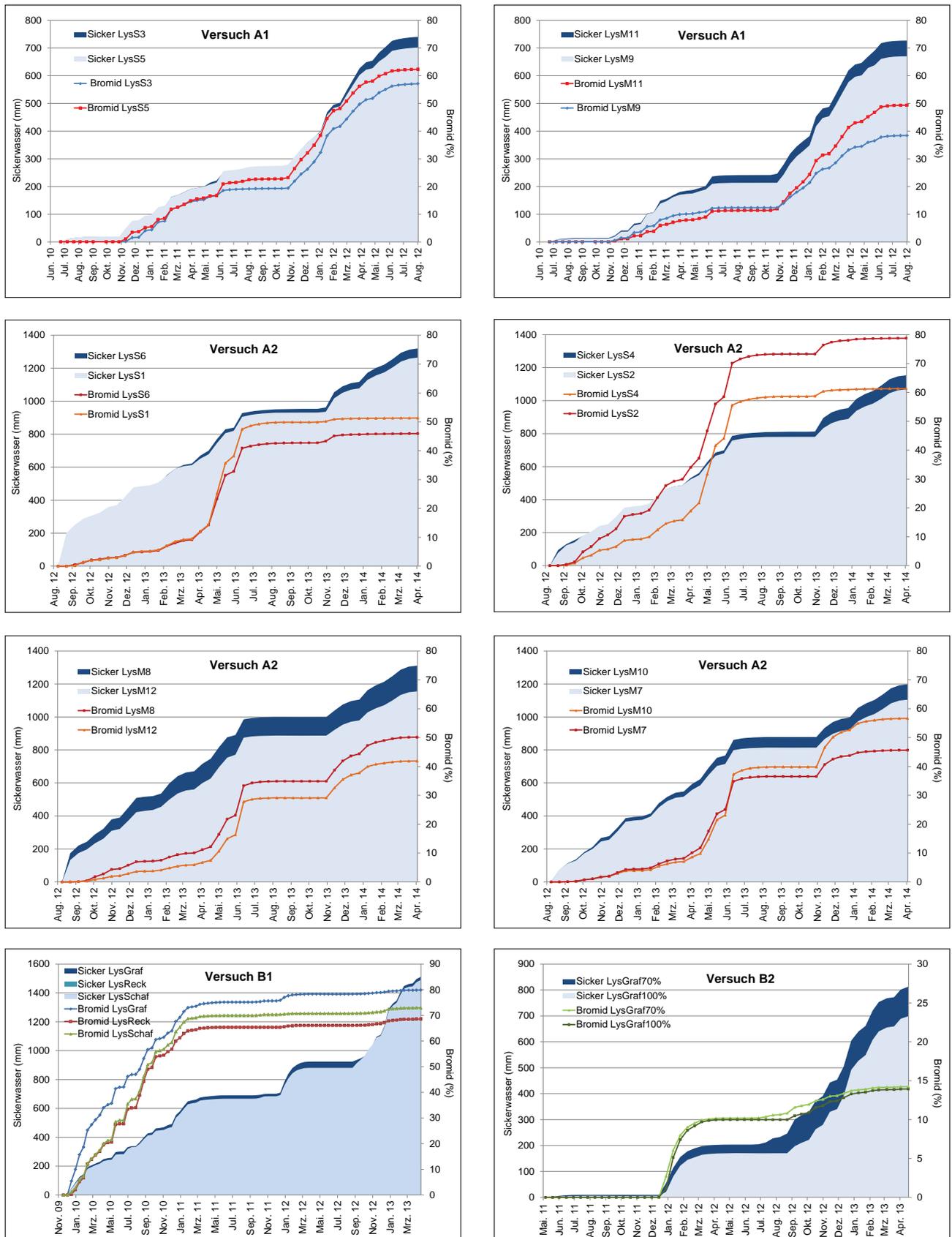


Abbildung 3: Kumulierte ausgewaschene Bromidfracht in Prozent der applizierten Bromidmenge und kumulierte Sickerwassermengen seit Beginn der Bromidapplikation für die verschiedenen Lysimeterversuche.

Bodenprofil Bromid über präferentiellen Fluss bis in den Sickerwasserausfluss.

Von August bis Oktober 2010 war in den Bodentiefen 10, 30 und 60 cm ein zweiter, kleiner Br-Konzentrationspeak bei allen Lysimetern auszumachen. Am 3.8.10 wurde das Stroh des geernteten Winterweizens auf die Lysimeter zurückgeführt und am 23.8.10 fand eine Bodenbearbeitung mit anschließender Saat von Phacelia statt. Bromid aus den Ernterückständen wurde mineralisiert und freigesetzt. Über den Winter waren die Br-Konzentrationen dann überall sehr niedrig, um dann im Februar/März wieder anzusteigen (Einarbeitung Phacelia, Bodenbearbeitung, Saat EE am 15.3.11). Ein dritter kleiner Peak war in den Bodentiefen 10 und 30 cm im September 2011 zu erkennen. Nach Ernte der EE am 5.7.11 und Einarbeitung des Strohes sowie Bodenbearbeitung und Saat von Raps am 31.8.11 fand wiederum eine Freisetzung von Bromid aus den Ernterückständen statt.

### Br-Wiederfindungsraten

Die Wiederfindungsraten des applizierten Bromids im Sickerwasserausfluss schwankten je nach Versuch zwischen 12% und 80% (Tabelle 2). Die geringsten Werte wurden im Versuch B2 gefunden. Nach der Br-Applikation im Mai folgte eine längere Trockenphase ohne Sickerwasser (Abbildung 3). Die Zuckerrüben hatten zwar mit dem Bodenwasser in dieser Zeit viel Bromid aufgenommen (Tabelle 1), dieses wurde aber mit den Ernteresten überwiegend wieder zurückgeführt. Auch nach zwei Jahren und 680 bzw. 800 mm Sickerwasser waren erst 12% ausgewaschen. Demnach muss ein großer Teil des Bromids mehr oder weniger immobil noch im Boden vorhanden sein. Das Bromid kann in kleinere Poren diffundiert sein, wo es nur sehr langsam wieder freigesetzt wird, es kann im Boden adsorbiert sein (z.B. an Eisen oder Mangan) oder in Mikroorganismen oder der organischen Substanz eingebaut sein. Eine relative hohe Wiederfindungsrate gab es im Versuch B1. Bei gleicher Bewirtschaftung lassen sich hier Bodenunterschiede erkennen. Die Braunerde LysGraf erreichte mit 80% die höchste Wiederfindungsrate, die Parabraunerde LysSchaf 73% und die pseudovergleyte, tonreichere Braunerde 69%. Der Transport in LysGraf erfolgte auch am schnellsten. Nach drei Monaten waren bereits 25% und nach sechs Monaten 40% ausgewaschen (Abbildung 3, Tabelle 2). Die Br-Pflanzenaufnahme war entsprechend bei LysGraf am geringsten (Tabelle 1).

Im Versuch A1 unter Silomais im wenig bewässerten Verfahren war die Wiederfindungsrate mit 57 bzw. 62% im Sickerwasser der Schotterbraunerde deutlich höher als bei der Moränenlehmbraunerde mit 38 bzw. 49%. Im Versuch A2 mit Broccoli war die Wiederfindungsrate in den optimal bewässerten Verfahren höher als in den übermäßig bewässerten Verfahren und in der Schotterbraunerde höher als in der Moränenlehmbraunerde.

Insgesamt zeigt sich aus allen Versuchen, dass die Wiederfindungsrate in den tonreicheren Böden langsamer zunimmt und geringer ist. Dies unterstützt die Vermutung, dass Bromid in kleinere Poren diffundiert und somit der Auswaschung auf lange Zeit entzogen wird. Folgt nach der Br-Applikation eine längere Trockenperiode mit hoher

Evapotranspiration, ist nur noch mit einer geringen Wiederfindungsrate im Sickerwasser zu rechnen.

Der Br-Transport durch das Bodenprofil erfolgte bei beiden Lysimeteranlagen und allen Böden relativ langsam. Bis der größte Teil der bisher gemessenen Bromidfracht ausgewaschen war (deutliches Abflachen der Br-Summenkurven in Abbildung 3), dauerte es 1 bis 2 Jahre bzw. es waren 600 bis 1200 mm Sickerwasser nötig. Die mittlere Sickerwassermenge am Standort Zürich-Reckenholz beträgt rund 400 mm pro Jahr.

### Schlussfolgerungen

Mit dem Einsatz von Bromid als Tracer konnte der Stofftransport durch den Boden in den verschiedenen Lysimetern und Böden charakterisiert werden. Der Tracerdurchgang erfolgte mehrgipflig: ein erster kleiner Schub erfolgte aufgrund von Makroporenfluss kurz nach der Applikation, die Hauptfront und -fracht folgte später über Matrixfluss und ein oder mehrere kleinere Peaks waren nachgeschoben. Sie resultieren aus der Freisetzung von Bromid aus Ernterückständen bei nachfolgender Bodenbearbeitung. Die Verweilzeit von Bromid war lang. Insgesamt dauerte es 1 bis 2 Jahre und es waren 600 bis 1200 mm Sickerwasser nötig, bis der größte Teil des applizierten Bromids ausgewaschen war. FANK (2009) nennt mit 278-459 Tagen Verweilzeiten in einer ähnlichen Größenordnung. Die Wiederfindungsraten im Sickerwasserausfluss waren mit 12-80% niedrig bis hoch. Die mit den Ernteprodukten weggeführten Bromidfrachten waren mit 2-12% der applizierten Menge gering. Die über die Ernterückstände (und vermutlich auch Wurzeln) zurückgeführten Bromidmengen waren dagegen besonders bei den Sommerkulturen hoch. Für das überwiegend erhebliche Massenbilanzdefizit nach zwei und mehr Jahren kann nur Diffusion in kleine Poren, Adsorption an Bodenteilchen oder Einbau in organische Substanz und Mikroorganismen vermutet werden. Bis dieses derzeit immobile Bromid wieder freigesetzt (Desorption, Rückdiffusion) und ausgewaschen wird, können Jahre oder Jahrzehnte vergehen (Retardation). Gegenwärtig sind die Br-Konzentrationen in allen Versuchen sehr gering (<3 mg/l Br).

Überträgt man unter den gegebenen klimatischen Bedingungen die Erkenntnisse auf die Nitratverlagerung in den untersuchten Böden, bedeutet dies, dass auch die Nitratwaschung relativ langsam verläuft. Der im Boden mineralisierte oder mit Düngern ausgebrachte Stickstoff benötigt - sofern er nicht von den Pflanzen aufgenommen wird - 1-2 Jahre bzw. mehr als eine Sickerwasserperiode, bis er den durchwurzelbaren Boden verlassen hat.

### Literatur

- DRESSEL, J., 2003: Transport von Ethydimuron, Methabenzthiazuron und Wassertracern in einer Parabraunerde. Dissertation, Universität Bonn.
- FANK, J., 2000: Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefruchtung des Grundwassers in quartären Lockersediment - Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich). Habilitation, Graz.
- FANK, J., 2009: Tracerhydrologie in der Lysimetrie. Bericht 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, 63-68.

- GROENEWEG, J., H. RÜTZEL, T. PÜTZ und H. VERECKEN, 2007: Verlagerung des Veterinärantibiotikums Sulfadiazin in Lysimetern. Bericht 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, 71-73.
- LISSNER, H., D. SCHOTANUS, L. MADRIGAL, G. EGGEN, H. FRENCH, S. VON DER ZEE, K.U. TOTSCHKE and M. WEHRER, 2012: Monitoring and characterisation of flow and transport in field- and laboratory experiments. In: Soil Contamination: Advanced integrated characterisation and time lapse Monitoring (SoilCAM), Bioforsk.
- PRASUHN, V., E. SPIESS und M. SEYFARTH, 2009: Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. Bericht 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdring, 11-16.
- PRASUHN, V., E. SPIESS, C. HUMPHRYS und C. VÖGELI ALBISSER, 2011: Lysimeterforschung an ART – dem Nitrat auf der Spur. Bulletin BGS 32, 85-90.
- REINKEN, G., 2004: Bodenphysikalische Untersuchungen zur Prozeßanalyse der Wasserbewegung und des Stofftransportes in ungesättigten, strukturierten Böden unter besonderer Berücksichtigung der Mechanismen der präferentiellen Wirkstoffverlagerung. Dissertation Universität Köln.
- VÖGELI ALBISSER, C. und V. PRASUHN, 2013: Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadstoffverfrachtung ins Grundwasser. Projekt-Schlussbericht, BAFU & Agroscope, 107 S.
- WERNLI, H.R., 2011: Einführung in die Tracerhydrologie. Geografisches Institut Universität Bern.