

# Lysimeter – Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte

*Lysimeter – Demands, Experiences, Technical Concepts*

K. E. BÖHM, P. CEPUDER, G. EDER, J. FANK, F. FEICHTINGER, F. FÜHR,  
H. GAUDLITZ, M. H. GERZABEK, G. HINREINER, H. HOLZMANN, D. KLOTZ,  
S. KNAPPE, A. KRENN, A. LEIS, R. MEISSNER, W. MITTELSTAEDT, H. P. NACHTNEBEL,  
Th. PÜTZ, J. RIESING, H. RUPP, J. SEEGER, G. VON UNOLD & H. VEREECKEN

## Inhalt

	Seite
1. Einleitung (A. LEIS) .....	118
2. Lysimeteranlagen in Österreich (G. EDER) .....	120
2.1. Typ 1 – Sickerwassersammler nach E. STENITZER .....	120
2.2. Typ 2 – monolithische Feldlysimeter nach dem System Petzenkirchen .....	122
2.3. Typ 3 – klassische Lysimeteranlagen .....	123
2.4. Typ 4 – „virtuelle“ Lysimeter .....	123
2.5. Typ 5 – Säulenversuche .....	124
3. Erfassung der Wasserbilanzgrößen mittels Lysimeter (P. CEPUDER) .....	124
3.1. Einleitung .....	124
3.2. Einteilung der Lysimeter .....	124
3.3. Wasserbilanzgrößen .....	126
3.4. Erfahrungen .....	126
4. Erfassung von Wasserinhaltsstoffen mittels Lysimeter (F. FEICHTINGER) .....	128
4.1. Einleitung .....	128
4.2. Untersuchungsumfang .....	129
4.3. Ergebnisse .....	129
4.4. Diskussion und Ausblick .....	131
5. Wasserfluss- und Nitratbilanzierung bei unterschiedlichen Lysimetertypen der Forschungsstation Wagna (J. FANK) .....	132
5.1. Einleitung .....	132
5.2. Bilanzierung des Wasserflusses .....	133
5.2.1. Ergebnisse an den Gefäßlysimetern .....	133
5.2.2. Ergebnisse an den Monolithlysimetern .....	134
5.2.3. Ergebnisse an den Sickerwassersammlern (Kleinlysimeter) .....	135
5.2.4. Bewertung der Bilanzierung des Wasserflusses .....	138
5.3. Bilanzierung des N-Austrages .....	138
5.3.1. Nitrat – Konzentrationsverteilung nach der Tiefe .....	138

5.3.2. N-Austrag aus der ungesättigten Zone .....	139
5.3.3. N-Austrag aus den Gefäßlysimetern .....	140
5.4. Zusammenfassung.....	141
6. Lysimetrie im pflanzenbaulichen Versuchswesen – pro und contra am Beispiel eines Forschungsprojektes des Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft (BFL), Wien (K. E. BÖHM) .....	142
6.1. Einleitung.....	142
6.2. Pflanzenbauliche Aspekte .....	143
6.3. Gestörte Bodenbefüllung.....	143
6.4. Wiederholungen je Bodentyp.....	144
6.5. Technische Ausstattung .....	145
6.5.1. TDR-Sonden .....	145
6.5.2. Tensiometer.....	145
6.5.3. Temperatursensoren.....	145
6.5.4. Drucksteuerungsanlage.....	146
6.6. Zusammenfassung.....	146
7. Direkte Messung der Flussbettinfiltration mit Hilfe eines Flussbett- lysimeters (H. HOLZMANN, H. P. NACHTNEBEL) .....	147
7.1. Einleitung.....	147
7.2. Problemstellung und Untersuchungsgebiet.....	147
7.3. Methodik der Lysimetertechnik .....	148
7.4. Beschreibung des Flussbettlysimeters.....	150
7.5. Messergebnisse.....	151
7.6. Zusammenfassung.....	152
Dank .....	153
8. Applikation von Radioisotopen im Lysimeterversuch (Th. PÜTZ, W. MITTELSTAEDT, H. VERECKEN, F. FÜHR).....	153
8.1. Einleitung.....	153
8.2. Einsatz von Radioisotopen im Lysimeterversuch.....	155
8.3. Applikation von radioaktiv markierten Substanzen.....	156
8.3.1. Manuelle Applikation .....	157
8.3.2. Halbautomatische Applikation .....	160
8.4. Schlussbetrachtung.....	163
8.5. Zusammenfassung.....	164
9. Vergleich unterschiedlicher Lysimetertypen – Einsatzmöglichkeiten und Grenzen (J. SEEGER, R. MEISSNER, H. RUPP).....	164
9.1. Einleitung.....	164
9.2. Material und Methoden.....	165
9.3. Ergebnisse und Diskussion .....	165
9.3.1. Einsatzgebiete von Lysimetern.....	165
9.3.2. Bewertung ausgewählter Lysimetertypen .....	169
9.3.2.1. Vergleich von Tracerversuchsergebnissen.....	169
9.3.2.2. Vergleich von Bewirtschaftungsszenarien.....	171
9.3.2.3. Ermittlung der realen Evapotranspiration.....	173
9.3.3. Vergleich der Lysimetertypen.....	175
9.4. Schlussfolgerungen.....	177
9.5. Zusammenfassung.....	177

10. Untersuchungen an den Intensiv-Lysimetern der GSF-Anlage Neuherberg (D. KLOTZ, H. GAUDLITZ, G. HINREINER) .....	177
10.1. Einleitung .....	177
10.2. Lysimeter der GSF-Anlage Neuherberg .....	178
10.3. Registrierung der Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung in den Messsondenebenen .....	180
10.4. Untersuchungen zu den Bypassflüssen .....	184
10.5. Zusammenfassung .....	184
11. Altlastenlysimeter Seibersdorf – Lysimeteereinsatz zur Gefährdungsabschätzung von Altlasten (A. KRENN, J. RIESING, M. H. GERZABEK) .....	184
11.1. Einleitung .....	184
11.2. Material und Methode .....	185
11.2.1. Anlage .....	185
11.2.2. Eingebautes Ausgangsmaterial .....	186
11.2.3. Angewendete Verfahren .....	186
11.2.4. Maßnahmen beim Einbau gegen bevorzugte Wasserwegigkeiten..	187
11.3. Ausgewählte Ergebnisse und Erfahrungen .....	188
11.4. Zusammenfassung .....	189
Dank .....	190
12. Anforderungen, Erfahrungen, Konzepte zum Lysimeteereinsatz für Bergbaufolgelandschaften (S. KNAPPE) .....	190
12.1. Einleitung .....	190
12.2. Anforderungen, Erfahrungen, Konzepte .....	191
12.2.1. Möglichkeiten der Nutzung von Lysimetern für Kippen mit hoher Heterogenität .....	191
12.2.2. Grundausstattung an Messtechnik und Anforderungen an verwendete Materialien .....	195
12.2.3. Messtechnik für Untersuchungen von Bodenluft sowie Austrag gasförmiger Komponenten mit Sickerwasser oder an die Umgebungsluft .....	198
12.2.4. Probleme und Besonderheiten bei der Bestimmung von im Boden- bzw. Sickerwasser gelösten Stoffen bzw. Ionenbilanzen zur Validierung geochemischer Modelle – Vorstellung eines neuen Onlinemesssystems „SAMSON“ .....	199
12.3. Zusammenfassung .....	200
13. Allgemeine Anforderungen an Lysimeter und deren Betrieb – Technische Konzeption/Betreuung/Qualitätssicherung (G. VON UNOLD) .....	201
13.1. Einleitung .....	201
13.2. Allgemeine Anforderungen und technische Konzeption .....	202
13.2.1. Erhalt des natürlichen Bodengefüges .....	202
13.2.2. Minimierung von Inseleffekten .....	202
13.2.3. Erhalt des natürlichen Wasserflusses .....	203
13.2.4. Thermische Vergleichbarkeit .....	204
13.2.5. Verwendung chemisch inerter Werkstoffe .....	204
13.2.6. Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit bestehenden Lysimetern ..	204
13.2.7. Stabiler Betrieb ohne Störungen über mehrere Jahrzehnte .....	204
13.2.8. Einsetzbarkeit für zukünftige Aufgabenstellungen .....	204
13.2.9. Normen und Richtlinien .....	205

13.3. Zieldefinition und Anforderungsprofil.....	205
13.4. Realisierung.....	206
13.4.1. Entnahme.....	206
13.4.1.1. Boden.....	206
13.4.1.2. Wahl des Standortes.....	207
13.4.1.3. Anforderungen an Maschinen und Bauarbeiter.....	208
13.4.1.4. Monolithische Entnahme.....	208
13.4.1.5. Gestörte oder verfüllte Lysimeterböden.....	209
13.4.1.6. Grobsand, Kies und Schotter.....	209
13.4.1.7. Terminwahl und Wasserspannung des Bodens für die Bodenentnahme.....	209
13.4.1.8. Qualitätssicherung.....	210
13.4.2. Lysimetergefäß.....	210
13.4.2.1. Allgemeines.....	210
13.4.2.2. Einfassung.....	210
13.4.2.3. Lysimeterzylinder.....	210
13.4.2.4. Filterboden.....	211
13.4.2.5. Materialien, Beschichtung und Oberflächen.....	211
13.4.2.6. Toleranzen und Schneidkante.....	211
13.4.2.7. Sondenbohrungen, Verschraubungen.....	211
13.4.3. Sickerwasserabflussmessung.....	212
13.4.4. Anforderungen an das Bauwerk.....	212
13.4.4.1. Allgemeines.....	212
13.4.4.2. Vermeidung von Inseffekten.....	213
13.4.4.3. Wägbare Lysimeter.....	213
13.4.5. Tracerversuche.....	214
13.5. Anforderungen an den Betreiber.....	214
13.6. Wissenschaftliche Betreuung und Qualitätssicherung.....	216
13.7. Zusammenfassung.....	216
Dank.....	216
Zusammenfassung (A. LEIS).....	217
Literatur.....	219
Summary (A. LEIS).....	227

## 1. Einleitung (A. LEIS)

In den letzten Jahren haben Lysimeteruntersuchungen auch in der Hydrogeologie verstärkt Einzug gehalten. Der Grund hierfür liegt vor allem in der Erkenntnis, dass der Wasser- und Stofftransport in der ungesättigten Zone als Input für die gesättigte Grundwasserzone sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserbeschaffenheit hat. Die Unterschätzung der Bedeutung des Wasser- und Stoffhaushaltes in der ungesättigten Zone hat in der Vergangenheit besonders in den landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten zu einer erheblichen anthropogenen Belastung des Grundwassers geführt. Lysimeteruntersuchungen ermöglichten hier bereits nach einem relativ kurzen Zeitabschnitt wesentliche Aussagen über die Auswirkungen unterschiedlicher Landnutzungsformen auf die

Grundwasserqualität und -quantität. Sie haben sich außerdem als sehr effizientes Werkzeug für die Validierung und Kalibrierung von Wasser- und Stofftransportmodellen bewährt.

Ursprünglich als einfaches Hilfsmittel zur Erfassung von Sickerwassermenge und -güte eingerichtet, sind Lysimeter heute oft komplexe Versuchsanlagen, deren technische Ausstattung so konzipiert ist, dass Wasserbewegung und Stofftransport unter möglichst naturnahen Bedingungen erfasst werden können. Das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten reicht von der hochaufgelösten Messung von Wasserhaushaltsgrößen für die Validierung und Kalibrierung von Transportmodellen über Studien des Weg-Zeit-Verhaltens von verschiedensten Stoffen (Nährstoffe, Schwermetalle, Pflanzenschutzmittel, Pharmaka usw.) bis zur biogeochemischen Prozessforschung.

Das sich ständig erweiternde Anwendungsgebiet für Lysimeteruntersuchungen hat dazu geführt, dass bei den bestehenden Lysimeteranlagen sowohl in konstruktiver Hinsicht als auch bei der messtechnischen Ausstattung eine große Vielfalt herrscht. Es stellt sich daher für den potentiellen Lysimeteranwender oft die Frage, welche Lysimeter für welchen Zweck am besten geeignet sind.

Dieser Fragestellung Rechnung tragend, veranstaltete die Österreichische Arbeitsgruppe Lysimeter gemeinsam mit der Fa. UMS GmbH München in Graz einen Workshop mit dem Titel „Lysimeter – Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte“. Im Mittelpunkt dieses als Erfahrungsaustausch zwischen Anwendern und Herstellern von Lysimetern konzipierten Workshops standen:

- das Aufzeigen des Status quo der technischen Ausführung von Lysimetern in Abhängigkeit von den jeweiligen Anwendungen (Wasserbewegung, Stoffdynamik, Stofftransport etc.);
- das Aufzeigen der Möglichkeiten, Grenzen und methodischen Probleme beim Arbeiten mit Lysimetern;
- die Erarbeitung von neuen Lösungsansätzen in der bodenhydrologischen Messtechnik.

In den Fachvorträgen wurden Probleme und Lösungsansätze zu den oben genannten Punkten vorgestellt und diskutiert. Die Veröffentlichung dieser Arbeiten ist Gegenstand der vorliegenden Publikation.

Neben einem generellen Überblick über die verschiedenen in Österreich eingesetzten Lysimeteranlagen (Kap. 2) werden in den Einzelbeiträgen (Kap. 3–13) folgende Themenschwerpunkte behandelt:

- die unterschiedlichen Anforderungen an den Aufbau und die Instrumentierung eines Lysimeters in Abhängigkeit von den zu erfassenden Wasserbilanzgrößen;
- die Probleme bei der Erfassung von Wasserinhaltsstoffen mittels Lysimeter; diskutiert werden insbesondere die Erkenntnisse aus Feldversuchen mit Lysimetern bei der Gewinnung von Sicker- und Bodenwasser aus monolithischen Bodenkörpern, mit Sickerwassersammlern und mit Saugkerzen;
- die Erfahrungen des Einsatzes unterschiedlicher Lysimetertypen (Gefäß-, Monolith- und Kleinlysimeter) bei der Wasserfluss- und Nitratbilanzierung an der Forschungsstation Wagna (Südsteiermark);
- die Probleme bei der Anwendung der Lysimetrie im pflanzenbaulichen Versuchswesen;
- der Einsatz von Flussbettlysimetern für die direkte Quantifizierung der Infiltration von Fließgewässern ins Grundwasser unter unterschiedlichen hydrologischen Verhältnissen;

- die vielfältigen Einsatzgebiete für die Applikation radioaktiv markierter Stoffe bei Lysimeterversuchen;
- der Vergleich von Lysimetern unterschiedlichen Alters und verschiedener Bauart im Hinblick auf ihre Einsatzmöglichkeiten und Grenzen;
- die Ergebnisse von Spezialuntersuchungen an Intensiv-Lysimetern zur Differenzierung zwischen Bypass- und Matrixfluss;
- die Anwendung der Lysimetertechnologie zur Gefährdungsabschätzung von Altlasten;
- die Anforderungen, Erfahrungen und Konzepte beim Einsatz von Lysimetern für die Untersuchung hydrogeologischer Fragestellungen von Bergbaufolgelandschaften;
- die grundsätzlichen Anforderungen an den Bau von Lysimetern, Qualitätsaspekte in der Lysimetrie und die Fragen eines guten Projektmanagements beim Betrieb einer Lysimeterstation.

Auch wenn die Arbeiten in ihrer thematischen Breite nur einen begrenzten Ausschnitt aus dem breiten Anwendungsspektrum von Lysimeteruntersuchungen widerspiegeln, zeigen sie doch wie vielfältig die Einsatzmöglichkeiten von Lysimeteruntersuchungen für hydrogeologische Fragestellungen sind. Das große Interesse an dieser Thematik war Anlass, die einzelnen Fachbeiträge zu einer Übersichtsarbeit zusammenzufassen und diese innovative Methode, nicht zuletzt auch als Anregung, einem breiteren Publikum zugänglich zu machen.

## 2. Lysimeteranlagen in Österreich (G. EDER)

Im Folgenden wird versucht, die derzeit in Österreich vorhandenen Lysimeter in fünf Typen zusammenzufassen, ihre Funktionsweise zu schildern und ihren Aufstellungsort und Betreiber zu nennen.

### 2.1. Typ 1 – Sickerwassersammler nach E. STENITZER

Dieser Lysimetertyp wird auch als Krümenlysimeter (M. DACHLER, 1992) bezeichnet und wurde von Dr. Elmar STENITZER am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen konstruiert. Er wurde ausschließlich für skelettreiche Böden entwickelt und ursprünglich auch nur in solchen eingesetzt.

Nach einer Modifizierung durch P. CEPUDER et al. (1997) und P. RAMSPACHER (1993) wird dieser Lysimetertyp nun in sehr handlicher und technisch gut ausgereifter Form von der Firma UMS in München praktisch europaweit vertrieben und eingesetzt.

Figur 2.1 zeigt die wesentlichen Elemente, aus denen sich dieser Typ zusammensetzt, nämlich die porösen Keramiksaugplatten aus Sintermaterial in einer Plastikwanne, die Saugleitung zum Sammelgefäß und das Sammelgefäß samt vorgeschalteter Vakuumflasche.

Diese Wanne kann nun je nach Bedarf in allen Bodentiefen eingesetzt werden. Dazu ist allerdings eine Profilgrube auszuheben, sodass sich nach dem Wiederverfüllen ein gestörtes Bodenprofil über der Auffangwanne befindet.

Der Vorteil dieses Systems ist, dass es praktisch in jedem Feldstück einzubauen ist, welches dann wiederum praxiskonform bewirtschaftet werden kann, und dass das Sammelgefäß für das Bodenwasser sowie der Unterdruckspeicher nur wenig Platz brau-

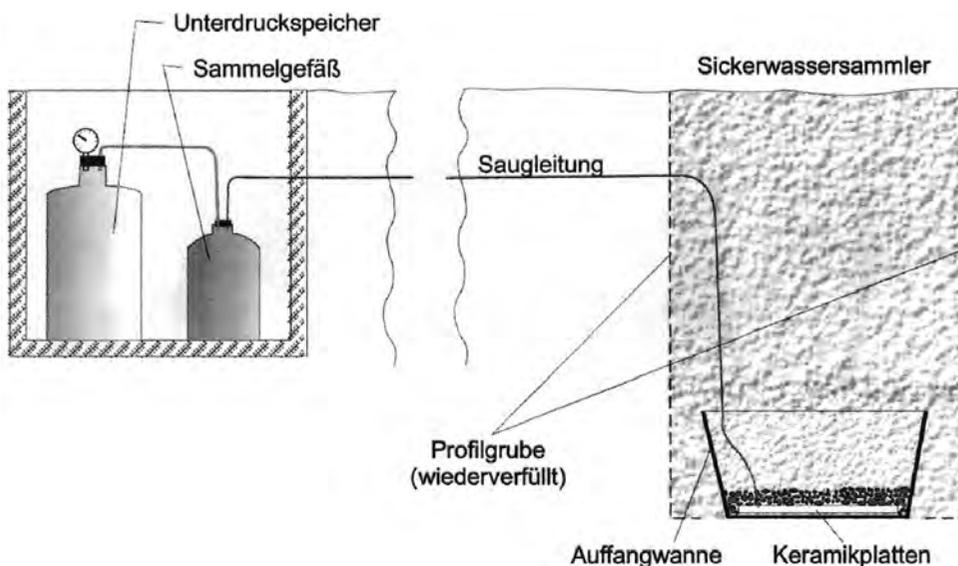


Fig. 2.1: Sickerwassersammler nach E. STENITZER (Quelle: Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen).  
 Percolation sampler after E. STENITZER (data: Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen).

chen. Der für beide Gefäße notwendige Schacht ist leicht in jedem Ackerrain oder Feldweg unterzubringen.

Diese Vorzüge sind auch der Grund, dass dieser Lysimetertyp der derzeit in Österreich am meisten verbreitete ist und bevorzugt von den Landwirtschaftskammern (E. KLAGHOFER, 1994) für deren Beratungstätigkeit im Umweltbereich (F. FEICHTINGER, 1993) – also zur Ermittlung der Nitratausträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen und unter den verschiedensten landwirtschaftlichen Kulturarten – verwendet wird.

Derzeit werden Lysimeter dieses Typs in Österreich wie nachfolgend angeführt eingesetzt:

- von der Landwirtschaftskammer Steiermark in Thalerhof, Wagner bei Leibnitz und Straß bei Spielfeld (J. RECHEIS, 1997),
- von der Landwirtschaftskammer Niederösterreich im politischen Bezirk Stockerau bei den Ortschaften Großmugl, Gaisruck, Katzenbach, Höberdorf und Stettendorf, an der Südbahn in Eberfurt, Reisenberg, Turmau und Loipersbach, an der Westbahnstrecke in Oberndorf, Wieselburg, Blindenmarkt und Amstetten und im Marchfeld bei Groß-Enzersdorf,
- von der Landwirtschaftskammer Oberösterreich in Katzdorf, Schwertberg, Eferding/Traun sowie an den landwirtschaftlichen Fachschulen Ritzlhof und Freistadt,
- von der Universität für Bodenkultur, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft im Leibnitzer Feld und am Dobratsch in Kärnten,
- vom Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft Wien in Wolfpassing (M. DACHLER, 1992),
- vom Kärntner Institut für Seenforschung in Liebenfels bei St. Veit an der Glan (R. HRADETZKY, 1999),

- von der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft in Gumpenstein (G. EDER, 1999).

## 2.2. Typ 2 – monolithische Feldlysimeter nach dem System Petzenkirchen

Dieser Typ wurde ebenfalls am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen konzipiert. Er ist vor allem für Böden aus feinklastischem Material gedacht, da ein Herausstechen von Bodenmonolithen in schotterigen, skelettreichen Böden nicht oder nur schwer möglich ist.

Hier waren ursprünglich zwei Untertypen in Verwendung, einerseits quaderförmige Monolithe, die nach dem Herausstechen aus dem Feld mit einer Kiesummantelung wieder eingesetzt wurden (F. FEICHTINGER, 1992), und andererseits zylindrische Monolithe, die nach Anbringung der Bodenplatte mit dem sie umgebenden Stahlzylinder wieder in den Boden rückversetzt wurden. Figur 2.2 bringt eine schematische Darstellung eines solchen Lysimeters samt dem dazugehörigen Messschacht und den möglichen Messfühlern im ungestörten Bodenprofil. Sie wurde (wie auch Fig. 2.1) dankenswerterweise vom Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen zur Verfügung gestellt. Sie entstammt der Fachzeitschrift „Der Förderungsdienst“, 44. Jahrgang, Heft 12/1996, S. 410–413. An zitierter Stelle wird über den konkreten Einsatz dieser Lysimetertypen in der Oberen Pettenbachrinne in Oberösterreich berichtet (E. MURER et al., 1996). In diesem Grundwassersanierungsprojekt werden die dort eingesetzten Monolithlysimeter zur Eichung der Simulationsmodelle (F. FEICHTINGER & E. STENITZER, 1995) bezüglich der flächendeckenden Erfassung der Nitrataussickerung unter landwirtschaftlichen Nutzflächen (D. ROTH et al., 1994) eingebaut.

In Österreich sind Lysimeter dieses Typs

- in Quaderform nur am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen,

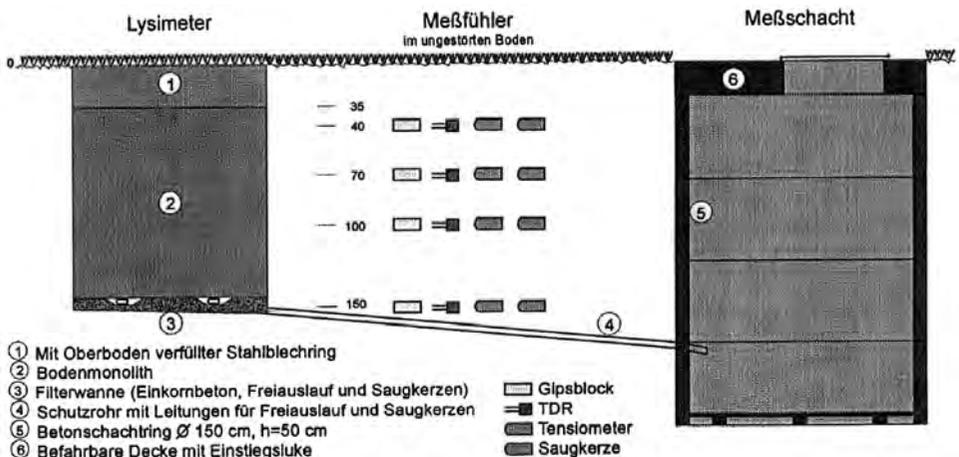


Fig. 2.2: Monolithischer Feldlysimeter, System Petzenkirchen (Quelle: Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen; E. MURER et al., 1996).  
 Monolithic field lysimeter – system of Petzenkirchen (data: Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen; E. MURER et al., 1996).

- in Zylinderform im Rahmen des Forschungsprojektes „Obere Pettenbachrinne“ bei Kirchdorf an der Krems sowie
- am Ludwig Boltzmann-Institut für Biologischen Landbau in Wien in der Lobau,
- von der Universität für Bodenkultur, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft in Fuchsenbigl im Marchfeld und
- von der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft in Gumpenstein im Rahmen eines Düngerkompostierungsversuches eingesetzt.

### 2.3. Typ 3 – klassische Lysimeteranlagen

Unter dem Begriff „klassische Lysimeteranlagen“ sollen in diesem Bericht sowohl monolithisch gezogene als auch gestört befüllte Lysimeter verstanden werden, die eine ganze zusammengehörende Serie bilden.

Lysimeteranlagen werden in Österreich von den nachfolgend angeführten Institutionen betrieben:

- Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen: Dort befindet sich die älteste in Österreich existierende Lysimeteranlage.
- Institut für Hydrogeologie und Geothermie der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH Graz: Anlage in Wagna bei Leibnitz (H. ZOJER et al., 1991).
- Institut für Landwirtschaft des Österreichischen Forschungszentrums Seibersdorf in Seibersdorf: Das dortige Institut verfügt über mehrere Lysimeteranlagen, von denen eine für den Einsatz radioaktiver Isotopen zertifiziert ist (M. H. GERZABEK, 1991, A. KRENN, 1997).
- Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft in Gumpenstein: Hier existiert die älteste in Österreich durchgehend betriebene Grünlandlysimeteranlage (G. EDER, 1991).
- Universität für Bodenkultur, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft: Anlage in Groß-Enzersdorf, im pannonischen Klimagebiet (P. CEPUDER & H. SUPERSPERG, 1991).
- Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft in Wien, Institut für Agrarökologie: Dieses besitzt die derzeit modernste und am aufwendigsten instrumentierte Lysimeteranlage Österreichs (M. DACHLER, 1996, H. SCHWABACH & H. ROSENKRANZ, 1996).
- Geoinert Umwelttechnik GesmbH in Katzelsdorf in Niederösterreich: Anlage zur Überprüfung der Deponieeigenschaften von diagenetisch inertisierten Abfällen.

### 2.4. Typ 4 – „virtuelle“ Lysimeter

Die sogenannten „virtuellen“ Lysimeter stellen ausgesuchte Bodenprofile über Grundwasserträgern dar, an denen in den unterschiedlichsten Tiefen Dauermessungen vorgenommen werden. Sie sind meistens mit TDR-Sonden, Tensiometern, Gipsblöcken, Temperaturfühlern und anderen Messsonden bestückt, um auf diese Weise Sickerwasserfronten verfolgen und messen zu können.

Sie werden in Österreich eingesetzt vom:

- Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Hydrographische Landesabteilung) bei Zeltweg,
- Amt der Niederösterreichischen Landesregierung in Immendorf bei Hollabrunn im Weinviertel und in Wolfsbach bei Seitenstetten im Mostviertel.

## 2.5. Typ 5 – Säulenversuche

Hierzu zählen die Säulen aus Acrylglas der Geoinert Umwelttechnik in Katzelsdorf, in denen sowohl die Durchströmung dichter Medien als auch die möglichen Schadstofffrachten aus Deponiematerialien untersucht wurden.

Am Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft in Wien Hirschstetten werden Laborversuche mit Plexiglassäulen durchgeführt, um so Aussagen zum Stoffaustrag (Anionen) aus und Stofftransformationen in Böden (drei unterschiedliche Bodentypen) zu erhalten.

## 3. Erfassung der Wasserbilanzgrößen mittels Lysimeter (P. CEPUDER)

### 3.1. Einleitung

Seit dem Bau des ersten Lysimeters vor mehr als 300 Jahren haben sich Lysimeter zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel für die Untersuchung vieler Fragen des Bodenwasserhaushaltes und der damit zusammenhängenden Transport- und Verlagerungsvorgänge von gelösten und suspendierten Inhaltsstoffen des Bodenwassers entwickelt. In Österreich sind mehr als 200 Lysimeter eingebaut (P. CEPUDER, 1994). Diese befinden sich meist in Gebieten, in denen Probleme mit der Grundwasserqualität auftreten. Messungen von Sickerwasser und deren Inhaltsstoffe dienen zur Quantifizierung von Stoffausträgen aus der durchwurzelten Bodenzone. Betroffen davon sind hauptsächlich die diffusen Austräge im landwirtschaftlichen Bereich. Die Wassergütererhebungsverordnung (WGEV, 1991) enthält Schwellenwerte für alle bekannten Schadstoffe und regelt die Untersuchungen aller Gewässer in Österreich. Sie weist speziell die Grundwasservorkommen im E und S von Österreich als belastet aus. Dass die Belastungen der Grundwässer in den westlichen Bundesländern nicht so dramatisch ausfallen, ist sicherlich auch durch die hohen Niederschläge in diesen Bereichen zu erklären. Durch die damit verbundene höhere Sickerwassermenge ist auch eine verstärkte Verdünnung aller Inhaltsstoffe die Folge.

### 3.2. Einteilung der Lysimeter

Lysimeter werden nach verschiedenen Kriterien eingeteilt. Tabelle 3.1 gibt eine Aufstellung der verschiedenen Größen und Arten.

Als klassisches Lysimeter wäre ein monolithisch bzw. geschichtet wiederbefüllter, unten geschlossener Zylinder oder Quader mit einer Oberfläche zwischen ein bis drei Quadratmeter zu sehen. Je nach Fragestellung können diese auch wägbare, dem Grundwasser ausgesetzt oder mit einem Unterdrucksystem ausgestattet sein. Der Bewuchs auf einem Lysimeter mit seinen pflanzenspezifischen Verdunstungsmengen spielt ebenfalls eine wesentliche Rolle.

Fragen zur Qualität von Bodenwasser bzw. zum Transport von Inhaltsstoffen haben auch die sogenannten Saugkerzen von vielen Wissenschaftlern zu „Lysimetern“ werden lassen. Diese können mit geringem Aufwand im Boden in den gewünschten Tiefen eingebaut werden und dadurch relativ rasch Informationen über eine Stoffbewegung liefern. Dies ist durch die einfache Einbauweise auch im ungestörten Bodenbereich möglich.

Tab. 3.1: Einteilung der Lysimeter.  
Types of lysimeter.

<b>nach Größe:</b> Saugkerze Kleinlysimeter Lysimeter Großlysimeter	<b>nach Einbringungsart des Bodens:</b> befüllte Lysimeter (gestört) Monolithe (ungestört)
<b>weitere Einteilung:</b> wägbar, Unterdruck, Grundwasserspiegel, geschichtet, Bewuchs	„virtuelles“ Lysimeter

Großlysimeter mit einem Durchmesser bis zu 28 m liefern sogar für Waldbestände Informationen über den Wasser- und Stoffhaushalt.

Jeder Eingriff in das natürliche System verursacht Fehler. Klassische Lysimeter sind daher bei unsachgemäßer Handhabung fehlerbehaftet. Je genauer die natürliche umgebende Boden-, Grundwasser- und Bewuchssituation mit Hilfe eines Lysimeters simuliert werden kann, desto kleiner sind auch die „Lysimeterfehler“ (E. KLAGHOFER, 1991).

Eine alte Überlegung ist das sogenannte „virtuelle“ Lysimeter (Fig. 3.1). Auf Grund des Fortschrittes in der Elektronik und der Möglichkeit der Datenaufzeichnung ist das „virtuelle“ Lysimeter zu einer aktuellen Alternative in der Lysimetrie geworden. Die Bodenwasserbewegung ist ein physikalischer Vorgang, der durch die physikalischen Parameter Wasseranteil und Wasserspannung definiert ist. Zwischen diesen beiden Parametern besteht eine Abhängigkeit, welche in der zeitlichen Abfolge der Änderun-

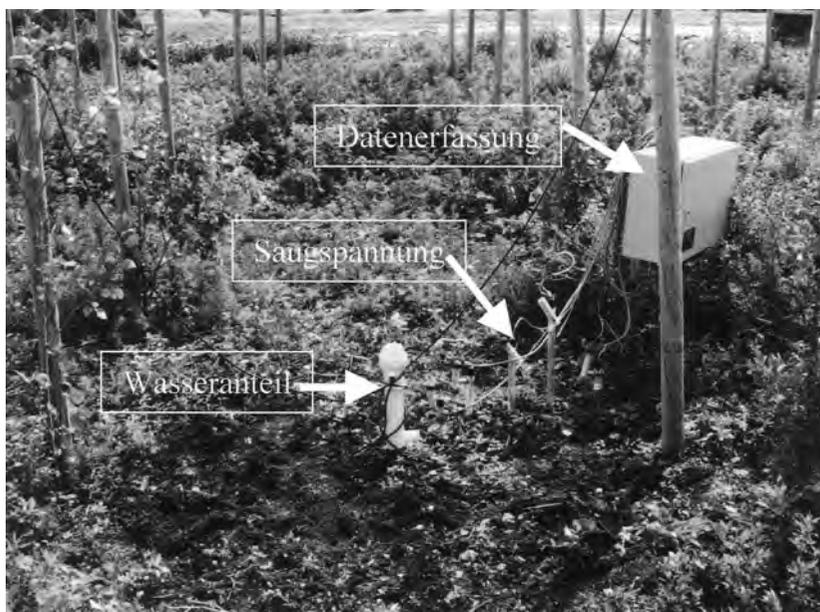


Fig. 3.1: „Virtuelles“ Lysimeter in einer Deponieabdeckschichte.  
“Virtual” lysimeter in a landfill cover.

gen und bei bekannten Randbedingungen die Bewegung des Wassers im Boden zu beschreiben im Stande ist und somit als relativ ungestörte Art eines Lysimeters gute Aussagen betreffend Sickerwasser ermöglicht. Das „virtuelle“ Lysimeter liefert mit der Messung des Wasseranteils und der Wasserspannung in kleinen zeitlichen Intervallen die dafür notwendigen Basisdaten. Zu erwähnen ist, dass dabei auch gewisse Randbedingungen und eine Kalibrierung der Sensoren speziell für den hohen Saugspannungsbe- reich zu berücksichtigen sind.

### 3.3. Wasserbilanzgrößen

Als Wasserbilanzgrößen werden Verdunstung, gespeichertes Bodenwasser und Sickerwasser behandelt. Für die Erfassung dieser Wasserbilanzgrößen sind den Anforderungen entsprechend geeignete Lysimetertypen zu wählen.

Für die Ermittlung der Verdunstung sollte das Lysimeter wägbare bzw. die Wassergehaltsänderung und das Sickerwasser erfasst werden. Wägbare Lysimeter sind sehr kostenintensiv, liefern jedoch bei entsprechend kleiner zeitlicher Auflösung detaillierte Informationen über die Verdunstung. Bei Verzicht einer Gewichtserfassung kann über die Änderung des Bodenwassergehaltes die Verdunstung ermittelt werden. Der zeitliche Abstand der Wassergehaltsmessungen im Profil liefert die anzugebenden Intervalle der Verdunstung. Unter Berücksichtigung der effektiven Niederschläge können die daraus ermittelten Verdunstungswerte von Wochen- über Tages- bis zu Stundenwerten angegeben werden. Für die Erfassung des Wassergehaltes eignen sich Neutronensonden bzw. gleichwertige Messgeräte auf Basis kapazitiver oder dielektrischer Messwerterfassung. Die Angabe der Sickerwassermenge ist in allen Fragen der Verdunstungsermittlung unbedingt notwendig.

Zur Erfassung der Wasserspeicherung (Wasserkapazität) eines Bodens kann neben dem Einsatz von wägbaren Lysimetern auch die Änderung des Wasseranteils im Profil herangezogen werden. Bei kontinuierlichen Niederschlägen zeigt ein konstantes Gewicht bei wägbaren Lysimetern bzw. ein gleichbleibender Wassergehalt im Profil das Erreichen der Wasserkapazität. Je kürzer dabei die Messintervalle angesetzt sind, desto genauer ist das Ergebnis.

Für die Erfassung der Sickerwassermenge können von der Konstruktion her auch weniger aufwendige Typen ausreichend sein. Meist werden für die quantitative Erfassung sogenannte Sickerwassersammler bzw. Kleinlysimeter nach E. STENITZER (1988) bzw. P. CEPUDER et al. (1992) verwendet. Vorteil dieser Systeme ist die maschinelle Bearbeitbarkeit der landwirtschaftlichen Flächen. Nachteil ist jedoch bei unsachgemäßer Handhabung der anzulegenden Saugspannung eine Unsicherheit in der Sickerwasserquantität. Monolithische Anlagen (E. MURER, 1995) kommen wegen der hohen Kosten nur vereinzelt zum Einsatz.

### 3.4. Erfahrungen

Mit der Lysimeteranlage Groß-Enzersdorf werden seit Jahren tägliche Verdunstungsdaten von Ackerfrüchten gemessen. In Fig. 3.2 sind die Schwankungen der Verdunstungsraten im Jahresablauf von Winterraps deutlich zu sehen. Durchschnittliche tägliche Verdunstungsmengen von 0,5 mm im Winter bis zu 3,5 mm im Frühjahr liefern den tatsächlichen Wasserbedarf. Wasserbilanzen von Ackerkulturen für größere Gebiete können somit genauer ermittelt werden.

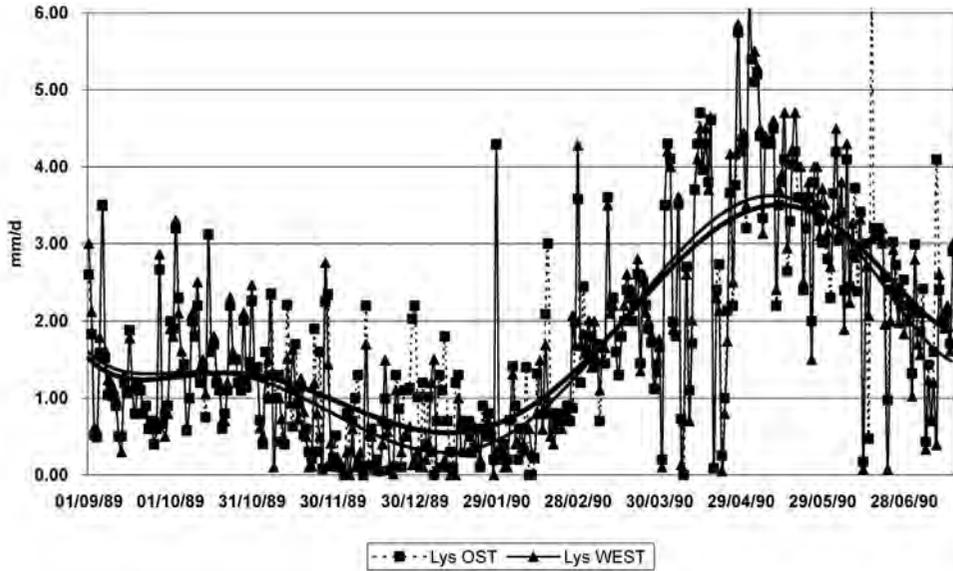


Fig. 3.2: Tägliche Verdunstungsraten von Winterraps (dicke Linie – Trendlinie Lysimeter Ost, dünne Linie – Trendlinie Lysimeter West).  
Daily rates of evaporation of rape (thick line – trend line of lysimeter East, thin line – trend line of lysimeter West).

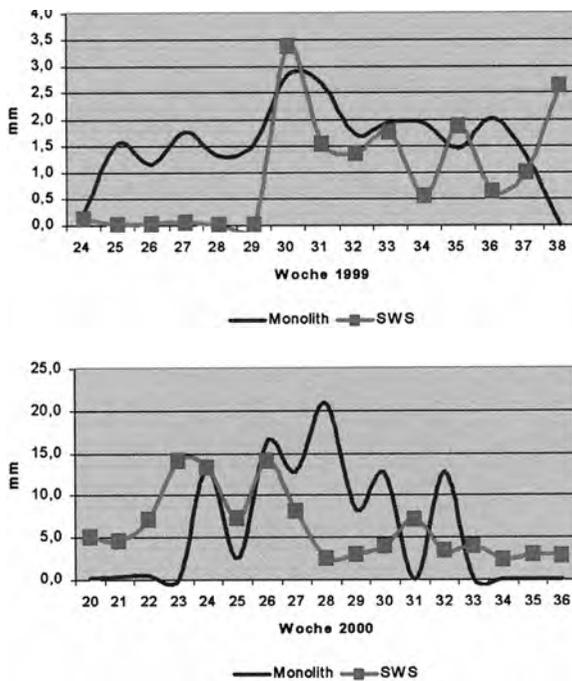


Fig. 3.3: Sickerwasseranfall im Sickerwassersammler (SWS) und monolithischen Lysimeter.  
Percolation in percolation sampler (SWS) and monolithic lysimeter.

Der Einsatz von Kleinlysometern bzw. Sickerwassersammlern über viele Jahre hat sich als problemlos gezeigt. Unterschiede in der Jahressickerwassermenge bis zu 100 % widerspiegeln die Heterogenität des Bodens trotz gleichem Profilaufbaues in diesem doch kleinen Messbereich von weniger als 0,1 m<sup>2</sup>. Speziell in Trockengebieten mit manchmal sehr kurzen Sickerwasserperioden ist auf eine gute Betreuung der Unterdruckanlagen zu achten. Trotzdem sind die zeitlichen Phasen der Sickerwasserbildung sehr deutlich. Ein erster Vergleich von Sickerwassersammlern (SWS) und klassischem Lysimeter im Marchfeld zeigt trotz unterschiedlichem Verlauf gleichwertige Ergebnisse (Fig. 3.3). Als Sickerwassersummen wurden 1999 für den SWS 15 mm, für den Monolithen 23 mm ermittelt. Im Jahr 2000 waren dies 106 bzw. 100 mm.

Für die Anwendung eines „virtuellen“ Lysimeters ist eine relativ hohe Genauigkeit der Wasseranteilmessungen und der Wasserspannungen notwendig. Die zeitlichen Messintervalle sind in erster Linie von der zeitlichen Änderung der oberen Randbedingung (z. B. Niederschlag) abhängig und können nach Erfordernis sogar weniger als 10 min betragen. Die Genauigkeit der Erfassung der oberen Randbedingung ist ein wesentlicher Faktor für eine gute Berechnung der Sickerwassermenge. Eine inverse Modellierung (J. SIMUNEK et al., 1998) ist für die Auswertung der „virtuellen“ Lysimeterdaten erforderlich.

## 4. Erfassung von Wasserinhaltsstoffen mittels Lysimeter

(F. FEICHTINGER)

### 4.1. Einleitung

Das Lysimeter dient der Quantifizierung von Wasserhaushaltskomponenten, wobei für einen exakt abgegrenzten Bodenkörper die Versickerungsmengen (nicht wägbares Lysimeter) bzw. auch die Abfluss-, Retentions- und Verdunstungsmengen (wägbares Lysimeter) zeitabhängig ermittelt werden. Mit dem Lysimeter wird vielfach auch die an den Wasserfluss gekoppelte (Nähr-)Stoffversickerung erfasst. Die Frachten werden üblicherweise durch Multiplikation der Sickerwassermenge mit der analytisch bestimmten Konzentration der Inhaltsstoffe im Sickerwasser ermittelt. Daraus erwachsen für eine bestmögliche Einschätzung der (Nähr-)Stoffausträge die Forderungen nach einer „repräsentativen Sickerwassermenge“ und einer „repräsentativen Stoffkonzentration“ im Sickerwasser. Die nachfolgenden Ausführungen sind ein Beitrag zum Thema „repräsentative Stoffkonzentration“ im Sickerwasser.

Im Rahmen der Österreichischen Arbeitsgruppe Lysimeter (Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, BAL) wie auch in umfangreicher Literatur sind zur Gewinnung von Bodenwasser die Lysimetrie (J. NIEVERGELT, 1997, J. D. TOOTH & R. H. FOX, 1998, R. MEISSNER et al., 2001), die „Saugtechnik“ (H. R. DUKE & H. R. HAISE, 1973, J. GROSSMANN et al., 1987, R. MARQUES et al., 1996) und Extraktionsverfahren (R. GIESLER et al., 1996) genannt. Damit verbunden ist die Frage nach möglichen Fehlerquellen (siehe T. BECKMANN et al., 1992, W. W. WENZEL et al., 1997, M. POTSCHIN, 1999, St. WESSEL-BOTHE et al., 2000) bzw. nach der Vergleichbarkeit (C. BEIER & K. HANSEN, 1992, C. P. WEBSTER et al., 1993, D. ROTH et al., 1994) der Ergebnisse. Auf dem Weg von der Gewinnung des Bodenwassers bis zur Analytik der Wasserinhaltsstoffe sind Systemstörungen (Wasser-, Gashaushalt, Milieuveränderungen), Einflüsse der Bodenstruktur (Erschließung verschiedener Porenbereiche), Interaktio-

nen mit verwendeten Materialien (Sorption, Filtration, Verunreinigungen) und uneinheitliche Laboranalytik als Ursachen differenter Ergebnisse in Erwägung zu ziehen.

Das Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT) hat mit Lysimetern, mit Sickerwassersammlern und mit Saugkerzen aus umfangreichen Feldversuchen Erfahrung, wobei primär landwirtschaftlich genutzte Böden im Nahbereich von Wien, im Burgenland, im Tullnerfeld, im nieder- und oberösterreichischen Alpenvorland sowie in der Südoststeiermark und Forstflächen in Niederösterreich und in Tirol untersucht wurden. Von all diesen Ergebnissen werden die Nitratausträge aus Agrarflächen in Pettenbach/Pucking, Oberösterreich, und in Petzenkirchen, Niederösterreich, diskutiert und die Erfahrungen daraus zusammengefasst.

## 4.2. Untersuchungsumfang

In Pettenbach wurden die Aussickerungen aus drei monolithischen Lysimetern untersucht. Diese haben eine kreisförmige Oberfläche von  $1 \text{ m}^2$  und die Lysimeterunterkante liegt  $1,5 \text{ m}$  unter Gelände. Etwa  $1 \text{ m}$  außerhalb des Lysimeters wurden in derselben Tiefe Saugkerzen in den natürlich gewachsenen Boden installiert, mittels derer Bodenlösung gewonnen wurde. Der Boden im Lysimeter 1 (L1) und Lysimeter 2 (L2) ist eine pseudovergleyte Braunerde. L1 war unter intensiver Ackernutzung ( $\sim 2,5 \text{ DGVE/ha}$ ) und L2 unter intensiver Grünlandnutzung. Im Lysimeter 3 (L3) ist der Boden eine Parabraunerde, worauf extensiver Ackerbau ( $\sim 0,7 \text{ DGVE/ha}$ ) betrieben wurde. In Pucking ist auf einer seichtgründigen Lockersedimentbraunerde (ab  $35 \text{ cm}$  Grobanteil vorherrschend) Lysimeter 4 (L4) in gleicher Bauart installiert, welches unter Ackernutzung mit vorwiegend organischer Düngung durch Biogasgülle steht. Die Sickerwassergewinnung außerhalb des Lysimeters (in  $150 \text{ cm}$  unter Gelände) erfolgt dort mittels Sickerwassersammler. Der Bewertungszeitraum erstreckt sich in Pettenbach von Jänner 1995 bis Juli 2000 und in Pucking von September 1995 bis Juli 2000. Details sind aus E. MURER (2001) zu entnehmen.

In Petzenkirchen wurden im Herbst 1989 rechteckige, monolithische Lysimeter (Oberfläche  $0,35 \text{ m}^2$ ) auf einer Lockersedimentbraunerde installiert, wobei die Lysimeterunterkanten und somit Aussickerungsniveaus in  $70$  und  $110 \text{ cm}$  unter Gelände lagen. Die Sickerwassergewinnung erfolgte über einen Freiauslauf wie auch über Saugkerzen, die jeweils an der Lysimeterunterseite platziert waren und dort eine Entwässerung der Lysimeter bis etwa Feldkapazität erwirkten (F. FEICHTINGER, 1999). Die Fläche wurde nach regionaler Bewirtschaftungspraxis als Acker genutzt. Im Zeitraum 01. 09. 1989 bis 04. 03. 1990 wurden die Proben von Freiauslauf und Saugkerzen einer getrennten Nitratanalytik unterzogen, wobei die Wassermengen der Einzelproben bekannt sind.

## 4.3. Ergebnisse

In Fig. 4.1 sind die Nitratkonzentrationen der über den Freiauslauf und mittels Saugkerzen gewonnenen Bodenlösungen für Lysimeter 3 und 4 (L3 und L4 bzw. SK3 und SK4) festgehalten. Dies verdeutlicht, auch stellvertretend für die übrigen Ergebnisse, dass deutliche Unterschiede in der Nitratkonzentration des Sickerwassers infolge merkbar differenter Bewirtschaftungsformen durch beide Messausstattungen aufgezeigt werden.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Nitratkonzentrationen zu bewerten, wurden für die vier Lysimeter die Sickerwassermengen (SW) sowohl mit deren Ni-

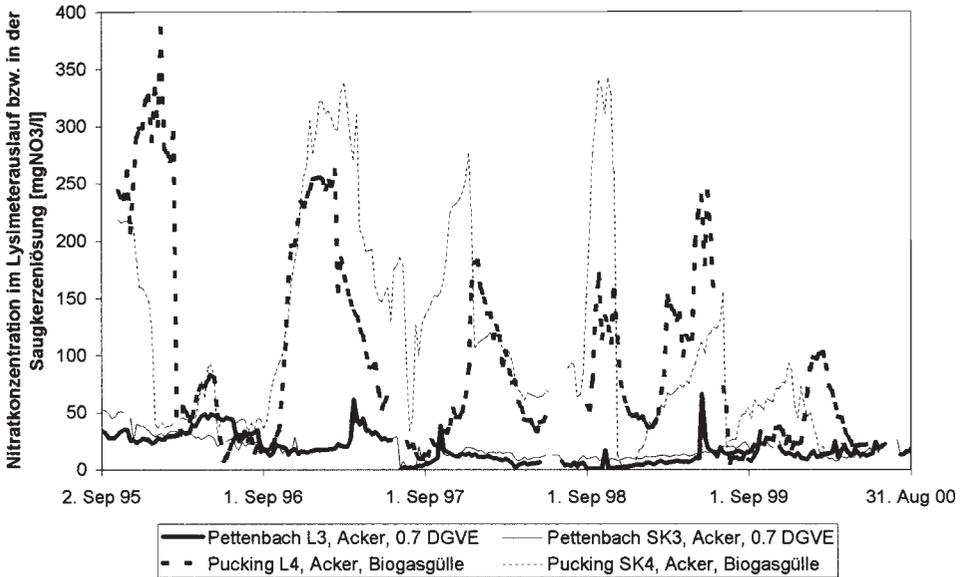


Fig. 4.1: Nitratkonzentration des Sickerwassers von Lysimeter 3 und 4 (L3, L4) und der Bodenlösung von Saugkerzen bzw. Sickerwassersammler (SK3, SK4) aus gleicher Tiefe.  
Nitrate concentration in the discharge of lysimeter 3 and 4 (L3, L4) and in the soil solution at the same depth extracted by suction cups.

tratkonzentrationen als auch mit jenen der parallelen Saugkerzen/Sickerwassersammler zu Frachten verrechnet. Die über den Beobachtungszeitraum akkumulierten Mengen sind in Tab. 4.1 zusammengefasst und einander gegenübergestellt.

Daraus ist ersichtlich, dass die mit den Saugkerzen/Sickerwassersammlern ermittelten Nitratkonzentrationen durchwegs eine höhere akkumulierte Stickstoffversickerung ergeben, die in den Fallbeispielen 6–68 % über jenen der Lysimeterausträge liegt.

Tab. 4.1: Akkumulierte Nitratstickstofffrachten resultierend aus Nitratkonzentrationen der Lysimeter und jener der Saugkerzenlösung samt Relation der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Fracht.  
Accumulated nitrate nitrogen loads in the lysimeter discharge respectively leaching in the soil at the same depth and its ratio.

Standort	Zeitraum	akkumulierte Stickstoffversickerung [ $\text{kgNO}_3\text{-N/ha}$ ]		Relation $\text{NO}_3\text{-N}$ -Fracht Saugkerze/Lysimeter
		SW Lysimeter [mm] × $\text{NO}_3$ Lysimeter [mg/l]	SW Lysimeter [mm] × $\text{NO}_3$ Saugkerze [mg/l]	
Lysimeter 1	01/01/1995– 31/07/2000	235,3	278,2	1,18
Lysimeter 2	01/01/1995– 31/07/2000	113,8	191,3	1,68
Lysimeter 3	01/01/1995– 31/07/2000	110,9	128,1	1,15
Lysimeter 4	01/01/1995– 31/07/2000	383,7	405,6	1,06

**Petzenkirchen 1.9.89 - 4.3.90**  
**Freiauslauf(FA) + Saugkerzen(SK) : 70, 110 cm u. GOK**

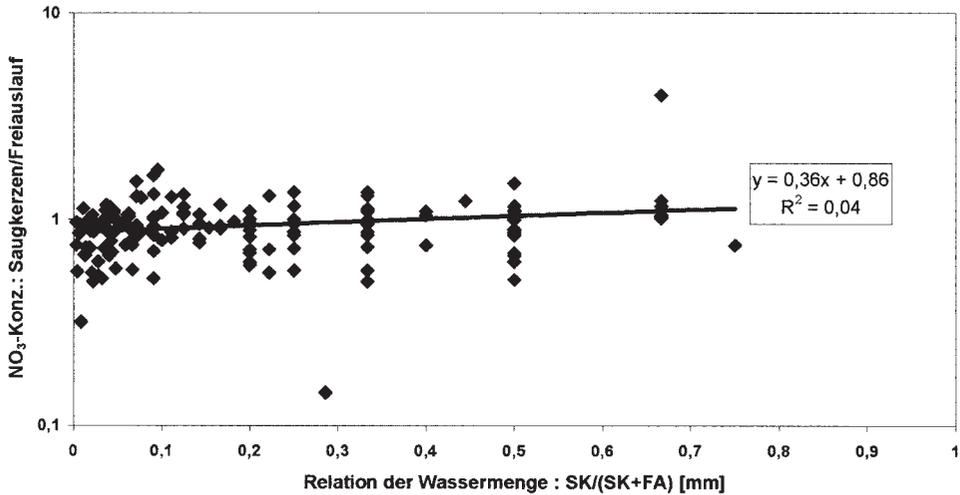


Fig. 4.2: Verhältnis der Nitratkonzentrationen zu jenem der Wassermengen aus Freiauslauf und Saugkerzengewinnung am Lysimeter Petzenkirchen.

*The ratio of simultaneous nitrate concentrations in the lysimeter discharge and in the soil solution related to the ratio of the amount of water caught up with the lysimeter respectively with suction cups at the lysimeter Petzenkirchen.*

Am Lysimeter in Petzenkirchen wurde zur selben Zeit und in derselben Tiefe (Lysimeterunterseite) Bodenwasser über den Freiauslauf und mittels Saugkerzen gewonnen. Das Verhältnis der Nitratkonzentrationen der Simultanproben ist der Relation der Wassermengen, die über Freiauslauf und Saugkerzen gewonnen wurden, in Fig. 4.2 gegenübergestellt.

Die Regressionsanalyse weist ein Verhältnis der Nitratkonzentrationen nahe 1 aus, was eine gute Übereinstimmung von Freiauslauf und Saugkerzenlösung hinsichtlich Nitratkonzentration bedeutet. Obwohl mit  $R^2=0,04$  kaum eine Abhängigkeit der beiden Variablen gegeben ist, deutet der leichte Trend der Ausgleichsgerade an, dass die Nitratkonzentration der Saugkerzenlösung umso eher über jener des Freiauslaufes liegt, je mehr die mit den Saugkerzen gewonnene Bodenlösung die Gesamtsickermenge dominiert. Dies hieße, dass bei mengenmäßiger Dominanz des Freiauslaufes eine „Verdünnung“ bzw. bei Überwiegen der Saugkerzenmenge eine „Aufkonzentrierung“ stattfindet.

#### 4.4. Diskussion und Ausblick

Die aufgezeigten Unterschiede in der Nitratkonzentration von Bodenlösung, die einerseits über Lysimeterfreiausläufe andererseits über Saugkerzen gewonnen wurden, scheinen durch räumliche Heterogenität aber auch durch das Erschließen unterschiedlicher Porenbereiche mitbegründet. Möglicherweise ist der Freiauslauf von bevorzugten Fließwegen für (Oberflächen-)Wasser mit geringer Nitratkonzentration beeinflusst oder erschließen Saugkerzen Porenbereiche, die von geringerer Mobilität jedoch „nachhal-

tiger Nitratkonzentration“ sind. Jedenfalls erhält man mit Lysimeter und mit Saugkerzen/Sickerwassersammler punktuelle Informationen zu Wasserinhaltsstoffen, die mit den oben angeführten Unsicherheiten ausgestattet sind. Daher scheint es angebracht, zeitlich und vor allem räumlich aufgelöste Information durch entsprechende Instrumentierung (Bestimmung von  $\theta$ ,  $\psi$  und Konzentrationen in abgestuften Messstufen und in Wiederholungen) einzuholen und Lysimeter, als relativ aufwendige Instrumente, als Justierpunkte in solch ein Messnetz einzubinden, die dann den exakten Flächenbezug der Messwerte erlauben.

Damit wären auch anzustrebende technische Konzepte umrissen. Dies wären Wasseranteils-, Potential- und Konzentrationsmessungen in zeitlicher und räumlicher Auflösung mit mehrfachen Wiederholungen. Zur technischen Weiterentwicklung wäre zu wünschen, dass eine tiefenaufgelöste Instrumentierung keiner Einzelfühlerplatzierung in den Messebenen bedarf, sondern alle Fühler in einem Stück (z. B. eine Lanze) in den Boden eingebracht werden können. Zur Konzentrationsbestimmung wäre wünschenswert, dass die Weiterentwicklung der Onlinemessung chemischer Parameter im Sickerwasser auf minimalen Wasserentzug aus dem Boden bzw. lediglich auf Wasseraustausch abzielt (Minimierung der Systemstörung) und dabei einen integralen Messwert für den entwässernden Porenbereich liefert.

## 5. Wasserfluss- und Nitratbilanzierung bei unterschiedlichen Lysimetertypen der Forschungsstation Wagna (J. FANK)

### 5.1. Einleitung

Lysimeter sind Messanlagen zur Bestimmung des Wasserhaushalts eines Bodenkörpers mit bekannten Abmessungen, Eigenschaften und Vegetationsverhältnissen. Ursprünglich wurden sie für die Untersuchung der Nährstoffbewegung entwickelt, und stellen mit gestörtem oder ungestörtem Boden gefüllte Behälter dar, in denen als Sickerwasser der Abfluss in vertikaler Richtung punktuell gemessen wird. Beim Einsatz von Lysimetern treten prinzipielle Fehler auf (E. KLAGHOFER, 1991 oder D. ROTH et al., 1994), die bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen: Lysimetertiefe als begrenzender Faktor für die Ausbildung der Saugspannungsprofile, Lysimeterbewuchs und -bearbeitung sowie die Standortgebundenheit der Lysimeter – Lysimetermessungen sind prinzipiell nur Punktmessungen, deren Ergebnisse nicht ohne weiteres auf größere Flächen übertragbar sind (Oaseneffekte).

Das „Leibnitzer Feld“, eine Talweitung des Murtales zwischen Wildon im N und dem Übergang in das „Untere Murtal“ bei Straß im S stellt aufgrund der hydrogeologischen Rahmenbedingungen einen hervorragenden Grundwasserleiter dar, in dem in erster Linie durch infiltrierendes Niederschlagswasser ein Trinkwasserreservoir gespeist wird. Die Intensivierung der Landwirtschaft auf den gut durchlässigen Böden der Schotterterrassen führte zwangsläufig zu Qualitätsproblemen im Grundwasser.

Basierend auf der Erkenntnis, dass ein Schlüssel zur Erfassung der Prozesse, die zum Nitratproblem im Leibnitzer Feld geführt hatten, in der wasserungesättigten Zone zu suchen sei, wurde im Problemgebiet die Forschungsstation Wagna errichtet, die es erlaubt, die Vorgänge der Wasserbewegung und des Stofftransportes von der Atmosphäre über den Boden, die ungesättigten Sande und Kiese der quartären Talfüllung bis in das Grundwasser zu untersuchen. Die Forschungsanlage konnte auf landwirtschaftlichen

Versuchsflächen in einer Fahrgasse zwischen zwei Parzellen mit unterschiedlicher Bewirtschaftung errichtet werden. Da die zu untersuchenden Fruchtfolgen bereits seit mehreren Jahren abließen, konnte durch die Errichtung der Forschungsstation im Bereich dieser Versuchsfelder nach einer sehr kurzen Einlaufzeit mit signifikanten Ergebnissen gerechnet werden.

Der Aufbau der Anlage ist in einer Vielzahl von Veröffentlichungen dokumentiert, die schlussendlich in J. FANK (1999) zusammengefasst sind. Neben einer meteorologischen Station sowie verschiedensten Sensoren, die bodenphysikalische Parameter online erfassen, sind im Bereich der ungesättigten Zone tiefengestaffelt unterschiedliche Lysimeterarten eingebaut, die es erlauben den Wasserfluss und über die Nitratkonzentrationen den Stickstoffeintrag in das Grundwasser zu bilanzieren. Die hier vorgestellten Bilanzergebnisse umfassen den Zeitraum von 1992 bis 1996 und werden auf Monats- und Jahresebene dargelegt.

## 5.2. Bilanzierung des Wasserflusses

Aufgrund der Schwierigkeiten der Erfassung der Grundwasserneubildung in einer realen, maschinell bewirtschafteten Umgebung wird generell empfohlen, nach Möglichkeit mehrere, voneinander unabhängige Verfahren einzusetzen. Die Quantifizierung dieses Flusses aber ist von entscheidender Bedeutung, da jeglicher Stofftransport auf einer korrekten Ermittlung der Wasserbewegung basiert. Der Ablauf der N-Auswaschung ist in Zeit und Masse eng an den Verlauf der Grundwasserneubildung gekoppelt, weshalb bei jedweder Betrachtung der Gefährdung des Grundwassers durch Nitratauswaschung eine detaillierte Bestimmung der Grundwasserneubildung vorgeschaltet sein muss.

Die im Beobachtungszeitraum 1992 bis 1996 an der Forschungsstation Wagna gemessenen Jahressummen des Niederschlags und der berechnete mittlere Jahresniederschlag sind in Tab. 5.1 dargestellt. Die mittlere Jahressumme lag etwas unter dem Mittel von 878 mm der Periode 1976 bis 1996, gemessen an der nahe gelegenen meteorologischen Station Leibnitz/Sulm (J. FANK, 1999).

*Tab. 5.1: Jahressummen des Niederschlags (in mm) während des Untersuchungszeitraumes 1992 bis 1996 und daraus berechnete mittlere Jahressumme gemessen an der Forschungsstation Wagna (Messmethodik siehe J. FANK, 1999).*

*Annual precipitation (mm) for the investigation period 1992 to 1996 and calculated annual mean for the research station Wagna (for measuring methods see J. FANK, 1999).*

1992	1993	1994	1995	1996	mittlere Jahressumme
770	759	842	886	1015	855

### 5.2.1. Ergebnisse an den Gefäßlysimetern

An den Gefäßlysimetern der Forschungsstation Wagna wird der Sickerwasserfluss an zwei identisch befüllten Kästen mit einer Oberfläche von 1 m<sup>2</sup> und einer Tiefe von 1,5 m kontinuierlich registriert. Praktisch alle üblicherweise angeführten Lysimeterfehler (E. KLAGHOFER, 1991) beeinflussen die Fließmenge des Sickerwassers, wobei in Summe davon auszugehen ist, dass die gemessenen Werte im Vergleich zur natürlichen Umgebung unter den gleichen pedologischen Bedingungen zu gering sind (Oaseneffekt, Oberfläche für Maisbau zu gering, Randeffekte).

Die Ergebnisse der Messungen für den Lysimeter mit einer vierschlägigen Fruchtfolge (zweimal Mais, Winterweizen, Raps) und jeweils winterharter Gründেকে sind in Tab. 5.2, die Sickerwassermengen des Lysimeters mit Maismonokultur und Schwarzbrotweizen sind in Tab. 5.3 zusammengefasst. Deutlich erkennbar sind die Unterschiede in den Sickerwassermengen bei gleichem Bodenprofil und differenzierter Bewirtschaftung: Während die mittlere Jahressickerwasserrate beim Fruchtfolgelysimeter bei etwa 30 % des mittleren Jahresniederschlags liegt, erreicht diese bei Maismonokultur etwa 45 %.

### 5.2.2. Ergebnisse an den Monolithlysimetern

Die im Bereich der Versuchsfelder der Forschungsstation Wagna eingebauten Monolithlysimeter beruhen auf dem Prinzip von F. FEICHTINGER (1992). Die Kiesummantelung führt bei den hier eingesetzten Lysimetern nur bis unter die Bearbeitungstiefe im Zuge der maschinellen Bewirtschaftung. Durch die zu geringe Wirksamkeit des an den Monolithlysimetern eingesetzten Unterdrucksystems können die vom Autor E. KLAGHOFER (1991) angeführten Grenzflächenphänomene an der Unterseite des Lysimeters nicht wirksam ausgeglichen werden. Problematisch ist auch der – entgegen dem Vorschlag von F. FEICHTINGER (1992) – absolut horizontale Einbau der Unterseite der Monolithlysimeter, wodurch die Funktionsfähigkeit des Freiauslaufes gerade bei starkem Wasserandrang beeinträchtigt wird. Generell ist eine deutliche Unterschätzung der Perkolatwassermengen im Vergleich zur natürlichen Grundwasserneubildung unter

Tab. 5.2: Monats- und Jahressummen der Sickerwassermengen (in mm) am Gefäßlysimeter „Fruchtfolge“ der Forschungsstation Wagna.  
*Monthly and yearly percolation water (mm) at the lysimeter tank “rotation of crops” at the research station Wagna.*

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	4	8	26	7	7	8	8	4	3	55	41	18	189
1993	32	18	2	5	5	1	2	0	0	61	42	16	186
1994	18	2	1	22	2	42	22	12	7	9	44	13	195
1995	21	25	16	9	17	40	18	5	42	33	9	37	271
1996	37	9	65	45	58	3	30	7	95	84	7	12	453
MITTEL	22	13	22	18	18	19	16	6	29	48	29	19	259

Tab. 5.3: Monats- und Jahressummen der Sickerwassermengen (in mm) am Gefäßlysimeter „Maismonokultur“ der Forschungsstation Wagna.  
*Monthly and yearly percolation water (mm) at the lysimeter tank “maize monoculture” at the research station Wagna.*

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	8	45	13	21	48	67	1	0	0	13	70	70	355
1993	5	3	18	25	13	5	1	0	0	57	49	87	262
1994	52	6	23	66	10	73	2	0	0	18	74	7	331
1995	79	51	84	11	20	32	2	0	67	17	4	57	422
1996	51	19	140	63	62	11	50	0	28	90	14	19	548
MITTEL	39	25	56	37	31	38	11	0	19	39	42	48	383

gleichen Verhältnissen anzunehmen. Diese Unterschätzung ist umso stärker, je seichter der jeweilige Monolithlysimeter ist. Die maximale Tiefe der Monolithlysimeter am Standort Wagna wird durch den Profilaufbau der ungesättigten Zone vorgegeben. In beiden Profilen erreichen die Pflanzenwurzeln die Unterseite des jeweiligen Lysimeters, was vor allem im seichten Maismonokulturprofil zu einer empfindlichen Störung des Wasserflusses führt.

Dies ist deutlich an den Ergebnissen in Tab. 5.4 für die Fruchtfolgeseite und in Tab. 5.5 für die Maismonokulturseite ersichtlich. Die mittleren Jahressummen der Sickerwassermenge liegen nur noch bei 25 % des mittleren Jahresniederschlags auf der Fruchtfolgeparzelle und bei 22 % auf der Maismonokulturparzelle. Aufgrund der geringeren Bodenmächtigkeit ist die gemessene Sickerwassermenge hier sogar niedriger als auf der tiefgründigeren Fruchtfolgeparzelle mit winterharter Gründedecke.

### 5.2.3. Ergebnisse an den Sickerwassersammlern (Kleinlysimeter)

Nach dem Prinzip von E. STENITZER (1988) bzw. in ähnlicher Art und Weise wie von P. CEPUDER (1993) beschrieben, sind im Bereich der ungesättigten Sande und Kiese Kleinlysimeter eingebaut. Im Vergleich zu mehreren anderen Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung (Berechnung der Wasserbilanz aus den meteorologischen Daten, Ableitung der Neubildung aus der Grundwasserstandsganglinie, Berechnung nach dem HAUDE-Einschichtbilanzmodell, Berechnung mit Hilfe eines Bodenwasserhaushaltsmodells) im Bereich der Forschungsstation Wagna (J. FANK, 1999)

Tab. 5.4: Monats- und Jahressummen der Sickerwassermengen (in mm) am Monolithlysimeter „Fruchtfolge“ (Bodenmächtigkeit 110 cm) der Forschungsstation Wagna.  
*Monthly and yearly percolation water (mm) at the monolithic lysimeter “rotation of crops” (soil thickness 110 cm) at the research station Wagna.*

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	16	14	11	16	7	9	1	3	0	29	24	7	138
1993	9	3	6	18	5	0	0	0	0	14	55	68	178
1994	35	26	36	44	14	22	5	0	0	0	29	12	225
1995	36	24	34	10	5	23	4	2	38	17	0	15	208
1996	25	14	46	37	24	3	15	18	39	37	12	16	286
MITTEL	24	16	27	25	11	11	5	5	15	19	24	24	207

Tab. 5.5: Monats- und Jahressummen der Sickerwassermengen (in mm) am Monolithlysimeter „Maismonokultur“ (Bodenmächtigkeit 70 cm) der Forschungsstation Wagna.  
*Monthly and yearly percolation water (mm) at the monolithic lysimeter “maize monoculture” (soil thickness 70 cm) at the research station Wagna.*

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	4	9	3	7	11	13	0	0	0	6	20	8	80
1993	5	4	9	17	16	2	0	0	0	24	44	48	170
1994	42	11	23	38	14	26	1	0	4	16	35	6	214
1995	13	30	30	12	29	29	6	7	42	17	2	16	233
1996	26	14	40	26	26	13	16	0	18	38	15	21	251
MITTEL	18	13	21	20	19	17	5	1	13	20	23	20	190

sind am ehesten die gemessenen Sickerwassermengen an den beiden Sickerwassersammlern in 1,5 m Tiefe im Sand-Kies-Bereich repräsentativ für die Anreicherung des Grundwasserkörpers durch infiltrierende Niederschläge.

Wie in Tab. 5.6 ersichtlich liegt die mittlere Jahressumme der Sickerwassermenge des Kleinlysimeters der Fruchtfolgeparzelle, der in 150 cm unter Gelände im Sand-Kies-Bereich der ungesättigten Zone eingebaut ist, bei etwa 35 % des mittleren Jahresniederschlags, der äquivalente Wert des Kleinlysimeters der Maismonokulturparzelle (Tab. 5.7) beträgt etwa 42 %. Diese Werte zeigen auch eine überraschend gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen an den beiden Gefäßlysimetern, die oben beschrieben wurden.

Durch die tensionsgesteuerte Unterdruckversorgung (P. RAMSPACHER, 1993) ist das Problem des Grenzflächenphänomens an der Lysimeterunterseite (E. KLAGHOFER, 1991) gelöst, allerdings kann bei diesen Kleinlysimetern dann, wenn nicht ausschließlich vertikaler Fluss vorherrscht, die Übereinstimmung der Lysimeteineinzugsgebietsfläche mit der wahren Einzugsgebietsfläche an der Oberfläche nicht garantiert werden. Dadurch, dass diese Kleinlysimeter nur gestört und in den ungesättigten Sanden und Kiesen nur im Bereich einer größeren Baugrube eingebaut werden können, spielen Setzungs Vorgänge nach der Wiederverfüllung der Grube eine entscheidende Rolle: Setzt sich das Material ungleichmäßig, verkippt das Kleinlysimeter im Untergrund und die Einzugsgebietsfläche wird durch das Verlassen der Horizontalen mehr oder weniger stark vermindert. Dies kann aber jedenfalls nur zu geringeren Wasserflüssen als im natür-

Tab. 5.6: Monats- und Jahressummen der Sickerwassermengen (in mm) am Kleinlysimeter „Fruchtfolge“ (Einbautiefe 150 cm) der Forschungsstation Wagna.  
Monthly and yearly percolation water (mm) at the small field lysimeter “rotation of crops” (depth 150 cm) at the research station Wagna.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	31	24	19	19	10	15	6	1	1	10	66	68	270
1993	6	3	5	2	0	0	0	0	0	11	42	67	136
1994	43	6	0	59	18	32	16	0	0	0	41	7	220
1995	38	61	75	12	7	21	16	5	31	39	6	33	345
1996	70	12	64	80	30	8	46	10	68	73	29	15	505
MITTEL	38	21	33	34	13	15	17	3	20	27	37	38	295

Tab. 5.7: Monats- und Jahressummen der Sickerwassermengen (in mm) am Kleinlysimeter „Maismonokultur“ (Einbautiefe 150 cm) der Forschungsstation Wagna.  
Monthly and yearly percolation water (mm) at the small field lysimeter “maize monoculture” (depth 150 cm) at the research station Wagna.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	29	23	22	35	29	29	14	0	0	12	88	104	385
1993	18	7	10	23	43	13	3	0	0	21	82	64	284
1994	75	31	50	49	47	50	30	1	0	0	65	35	432
1995	33	40	26	12	24	24	12	11	127	49	7	22	386
1996	29	26	8	8	28	1	1	16	23	54	47	53	294
MITTEL	37	25	23	25	34	23	12	6	30	27	58	55	356

lichen System führen. Im Bereich der Forschungsstation Wagna wurde dieses Problem am Lysimeter LSRR15 erkannt (J. FANK, 1999), wobei die gemessenen Sickerwassermengen unter zu Hilfenahme der Ergebnisse von Tracerversuchen korrigiert werden konnten (J. FANK, 2001). Während die unkorrigierten Messergebnisse in Tab. 5.8 deutlich zu niedrige Werte zeigen (der Kleinlysimeter liegt in etwa 3 m Horizontaldistanz zum oben beschriebenen Kleinlysimeter der Maismonokulturparzelle in derselben Einbautiefe), stimmen die korrigierten Werte (Tab. 5.9) gut mit den oben angeführten überein. Insbesondere im Vergleich mit den Ergebnissen der Ableitung der Grundwasserneubildung aus der Grundwasserstandsganglinie zeigen die korrigierten Lysimeterergebnisse eine hervorragende Übereinstimmung nicht nur im Vergleich der Jahressummen, sondern auch des zeitlichen Verlaufes der Grundwasseranreicherung (vgl. J. FANK, 1999).

Ein weiteres Problem dieser Art der Lysimeter liegt auch in der Wiederverfüllung des Lysimeters selbst und der zur Errichtung notwendigen Baugrube: Wird zur Verhinderung einer Störung des Wasserflusses im und oberhalb des Lysimetergefäßes besonders ausgewähltes, gegenüber der natürlichen Lagerung feines Material verwendet (Entfernung von größeren Schotterteilen, Siebung des Materials), wird im Zusammenhang mit eventuell dem Einbau folgenden Setzungen an der Oberseite des Lysimeters oder im Lysimeter selbst eine Zone schlechterer Durchlässigkeit geschaffen, als sie unter natürlichen Gegebenheiten vorherrscht. Zu Zeiten besonders starken Wasserandranges kann in diesem Bereich ein kleinräumiger hängender Grund-

Tab. 5.8: Monats- und Jahressummen der unkorrigierten Sickerwassermengen (in mm) am Kleinlysimeter „LSRR15 Maismonokultur“ (Einbautiefe 150 cm) der Forschungsstation Wagna. *Measured monthly and yearly percolation water (mm) at the small field lysimeter “LSRR15 maize monoculture” (depth 150 cm) at the research station Wagna.*

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	35	14	18	19	26	31	11	0	0	0	64	47	266
1993	8	4	5	5	22	6	0	0	0	5	41	66	161
1994	43	8	0	72	25	36	9	1	0	0	51	12	257
1995	55	50	58	15	24	40	13	0	41	19	9	22	347
1996	36	15	65	34	39	13	30	8	6	58	16	22	342
MITTEL	35	18	29	29	27	25	13	2	9	16	36	34	275

Tab. 5.9: Monats- und Jahressummen der korrigierten Sickerwassermengen (in mm) am Kleinlysimeter „LSRR15 Maismonokultur“ (Einbautiefe 150 cm) der Forschungsstation Wagna. *Corrected monthly and yearly percolation water (mm) at the small field lysimeter “LSRR15 maize monoculture” (depth 150 cm) at the research station Wagna.*

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	51	20	26	28	37	44	16	0	0	0	93	68	384
1993	11	6	8	7	32	8	0	0	0	7	59	95	232
1994	62	12	0	104	36	53	12	1	0	0	73	17	371
1995	80	72	84	21	35	58	18	0	59	28	13	32	500
1996	52	21	94	49	56	19	43	12	8	83	23	31	493
MITTEL	51	26	42	42	39	36	18	3	13	24	52	49	396

wasserkörper ausgebildet werden, was dazu führt, dass das Wasser nicht mehr vertikal in das Lysimetergefäß einströmt, sondern in einem lateralen Fließvorgang am Lysimeter vorbeigeleitet wird. Auch dieser Prozess führt aber jedenfalls zu einer Verminderung der Sickerwassermenge im Vergleich zum natürlichen Fluss. Diese hier angesprochenen Probleme sind die wahrscheinliche Ursache für die Mindermengen an Sickerwasser, die in den in 2,5 m unter Gelände eingebauten Sickerwassersammlern erfasst wurden.

#### **5.2.4. Bewertung der Bilanzierung des Wasserflusses**

Wie die Untersuchungen hinsichtlich der Grundwasserneubildung ergeben haben (vgl. J. FANK, 1999), repräsentieren die Kleinlysimeter unter Maismonokultur und unter der Fruchtfolgeparzelle sehr gut die Anreicherung des Grundwasserkörpers über infiltrierende Niederschlagswässer. Diese beiden Messstellen in 1,5 m Tiefe stellen damit aussagekräftige Daten hinsichtlich der Nitratauswaschung in das Grundwasser zur Verfügung. Wie aus den Untersuchungen zur Verweilzeit des Sickerwassers in den Kiesen und Sanden erkennbar (vgl. J. FANK, 1999), können aus diesen Daten aber nur unzuverlässige Aussagen über das zeitliche Eintreffen bestimmter Wasseranteile (und damit auch Stoffpakete) an der Grundwasseroberfläche gemacht werden. Hinsichtlich der Fließbilanz zeigen auch die beiden Gefäßlysimeter eine hohe Repräsentativität der Sickerwassermenge für die Verhältnisse unter ortsüblicher Bewirtschaftung der Versuchsfelder.

### **5.3. Bilanzierung des N-Austrages**

Basierend auf den Ergebnissen der Wasserflussmessungen an den Lysimetern der Forschungsstation Wagna und der Analyse der Sickerwasserproben auf deren Gehalt an Stickstoff ist es möglich, den Austrag an Stickstoff in das Grundwasser zu bilanzieren. Dies erfolgte prinzipiell durch Summierung der Sickerwassermengen auf die Termine der Probenahme und Berechnung der jeweiligen Stickstofffracht. Die weitere Summenbildung erfolgte über die Einzelfrachten.

#### **5.3.1. Nitrat – Konzentrationsverteilung nach der Tiefe**

Die Messanordnung der Versuchsanlage in Wagna mit tiefengestaffelten Lysimetersystemen erlaubt es, die Entwicklung der Nitratkonzentration nach Tiefe und Zeit über die gesamte ungesättigte Zone zu erfassen. Folgt man der Literatur, so wird üblicherweise davon ausgegangen, dass die Mineralisation des Stickstoffes zu Nitrat im Oberboden vor sich geht und mit Erreichen der unterlagernden Schotter abgeschlossen ist. Die Messdaten an der Station Wagna zeigen dagegen im Bereich der den Boden unterlagernden Kiese und Sande eine deutliche Zunahme der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser (Fig. 5.1 und J. FANK, 1999).

Durch den Vergleich der gemessenen Bromidverteilung im Rahmen der Auswertung von Tracerversuchen nach Tiefe und Zeit mit den gemessenen Nitratkonzentrationen wird klar, dass dieses Phänomen keinesfalls auf messtechnische Probleme zurückgeführt werden kann, da die Bromidverteilung in der ungesättigten Zone der klassischen Vorstellung von Transportprozessen entspricht (J. FANK, 1999 und J. FANK, 2001). Die davon abweichenden Ergebnisse der Nitratmessungen führten zur Hypothese, dass im ungesättigten Sand-Kies-Bereich Mineralisations- und Nitrifikationsprozesse stattfinden, die zu einer zusätzlichen Nitratanreicherung führen.

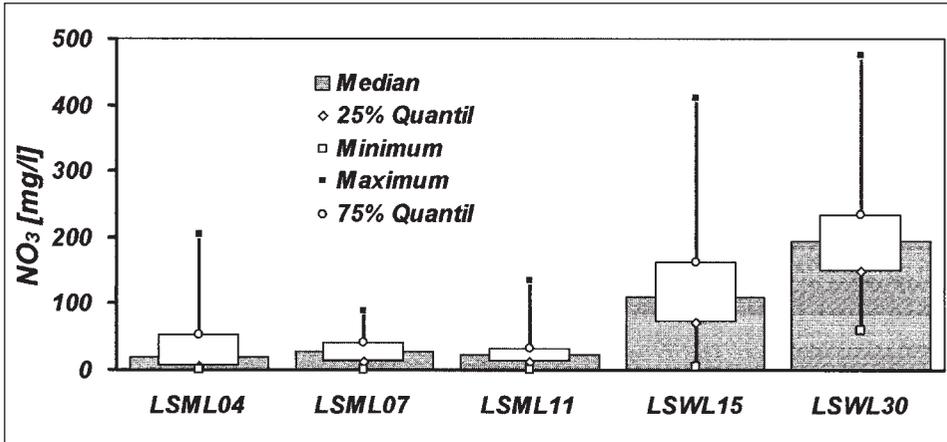


Fig. 5.1: Tiefenverteilung der Nitratkonzentration (in mg/l) im Sickerwasser auf der Fruchtfolgeparzelle als Ergebnis der statistischen Auswertung der Messdaten von 1992 bis 1996 (J. FANK, 1999).

*Depth profile of nitrate concentration (mg/l) in percolation water under crop rotation plot. Visualization of the statistical evaluation results obtained from the data measured during 1992 and 1996 (J. FANK, 1999).*

Aus Fig. 5.1 wird implizit klar, dass die Berechnung der Stickstofffrachten an der Unterseite der feinklastischen Bodenaufgabe keinesfalls dem Stickstoffeintrag an der Grundwasseroberfläche, die zwischen 300 und 500 cm unter Gelände liegt, entsprechen kann. Damit wird auch deutlich, dass ein Vergleich des Stickstoffaustrages aus dem Boden mit Nitratkonzentrationen im Grundwasser selbst zu Differenzen führen muss, die sich unter Berücksichtigung der Prozesse im ungesättigten Sand-Kies-Bereich aber erklären lassen (J. FANK, 1999).

### 5.3.2. N-Austrag aus der ungesättigten Zone

Aus den Überlegungen hinsichtlich der Bilanzierung des Wasserflusses und der Entwicklung der Nitratkonzentrationsverteilung nach der Tiefe am Standort Wagna kommen für eine Bilanzierung des Stickstoffaustrages aus der ungesättigten Zone in das Grundwasser in erster Linie die Messungen an den Kleinlysimetern Fruchtfolge und Maismonokultur in Frage. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in Tab. 5.10 für die Fruchtfolgeparzelle und in Tab. 5.11 für die Maismonokulturparzelle dokumentiert. Im fünfjährigen Mittel liegen unter den Bewirtschaftungsbedingungen und den Bodenverhältnissen im Bereich der Forschungsstation Wagna (J. FANK, 1999) zwischen 69 kg/Ha/a auf der Maismonokulturparzelle und 92 kg/Ha/a auf der Fruchtfolgeparzelle. Der mittlere Jahresverlauf zeigt die höchsten Austräge – in Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Verteilung der Sickerwassermengen – in den Monaten November und Dezember. Deutlich erkennbar ist aber auch eine – in Abhängigkeit von den aktuellen hydrometeorologischen Verhältnissen – extrem hohe Variabilität des Nitrataustrages in den Einzeljahren – ein Faktum, das aufgrund der nicht Vorhersehbarkeit der Entwicklung des Wetters eine weitere Verminderung des Stickstoffaustrages aus der ungesättigten Zone über eine Optimierung des Düngemittleinsatzes nahezu unmöglich macht.

Tab. 5.10: Monats- und Jahressummen der Stickstofffrachten (in kg/Ha) am Kleinlysimeter „Fruchtfolge“ (Einbautiefe 150 cm) der Forschungsstation Wagna.  
 Monthly and yearly nitrogen load (kg/Ha) at the small field lysimeter “rotation of crops” (depth 150 cm) at the research station Wagna.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	1	1	2	1	1	1	0	0	0	1	56	50	113
1993	4	2	4	1	0	0	0	0	0	3	21	24	60
1994	14	2	0	21	7	12	5	0	0	0	5	1	68
1995	3	17	16	3	2	5	5	1	3	3	0	4	63
1996	16	1	28	19	5	1	9	2	25	31	11	6	155
MITTEL	8	5	10	9	3	4	4	1	6	8	19	17	92

Tab. 5.11: Monats- und Jahressummen der Stickstofffrachten (in kg/Ha) am Kleinlysimeter „Maismonokultur“ (Einbautiefe 150 cm) der Forschungsstation Wagna.  
 Monthly and yearly nitrogen load (kg/Ha) at the small field lysimeter “maize monoculture” (depth 150 cm) at the research station Wagna.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	5	4	5	5	5	8	4	0	0	3	56	22	117
1993	4	2	3	8	13	3	1	0	0	8	21	16	77
1994	11	5	6	7	10	12	6	0	0	0	9	5	71
1995	5	7	3	2	5	5	3	3	4	1	0	2	40
1996	3	4	2	3	5	0	0	4	5	5	3	4	39
MITTEL	5	4	4	5	7	6	3	2	2	3	18	10	69

### 5.3.3. N-Austrag aus den Gefäßlysimetern

Wie oben erwähnt, liefern die beiden im Bereich der Forschungsstation Wagna eingebauten Gefäßlysimeter repräsentative Sickerwassermengen für die ortsübliche Bewirtschaftung im Versuchsfeld-Maßstab. Eine Bilanzierung der Stickstofffrachten aus dem Gefäßlysimeter Maismonokultur ist in Tab. 5.12 dargestellt und zeigt im Mittel nur einen Austrag von 19 kg Stickstoff je Hektar und Jahr, wobei die Variabilität innerhalb der Jahre deutlich geringer ist als an den Feldmessstellen. Auch sind die höchsten Austräge im Jahreszyklus im Juni zu erkennen. Diese gravierenden Unterschiede in der Stickstoffbilanz sind auf die Befüllung der Gefäßlysimeter mit Bodenmaterial aus der Fahrgasse zwischen den bewirtschafteten Parzellen zurückzuführen. In diesen Fahrgassen wird das dort vorhandene Grünland nicht bewusst gedüngt, eine Zufuhr von Stickstoffdünger erfolgt nur über den atmosphärischen Eintrag.

Diese Auswertungen belegen die Forderung nach Berücksichtigung der Historie in der Errichtung, Instrumentierung und Auswertung von Lysimeterergebnissen. Teilweise schon lange zurückliegende externe Auswirkungen auf das Bodenmaterial wirken lange nach und beeinflussen die Messergebnisse vieler Jahre. Eine Rückrechnung des mittleren jährlichen Austrages aus dem Gefäßlysimeter Maismonokultur über die Sickerwassermenge ergibt eine mittlere Nitratkonzentration im Perkolat von 22 mg/l und damit Werte, die mit einer Grundwassergefährdung aus dem diffusen Eintrag über landwirtschaftlich genutzte Böden nicht in Einklang zu bringen wären.

Tab. 5.12: Monats- und Jahressummen der Stickstofffrachten (in kg/Ha) am Gefäßlysimeter „Maismonokultur“ der Forschungsstation Wagna.  
 Monthly and yearly nitrogen load (kg/Ha) at the lysimeter tank “maize monoculture” at the research station Wagna.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
1992	0	2	1	2	5	12	0	0	0	0	16	7	45
1993	0	0	3	4	1	1	0	0	0	1	1	2	12
1994	2	0	1	3	0	6	0	0	0	0	1	0	14
1995	1	2	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	9
1996	0	0	4	4	5	1	1	0	0	0	0	0	16
MITTEL	1	1	2	3	2	4	0	0	0	0	3	2	19

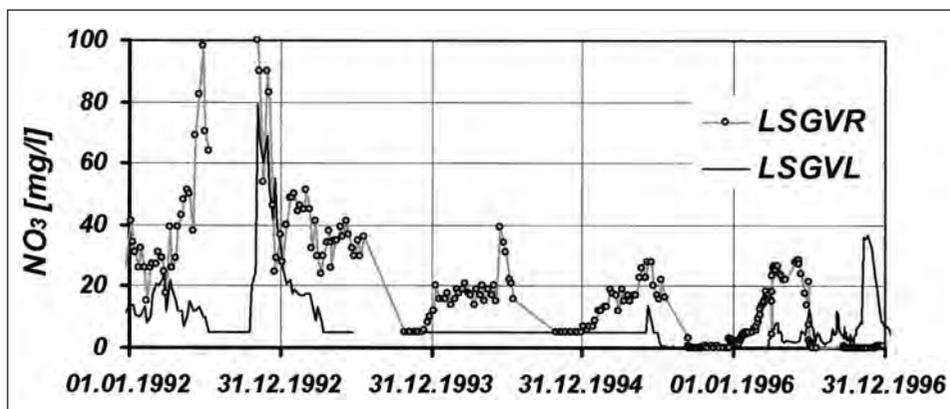


Fig. 5.2: Ganglinie der Nitratkonzentration (in mg/l) im Sickerwasser des Gefäßlysimeters „Maismonokultur“ der Forschungsstation Wagna.  
 Time series of nitrate concentration (mg/l) in percolation water of the lysimeter tank “maize monoculture” at research station Wagna.

Dies wird auch durch die Ganglinien der Nitratkonzentration im Sickerwasser beider Gefäßlysimeter in Fig. 5.2 belegt, die zeigen, dass die Messwerte hier großteils deutlich niedrigere Nitratwerte aufweisen, als im darunter liegenden Grundwasser anzutreffen sind (vgl. J. FANK, 1999). Eine Ausnahme stellen nur die Werte des Jahres 1992 dar, das durch besonders geringe Niederschlags- und Sickerwassermengen gekennzeichnet war. Eine undifferenzierte Übertragung derartiger Messergebnisse auf das Leibnitzer Feld würde bedeuten, dass die Nitratprobleme im Grundwasser nicht aus der Landwirtschaft, sondern aus sonstigen Quellen stammen – eine Aussage, die durch die übrigen Messungen und Auswertungen der Ergebnisse der Forschungsstation Wagna eindeutig widerlegt wird (vgl. dazu J. Fank, 1999 und J. Fank, 2001b).

#### 5.4. Zusammenfassung

Aus den Auswertungen der Messergebnisse an der Forschungsstation Wagna lassen sich hinsichtlich der Verwendung von Lysimeterdaten für die Bilanzierung des Was-

ser- und Stoffflusses für das Leibnitzer Feld folgende Punkte zusammenfassen (die aber nach Meinung des Autors auch für andere Gebiete relevant sind):

- Lysimetermessungen sind immer mit Fehlern behaftete Punktmessungen, wobei einerseits die Lysimeterfehler an sich, aber auch die Heterogenität natürlicher Böden eine entscheidende Rolle spielen.
- Lysimetermessungen sind durch zusätzliche Untersuchungen zu begleiten, wobei sich besonders die Methoden der Tracerhydrologie bewährt haben, um komplexe Sachverhalte aufzutrennen und bewerten zu helfen. Generell kann die Forderung, die Ergebnisse von Lysimetermessungen mit möglichst vielen anderen – davon unabhängigen – Methoden zu überprüfen, nur bestätigt werden.
- Lysimetermessungen sind unverzichtbar für die Kalibrierung und Validierung von physikalisch basierten Modellen, erfordern aber sehr genaues Arbeiten. Die Ergebnisse gelten nur für den jeweiligen genau erkundeten Punkt.
- Eine Übertragung von Lysimeterergebnissen in die regionale Skala ist aufgrund der angeführten Punkte auf interpretativem Weg praktisch nicht möglich. Allerdings bieten die anhand von fachkundig durchgeführten Lysimeterexperimenten kalibrierten numerischen Modelle eine vielversprechende Möglichkeit zur Regionalisierung von Grundwasserneubildung und Stoffbefrachtung.

## **6. Lysimetrie im pflanzenbaulichen Versuchswesen – pro und contra am Beispiel eines Forschungsprojektes des Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft (BFL), Wien (K. E. BÖHM)**

### **6.1. Einleitung**

Die Lysimeteranlage des Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft (BFL), Wien, wurde 1995 in Betrieb genommen. Die Anlage besteht aus 18 gestört befüllten Lysimetern. Die drei verschiedenen Lysimeterböden (sandiger Tschernosem/Calcic Phaeozem, Feuchtschwarzerde/Gleyic Phaeozem, tiefgründiger Tschernosem/Calcic Chernosem) stammen aus dem Marchfeld/NÖ und unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bodeneigenschaften. Pro Bodentyp existieren sechs Wiederholungen. Die natürliche Variabilität der Bodeneigenschaften wurde durch die gestörte Befüllung so weit wie möglich unterbunden.

Die einzelnen Lysimeter haben eine Oberfläche von 3 m<sup>2</sup> und eine Tiefe von 2,5 m. In Abständen von 30 cm werden der volumetrische Wassergehalt (WG%) bis in eine Tiefe von 180 cm, die Wasserspannung und die Temperatur bis in eine Tiefe von 210 cm des Lysimeterbodens kontinuierlich erfasst. In sieben Bodentiefen besteht die Möglichkeit Bodenlösung mit den Saugkerzen der Drucksteuerungsanlage zu entnehmen (siehe M. DACHLER, 1996, M. GERZABEK & A. KRENN, 1996, A. KRENN & E. KLAGHOFER, 1996, H. SCHWABACH & H. ROSENKRANZ, 1996, K. BÖHM et al. 1997).

Im Zeitraum 1996 bis 1997 wurden durch eine einheitliche Begrünung die Regeneration der gestörten Bodendynamik forciert und gleichzeitig die Lysimeteereigenschaften erhoben (K. BÖHM, 1996, J. HÖSCH, 1996, K. BÖHM & J. HÖSCH, 1997).

Von 1998 bis 2001 wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes der Einfluss unterschiedlicher Anbau- und Umbruchertermine von Zwischenfrüchten auf den Stoffaustausch untersucht (K. BÖHM & J. HÖSCH, 2000, K. BÖHM & J. HÖSCH, 2001a, K. BÖHM & J. HÖSCH, 2001b).

## 6.2. Pflanzenbauliche Aspekte

Die Lysimeteroberfläche befindet sich mit der umgebenden Ackerfläche auf demselben Niveau und ermöglicht so die Entwicklung eines geschlossenen Pflanzenbestandes mit Temperatur- und Wasserhaushaltsbedingungen, die jenen am freien Feld sehr nahe kommen.

Eine durch Sonneneinstrahlung bedingte Erwärmung der Lysimeterböden durch die Behälter aus Chrom-Nickel-Stahl bzw. eine Erwärmung durch den begehbaren Lysimeterkeller findet kaum statt. Dies konnte durch Vergleichsmessungen mit der nahegelegenen Wetterstation und vergleichbarem Datenmaterial aus dem Weinviertler Raum (E. STENITZER & L. GASSNER, unveröffentlicht) belegt werden. Das Temperaturniveau der Lysimeterböden entspricht in etwa dem der „natürlichen Bodentemperatur“ und ist unabhängig vom Bodentyp, weicht jedoch zu Zeitpunkten mit extremen Außenlufttemperaturen (Sommer, Winter) mit max. 2–3 °C höheren Werten geringfügig ab. Dieser Umstand gewährleistet Reaktionsgeschwindigkeiten bei den Stoffumsätzen, die jenen im Freiland sehr ähnlich sind.

Anfängliche Probleme mit Feldhamstern und Mäusen und einem dadurch resultierenden unerwünschten „preferential-flow“ konnten durch die Installation eines im Boden versenkten nach außen gebogenen Maschendrahtzaunes auf Dauer behoben werden.

Zu Zeitpunkten kurz nach der Aussaat und kurz vor der Ernte wird der Bereich der Lysimeteranlage durch ein begehbare Vogelnetz vor Vogelfraß geschützt.

Künstlich beregnet wurde bisher nur in dem Ausmaß, wie es für einen homogenen Saataufgang unbedingt notwendig erschien. Die Bodenbearbeitung erfolgt per Hand mit dem Spaten, dadurch ergeben sich verglichen mit der maschinellen Bearbeitung am Feld geringfügige Unterschiede. Die Aussaat erfolgt durch ein für die Lysimeteranlage speziell adaptiertes mechanisches Aussaatgerät.

Böden mit hohem Ton- und Humusgehalt im Oberboden (Feuchtschwarzerde) weisen in Trockenperioden Trockenrisse auf. Der Schwund an den Berührungspunkten zur Behälterwand kann bis zu max. 3 cm betragen. Bei Starkregenereignissen innerhalb der Trockenperioden ist daher der Effekt des sogenannten „edge-flow“ nicht ganz zu vermeiden. Der Einfluss des unerwünschten „edge-flow“ auf das Versickerungsverhalten wird jedoch durch die verhältnismäßig große Lysimeteroberfläche (3 m<sup>2</sup>) in vertretbaren Grenzen gehalten. Ähnliche Versickerungseffekte bei Starkregenereignissen durch Trockenrisse sind auch auf vergleichbaren Böden im Feld zu beobachten.

## 6.3. Gestörte Bodenbefüllung

Die Verläufe der Bodenwassergehalte und der Bodenwasserspannung in den unterschiedlichen Bodentiefen wurden in den Jahren 1996 bis 1997 verfolgt und auf Veränderungen hin untersucht. Tendenziell wurde von der ersten Hälfte des Jahres 1996 im Vergleich zum weiteren Verlauf ein generelles Absinken der Bodenwassergehalte um 5–8 WG% bei Feuchtschwarzerde und tiefgründigem Tschernosem und beim sandigen Tschernosem ab einer Tiefe von 60 cm festgestellt.

Im selben Zeitraum wurden sehr niedrige Wasserspannungen und ein hoher Gleichlauf der Wiederholungen bei allen Bodentypen in allen Tiefen beobachtet. Die Ursache für diese Entwicklung könnte in der für die optimale Bodenwiederverdichtung notwendigen Einstellung der Proctordichte bei der Lysimetererbauung und der damit einhergegangenen künstlich herbeigeführten Befeuchtung liegen.

Bis in die erste Hälfte des Jahres 1996 waren die direkten Auswirkungen des Bodeneinbaues auf den Bodenwasserhaushalt anhand der Verläufe von Wassergehalt und Wasserspannung deutlich zu erkennen.

Ein Methodenvergleich zwischen Drucktopfmethode (A. KRENN, unveröffentlicht) und kontinuierlich erhobenen Wassergehalten mittels TDR wurde beim pF-Wert 2 durchgeführt. Anzumerken ist, dass bei den TDR-Daten kein Unterschied zwischen Entwässerungs- und Bewässerungskurve gemacht wurde. Die errechneten Daten liegen daher im mittleren Bereich der Hysteresisschleife und sollten im Vergleich zur Drucktopfmethode, bei der nur die Entwässerungskurve von monolithischen Bodenproben betrachtet wird, generell etwas geringere Wassergehalte aufweisen.

Die errechneten TDR-Daten lagen beim tiefgründigen Tschernosem und bei der Feuchtschwarzerde, beide Böden weisen einen hohen Schluff- und Tongehalt auf, um 2 WG% über bzw. unter den Wassergehaltsdaten der Drucktopfmethode. Bedeutende Unterschiede traten lediglich in einer Bodentiefe von 180 cm mit höheren Werten bei der Drucktopfmethode auf.

Beim sandigen Tschernosem (hoher Sandgehalt) konnte im Methodenvergleich wenig Übereinstimmung gefunden werden. Die TDR-Daten lagen deutlich über den der Drucktopfdaten. Die Bodenbeschaffenheit des Entnahmestandortes des sandigen Tschernosem ist äußerst heterogen, darin könnte eine mögliche Erklärung für die mangelnde Übereinstimmung liegen.

#### 6.4. Wiederholungen je Bodentyp

Je sechs Lysimeter wurden mit Bodenmaterial eines Bodentyps unter Bedachtnahme der herrschenden Horizontierung, Schicht für Schicht ident befüllt. Aus pflanzenbaulicher Sicht ist der Ausschluss der natürlich auftretenden Bodendiversität notwendig, um die Wirkung von ackerbaulichen Maßnahmen eindeutig zuzuordnen und beurteilen zu können.

Der Gleichlauf der identen Wiederholungen wurde im Zeitraum ohne differenzierte Behandlung 1996 bis 1997 anhand der Verläufe von Wassergehalt und Wasserspannung beurteilt.

Beim sandigen Tschernosem schwankte der Wassergehalt zwischen der Wiederholung mit dem niedrigsten und jener mit dem höchsten Wert in den oberen Schichten 30 cm und 60 cm um ca. 5 WG%. In tieferen Schichten wurde der Schwankungsbereich tendenziell etwas größer und lag bei ca. 7 WG%. Die Unterschiede beim tiefgründigen Tschernosem zwischen niedrigstem und höchstem Wassergehaltsverlauf der Wiederholungen lagen über die Tiefe mit einer Ausnahme (Lysimeter T15 in der Tiefe 126 cm) bei 7–8 WG%. Die Schwankungen bei der Feuchtschwarzerde zwischen der Wiederholung mit dem geringsten und dem höchsten Wassergehalt betragen 5–7 WG%, mit einer Ausnahme, in der Tiefe 180 cm kam es zu Jahresende 1997 zu Unterschieden von bis zu 12 WG%.

Die Unterschiede der Wiederholungen im Wassergehaltsverlauf sind Resultat mehrerer Ursachen, zum einen ergeben sie sich aus dem schichtweisen Bodeneinbau mit anschließender Wiederverdichtung und zum anderen aus dem Genauigkeitsbereich der TDR-Sonden ( $\pm 2\%$ ).

Der zeitliche Verlauf der Wasserspannung eignete sich aufgrund des diskontinuierlichen Verlaufes nicht um die Schwankungsbreite der Wiederholungen ausreichend zu beschreiben.

## 6.5. Technische Ausstattung

### 6.5.1. TDR-Sonden

Die erhobenen Wassergehaltsdaten bilden mit den Analysedaten der Bodenlösungen die Basis für die Abschätzung der potentiell verfügbaren Menge an gelösten Stoffen in der jeweiligen Bodenschichte. Diese Abschätzung ist für Fragestellungen im pflanzenbaulichen Versuchswesen von großer Bedeutung. Zur Erfassung von Veränderungen im Bodenwasserhaushalt sind die Wassergehaltsdaten nur begrenzt geeignet, da Bewässerungs- bzw. Entwässerungseffekte erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung sichtbar werden.

Mittels kontinuierlicher Datenerfassung werden beim sandigen Tschernosem pro Lysimeter täglich 720 Wassergehaltswerte aufgezeichnet, beim tiefgründigen Tschernosem und bei der Feuchtschwarzerde sind dies je 864 Werte pro Lysimeter und Tag. Für die gesamte Lysimeteranlage ergeben sich daraus täglich 14 688 Wassergehaltsdaten.

Der Messbereich der TDR-Sonden liegt bei 0–95 % und die Genauigkeit im Bereich 0–40 % bei  $\pm 2$  % und im Bereich 40–70 % bei  $\pm 3$  %. Bisher waren der Wartungsaufwand relativ gering und die Datenaufzeichnung mit wenigen Ausnahmen problemlos und zufriedenstellend. Selten konnte beobachtet werden, dass Daten „hängen“ bleiben und so die korrespondierenden Datenpaare von Wassergehalt und Wasserspannung nicht mehr übereinstimmen.

### 6.5.2. Tensiometer

Die Daten ermöglichen eine unmittelbare und exakte Erfassung von Veränderungen im Bodenwasserhaushalt und sind für diese Art von Fragestellungen unverzichtbar. Die Grenze des oberen Messbereiches liegt bei 850 hPa und wird durch die Tensiometertechnologie vorgegeben. Die Messgenauigkeit ist hoch und liegt bei  $\pm 0,5$ %.

Mittels kontinuierlicher Datenerfassung werden bei allen drei Bodentypen täglich pro Lysimeter 1008 Wasserspannungswerte aufgezeichnet, dies ergibt für die gesamte Lysimeteranlage einen Datenumfang von 18 144 Werten pro Tag.

In Zeiten von intensiver Bodendurchfeuchtung wird der Wasserspannungsverlauf bei optimaler Wartung kontinuierlich aufgezeichnet und zeigt kritische Phasen rasch auf, in denen Feldkapazität erreicht bzw. überschritten wird und dadurch eine Stoffverlagerung vom Boden in Richtung Grundwasser stattfinden kann. Abhängig vom Durchfeuchtungsgrad des Bodens und der Bodentextur übersteigt in der Vegetationsperiode April bis September die Wasserspannung den Messbereich häufig und verursacht dadurch eine intensive Datennachbearbeitung und aufwendige Wartungsarbeiten.

In einem eingeschränkten Bereich von pF-Wert 1,6/1,8 bis pF-Wert 2,9 ist die Erstellung von pF-Kurven möglich. Durch den gezielten Einsatz von Gipsblöcken in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT) in Petzenkirchen unter Einbeziehung von empirisch erhobenen Daten (E. STENITZER & L. GASSNER, unveröffentlicht) können die pF-Kurven auf den für das pflanzenbauliche Versuchswesen relevanten Bereich erweitert werden.

### 6.5.3. Temperatursensoren

Die Bodentemperaturdaten werden durch einen im Tensiometer eingebauten Temperatursensor im selben Umfang wie die Wasserspannungsdaten erfasst. Die Temperaturdaten dienen als Kontrolle der Reaktionsgeschwindigkeit von chemischen und

mikrobiologischen Prozessen im Lysimeterboden im Vergleich mit Böden unter Feldbedingungen.

Der Messbereich liegt zwischen  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , die Messgenauigkeit bei  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  und der Wartungsaufwand ist gering.

#### 6.5.4. Drucksteuerungsanlage

Der Einsatz der Drucksteuerungsanlage bestehend aus den Elementen – Drucksteuerung, Saugkerzen, Sammelflaschen – ermöglicht die Entnahme von Bodenlösung aus den Grobporen und den weiten Mittelporen. Dieser Teil der Bodenlösung und die darin gelösten Stoffe stellen den austragsgefährdeten Anteil der Gesamtbodenlösung dar. Jenes Bodenwasser, das mittels Drucksteuerungsanlage nicht gewonnen werden kann, unterliegt zum Probenahmezeitpunkt auch nicht der direkten Verlagerungsgefahr in tiefere Bodenschichten bzw. ins Grundwasser. Geht man hypothetisch davon aus, dass die Stoffkonzentration der Bodenlösung in allen Porenbereichen gleich hoch ist, dann lässt sich rechnerisch der Anteil der potentiellen Stoffreserven in gelöster Form in den entsprechenden Bodentiefen abschätzen.

Der Unterdruck zur Entnahme von Bodenlösungen beträgt derzeit 0,5 bar und wird je nach Durchfeuchtungsgrad des Bodens zwischen ein und drei Tagen angelegt. Mit Versuchsbeginn 1998 wurde in Abständen von vier Wochen die Drucksteuerungsanlage zum Zweck der Bodenlösungsentnahme aktiviert. Der Einsatzbereich der Drucksteuerungsanlage beschränkt sich aus technischen Gründen auf Saugspannungen von maximal 0,7 bar.

Die Erfolgsquote (d. h. Bodenlösung wird tatsächlich gewonnen) beträgt beim sandigen Tschernosem in den Bodentiefen 30–90 cm ca. 60 %, im Vergleich dazu liegt die Erfolgsquote ab einer Bodentiefe von 126 cm trotz Wasserspannungen unter einem pF-Wert 2 bei 10 %. Die Ursache dürfte darin zu sehen sein, dass sich der Unterdruck im Grobschotterkörper nicht nachhaltig aufbauen lässt. Bei der Feuchtschwarzerde war die Erfolgsquote gemittelt über alle Bodentiefen 21 %. Ursache für die eher niedrige Erfolgsquote ist der hohe Schluff- und Tongehalt und der daraus resultierende hohe Mittel- und Feinporenanteil mit den korrespondierenden Wasserspannungsbereichen ( $> \text{pF}$ -Wert 2,9). Beim tiefgründigen Tschernosem lag die Erfolgsquote bei der Bodenlösungsentnahme betrachtet über alle Bodentiefen bei 32 %.

Der Einsatz der Drucksteuerungsanlage war bisher problemlos und der Wartungsaufwand gering.

#### 6.6. Zusammenfassung

Die pflanzenbaulichen Versuchsrahmenbedingungen der Lysimeteranlage des BFL kommen den Feldbedingungen sehr nahe und bilden so die beste Voraussetzung für eine praxisnahe Versuchsführung. Mögliche methodische Einflüsse treten durch die Dimension der Lysimeter in den Hintergrund.

Der direkte Einfluss der gestörten Bodenbefüllung (1995) auf den Bodenwasserhaushalt war bei allen Bodentypen bis zur ersten Hälfte des Jahres 1996 anhand von kontinuierlich erhobenen Wassergehalts- und Wasserspannungsdaten deutlich erkennbar.

Der Schwankungsbereich der sechs Wiederholungen pro Bodentyp liegt bei der Wassergehaltsmessung für alle Bodentypen in einem Bereich von 5–8 WG%.

Der Einsatz der vorhandenen Drucksteuerungsanlage (Drucksteuerung, Saugkerzen, Sammelflaschen) ermöglicht bei leichten Böden eine gezielte Bodenlösungsentnahme des austragsgefährdeten Bodenlösungsanteils in einem zufriedenstellenden Umfang. Der

Einsatz von Saugkerzen in Bodenzonen mit hohem Grobskelettanteil kann zur Folge haben, dass der angelegte Unterdruck nicht nachhaltig aufrechterhalten werden kann.

Die kontinuierliche Erfassung von Wassergehaltsdaten ermöglicht in Kombination mit den Stoffkonzentrationen von Bodenlösungen eine Abschätzung der gelösten potentiell pflanzenverfügbaren Stoffmenge.

Die erhobenen Wasserspannungsdaten mit Tensiometern ermöglichen die Erstellung von pF-Kurven im Bereich der Feldkapazität und beschreiben damit die Bereiche mit hohem Stoffaustragsrisiko. Phasen mit großem Stoffaustragsrisiko können mittels Wasserspannungsdaten frühzeitig erkannt werden. Die vorliegenden Wasserspannungsdaten werden durch den gezielten Einsatz von Gipsblöcken und empirischem Datenmaterial ergänzt und decken so den für pflanzenbauliche Fragestellungen relevanten Bereich des Bodenwasserhaushaltes ab.

Im pannonischen Klimaraum ist bei leichten bis mittelschweren Böden eine kontinuierliche und zufriedenstellende Wasserspannungserfassung mittels Tensiometertechnik in der für pflanzenbauliche Versuchsfragestellungen bedeutenden Bodenzone von 0–90 cm in Zeiträumen mit ausreichender Bodendurchfeuchtung möglich.

## **7. Direkte Messung der Flussbettinfiltration mit Hilfe eines Flussbettlysimeters (H. HOLZMANN, H. P. NACHTNEBEL)**

### **7.1. Einleitung**

Die Massenflüsse und Interaktionen zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser sind durch ihre Lage und den bestehenden Gradienten definiert. Exfiltration aus dem Grundwasser besteht, wenn die Druckhöhe des Grundwassers über dem Wasserstand des Flusses liegt. Infiltration tritt auf, wenn der Grundwasserspiegel niedriger als der Wasserstand im Oberflächengewässer ist. Hier unterscheidet man weiters zwischen Grundwasseranschluss und tief liegendem Grundwasserspiegel. Neben den Gradienten bestimmen die hydrogeologischen Eigenschaften der Flusssohle und des Untergrunds die Austauschkapazitäten. Dabei ist besonders die hydraulische Durchlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Daneben spielen temporäre Prozesse wie Sedimentation, biogene Aktivitäten (biogene Kolmatierung) oder Erosion eine Rolle.

Die Prozesse der Oberflächen-Grundwasser-Interaktionen sind qualitativ bekannt, die prozessorientierte Quantifizierung der Massenströme ist jedoch messtechnisch aufwendig und wird selten angewandt. Zwar liefern Abflussdifferenzmessungen für längere Fließabschnitte ausreichende, integrative Schätzwerte, für eine Aussage im lokalen Bereich eignen sich diese Verfahren wegen der eingeschränkten Messgenauigkeiten nicht. Infiltrationsmessungen mit Hilfe von Infiltrometern erlauben keine kontinuierliche Messung und setzen die Begehrbarkeit des Flussbettes voraus. Daher ist diese Methode nur in Trocken- und Niederwasserphasen einsetzbar. Mit Hilfe der Lyimetertechnik ist es möglich, die ungestörte Entwicklung der Flusssohle durch Erosions- und Sedimentationsprozesse zu berücksichtigen und temporäre Änderungen der Sohdurchlässigkeit zu erfassen.

### **7.2. Problemstellung und Untersuchungsgebiet**

Im Einzugsgebiet der Schwarza und Leitha bestehen infolge der vielfältigen Nutzung des Wasserdargebots durch Trinkwassergewinnung (1. Wiener Hochquellwasserleitung), Energieerzeugung (Kleinwasserkraftwerke an Ausleitungskanälen), Be-

wässerung (Steinfeld) und Grundwasserbewirtschaftung (Trinkwasser, Deponiesicherung) Nutzungskonflikte, deren Lösung durch integratives wasserwirtschaftliches Management bewerkstelligt werden muss. Im Zuge eines angewandten Forschungsprojektes (H. P. NACHTNEBEL & H. HOLZMANN, 2001) war für das Flusssystem Schwarza und Leitha die regionale Verteilung der Infiltrationsverluste anzugeben.

Die Einzugsgebiete der Flüsse im Ursprungsbereich liegen im Triaskalk (Rax, Schneeberg) und in der Flyschzone (Wechsel). Die Tieflandbereiche umfassen quartäre Sande mit teils mächtigen Grundwasseraquiferen. Das Gebiet des Steinfeldes ist geprägt durch sandige, geringmächtige Böden mit eingeschränktem Wasserspeichervermögen. Auch die Flussabschnitte der Schwarza und Leitha zeigen in diesem Bereich infolge des vorherrschenden Grobsediments hohe Durchlässigkeiten.

An der Schwarza gibt es aufgrund von Ausleitungen in das Kehrbachsystem Abschnitte mit ephemeralen Charakter, d. h. es findet kein kontinuierlicher Durchfluss statt. Es stellt sich die Frage, ob bei vorgeschriebener Restwasserdotierung ein Abflusskontinuum bewerkstelligt werden kann, oder ob aufgrund der hohen Sohldurchlässigkeiten die Sickerverluste überwiegen. Dazu wurde neben anderen Verfahren (vgl. H. HOLZMANN et al., 2001) die Infiltrationsmessung mittels Flussbettlysimeter durchgeführt. Dabei war besonders der zeitliche Verlauf der Infiltrationskapazität von Interesse. Der Einbau des Lysimeters erfolgte in der Tiefenrinne des Flussbettes der Schwarza bei Flusskilometer 0.650. Die Lagekoordinaten im Gauß-Krüger-System sind gemäß ÖK 25 (BAEV, 1991) –8 626 (Rechts) und 5 288 475 (Hoch). Eine detailliertere Beschreibung erfolgt in Kapitel 7.4.

### 7.3. Methodik der Lysimetertechnik

Das Ziel der Lysimetermessung ist die quantitative Erfassung der vertikalen Flussbettinfiltration. Die Fließrichtung des Infiltrationswassers hängt jedoch von der Art der bestehenden hydraulischen Randbedingungen ab. Dabei ist zwischen vertikaler und lateraler Infiltration zu unterscheiden. Untersuchungen zu diesem instationären Prozess wurden bereits von M. VAUCLIN et al. (1979), P. J. DILLON & J. A. LIGGETT (1983) und M. J. ABDULRAZZAK & H. J. MOREL-SEYTOUX (1983) durchgeführt. Dabei fanden analytische, numerische und experimentelle Modelle Anwendung.

Solange die fortschreitende Infiltrationsfront einen tief anstehenden Grundwasserkörper noch nicht erreicht hat, dominieren vertikale Ströme. Dies ist in Fig. 7.1 dargestellt. Die Perkulationsrate in einer bestimmten Tiefe kann nach dem Gesetz von DARCY abgeschätzt werden. Unter Annahme der Homogenität und Isotropie errechnen sich die Sickerraten wie folgt:

$$q_{\text{GW}} = K \cdot \frac{(\Delta H + L_{\text{GW}})}{L_{\text{GW}}} \quad \text{bzw.} \quad (1)$$

$$q_{\text{LY}} = K \cdot \frac{(\Delta H + L_{\text{LY}})}{L_{\text{LY}}}, \quad (2)$$

mit

- $q_{\text{GW}}$  – Grundwasserneubildungsrate,
- $q_{\text{LY}}$  – Sickerrate am Lysimeter,
- $K$  – gesättigte, hydraulische Durchlässigkeit,
- $\Delta H$  – Abflusstiefe im Oberflächengewässer,
- $L$  – Sickerweg.

Da sich die Sickerfläche des Lysimeters und die Grundwasseroberfläche üblicherweise nicht in der selben Höhe befinden (Fig. 7.2), ist bei der Berechnung der Grundwasserneubildung aus der Lysimetermessung ein entsprechender Korrekturfaktor zu berücksichtigen. Die Umrechnung der Sickermenge im Lysimeter in die Grundwasserneubildungsrate erfolgt gemäß Gl. (3).

$$q_{GW} = q_{LY} \cdot \frac{(L_{GW} + \Delta H) \cdot L_{LY}}{(L_{LY} + \Delta H) \cdot L_{GW}} \quad (3)$$

Sind diese hydraulischen Rahmenbedingungen gegeben, so ist die Anwendbarkeit des Flussbettlysimeters des vorgestellten Typs zur Abschätzung der Grundwasserneubildung zielführend. Dabei ist zu empfehlen, das Lysimeter zentral unter der Flusssohle (Tiefenrinne) zu installieren, um Randeffekte durch die Gradientenablenkung zu vermeiden (Fig. 7.1).

Übersteigt die Infiltrationsrate die laterale Grundwassertransmissivität, so erfolgt eine Aufspiegelung des Grundwassers unterhalb der Flusssohle. Dabei kann ein stationärer Gleichgewichtszustand erreicht werden oder eine Aufspiegelung bis zum Grundwasseranschluss auftreten. Gilt letzteres, so verschieben sich die Gradienten von vertikaler in laterale Richtung. Dies verdeutlicht Fig. 7.3. Dabei ist zu erkennen, dass die

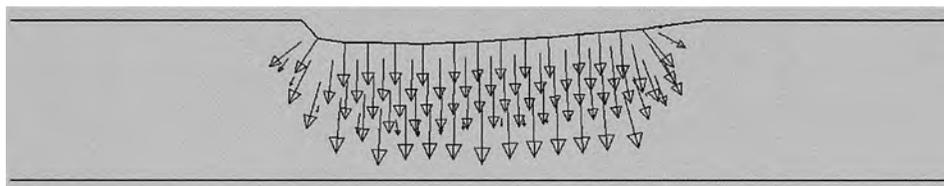


Fig. 7.1: Vertikal dominierte Flussbettinfiltration.  
Vertical infiltration gradients.

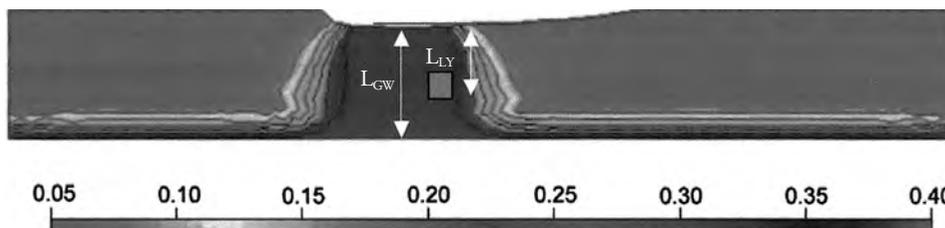


Fig. 7.2: Feuchteverlauf (Vol.%) bei Fluss-/Grundwasser Interaktion (hell – teilgesättigt, dunkel – gesättigt).  
Soil moisture distribution in vol.% for river/groundwater interaction.



Fig. 7.3: Lateral dominierte Flussbettinfiltration.  
Lateral infiltration gradients.

Infiltrationsraten in den Uferbereichen höher sind als im zentralen Bettbereich. Die Anwendung der Lysimeterertechnik unter diesen Randbedingungen ist nicht zulässig. Auch gradientengesteuerte Lysimeter, wie sie beispielsweise von V. KALERIS (1986) vorgeschlagen werden, erscheinen als nicht zielführend, da keine homogenen Infiltrationen zu erwarten sind und die Messungen von der zufälligen Positionierung der Lysimeteranlage abhängen. Die Fig. 7.1, 7.2 und 7.3 zeigen Ergebnisse einer zweidimensionalen numerischen Infiltrationsmodellierung (H. HOLZMANN, 2000).

#### 7.4. Beschreibung des Flussbettlysimeters

Ziel der Anwendung des Flussbettlysimeters war die Abschätzung der lokalen Versickerungsverhältnisse an der Schwarza unter Berücksichtigung einer möglichen zeitlichen Veränderlichkeit der Infiltrationskapazität. Dies kann durch fortschreitende Ablagerung von Feinsediment oder Schwebstoffen bedingt sein, oder durch erhöhte organische Schwebstoffführung während größerer Hochwasserereignisse.

Das Flussbettlysimeter wurde im Dezember 1999 während einer abflussfreien Phase in Trockenbauweise installiert. Mittels Schaufelbagger wurden Grube und Schlauchkүнette gegraben, mit Feinsand hinterfüllt und die Bauteile eingebracht. Das Volumen des Lysimeterbehälters beträgt ca. 500 l. Der Lysimeterbehälter aus Kunststoff (PVC) ist durch drei Leitungen, die lateral zur Uferböschung in einer Kүнette vergraben sind, mit der angrenzenden Uferböschung verbunden. Sie beinhalten den Saugschlauch zum Abpumpen des anfallenden Sickerwassers, eine Luftleitung zum Druckausgleich und eine Stromleitung mit Schwimmerschalter zur intermittierenden Steuerung der externen Kreiselpumpe. Die Fig. 7.4 zeigt die Konstruktion und die Anordnung der Bauteile.

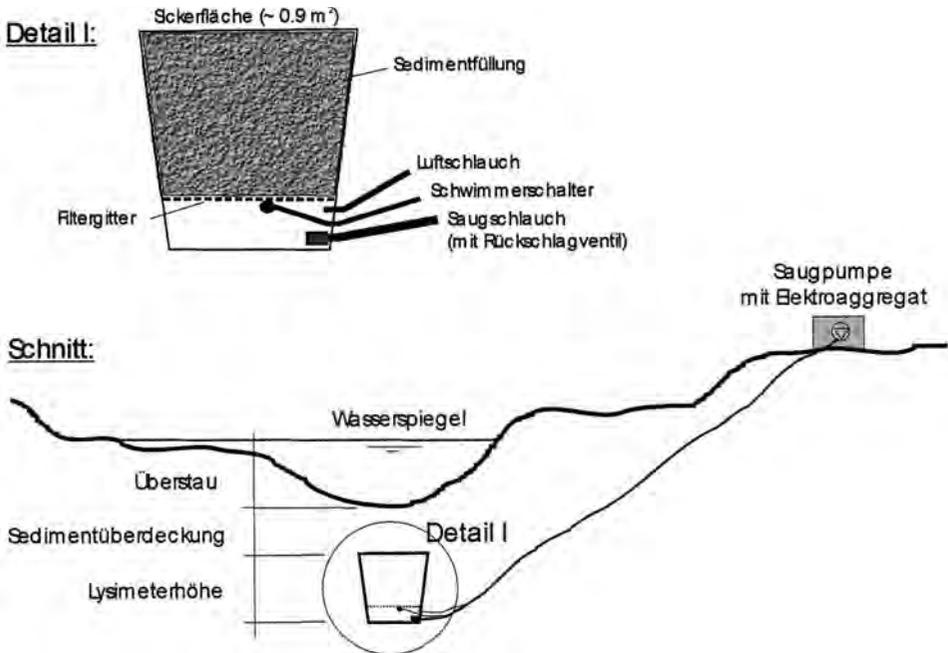


Fig. 7.4: Schema des Flussbettlysimeters.  
Scheme of riverbed lysimeter.

Der Dränraum des Lysimeters wird durch einen, auf Plattenständer gelagerten Metallrost gebildet. Ein feines Maschengitter und eine Geotextilfolie verhindern das Auswaschen des Sedimentmaterials. Das Volumen des Dränraumes beträgt ca. 100 l. Der Lysimeterbehälter wurde mit anstehendem Sohsubstrat gefüllt und mit ca. 90 cm Überdeckung vergraben.

Im operationellen Betrieb setzt der Schwimmerschalter eine Kreiselpumpe in Betrieb. Nach Leerpumpen des Dränraumes schaltet sich die Pumpe ab, ein Neustart erfolgt nach Wiederfüllung des Dränraumes. Durch Messung des intermittierend anfallenden Pumpwassers wird die Sickerrate des Lysimeters erfasst. Dabei werden pro Messkampagne ca. 10 bis 15 Pumpzyklen festgehalten, um einen stationären Zustand zu gewährleisten.

### 7.5. Messergebnisse

Nach Eintritt der Schneeschmelze wurden im Februar 2000 die ersten Lysimeterversuche durchgeführt. Insgesamt erfolgten bis zum Frühsommer sieben Messversuche, bis aufgrund des kontinuierlichen Abflusses der Grundwasserspiegel über die Konstruktionsoberkante reichte und somit keine Messungen möglich waren.

Während des Pumpversuches wird das Dränwasser intermittierend abgepumpt. Die Aufsummierung der Pumpmengen wird als akkumulierte Versickerung interpretiert. Die Ergebnisse sind in Fig. 7.5 zu sehen. Der erste Versuch (03. 02. 2000) zeigt anfänglich noch stärkere Zusickerung. Nach etwa zweieinhalb Stunden wurde ein stationärer Zustand erreicht. Die Versickerungen an den einzelnen Versuchstagen zeigen eine begrenzte Streuung. Dies ist durch unterschiedliche Wasserführungen (Überstauhöhen) und variable Sickerwege durch kontinuierliche Sedimentdeposition zu begründen. Die aus Gl. (2) rückgerechneten Durchlässigkeitsbeiwerte  $K$  sind in Tab. 7.1 angeführt. Sie schwanken zwischen  $1,0 \text{ E-}04$  und  $1,5 \text{ E-}04 \text{ m/s}$  ( $860\text{--}1300 \text{ cm/d}$ ).

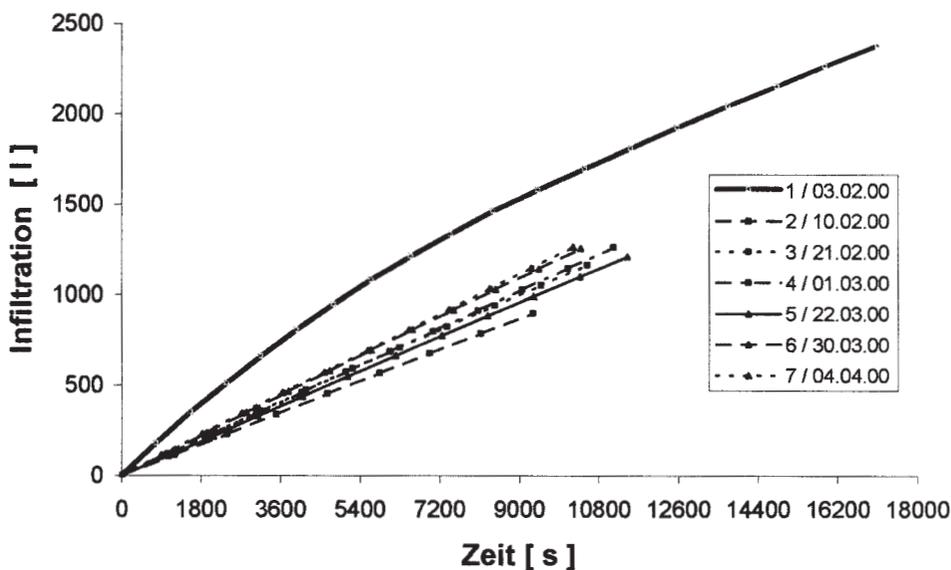


Fig. 7.5: Summenlinien der Versickerungen zu verschiedenen Terminen.  
Accumulated infiltration at different time periods.

Tab. 7.1: Rückgerechnete hydraulische Durchlässigkeiten (K-Werte) der Sedimentauflage.  
*Estimated hydraulic conductivity of the sediment layer.*

Datum	K-Werte [m/s]
03/02/2000	9,98 E-05
10/02/2000	1,1 E-04
21/02/2000	1,49 E-04
01/03/2000	1,42 E-04
22/03/2000	1,46 E-04
30/03/2000	1,35 E-04
04/04/2000	1,38 E-04

Während der Untersuchungsperiode wurden Abflüsse beobachtet, die über der Mittelwasserführung der Schwarza einzuordnen sind. Allerdings war der Feinsediment- und Schwebstoffanteil – anders als bei sommerlichen Hochwasserabflüssen – gering und führte zu keiner Absetzung von Feinsediment. Dadurch konnte keine nennenswerte Schichtung der Sedimentablagerungen beobachtet werden.

Hierin liegt jedoch eine weitere potentielle Anwendungsmöglichkeit der Flußbettlysimetertechnik. Durch Absetzung von Feinsediment kann sich eine Dichtschicht (Kolmatierungsschicht) ausbilden, deren hydraulische Durchlässigkeit a priori nicht bekannt ist. Die Gesamtdurchlässigkeit des geschichteten Sediments ist in Gl. (4) definiert. Der Index 1 entspricht der abgesetzten Kolmatierungsschicht. Die Durchlässigkeit der Grobsedimentüberlagerung  $K_2$  kann nach der Einbauphase aus der Lysimetermessung unter homogenen Bedingungen ermittelt werden. Durch Umformung von Gl. (2) und (4) kann  $K_1$  gemäß Gl. (5) invers rückgerechnet werden. Dies unter der Voraussetzung, dass die Schichtdicke  $z_1$  z. B. durch Sedimentbeprobung ermittelbar ist.

$$K = \frac{z_1 + z_2}{\frac{z_1}{K_1} + \frac{z_2}{K_2}}, \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{z_1}{\frac{\Delta H + z_1 + z_2}{q_{LY}} - \frac{z_2}{K_2}} \quad \text{mit } z_1 + z_2 = L_{LY}. \quad (5)$$

Dieser Lösungsvorschlag kann insbesondere bei jenen Flüssen sinnvoll sein, an denen Kolmatierungs- und Erosionsprozesse temporär wechseln und daraus unterschiedliche Grundwasserneubildungsraten resultieren.

## 7.6. Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt Erfahrungen mit einem Flußbettlysimeter. Der ausgeführte Lysimetertyp entspricht einem Gravitationslysimeter mit Dränraum und ist bei tief liegendem Grundwasser einsetzbar. Das Ziel der Lysimeteranwendung war die Abschätzung der Sickerverluste aus einem Flußbett und der Vergleich der Ergebnisse mit anderen Messverfahren. Die Erfahrungen waren durchaus positiv und die gewonne-

nen Messdaten tragen wesentlich zum Verständnis der Interaktionsprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser bei. Aus den Erfahrungen leiten sich jedoch folgende Empfehlungen ab: Das verwendete, dünnwandige PVC-Material des Lysimeters hielt den Drücken nicht stand und es trat eine Beschädigung auf. Hier sind dickwandigere Materialien oder Metall zu empfehlen. Zur besseren Kenntnis der Gradienten und Sickerlinien empfiehlt sich eine dichtere Beobachtung mit Hilfe von z. T. selbstregistrierenden Piezometern. Damit können auch räumlich begrenzte Staueffekte, bedingt durch Einlagerung von Dichtlinsen, erfasst werden.

Die Anwendungsmöglichkeit für die inverse Abschätzung von Kolmatierungseffekten wurde beschrieben, fand jedoch aufgrund der vorherrschenden Sedimentationsprozesse keine direkte Anwendung. Generell kann jedoch die Lysimetertechnik, die traditionsgemäß stärker im landwirtschaftlichen Bereich angewendet wird, auch in der integrierten Wasserwirtschaft, in der verstärkt ein fundiertes Prozessverständnis der Interaktionsprozesse Eingang finden soll, als geeignetes Instrumentarium zur Quantifizierung von Austauschprozessen zwischen Oberflächen- und Grundwasser angesehen werden.

## Dank

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Land- u. Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion IV, beim Amt der Burgenländischen Landesregierung, Abteilung 9 Wasser- und Abfallwirtschaft und beim Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Gruppe Wasser, für den Forschungsauftrag zur Untersuchung der Abflussverhältnisse an der Schwarza und Leitha bei Nieder- und Mittelwasserführung.

## 8. Applikation von Radioisotopen im Lysimeterversuch

(Th. PÜTZ, W. MITTELSTAEDT, H. VERECKEN, F. FÜHR)

### 8.1. Einleitung

Eine Vielzahl von Prozessen, wie Verflüchtigung, photochemischer Abbau, Aufnahme durch Pflanzen, Abbau, Sorption, Verlagerung im Boden bestimmen den Verbleib von Xenobiotika in der Umwelt (Fig. 8.1). Zur Abschätzung und Beurteilung eines möglichen Gefahrenpotentials eines Stoffes für den Menschen und die Umwelt werden deshalb eine Vielzahl von Untersuchungen unter Verwendung von definierten Testsystemen, z. B. Suntestapparaturen, pflanzliche Zellkulturen, Laborkultivierungssysteme nach J. P. E. ANDERSON (1975), Laborsäulen, mikrobiologische Testsysteme, u. a. eingesetzt.

Die Versuchsziele sind belastbare und auf das reale Freiland übertragbare Aussagen zum Stoffverhalten auch unter Einbeziehung des Langzeitverhaltens zu erarbeiten. Dabei besitzen verschiedene Testsysteme, in Abhängigkeit ihrer Dimensionen, systemimmanente Vor- und Nachteile (Tab. 8.1), die die Ergebnisse und damit die Übertragbarkeit auf die reale Freilandsituation beeinflussen.

Eine besondere versuchstechnische Schwierigkeit stellt die Matrix Boden dar, die wegen ihrer sehr komplexen, heterogenen Zusammensetzung und Variabilität, hier besonders der Gehalt an organischer Substanz, und ihrer chemischen sowie physikalischen Eigenschaften den Verbleib organischer und anorganischer Xenobiotika im Freiland

nachhaltig beeinflussen kann. In Abhängigkeit von örtlichen Gegebenheiten kann die kleinräumige Variabilität des Bodens bei standardisierten Testsystemen die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse erheblich beeinträchtigen.

Das Lysimeter, befüllt mit einem Bodenmonolithen, ist von allen experimentellen Versuchssystemen mit Ausnahme des Feldversuches jenes, das die Realität am besten

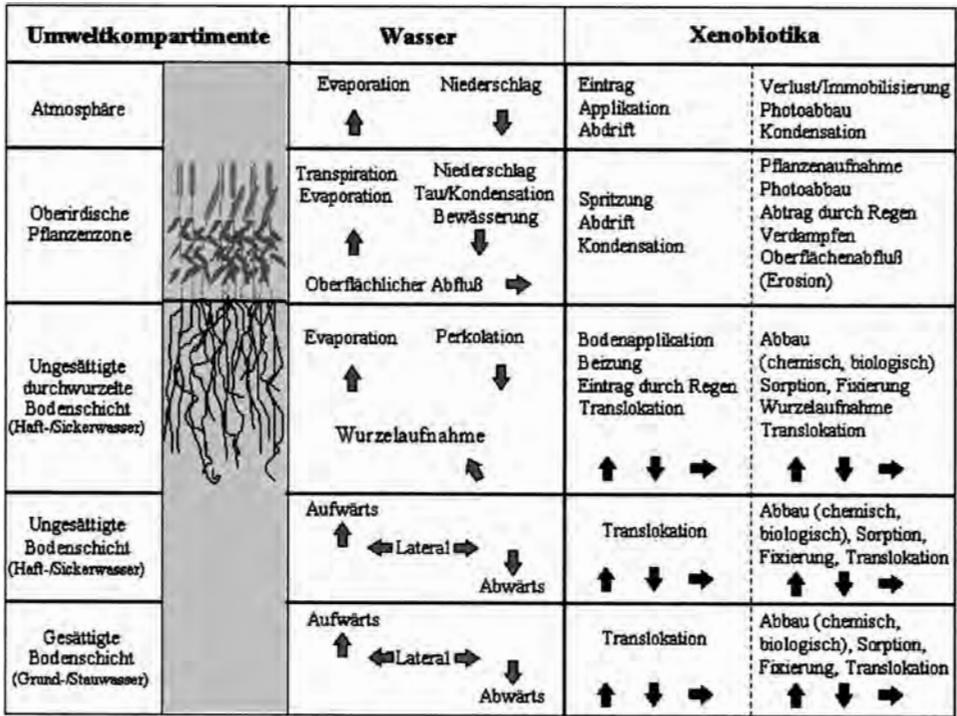


Fig. 8.1: Prozesse, die den Verbleib von Xenobiotika in der Umwelt beeinflussen (verändert nach H. H. CHENG & W. C. KOSKINEN, 1986).  
Processes affecting fate of xenobiotics in the environment (modified after, H. H. CHENG & W. C. KOSKINEN, 1986).

Tab. 8.1: Vor- und Nachteile verschiedener Testsysteme.  
Advantages and disadvantages of different test systems.

	Labor	Lysimeter	Feld
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>definierte, reproduzierbare Bedingungen</li> <li>Bilanz</li> <li>preisgünstig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ungestörter Boden</li> <li>Freilandbedingungen</li> <li>Bilanz</li> <li>Wiederholungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>reale Situation</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>artifizuell</li> <li>Fehleinschätzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>gestörte Drainage</li> <li>Lysimeterlänge</li> <li>einmaliges Szenario</li> <li>hohe Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flächenvariabilität</li> <li>keine Bilanz</li> <li>Kontrollflächen</li> <li>einmaliges Szenario</li> <li>hohe Kosten</li> </ul>

abbildet. Unter Nutzung der radioaktiven Markierung der zu untersuchenden Testsubstanzen können folgende Fragen erfolgreich behandelt werden:

- Rückstandssituationen in Pflanzen, Boden und Perkolat einschließlich der gebundenen Rückstände in Pflanzen und Böden,
- Abbau- und Versickerungsverhalten,
- weiterführende Studien zu Abbau, Sorption, Freisetzung und Bioverfügbarkeit von Rückständen in landwirtschaftlichen Fruchtfolgen,
- Verbesserung der Interpretation der Ergebnisse aus ökotoxikologischen Freilandstudien und
- Validierung von Stofftransport- und Abbau-Modellen (F. FÜHR et al., 1991, R. HANCE & F. FÜHR, 1992),
- Transfer von Radionukliden in die Nahrungskette (siehe W. STEFFENS et al., 1986, W. STEFFENS et al., 1988, M. BILO, 1991) bzw.
- spezielle Fragen der Pflanzenernährung, z. B. Wirkung von Nitrifikationshemmern (U. FETTWEIS, 2001).

Darüber hinaus erhält man durch Kombination von konventioneller Analytik (Dünnschichtchromatographie, Gaschromatographie, HPLC) mit der Radioaktivitätsbestimmung (Flüssigkeitsszintillationspektrometer, Radio-Dünnschichtchromatographie, Mikro- und Makroautoradiographie):

- eine Überprüfung der Extraktions- und Clean-Up-Verfahren,
- eine genaue Zuordnung der chromatographischen Trennung,
- spezifische Informationen über definierte Atompositionen im Wirkstoffmolekül,
- eine Lokalisierung der Radioaktivität im pflanzlichen Gewebe und
- eine Kombination von Radioisotopen sowie stabilen Isotopen.

Für jede dieser Fragestellungen ist die Applikation der radioaktiv markierten Verbindung oder des Radioisotops von entscheidender Bedeutung.

## 8.2. Einsatz von Radioisotopen im Lysimeterversuch

Wichtige Voraussetzung für Freilandlysimeterversuche in Kombination mit Radioisotopen sind vertretbare Risiken hinsichtlich des Strahlenschutzes. So ist von vornherein die Nutzung von  $\alpha$ -Strahlern auszuschließen. In Tab. 8.2 sind nur die ge-

Tab. 8.2: Einsatzmöglichkeiten der Radioisotope im Lysimeterversuch. <sup>1)</sup> – Halbwertszeit.  
Use of radioisotopes in lysimeter experiment. <sup>1)</sup> – half-life time.

Wasserbewegung		Transport und Verbleib von Xenobiotika		Transfer Boden-Pflanze/ Nährstoffhaushalt	
<sup>3</sup> H	12,33 Jahre <sup>1)</sup>	<sup>14</sup> C	5730 Jahre	<sup>85</sup> Sr	64,84 Tage
				<sup>35</sup> S	87,51 Tage
				<sup>45</sup> Ca	162,61 Tage
				<sup>57</sup> Co	271,79 Tage
				<sup>134</sup> Cs	2,07 Jahre
				<sup>22</sup> Na	2,60 Jahre
				<sup>60</sup> Co	5,00 Jahre
				<sup>90</sup> Sr	28,78 Jahre
				<sup>137</sup> Cs	30,07 Jahre
				<sup>36</sup> Cl	301000 Jahre

brüchlichsten  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahler aufgeführt. Aufgrund der Strahlenschutzrisiken wurde im Forschungszentrum Cadarache (Frankreich) ein Lysimeterversuch unter simulierten Freilandbedingungen in einem Gewächshaus durchgeführt. Im Rahmen dieses Versuches wurde der Transfer eines radioaktiven Fallouts der Radioisotope  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  nach einer simulierten Reaktor-Kern-Schmelze in die Nahrungskette untersucht (siehe M. MUSZINSKI, 1996). Aufgrund des sehr breiten Stoffspektrums organischer Verbindungen wird das  $^{14}\text{C}$ -Isotop mit Abstand am häufigsten verwendet. An dieser Stelle wird ausdrücklich auf die Verwendung des  $^{14}\text{C}$ -Isotops zur Untersuchung der Chemie und Dynamik des Bodenumus hingewiesen, das teilweise im natürlichen Feld (H. E. OBERLÄNDER & K. ROTH, 1975, A. ZELLER et al., 1966) und parallel im Lysimeter eingesetzt wurde (Th. PÜTZ, 1993, H. PRINTZ, 1995).

Bei der Applikation von Radioisotopen im Lysimeterversuch wird eine radioaktiv markierte Substanz freigesetzt. Aufgrund der Verteilung eines häufig sehr geringen Volumens (10–60 ml/m<sup>2</sup>) auf eine relativ große Bodenmenge muss eine Verdünnung der applizierten Substanz berücksichtigt werden und somit eine entsprechend hohe spezifische Radioaktivität der Testsubstanz (kBq/mg Testsubstanz) gewählt werden, um in nachfolgenden Beprobungen ein deutliches radioaktives Signal nachzuweisen. Die Höhe der spezifischen Radioaktivität wird nur durch eine mögliche Radiolyse der markierten organischen Testsubstanz begrenzt.

Radioisotope dürfen in Deutschland nur entsprechend der Strahlenschutzverordnung (BUNDESANZEIGER, 2001) eingesetzt werden. Sobald die dort festgeschriebenen Freigrenzen überschritten werden, bedarf es einer Genehmigung zum Umgang mit radioaktiven Stoffen. Dies bedeutet, dass ein Kontrollbereich mit den entsprechenden bautechnischen Anforderungen, die Umsetzung der Strahlenschutzauflagen und eine Personendosisüberwachung eingerichtet werden müssen.

Die Messung der Radioaktivität allein ermöglicht nur sehr limitierte Aussagen. So sind zum einen nur Angaben zum Schicksal der Markierungspositionen bei organischen Verbindungen möglich, zum anderen werden wirkstoffäquivalente Rückstandsmengen sehr leicht fehlinterpretiert, da es sich bei diesen Ergebnissen stets um maximale Stoffmengen handelt, die aber, bedingt durch Abbau- und Mineralisierungsprozesse, auch Metabolite bzw. Zwischenprodukte bis hin zum reassimilierten  $^{14}\text{CO}_2$  darstellen können. Zur exakten chemischen Bestimmung der detektierten Radioaktivität ist deshalb der Einsatz konventioneller Analytik, wie z. B. Radio-Dünnschichtchromatographie, LC-MS/MS oder GC-MS notwendig (F. FÜHR et al., 1991).

Die administrativen, baulichen, geräte- sowie messtechnischen Anforderungen des Einsatzes von Radioisotopen, aber auch die fachgerechte Entsorgung der radioaktiven Abfälle können höhere Kosten im Vergleich zu einer konventionellen, nicht die Vorteile der Radioisotope nutzenden Versuchsdurchführung verursachen. Das Verhältnis der Mehrkosten von konventioneller zu radioaktiver Versuchsdurchführung kann bei ca. 1 : 1,5 liegen, wobei dieses Verhältnis in Abhängigkeit der Versuchsdurchführung durch personalintensive Probenvorbereitung im Falle einer konventionellen chemischen Analytik enger sein kann.

### 8.3. Applikation von radioaktiv markierten Substanzen

Das Institut für Radioagronomie der Forschungszentrum Jülich GmbH, das 2001 in das Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre IV: Agrosphäre aufgegangen ist, hat in den letzten 30 Jahren Pionierarbeit beim Einsatz von Radioisotopen in Lysimeterversuchen geleistet, und es werden im Folgenden aufgrund dieser Erfahrungen

Applikationsbeispiele dargestellt. Bei der Applikation von radioaktiv markierten Testsubstanzen wird in der Regel eine gleichmäßige Verteilung auf der Zieloberfläche (z. B. Pflanzen, Boden) angestrebt. Die zu applizierenden Testsubstanzen können dabei in den drei Aggregatzuständen – fest, flüssig oder gasförmig – vorliegen. In Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung des Lysimeterversuches erfolgt die Applikation direkt auf die Bodenoberfläche oder die Pflanzen, durch Einmischung in den Boden, Einleitung in das Grundwasser oder durch Einspeisung in die Gasphase (Spezialanwendung im Windkanal).

Zur Untersuchung des Umweltverhaltens von Pflanzenschutzmitteln gibt die landwirtschaftliche Praxis die Rahmenbedingung für eine Spritzapplikation vor. Sie erreicht mit computergestützten Pflanzenschutzspritzen eine recht gute Gleichverteilung der ausgebrachten Substanzen im Feldmaßstab. Die gleichmäßige Verteilung, das Tropfenspektrum und das Aufwandvolumen können sich auf verschiedene Prozesse im System Boden/Pflanze auswirken. Die gleichmäßige Verteilung der Testsubstanzen auf der Zielfläche sollte einen Variationskoeffizienten  $< 10\%$  aufweisen, um kleinräumige Über- oder Unterkonzentrationen zu vermeiden, die einer repräsentativen Probenahme nach der Applikation entgegenstehen (A. STORK, 1995). K. HURLE (1982) beobachtete für zahlreiche Substanzen eine Konzentrationsabhängigkeit der Biomineralisierung im System Boden/Pflanze. Nach A. STORK et al. (1994) werden auch Adsorption und Verflüchtigung beeinflusst. Eine exakte Spritzapplikation mit dem Ziel, das Applikationsvolumen von  $10\text{--}60\text{ ml/m}^2$  gleichmäßig auf den Lysimeterflächen von  $0,5\text{--}1,0\text{ m}^2$  zu verteilen, kann mit manuellen und halbautomatischen Applikationstechniken erreicht werden (W. STEFFENS et al., 1992). Zur Vorbereitung der Spritzapplikation muss in ein Lysimeter eine Einfassung mit Aluminiumblechen (Höhe ca. 50 cm) aufgebaut werden, die eine Kontamination der umgebenden Kontrollflächen bzw. eine unkontrollierte Freisetzung vermeidet und so auch eine korrekte Applikationsbilanz gewährleistet. Dazu wird dieser Kontaminationsschutz auf ein Lysimeter gesetzt und zur rascheren Dekontamination von innen mit Aluminiumfolie ausgekleidet. Gerade der sensible Randbereich eines Lysimeters (Berührungszone Boden/Lysimeterwand) sollte bei der Spritzapplikation nicht direkt angesprüht werden. Deshalb muss die Aluminiumfolie länger sein als die Blechwand und dieser Überstand wird einer Rinne entsprechend gebördelt, um überschüssige Spritzlösung aufzufangen.

### 8.3.1. Manuelle Applikation

Zur manuellen Spritzapplikation werden Handdosierpumpen (Fig. 8.2) bei kleinen Applikationsvolumina und druckluftunterstützte Spritzen (Fig. 8.3) bei großen Volumina verwendet. Beim Einsatz dieser Techniken ist darauf zu achten, dass das Spritzbild der eingesetzten Handpumpenspritzen bzw. Düsen eine gleichmäßige Verteilung gewährleistet und das Lysimeter in gleichmäßigen Bahnen appliziert wird. Diese Applikationsverfahren sind von der Verteilungsgenauigkeit und dem Spektrum der Tropfengröße mit der landwirtschaftlichen Praxis durchaus vergleichbar.

Es sollten vor der Applikation die Handdosierpumpen ausgewählt werden, die anhand ihres Spritzbildes und ihrer Funktionstüchtigkeit den Anforderungen entsprechen. Der Ansaugschlauch sollte aus einem nicht sorbierenden Material, z. B. PTFE bestehen und mit einer Pipettenspitze verlängert werden, um das Vorratsgefäß vollständig zu entleeren. Als Vorratsgefäße haben sich Spitzkolben sehr gut bewährt. Zur Konditionierung empfiehlt es sich, mit der Handpumpenspritze eine inaktive Lösung der zu applizierenden Testsubstanz in der entsprechenden Konzentration zu versprühen, um mögliche Sorptionsplätze in der Spritze zu belegen (A. WÜSTEMEYER, 2000). Die



Fig. 8.2: Handpumpenapplikation eines  $1,0\text{ m}^2$ -Lysimeters mit Aluminiumfolie ausgekleidetem Kontaminationsschutz.  
 Application by hand pump of a  $1.0\text{ m}^2$ -lysimeter with contamination protection covered with aluminum foil.

Applikationsverluste dieser Technik betragen zwischen 0,3 und 20,0 % (A. STORK et al., 1991, Th. PÜTZ, 1993, H. PRINTZ, 1995, A. WÜSTEMEYER, 2000). Die Verteilungsgenauigkeit hängt sehr stark vom Pflanzenbewuchs ab. Wenn eine Applikation im Voraufverfahren durchgeführt wird, kann eine gute Verteilung erreicht werden, die einen Variationskoeffizient zwischen 15 und 25 % aufweist (A. STORK et al., 1991, Th. PÜTZ, 1993). Bei Applikationen mit Pflanzenbewuchs kann, bedingt durch die Beschattung der Bodenoberfläche durch Pflanzenteile, der Variationskoeffizient Werte zwischen 46 und 100 % erreichen (A. STORK et al., 1991, B. HEITMANN-WEBER, 1992).

Für runde Lysimeter berichtet G. FENT (1992) von einem statischen Spritzsystem. An ein für das Lysimeter angepasstes Leichtmetallgerüst wurde eine nach oben hin geschlossene Schlauchfolie befestigt. Über eine mit Druckluft betriebene Hohlkegeldüse erfolgte die Applikation des Lysimeters mit den oben genannten geringen Volumina. Die Applikationsverluste, ermittelt während der Applikation von sechs Lysimetern mit jeweils zwei Applikationsterminen, beliefen sich auf 2,3–13,9 %.

Darüber hinaus wurden auch Tröpfchenapplikationen mit Kolbenhubpipetten durchgeführt, die eine sehr gute Verteilung auf dem Lysimeter gewährleisten. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens sind die geringen Applikationsverluste von  $< 2\%$ , die lediglich aus Resten der Lösungen an Gefäßwandungen und Pipettenspitzen resultieren (U. FETTWEIS, 2001).



*Fig. 8.3: Druckluftgetriebene Spritzapplikation eines 1,0 m<sup>2</sup>-Lysimeters mit Aluminiumfolie ausgekleidetem Kontaminationsschutz.  
Compressed air driven spray application of a 1.0 m<sup>2</sup>-lysimeter with contamination protection covered with aluminium foil.*

Eine weitere manuelle Spritztechnik stellt der Einsatz von Airbrushpistolen bei der Pflanzen- (W. STEFFENS & J. WIENEKE, 1974) und Lysimeterapplikation dar (siehe M. HANSPER, 1986). Als inertes Trägergas wurde Stickstoff eingesetzt und die Durchflusseinstellung der Wassermenge erfolgte über die Druckregelung. Aufgrund des sehr feinen Sprühnebels ist eine Verschwebung von Teilen der Applikationslösung gegeben, so dass ein rundum geschlossener Applikationsschutz notwendig ist. Daraus kann ein relativ hoher Applikationsverlust resultieren. Das sehr feine Tropfenspektrum stellt im Bezug zur Spritzung in der landwirtschaftlichen Praxis einen Spezialfall dar.

Als eine Sonderform der manuellen Applikation wurde die Testsubstanz direkt in den Boden eingemischt. Hierzu wurde die relevante Bodenschicht aus dem Lysimeter

entnommen und dieses Bodenmaterial über ein Sieb (< 5 mm) homogenisiert. In Vorversuchen wurde die optimale Bodenfeuchte zur Einmischung der Testsubstanz ermittelt, um sowohl eine geringe Staubentwicklung als auch eine geringe Neigung zur Klumpenbildung beim Mischvorgang zu gewährleisten. Im Labor wurde auf einem Aliquot dieses Bodens, das auf < 2 mm gesiebt wurde, die Testsubstanz geträufelt. Anschließend wurde dieser applizierte Boden homogenisiert. Im nächsten Arbeitsschritt wurde diese Bodencharge dem Restboden zugegeben, mit Hilfe eines Rhönrad- bzw. Betonmischers gleichmäßig in die gesamte Bodencharge eingemischt und wieder in das Lysimeter eingefüllt. Anhand von Bodenproben wurde die Verteilungsqualität überprüft, die bei einem Variationskoeffizient von ca. 6–7 % lag. In Abhängigkeit von der verwendeten Testsubstanz und den Oberflächen der Mischbehälter (Verluste durch Sorption) betragen die Applikationsverluste zwischen 8 und 22 % (F. SCHNÖDER, 1995).

In Lysimeterexperimenten mit Fragestellungen zur Saatgutbeizung, Beizhofausbildung und Aufnahme der Beize durch die Pflanzen wurde die radioaktiv markierte Testsubstanz direkt auf das Saatgut aufgebracht, also das Saatgut entsprechend der landwirtschaftlichen Praxis gebeizt. Die exakte Verteilung der Saatgutbeize auf den Körneroberflächen kann nach einem von G. REINKEN & F. FÜHR (1995) entwickelten Verfahren im Gammaskpektrometer überprüft werden. Der ermittelte Beizgrad nach Einzelsamenanalyse betrug im Mittel 80–98 % (W. THIELERT, 1984, C.-M. TRÖLTZSCH, 1995). Anschließend wurde das gebeizte Saatgut in den Lysimeterboden gelegt.

Bei dieser Applikationsform traten keinerlei Applikationsverluste auf und die Verteilung im Lysimeter entsprach der Kornablage, war also abhängig vom Versuchsdesign. Lediglich nach längerer Lagerung des gebeizten Saatgutes konnte sich der mittlere Wirkstoffgehalt des Samens durch Abrieb um bis zu 12 % vermindern (C.-M. TRÖLTZSCH, 1995).

Bei Lysimeterversuchen mit Grundwassersimulation, z. B. zur Untersuchung der aufwärtsgerichteten Bodenpassage von leichtflüchtigen Kohlenwasserstoff-Verbindungen, wurde eine Kontamination des Grundwassers vorgenommen. Zur Optimierung des Versuchsdesign sollte eine Beprobung der Gasphase oberhalb des Lysimeters in Form eines Windkanals vorhanden sein, so dass alle Phasen (Luft, Boden, Wasser) messtechnisch erfasst werden können (A. STORK, 1995, V. LINNEMANN, 2002). Zur Regulation der Höhe des Grundwassers besaß dieses Versuchsdesign neben der Grundwasserstauzone einen gekühlten Grundwasservorratsbehälter und eine Pumpe (Fig. 8.4). Die Applikation einer gelösten Testsubstanz erfolgte mittels einer Spritze über ein Septum direkt in den Grundwasservorratsbehälter. Nach der Injektion wurde zur Spülung der Spritze wiederholt Wasser aus dem Vorratsbehälter angesaugt und zurückgespritzt. Die Applikationsverluste waren < 1 % und die gleichmäßige Kontamination des Grundwassers erfolgte durch kontinuierliches Umpumpen des Wassers (siehe V. LINNEMANN, 2002).

### 8.3.2. Halbautomatische Applikation

Die im Institut Agrosphäre eingesetzte halbautomatische Applikationsspritze für radioaktive Spritzmittelbrühen erfüllt die Anforderungen, die an Pflanzenschutzspritzen der landwirtschaftlichen Praxis gestellt werden (A. STORK, 1995):

- praxisübliche Applikationstechnik,
- Verwendung praxisüblicher Düsen,

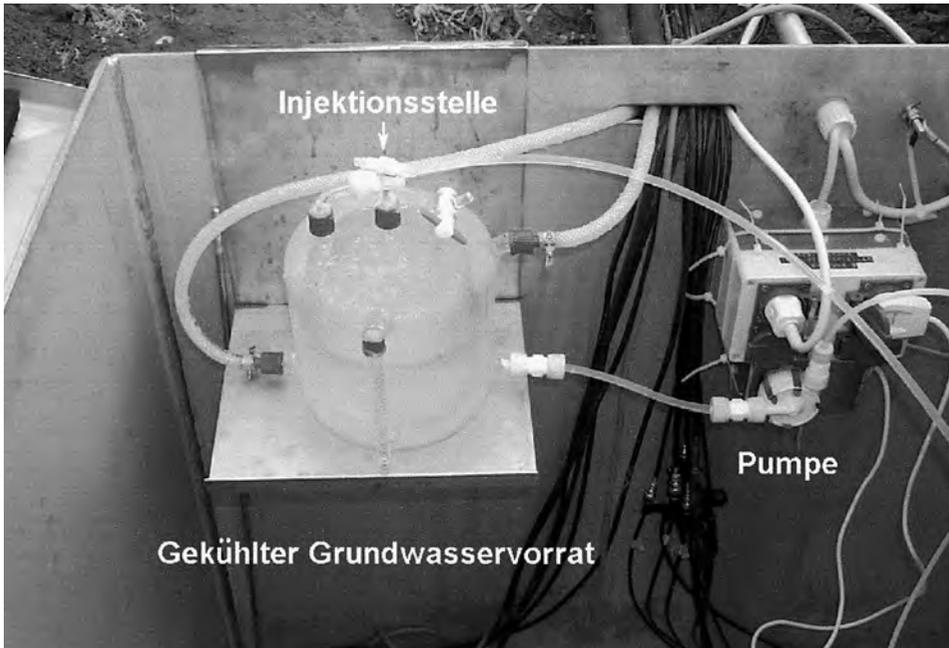


Fig. 8.4: Gekühlter Grundwasservorrat, Injektionsstelle und Pumpe eines Lysimeters mit Grundwasseranstaue.

*Cooled ground water reservoir, injection tube and pump of a ground water lysimeter.*

- praxisüblicher Spritzdruck,
- praxisübliche Fahrgeschwindigkeit,
- Abstand der Düsen zur Bodenoberfläche,
- geringstes Totvolumen.

Die wesentlichen bautechnischen Details der halbautomatischen Applikationsspritze sind: ein Rahmen, eine Lineareinheit, ein elektromechanischer Hubzylinder, ein Magnetrührer, ein Applikationsbehälter, ein Magnetventil, eine Pressluftflasche und eine Steuerungseinheit (Fig. 8.5). Weiterführende Details sind bei C. EVERS (1993) und A. STORK (1995) nachzulesen.

Bei dieser Applikationsspritze können nur Düsen eingesetzt werden, die über eine gleichmäßige Querverteilung verfügen. Da aber handelsübliche Düsen erhebliche Mängel hinsichtlich der Querverteilung aufweisen, müssen geeignete Düsen selektiert werden.

Hierbei werden zwei Verfahren eingesetzt. Im ersten Schritt wurden auf einem Düsenprüfstand (statischer Test) Düsen hinsichtlich ihrer Querverteilungsgüte geprüft. Es wurden nur Düsen akzeptiert, deren Rechteckverteilung einen Variationskoeffizienten  $< 10\%$  besaßen. Dies war nur bei ca.  $10\%$  aller getesteten Düsen der Fall. Im zweiten Schritt wurde anhand eines Tintenspritzbildes (dynamische Methode) noch einmal das charakteristische Verteilungsmuster ermittelt (A. STORK, 1995).

Zur Durchführung einer Applikation mit der halbautomatischen Applikationsspritze wurde ein mit Aluminiumfolie ausgekleideter Kontaminationsschutz, der auch eine möglich Abdrift vermied, auf das Lysimeter gesetzt. Dieser Kontaminationsschutz

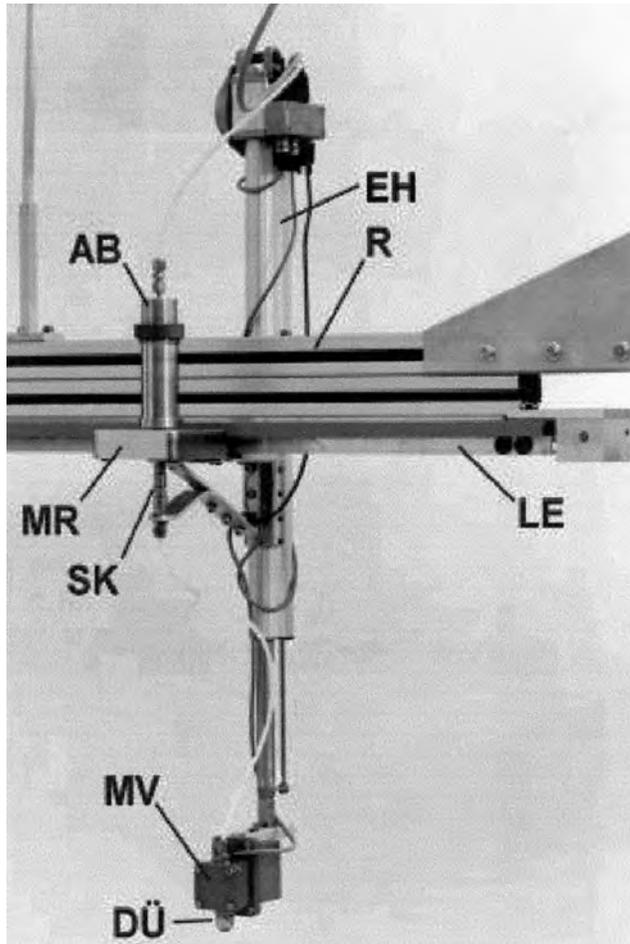


Fig. 8.5: Detailansicht der halbautomatischen Applikationsspritze. AB – Applikationsbecher, DÜ – Düse, EH – elektromagnetischer Hubzylinder, LE – Lineareinheit, MR – Magnetrührer, MV – Magnetventil, R – Rahmen, SK – Schnellkupplung.  
 Detail view of the semi-automatic application sprayer. AB – application cup, DÜ – nozzle, EH – electromagnetic lifting cylinder, LE – drive unit, MR – magnetic stirrer, MV – magnetic valve, R – frame, SK – quick coupler.

hatte als Besonderheit eine Vorlauf- und Nachlaufzone (Fig. 8.6), damit sich bereits vor Überfahren der eigentlichen Zielfläche der Spritzkegel vollständig ausbilden konnte. Das Ende der Applikation wurde durch den Übergang in die Nachlaufzone vorgegeben. Die Validierung der halbautomatischen Applikationsspritze für ein 1,0 m<sup>2</sup>-Lysimeter ergab Applikationsverluste von 15–25 % (B. BRUMHARD & F. FÜHR, 1992, C. EVERS, 1993, E. GATZWEILER, 1994, A. STORK et al., 1994, A. STORK, 1995, M. DUST, 1995) und eine Verteilungsgenauigkeit von 8 % relativer Standardabweichung (C. EVERS, 1993, A. STORK et al., 1994, A. STORK, 1995). Bei der Berechnung der Applikationslösung ist entsprechend der zu erwartenden Applikationsverluste ein Zuschlag zu berücksichtigen.

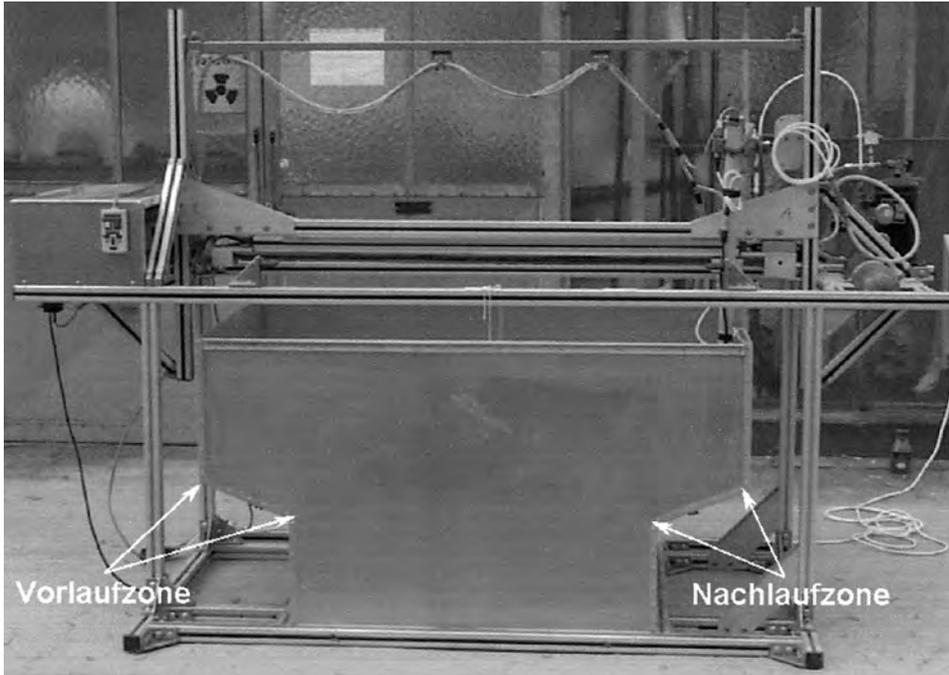


Fig. 8.6: Halbautomatische Applikationsspritze zur praxisgerechten und homogenen Lysimeterapplikation.  
*Semi-automatic application sprayer for a homogeneous lysimeter application in good agricultural practice.*

## 8.4. Schlussbetrachtung

Das Lysimeter als definiertes Modell für realitätsnahe Freilandversuche ist in Kombination mit dem Einsatz von Radioisotopen ein Instrument, das sichere, valide Ergebnisse liefert, die in ihrer Breite mit keinem anderen Versuchsdesign gewonnen werden können. Bei konsequenter Nutzung aller Vorteile dieses Ansatzes erhält der Experimentator umfassende Datensätze über den Verbleib von Testsubstanzen in definierten, repräsentativen Ökosystemausschnitten. Konsequenterweise werden alle Unregelmäßigkeiten in der Versuchsplanung und Versuchsdurchführung aufgedeckt, da stets auf der Basis der Applikationsbilanz valide Daten der eingesetzten Testsubstanzen im Lysimeterversuch vorhanden sind. Im Lysimeter kombiniert mit einem Windkanal kann eine Gesamtbilanz der insgesamt applizierten Testsubstanzenmenge sogar messtechnisch exakt bestimmt werden.

Die verschiedenen, vielfältigen Applikationstechniken werden den sehr komplexen Fragestellungen und Versuchsansätzen gerecht, so dass stets für einen spezifischen Versuchsansatz die Applikationstechnik zur Verfügung steht, die einen direkten Bezug zur Praxis besitzt. Von Versuchsbeginn an ist die Vermeidung von Artefakten und damit von Fehleinschätzungen der Versuchsergebnisse sichergestellt.

Bei den vorgestellten Applikationstechniken wurden stets auch Strahlenschutzaspekte berücksichtigt, um ein Gesundheitsrisiko für den Versuchsansteller ausschließen zu können.

## 8.5. Zusammenfassung

Das Lysimeter, befüllt mit einem Bodenmonolithen, ist von allen experimentellen Versuchssystemen mit Ausnahme des Feldversuches das System, das die Realität am besten abbildet. In diesem repräsentativen Agrarökosystemausschnitt werden verschiedene Fragestellungen zur Wasserbewegung, zum Transport sowie Verbleib von Xenobiotika und zum Transfer von Radionukliden im System Boden/Pflanze bzw. Nährstoffhaushalt bearbeitet. Nur in diesem Versuchssystem ist der Einsatz von radioaktiven Isotopen möglich. Das Institut für Radioagronomie der Forschungszentrum Jülich GmbH, das 2001 in das Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre IV: Agrosphäre aufgegangen ist, besitzt 30 Jahre Erfahrung im Radioisotopeneinsatz in Lysimeterversuchen. In dieser Zeit wurden verschiedene manuelle und halbautomatische Applikationstechniken von radioaktiv markierten Testsubstanzen auf Lysimeter entwickelt, deren Besonderheiten, Verteilgenauigkeiten und Applikationsverluste hier zusammengestellt wurden.

## 9. Vergleich unterschiedlicher Lysimetertypen – Einsatzmöglichkeiten und Grenzen (J. SEEGER, R. MEISSNER, H. RUPP)

### 9.1. Einleitung

Die ungesättigte Bodenzone stellt einen im Vergleich zur Boden- und Grundwasserforschung relativ wenig untersuchten Bereich dar. Da es aufgrund der Vielzahl der pedohydrologischen Standortbedingungen (Gestaltung der Deckschichten) sowie der potentiellen Nutzungs- und Belastungssituationen nicht möglich ist, jeden Einzelfall zu untersuchen, haben sich sowohl im nationalen als auch im internationalen Rahmen Lysimeter bei der Ableitung von Schutzmaßnahmen durch die Möglichkeit der Simulation von typischen Bewirtschaftungsszenarien bewährt und spielen eine entscheidende Rolle bei der Lösung von Aufgaben im Bereich der Sickerwasserforschung (F. FÜHR et al., 1998, F. LENNARTZ et al., 1997, G. VAN DER KAMP & R. SCHMIDT, 1997, M. M. YOUNG et al., 1996, D. W. JOHNSON et al., 1995, C. DEYHLE, 1995 und J. V. HEADLY et al., 1994). Auf der seit Beginn der 80er Jahren bestehenden UFZ-Lysimeteranlage in Falkenberg (Landkreis Stendal, Sachsen-Anhalt) ist neben der sukzessiven Verbesserung der Bautechnik von Lysimetern nach wie vor die weitere Nutzung der vorhandenen Altanlagen ein integraler Bestandteil der gegenwärtigen Arbeiten. Inzwischen reicht die Betrachtung von Lysimeterergebnissen allein nicht mehr aus, um verallgemeinerungsfähige Aussagen für repräsentative Gebiete machen zu können. Es ist erforderlich, Erkenntnisse aus Lysimeterversuchen auf größere Flächeneinheiten zu übertragen. Die Skalierung, d. h. die Übertragung von mikroskalig gewonnenen Ergebnissen auf meso- und makroskalige Areale stellt nicht nur in der Lysimeterforschung, sondern in der gesamten hydrologisch-pedologischen Forschung, ein bisher nicht zufriedenstellend gelöstes Problem dar (M. RODE, 1999). Ziel der Arbeit ist es, zunächst einen Überblick über die an den Standorten in Falkenberg (Eigentümer: UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH) und Colbitz (Eigentümer: STAU-Staatliches Amt für Umweltschutz Magdeburg, wissenschaftliche Betreuung UFZ) betriebenen Lysimetertypen zu geben und basierend auf den damit bearbeiteten Aufgabenstellungen Bewertungen über Einsatzmöglichkeiten und Grenzen aufzuzeigen.

## 9.2. Material und Methoden

Auf der UFZ-eigenen Lysimeterstation in Falkenberg werden gegenwärtig 142 Lysimetergefäße unterschiedlicher Bauart und Wirkungsweise betrieben. Ein Großteil der verwendeten Lysimeterfüllböden repräsentiert das Elbeinzugsgebiet im nördlichen Teil der Bundesländer Sachsen-Anhalt und Brandenburg. Aus einer Zusammenstellung aller am Standort in Falkenberg etablierten Lysimetertypen in Tab. 9.1 wird deutlich, dass der Übergang zu inertem Material, höheren Tiefen, monolithischer Füllbodenentnahme und Wägbbarkeit der Lysimeter mit einer deutlichen Reduzierung der Anzahl an neu gebauten Versuchsgefäßen verbunden war. Während die Auswertung der Ergebnisse des Lysimetertyps a hauptsächlich darauf basiert, unterschiedliche Nutzungsszenarien miteinander vergleichen zu können, ist es in den Lysimetertypen d–g möglich, durch die Erhöhung der zeitlichen und räumlichen Auflösung bodenchemische und -physikalische Parameter in verschiedenen Tiefenstufen detailliert zu erfassen.

Für alle Versuchsgefäße erfolgte eine Anbindung an den ebenfalls zu Beginn der 80er Jahre gebauten Lysimeterschacht, dem sowohl die Grundabläufe als auch die Bodenwässer aus verschiedenen Tiefenstufen zufließen (Platz für Neuentwicklungen wurde durch sukzessiven Rückbau der Altlysimeter geschaffen). Obgleich die jeweils vier Lysimeter der Lysimetergruppen e–g in abgedichteten eigenständigen PE-Containern mit mittig liegendem Steuerschacht untergebracht sind, besteht aus Gründen der Arbeitserleichterung zusätzlich eine Anbindung an den vorhandenen Lysimeterkeller. Durch die Entwicklung und den Bau dieser hermetisch gegen den Eintritt von Grund- und Sickerwässern geschützten Anlagen in Containerbauweise ist es möglich, Lysimeter in situ, d. h. direkt am zu untersuchenden Standort einzusetzen.

In der Colbitz-Letzlinger Heide befinden sich zwei Lysimeteranlagen mit insgesamt 13 Lysimetern. Das Großlysimeter h wurde mit dem am Standort anstehenden Bodensubstrat Sand lagenweise befüllt und entsprechend der Umgebung mit zweijährigen Kiefernsetzlingen bepflanzt. Auf den 12 Lysimetern des Typs i befinden sich repräsentative Pflanzengesellschaften aus der umliegenden Heide. Im Zeitraum 1996/97 wurde auf beiden Anlagen eine Automatisierung der Sickerwassermengenerfassung vorgenommen.

## 9.3. Ergebnisse und Diskussion

### 9.3.1. Einsatzgebiete von Lysimetern

Eine Zusammenstellung von relevanten Untersuchungsschwerpunkten, die auf der Forschungsstelle in Falkenberg mit Lysimetern bearbeitet werden, enthält Tab. 9.2. Die hier vorgenommene Dreiteilung macht deutlich, dass die Forschungsaufgaben maßgeblich von politischen Rahmenbedingungen und damit jeweils von aktuell anstehenden Problemstellungen sowie der Entwicklung von Wissenschaft und Technik geprägt sind.

Im ersten Entwicklungsabschnitt, zur Zeit der ehemaligen DDR, waren die wissenschaftlichen Aufgabenstellungen durch die Maßgabe der Erzielung maximaler Erträge bei minimaler Stoffauswaschung unter Berücksichtigung von Düngungs- und Beregnungsmaßnahmen auf hohem Intensitätsniveau geprägt. Durch diese praxisnahe Nutzung der Lysimeter, die zum Zeitpunkt der politischen Wende in den Bodenkerne den „alten“ Zustand der Landbewirtschaftung darstellten, bestanden 1991 auf der Forschungsstelle gute Voraussetzungen, um auf die Umstrukturierung in der Land-

Tab. 9.1: Gegenüberstellung der an den Standorten Falkenberg und Colbitz etablierten Lysimeterarten.  
Comparison of lysimeter types at the stations in Falkenberg and Colbitz. LS – Loamy Sand, S – Sand,

Lysimeterart	Bautermin	Anzahl	Material	Tiefe	Oberfläche	
<b>Lysimeterstation Falkenberg</b>						
<b>a –</b> Kastenlysimeter	1982/83	120 – sukzessiver Rückbau (aktuell 100 Lysimeter)	Stahlblech mit Bitumenschicht	1,25 m	1 m <sup>2</sup> , quadratisch	
<b>b –</b> tiefengestaffelte Lysimeteranlage	1978/79	20	verzinktes Stahlblech	0,25 m, 0,50 m, 1,00 m, 2,00 m, 3,00 m	0,2 m <sup>2</sup> , rund	
<b>c –</b> automatisiertes Lysimeter	1993/94	2	Stahlblech mit Bitumenschicht	1,25 m	1 m <sup>2</sup> , quadratisch	
<b>d –</b> Lysimeter mit ein- stellbarem Grund- wasserstand	1995–97	4	PE	1,75 m	1 m <sup>2</sup> , rund	
<b>e –</b> wägbare Lysimeter	1998/99	4	PE	2,00 m	1 m <sup>2</sup> , rund	
<b>f –</b> Gasmigrations- simulatoren (GAMS)	1998	8	PE	2,00 m	1 m <sup>2</sup> , rund	
<b>g –</b> monolithisch ge- füllte Lysimeter mit einstellbarem Grundwasser- stand	2000	4	Edelstahl	2,00 m	1 m <sup>2</sup> , rund	
<b>Lysimeterstation Colbitz</b>						
<b>h –</b> Großlysimeter	1973	1	Betonbauweise	4,00 m	660 m <sup>2</sup> , rund	
<b>i –</b> wägbare, mono- lithisch gefüllte Lysimeter	1968	12	Stahlblech	2,00 m	1 m <sup>2</sup> , rund	

IS – lehmiger Sand, S – Sand, L – Lehm, Loe – Löss.  
L – Loam, Loe – Loess.

	Bodenart	Befüllung	wägbar/ nicht wägbar	Messkriterien
<b>Lysimeterstation Falkenberg</b>				
	IS, S, L, Loe (IS-Haupt- bodenart)	nicht monolithisch	nicht wägbar	Sickerwasser und Sickerwasserqualität am Lysimeterboden
	IS, S	nicht monolithisch	nicht wägbar	Sickerwasser und Sickerwasserqualität am Lysimeterboden
	IS	nicht monolithisch	nicht wägbar	Sickerwasser und Sickerwasserqualität am Lysimeterboden; Wassergehalt, Temperatur, Tension und Qualitätskriterien in 3 Tiefenstufen
	Kippenböden	nicht monolithisch	nicht wägbar	Sickerwasser und Sickerwasserqualität am Lysimeterboden, Wassergehalt, Temperatur, Tension, Bodenluft und Qualitätskriterien in 4 Tiefenstufen, Höhe des Grundwasserstandes
	Kippenböden	nicht monolithisch	wägbar	Sickerwasser und Sickerwasserqualität am Lysimeterboden, Wassergehalt, Temperatur, Tension, Bodenluft und Qualitätskriterien in 3 Tiefenstufen, Höhe des Grundwasserstandes, Evapotranspiration
	Quarzsand	nicht monolithisch	nicht wägbar	Gaskonzentration, Temperatur und Luftfeuchte in 4 Tiefenstufen, Tension in 3 Tiefenstufen
	Elbaueböden	monolithisch	wägbar	Sickerwasser und Sickerwasserqualität am Lysimeterboden, Wassergehalt, Temperatur, Tension, Bodenluft und Qualitätskriterien in 3 Tiefenstufen, Höhe des Grundwasserstandes, Evapotranspiration
<b>Lysimeterstation Colbitz</b>				
	S	nicht monolithisch	nicht wägbar	Sickerwasser und Sickerwasserqualität am Lysimeterboden
	S	monolithisch	wägbar	Sickerwasser und Sickerwasserqualität am Lysimeterboden, Evapotranspiration

Tab. 9.2: Darstellung von relevanten, mit unterschiedlichen Lysimeterarten bearbeiteten Forschungsaufgaben. IS – lehmiger Sand.  
Main research tasks handled with different lysimeter types. IS – Loamy Sand.

Bearbeitungszeitraum	Lysimeter- typ	relevante Forschungsaufgaben
<b>Lysimeterstation Falkenberg</b>		
1982/83 bis 1990/91 „Ermittlung von Kennwerten zum Nährstoffaustrag bei landwirtschaftlicher Nutzung“	a, b	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kennwerte zum Auswaschungsverhalten von Nährstoffen bei intensiver landwirtschaftlicher Bodennutzung</li> <li>• Regeln und Richtlinien zur Bewirtschaftung von Wasserschutzgebieten</li> <li>• Kennwerte über den Einfluss von gestaffelter Mineraldüngung auf den Nährstoffaustrag bei unterschiedlichen Standort- und Nutzungsbedingungen (Dauerversuch)</li> <li>• Tracerversuche zur Untersuchung des Migrationsverhaltens in der ungesättigten Bodenzone</li> </ul>
1991/92 bis 1995/96 „Integration von Prozessuntersuchungen“	a, b  c	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kontinuierliche Weiterführung von Dauerversuchen</li> <li>• Etablierung neuer Tracerversuche</li> <li>• Wirkungen von Veränderungen in der Landwirtschaft auf die Gewässerbeschaffenheit, vor allem Auswirkung von Flächenstilllegungs- und Extensivierungsmaßnahmen</li> <li>• Transportverhalten von organischen Schadstoffen</li> <li>• Validierung des Modells C- und N-Transportmodells CANDY (für die Bodenart IS)</li> </ul>
1996/97 bis 1999/00 „Kopplung von Lysimeter- mit Feld- und Einzugsgebietsuntersuchungen“	a, b  c  a  d, e  f  g	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kontinuierliche Weiterführung von Dauerversuchen</li> <li>• Etablierung neuer Tracerversuche</li> <li>• Transportverhalten von organischen Schadstoffen</li> <li>• Validierung des Modells C- und N-Transportmodells CANDY (für die Bodenart IS)</li> <li>• Übertragung von Erkenntnissen aus Lysimeterversuchen auf Kleineinzugsgebiete u. a. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kleineinzugsgebiete und Landnutzung im Elbeinzugsgebiet</li> <li>• Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit in bergbaulich gestörten Räumen und biologische und chemische Entwicklung von Bergbaurestseen</li> </ul> </li> <li>• Entwicklung einer Messmethode zur Untersuchung von Kontaminationen der Umwelt aus belasteten Böden bzw. Aquiferen (Messgas Radon)</li> <li>• Untersuchung von Redoxvorgängen und Kalibrierung bereits in situ vorliegender Wasser- und Stoffhaushaltsmessungen in Flussauen</li> </ul>
<b>Lysimeterstation Colbitz</b>		
1968/69 bis 1999/00 „Erfassung von Wasser- und Stoffhaushaltskenndaten für Wald- und Heidegebiete“	h, i	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bestimmung von Wasserhaushaltsgrößen – Evapotranspiration und Sickerwassermenge von bewaldeten Gebieten</li> <li>• Untersuchung des Einflusses der atmosphärischen Deposition in Abhängigkeit vom forstlichen Bewirtschaftungsregime auf den Wasser- und Stoffhaushalt</li> <li>• Erarbeitung von Strategien für die künftige Bewirtschaftung von Heidearealen unter besonderer Berücksichtigung des Wasser- und Stoffhaushaltes</li> </ul>

wirtschaft mit einer umfangreichen Modifizierung der laufenden Experimente zu reagieren.

Im zweiten Entwicklungsabschnitt waren die Aufgaben durch Forschungen zur Folgewirkung von Veränderungen in der Landwirtschaft auf die Gewässerbeschaffenheit geprägt. Außerdem bestanden nun die technischen Möglichkeiten, um verstärkte Prozessuntersuchungen innerhalb der bisherigen „black box“-Lysimeter durch den Einbau von Sonden in differenzierten Tiefenstufen vorzunehmen.

Mitte der 90er Jahre begann ein dritter Entwicklungsabschnitt. Der wachsenden Forderung, Untersuchungen nicht mehr nur auf das Lysimeter an sich zu beschränken, sondern verallgemeinerungsfähige Aussagen für repräsentative Gebiete zu erarbeiten, wurde durch die verstärkte Kopplung zwischen Lysimeter-, Feld- und Einzugsgebietsuntersuchungen Rechnung getragen. Waren bis zu dem Zeitpunkt die installierten Lysimeter des Typs a und b (mit Ausnahme von Typ c) die bestimmenden Faktoren für die zu bearbeitenden Forschungsaufgaben, wurde nun verstärkt dazu übergegangen, die inzwischen vorhandenen materiell-technischen Möglichkeiten zu nutzen, um die Lysimetertechnik auf der Grundlage qualitativ neuer Fragestellungen gezielt weiterzuentwickeln. Trotz der damit verbundenen sukzessiven Verringerung des Lysimeterbestandes (Typ a) geht aus der zeitlichen Auflistung der Aufgabenstellungen deutlich hervor, dass der weiteren Nutzung vorhandener Lysimeteranlagen durch die Einbindung in langjährige Untersuchungen und nicht zuletzt durch die große Kontinuität bei der Gewinnung von Messergebnissen (z. B. Dauerversuche) nach wie vor eine erhebliche Bedeutung zukommt.

Für die Lysimeter der Stationen in Colbitz war zunächst die Bestimmung von Wasserhaushaltsgrößen von Interesse. In den letzten Jahren rückte immer mehr die Frage nach relevanten Sickerwasserinhaltsstoffen sowie der Quantifizierung von Stoffeinträgen aus der atmosphärischen Deposition in den Vordergrund.

### 9.3.2. Bewertung ausgewählter Lysimetertypen

#### 9.3.2.1. Vergleich von Tracerversuchsergebnissen

Ein direkter Vergleich von Messergebnissen aus verschiedenen Lysimetertypen ist schwierig, da die Versuchsgefäße zum Zeitpunkt ihrer Errichtung den jeweils wissenschaftlich-technischen Stand bei der Erfassung von Kenngrößen des Bodenwasser- und Stoffhaushaltes repräsentierten. Im Rahmen von umfangreich durchgeführten Tracerversuchen auf der Lysimeterstation in Falkenberg konnte ein direkter Messwertvergleich zwischen den Lysimetertypen a und b durchgeführt werden. Darüber hinaus war eine Bewertung der Eignung der Lysimeter des Typs a für die mit ihnen schwerpunktmäßig bearbeiteten Fragestellungen im Rahmen der Skalierung von mikroskalig gewonnenen Ergebnissen auf größere Flächeneinheiten möglich.

Die seit 1984 vorwiegend mit konservativen Tracern realisierten Experimente galten zunächst ausschließlich der Abschätzung der Verlagerungsgeschwindigkeit von gelösten Stickstoffverbindungen im Boden, d. h. der exakteren Zuordnung von Ursache und Wirkung einer Kontamination (z. B. landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahme). Seit 1996 werden Tracerversuche als Hilfsmittel für die Übertragung von Erkenntnissen aus Lysimetern auf Freilandbedingungen genutzt.

Einen Überblick über die in den Lysimetertypen a und b durchgeführten Tracereperimente und einen im Vorfeld dieser Untersuchungen realisierten Versuch unter idealisierten Laborbedingungen mit jeweils vergleichbaren Bodenarten als Einsatzsubstrate gibt Tab. 9.3.

Tab. 9.3: Überblick über durchgeführte Tracerversuche in unterschiedlichen Skalenbereichen und Lysimetertypen. S – Sand, IS – lehmiger Sand, L – Lehm, Loe – Löss.  
 Overview about tracer experiments carried out in different scales and lysimeter types. S – Sand, IS – Loamy Sand, L – Loam, Loe – Loess.

	Versuch	Versuchszeitraum	Bodenart	eingesetzter Tracer
Laborsäule	0	1982–83	S, IS, L, Loe	Cl
Lysimetertyp a	a-1	1984–87	S, IS, L, Loe	Cl
	a-2	1997–99	S, IS, L, Loe	Br
Lysimetertyp b	b-1	1992–96	S, IS	<sup>15</sup> N)NO <sub>3</sub>
	b-2	1996–97	S, IS	Cl
	b-3	1997–98	S, IS	Br

Die sowohl in den Laborsäulen als auch in den Lysimetern getätigte Annahme, dass bei der Bestimmung der Tracerverlagerung von einem idealen Fluss des Tracers durch den Boden nach dem Kolbenverdrängungsprinzip – „piston flow“ – ausgegangen werden kann, wird durch die in beiden Versuchsebenen ermittelten Verweilzeitvolumina (VWZV – ist die mit der Hälfte der Tracermenge ausgetragene korrespondierende Sickerwassermenge) im Bereich der zuvor ermittelten Wasserkapazitäten der Einsatzsubstrate bestätigt (Tab. 9.4). Die nur geringfügige Neigung zum „preferential flow“ konnte für die Bodenart IS (experimentell ermittelte Feldkapazitäten von 28 Vol.% im Oberboden – 0–30 cm und 22 Vol.% im Unterboden – 30–100 cm) auch bei der Auswertung weiterer Tracerversuche bestätigt werden (Tab. 9.5).

Tab. 9.4: Vergleich von VWZV (Verweilzeitvolumina) und Tracerverlagerung in unterschiedlichen Skalenbereichen (Versuche 0 und a-2) und bei differenzierten Bodenarten. S – Sand, IS – lehmiger Sand, L – Lehm, Loe – Löss.  
 Comparison of VWZV (retention time volumina) and tracer movement in different scales (trials 0 and a-2) and in different soils. S – Sand, IS – Loamy Sand, L – Loam, Loe – Loess.

Bodenart	Wasser- kapazität [mm]	VWZV [mm]		Verlagerung [mm/l/m <sup>2</sup> ]	
		Gefäßversuch	Lysimeterversuch	Gefäßversuch	Lysimeterversuch
S	131	173	135	5,8	7,5
IS	223	213	205	4,7	4,9
L	233	229	215	4,4	5,0
Loe	295	278	255	3,6	3,9

Tab. 9.5: Vergleich von VWZV (Verweilzeitvolumina) und Verlagerung in unterschiedlichen Lysimetertypen.  
 Comparison of VWZV (retention time volumina) and movement in different lysimeter types.

Versuche	eingesetzter Tracer	VWZV [mm]	Verlagerung [mm/l/m <sup>2</sup> ]
a-1	Cl	250	4,0
b-1	<sup>15</sup> N)NO <sub>3</sub>	220	4,5
b-2	Cl	240	4,2
b-3	Br	250	4,8
a-2	Br	205	4,9

Auf der Basis der aus den VWZV errechneten Tracerverlagerungen, die sowohl in den verschiedenen Versuchsebenen als auch zwischen den Lysimetertypen a und b gut übereinstimmen, konnte die bekannte Gleichung zur Abschätzung des kapillaren Wasserflusses im Freiland

$$\text{Verlagerungsstrecke} = \text{Sickerwassermenge} / \text{Feldkapazität}$$

auch für Lysimeterbedingungen bestätigt werden. Der so erzielte Grad der Widerspiegelung bodenhydrologischer Zustände von Freilandparzellen (hier experimentell ermittelte Feldkapazität von 24 Vol.%) in Lysimetern konnte, durch zahlreiche zeitgleich realisierte Tracerversuche im Freiland gestützt, ausreichend belegt werden. Er bildet zugleich eine Grundlage dafür, dass die Lysimeter des Typs a für die gegenwärtig in Bearbeitung befindlichen Fragestellungen zur Skalierung nach wie vor geeignet sind (J. SEEGER et al., 1999).

### 9.3.2.2. Vergleich von Bewirtschaftungsszenarien

Im Gegensatz zu großen Flussgebieten, bei denen sich die Ursache-Wirkung-Beziehungen komplex überlagern und sich der erforderliche Detailliertheitsgrad bei den Untersuchungen nicht erzielen lässt, sind Kleineinzugsgebiete (< 50 km<sup>2</sup>) gut geeignet, um Prozessabläufe aufzuklären. Ergänzende experimentelle Arbeiten zur Ermittlung der Wirkung von Änderungen der Landnutzung auf den Wasser- und Stofftransport sowie der während der Bodenpassage ablaufenden Transformationsprozesse werden mit Hilfe von Lysimetern durchgeführt. Im Rahmen von Skalierungsarbeiten stellen die Lysimeterexperimente in Falkenberg und z. T. in Colbitz eine unmittelbare Bezugsgröße zu der in einem Referenzgebiet – „Schaugraben“ (Flächengröße ca. 2500 ha bei pedologisch und hydrologisch vergleichbaren Bedingungen) – angetroffenen Landnutzung dar (R. MEISSNER et al., 1999). Sie ermöglichen die Simulation typischer Landnutzungsszenarien und liefern in relativ kurzer Zeit Informationen über die Auswirkung von Änderungen der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt.

#### Fallbeispiel 1 – landwirtschaftliche Nutzung (Lysimeter des Typs a)

In Anlehnung an die Praxis wurden vor der politischen Wende intensiv bewirtschaftete Lysimeter 1991 für verschiedene Zeiträume stillgelegt und anschließend wieder in die Intensivnutzung integriert (Fig. 9.1). Eine Zusammenstellung von Ergebnissen über

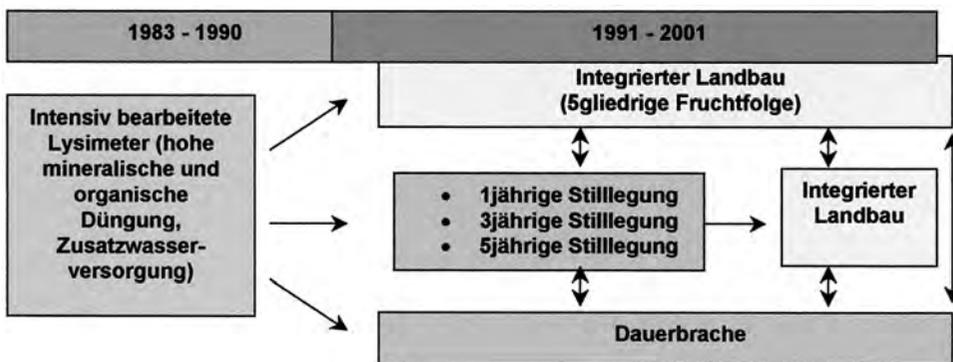


Fig. 9.1: Schematische Darstellung eines Lysimeterexperimentes zur Prüfung des Einflusses von Landnutzungsänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt.  
Schematic representation of a lysimeter trial for testing the influence of land use changes on water and solute balances.

die Wirkung von Stilllegungen mit unterschiedlich langen Brachlegungszeiten auf die Sickerwasserbildung und das N-Austragsverhalten (Relativangaben) im Vergleich zu intensiv bewirtschafteten ackerbaulich genutzten Lysimetern des „Integrierten Landbaus“ (als Bezugsbasis genutzt und als 100 %-Variante gesetzt) wurde in Fig. 9.2 vorgenommen. Dabei wurde festgestellt, dass sowohl im Jahr der Stilllegung als auch bei Wiedereingliederung bei den ein- und fünfjährig stillgelegten Lysimetern ein erhöhter Sickerwasseranfall zu verzeichnen war (R. MEISSNER et al., 1995, 1998, M. A. SHEPHERD & J. WEBB, 1996, M. A. SHEPHERD & E. I. LORD, 1996). Der erhöhte Sickerwasseranfall war bei den einjährigen Stilllegungen mit N-Mehrausträgen von 52 bzw. 30 % verbunden. Innerhalb von fünf Stilllegungsjahren konnte die N-Auswaschung insgesamt nur um 25 % gesenkt werden (J. SEEGER et al., 1999, R. MEISSNER et al., 2001). Der N-Austrag

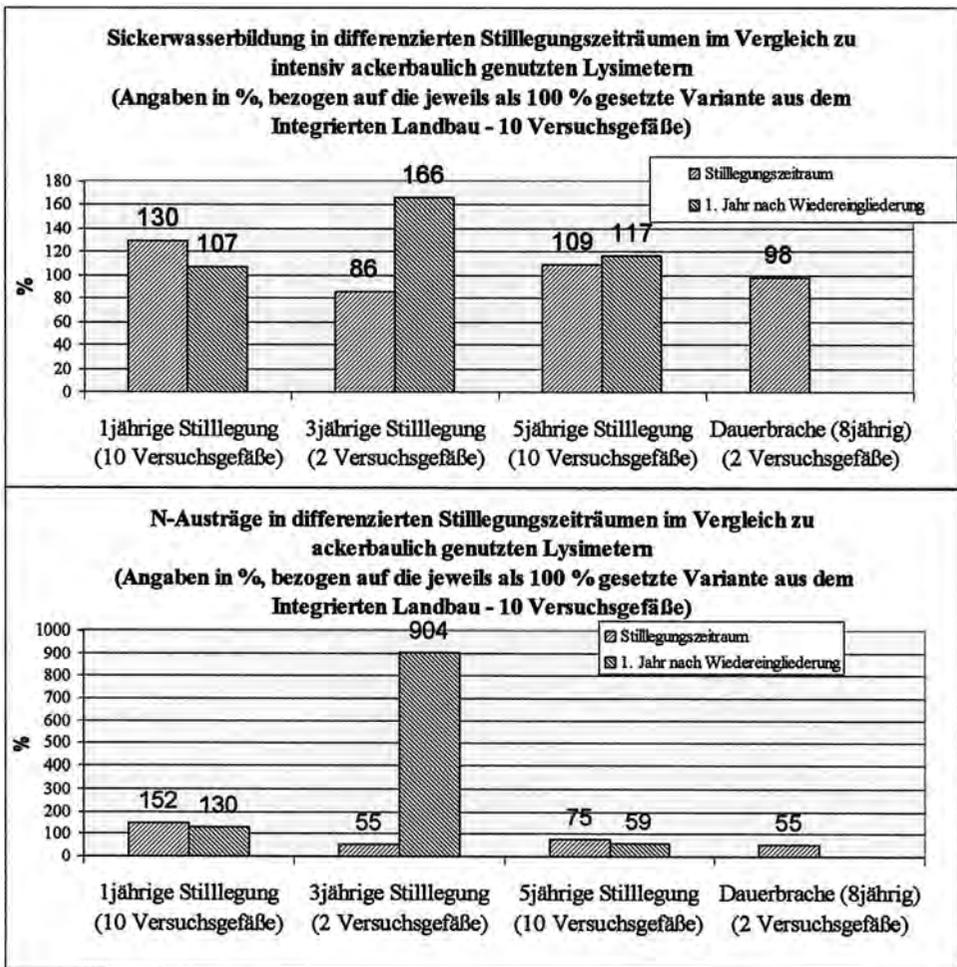


Fig. 9.2: Wirkung differenzierter Stilllegungszeiträume auf die Sickerwasserbildung und das N-Austragsverhalten im Vergleich zu intensiv ackerbaulich genutzten Lysimetern (Versuchszeitraum 1991 bis 2000).

Effects of different set aside periods on seepage and N-leaching in comparison with intensively used lysimeters (for a period of 1991 to 2000).

im Jahr der Wiedereingliederung nach dreijähriger Stilllegung erwies sich als außerordentlich hoch.

### Fallbeispiel 2 – aufwachsender Kiefernbestand (Großlysimeter des Typs h)

Im Rahmen der Ermittlung von Kenndaten über den Wasser- und Stoffhaushalt eines aufwachsenden Kiefernbestandes wurde in Fig. 9.3 eine Zusammenstellung der seit 1974 durchgeführten Messungen über Bestandes- und Freilandniederschläge sowie der dazugehörigen Sickerwasserbildung im Großlysimeter in Colbitz vorgenommen. Mit zunehmendem Bestandesalter verringerte sich die Höhe der Grundwasserneubildung. Die aufgrund der Abhängigkeit vom Bestandesalter deutlich ansteigende Transpiration führte dazu, dass eine Sickerwasserbildung nach 18 Jahren bis auf Jahre mit hohem Niederschlagsdargebot im Vergleich zum langjährigen Mittel (1993/94 und 1998/99) fast voll-

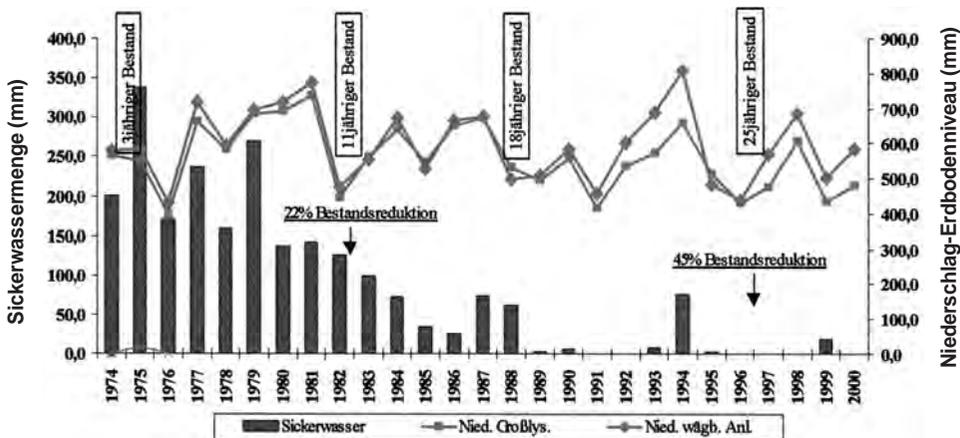


Fig. 9.3: Gegenüberstellung von Niederschlag und Sickerwasserbildung am Großlysimeter in Colbitz. Comparison of precipitation and seepage water amount at the big forrest lysimeter Colbitz.

ständig zum Erliegen kam. Diese Ergebnisse decken sich mit Lysimeteruntersuchungen von J. MÜLLER (1996), die im Raum Eberswalde (Brandenburg) durchgeführt wurden. Traten bis 1987/88 keine nennenswerten Unterschiede der Niederschlagsmengen zwischen Bestandes- und Freilandniederschlag auf, so verminderte sich danach der Bestandesniederschlag in Folge der zunehmenden Kronenüberdeckung und steigender Interzeptionsverdunstung im Kronenraum im Vergleich zum Freilandniederschlag um ca. 15 %.

#### 9.3.2.3. Ermittlung der realen Evapotranspiration

Die Bestimmung der realen Evapotranspiration bietet eine weitere Möglichkeit zur Bewertung von verschiedenen Lysimetertypen (a sowie e und g). Da auf der Lysimeterstation in Falkenberg in früheren Jahren ausschließlich nicht wägbare Lysimeter (Typ a) zum Einsatz kamen, wurde die reale Evapotranspiration summarisch über mehrjährige Zeitreihen nach folgender Gleichung bestimmt:

$$E_{ta} = P_o - SW,$$

wobei

$E_{ta}$  die reale Evapotranspiration (in mm),

$P_o$  die Niederschlagsmenge auf Erdbodenniveau (in mm) und

$SW$  die Sickerwassermenge (in mm) ist.

Hierfür wurden die als Grünland genutzten Lysimeter (Normalnutzung, ohne Beregnung) als Basisvariante verwendet (Tab. 9.6). Durch dieses praktikable Verfahren lässt sich aus der korrigierten Niederschlagsmenge von 583 mm (Korrekturfaktor 9 %) und einer mittleren Sickerwassermenge von 87 mm eine Größenordnung für die mittlere reale Evapotranspiration von 496 mm bestimmen. Der Vergleich mit der Grasreferenzverdunstung  $E_{to}$  (die von der FAO als Standardgröße empfohlen wurde und aus Daten 6-jähriger meteorologischer Messungen direkt auf der Lysimeterstation ermittelt wurde) in Höhe von 490 mm zeigt eine sehr gute Übereinstimmung und belegt die Zuverlässigkeit der mit diesem Lysimetertyp durchgeführten Messungen (U. WENDLING, 2001).

Trotz des guten Resultates genügen die ermittelten langjährigen Jahresmittelwerte der realen Evapotranspiration in ihrer zeitlichen Auflösung nicht den Anforderungen zur Bearbeitung neuer spezieller Aufgabenstellungen. Um Fragen, wie Grundwasserneubildung und Auswaschungsverhalten von Nähr- und Schadstoffen aus Kippböden, von denen es zur Zeit kaum belastbare Daten gibt, zu beantworten oder auch Probleme, wie Bilanzierung des Bodenwasserhaushaltes in Auen, die zur Zeit messtechnisch nicht erfassbar sind, zu lösen, wurden die Lysimetertypen e und g entwickelt. Deren Kernstück ist eine digitale Wägezelle. Mit Hilfe dieses neuen Verfahrens ist es möglich, Bodensäulen mit 2 m<sup>3</sup> Rauminhalt mit einer Genauigkeit von 30 g zu wiegen und somit die reale Evapotranspiration mit einer hohen zeitlichen Auflösung zu bestimmen (R. MEISSNER et al., 2000). Das in Fig. 9.4 exemplarisch für einen Zeitraum im April 2000 dargestellte Ergebnis der Wägung eines Lysimetergefäßes zeigt hoch aufgelöst eine Amplitude der täglichen Gewichtsänderung in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen. Die Grafik verdeutlicht die Möglichkeit, durch den Einsatz der innovativen Wägetechnik selbst eine geringe Gewichtszunahme durch die Taubildung in den Morgenstunden (zwischen 4.00 und 6.00 Uhr) messtechnisch zu erfassen.

Tab. 9.6: Darstellung einer langjährigen Messreihe zum Niederschlagsdargebot und daraus resultierender Sickerwassermenge unter Grünlandlysimetern am Standort Falkenberg.  
Representation of a long term precipitation measuring series and the resulting seepage water amount on lysimeters used as grassland at the site Falkenberg.

Lysimeterjahr	Niederschlag in 1 m Höhe [mm]	Lysimeter – Sickerwasser [mm]
1986/87	546	123,8
1987/88	595	145,4
1988/89	383	0,2
1989/90	404	21,1
1990/91	482	48,2
1991/92	532	87,8
1992/93	486	57,6
1993/94	851	260,4
1994/95	680	152,0
1995/96	344	2,8
1996/97	475	34,6
1997/98	550	42,3
1998/99	635	220,9
1999/00	533	21,7
Mittel	535	87,0

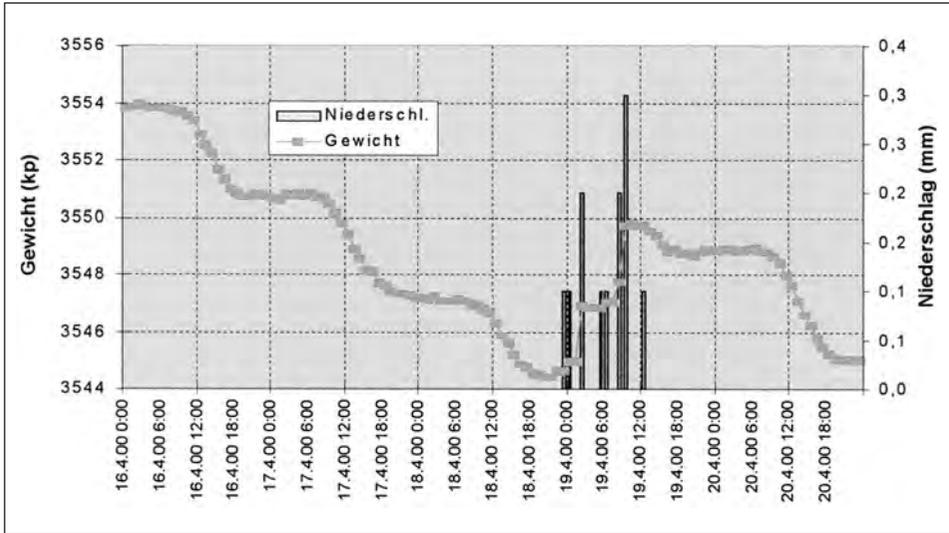


Fig. 9.4: Zeitlicher Verlauf der Gewichtsänderung eines Lysimeters in Abhängigkeit vom Niederschlag. Example of the diurnal change of the lysimeter weight in dependence on precipitation.

### 9.3.3. Vergleich der Lysimetertypen

Basierend auf den bei den Verfassern vorliegenden Erfahrungen sowie den zuvor dargestellten Ergebnissen ist in Tab. 9.7 der Versuch einer zusammenfassenden Bewertung der hier analysierten Lysimetertypen vorgenommen worden. Diese Zusammenstellung der Vorteile und Grenzen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Deshalb wurde bewusst auf ein Ranking der einzelnen Lysimetertypen verzichtet. Ein „Ideallysimeter“ gibt es nicht. Konstruktion und Einsatz hängen maßgeblich von der zu lösenden Fragestellung ab.

Tab. 9.7: Gegenüberstellung von Vorteilen und Grenzen beim Einsatz unterschiedlicher Lysimetertypen. (Fortsetzung S. 176.)

Comparison of the advantages and limits of different lysimeter types. (Continuation p. 176.)

Lysimeter-typ	Vorteile	Grenzen
a	<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Anzahl an Versuchsgefäßen – Vergleich von unterschiedlichen Bewirtschaftungsintensitäten und Bodenarten</li> <li>durch Hauptbodenart IS und Tiefe direkte Zuordnung von Ursache und Wirkung einer Bewirtschaftungsmaßnahme</li> <li>geringe Wartungs- und Instandhaltungskosten</li> <li>hohe Datensicherheit</li> <li>wertvolle Ergebnisse aus etablierten Dauerversuchen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einschränkung durch Material (nicht alle Kriterien erfassbar, z. B. Schwermetalle)</li> <li>Einschränkung durch geringe Tiefe (Wasserhaushaltsbetrachtungen)</li> <li>beträchtlicher Pflegeaufwand durch hohe Anzahl an Versuchsgefäßen</li> <li>keine Transparenz in den Lysimetern – „black box“</li> </ul>

Lysimeter- typ	Vorteile	Grenzen
b	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ermittlung des Weg-Zeit-Verhaltens ausgewählter Kriterien ohne Automatisierung</li> <li>• geringe Wartungs- und Instandhaltungskosten</li> <li>• geringer Pflegeaufwand</li> <li>• wertvolle Ergebnisse aus etablierten Dauerversuchen</li> <li>• leichte Neubefüllung der Gefäße</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einschränkung durch Material (nicht alle Kriterien erfassbar, z. B. Schwermetalle)</li> <li>• geringe Gefäßoberfläche (keine landwirtschaftlichen Versuche möglich)</li> </ul>
c	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Transparenz in den Lysimetern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis</li> </ul>
d	<ul style="list-style-type: none"> <li>• inertes Wandmaterial</li> <li>• Einsatz von säurefestem Sondenmaterial</li> <li>• über die Wasserscheide hinaus reichende Lysimetertiefe</li> <li>• hohe Transparenz durch Messungen in verschiedenen Tiefen</li> <li>• moderate Fertigungskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durch nicht monolithische Füllung initiierte Umsetzungsprozesse innerhalb der Bodensäule</li> <li>• längere Einlaufzeit</li> <li>• geringere Genauigkeit der Tensionsmessung durch FDR-Sonden</li> </ul>
e	<ul style="list-style-type: none"> <li>• genaue Bestimmung des Wasserhaushaltes</li> <li>• inertes Wandmaterial</li> <li>• Einsatz von säurefestem Sondenmaterial</li> <li>• über die Wasserscheide hinaus reichende Lysimetertiefe</li> <li>• hohe Transparenz durch Messungen in verschiedenen Tiefen</li> <li>• moderate Fertigungskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• anfänglich hohe Störanfälligkeit der Wägetechnik</li> <li>• hoher Wartungs- und Instandhaltungsaufwand</li> <li>• längere Einlaufzeit</li> </ul>
f	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anwendung neuer Messmethodik</li> <li>• inertes Wandmaterial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Anfall verunreinigten Abwassers</li> </ul>
g	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation von in situ Verhältnissen</li> <li>• genaue Bestimmung des Wasserhaushaltes</li> <li>• inertes Wandmaterial</li> <li>• über die Wasserscheide hinaus reichende Lysimetertiefe</li> <li>• hohe Transparenz durch Messungen in verschiedenen Tiefen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• anfänglich hohe Störanfälligkeit der Wägetechnik</li> <li>• hoher Wartungs- und Instandhaltungsaufwand</li> </ul>
h	<ul style="list-style-type: none"> <li>• langjährige kontinuierliche Versuchsführung</li> <li>• geringe Wartungs- und Instandhaltungskosten</li> <li>• geringer Pflegeaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Baukosten</li> <li>• Aufgabenstellung begrenzt (geringere Chance für Drittmittel-einwerbung)</li> <li>• geringe Transparenz im Lysimeterkörper</li> </ul>
i	<ul style="list-style-type: none"> <li>• genaue Bestimmung des Wasserhaushaltes</li> <li>• geringer Pflegeaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einschränkung durch Material (nicht alle Kriterien erfassbar, z. B. Schwermetalle)</li> <li>• hohe Störanfälligkeit der elektronischen Bauelemente</li> <li>• geringe Transparenz in den Lysimetern</li> </ul>

## 9.4. Schlussfolgerungen

- Bereits langjährig in Betrieb befindliche Lysimeterarten sind geeignet, verschiedene Landnutzungssysteme hinsichtlich Quantität und Qualität der Zuflüsse zum Grundwasser zu vergleichen, um daraus Kenndaten für Stoffbilanzierungen ableiten zu können.
- Lysimeteruntersuchungen sind eine wesentliche Grundlage zur Abschätzung der Auswirkungen von Landnutzungen und Landnutzungsänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in Kleinzugsgebieten und zur Validierung von Modellen.
- Innovative Messtechniken erlauben eine zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Messung von Bodenwasserhaushaltsparametern und sind daher von großer Bedeutung für die Erarbeitung neuer bzw. für die Validierung von bestehenden Bodenwasserhaushaltsmodellen.
- Das Einsatzspektrum der Lysimetermethode war durch die Verwendung von inerten Materialien, die den Bau von hermetisch abgedichteten Lysimetermodulen in Containerbauweise erlauben, wesentlich erweiterbar und kostengünstiger.
- Im Interesse der weiteren Etablierung von Lysimetern als Standardmethode der Sickerwasserforschung sollte an weiteren innovativen Lösungen zur Reduktion der Investitionskosten sowie der Störanfälligkeit der Messtechnik gearbeitet werden.

## 9.5. Zusammenfassung

Bereits seit Jahren werden Lysimeter zur Erfassung und Bewertung von sickerwassergebundenen Stoffverlagerungen eingesetzt. Durch Integration alter und neuer Lysimetertechnik wird auf der Lysimeterstation des UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH in Falkenberg und auf den Stationen in Colbitz vor allem der Einfluss differenzierter Landnutzungen (Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Heidelandschaft, Kippenrekultivierung) auf den Stoffaustrag untersucht. Die vorgestellten Einsatzgebiete der unterschiedlichen Lysimeterarten werden sowohl durch die politischen Rahmenbedingungen als auch den jeweiligen Entwicklungsstand von Wissenschaft und Technik bestimmt. Ein Vergleich von Ergebnissen auf der Grundlage von Tracerversuchen, der Kenndatenermittlung aus unterschiedlichen Bewirtschaftungsszenarien (land- und forstwirtschaftlich betriebene Versuchsgefäße) und der Bestimmung der realen Evapotranspiration dient gemeinsam mit langjährigen Erfahrungen als Basis für eine abschließende Bewertung von Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von unterschiedlichen Lysimeterarten.

## 10. Untersuchungen an den Intensiv-Lysimetern der GSF-Anlage Neuherberg (D. KLOTZ, H. GAUDLITZ, G. HINREINER)

### 10.1. Einleitung

Böden sind sowohl groß- als auch kleinskalig inhomogen aufgebaut:

- Im Makrobereich sind die den Boden bildenden Horizonte verschieden mächtig ausgebildet, die Mächtigkeit eines Horizontes ist nicht konstant. Dazu weisen die Lockersedimente eines Horizontes Schwankungen in der Körnung, in der Lagerung und damit im Feuchtegehalt auf. Die Folge sind unterschiedliche Sicker-

wassergeschwindigkeiten und damit unterschiedliche Grundwasserneubildungsraten.

- Durch den natürlichen Ablagerungsvorgang der Sedimente entstehen kleinskalige Inhomogenitäten, die sich durch verschiedene bodenphysikalische Kenngrößen auszeichnen. Im Mikrobereich ändert sich auch insbesondere in den oberen Bodenhorizonten durch die Bodenbearbeitung, durch die Durchwurzelung, durch Kleintieraktivitäten und durch den Gefrier-/Auftauvorgang laufend die Lagerung und das Gefüge, es entstehen Kurzschlüsse. Die Folge der kleinskaligen Inhomogenitäten und der Kurzschlüsse können unter gewissen hydraulischen Randbedingungen und bei Starkregen Bypassflüsse mit Sickerwassergeschwindigkeiten im m/d-Bereich sein (K.-P. SEILER, 1994, K.-P. SEILER et al., 2000).

Der Einfluss der Inhomogenitäten im Makrobereich kann an mehreren Lysimetern eines Bodentyps untersucht werden. So zeigen die je fünf Lysimeter dreier monolithisch entnommener Schluff- und Sandböden und die eines händisch eingebauten Kiesbodens der GSF-Anlage Neuherberg bei gleichen Bedingungen des Inputs und der Landwirtschaft Unterschiede in den Sickerwasserraten (D. KLOTZ & K.-P. SEILER, 2000) sowie im Stoff- und Partikelaustrag (D. KLOTZ, 2001b).

Über den Einfluss der Inhomogenitäten im Mikrobereich

- auf die Feuchte-Wasserpotenzial-Beziehung in verschiedenen Querschnitten eines Lysimeters und
- auf die Verteilung der Grundwasserneubildungsrate über die Auslauffläche eines Lysimeters

wird im Folgenden berichtet.

## 10.2. Lysimeter der GSF-Anlage Neuherberg

Die Lysimeter der GSF-Anlage Neuherberg bestehen aus den eigentlichen Lysimetergefäßen, die im Auslauf mit Filterböden versehen sind. Jedes Lysimeter wird durch drei Haltearme, die in der Decke des Lysimetergebäudes befestigt sind, getragen, so dass sie ebenerdig bündig sind. Aus den Lysimetern laufendes Sickerwasser wird in Auslaufbehältern, die tiefer als die Filterböden angeordnet sind, gesammelt und registriert (D. KLOTZ, 1998).

Die **Lysimetergefäße** der GSF-Anlage Neuherberg sind kreiszylindrische Säulen mit folgenden Abmessungen (Fig. 10.1):

Innendurchmesser: 1128 mm,  
Wandstärke: 8,0 mm,  
Länge: 2050 mm.

Als Material wird Edelstahl („V4A“) verwendet. Alle Schweißnähte sind mit Flusssäure gebeizt.

In vier Ebenen in Tiefen von 50 cm, 80 cm, 150 cm und 190 cm ab Geländeoberkante (GOK) sind die Lysimetersäulen mit vier (Ebene 190 cm ab GOK) bzw. 12 Bohrungen von 50 mm Durchmesser zum Einbau von Messsonden versehen. Bei der Befüllung sind die Bohrungen mit kreisförmigen Verschlüssen verflanscht.

Bis 30 cm Tiefe („gestörter Pflughorizont“) geschieht der **Einbau der Messsonden** von der Bodenoberfläche aus, ab 50 cm können die Messsonden in die vorhandenen Bohrungen eingebaut werden. Neben Tensiometern mit integrierten Temperaturfühlern

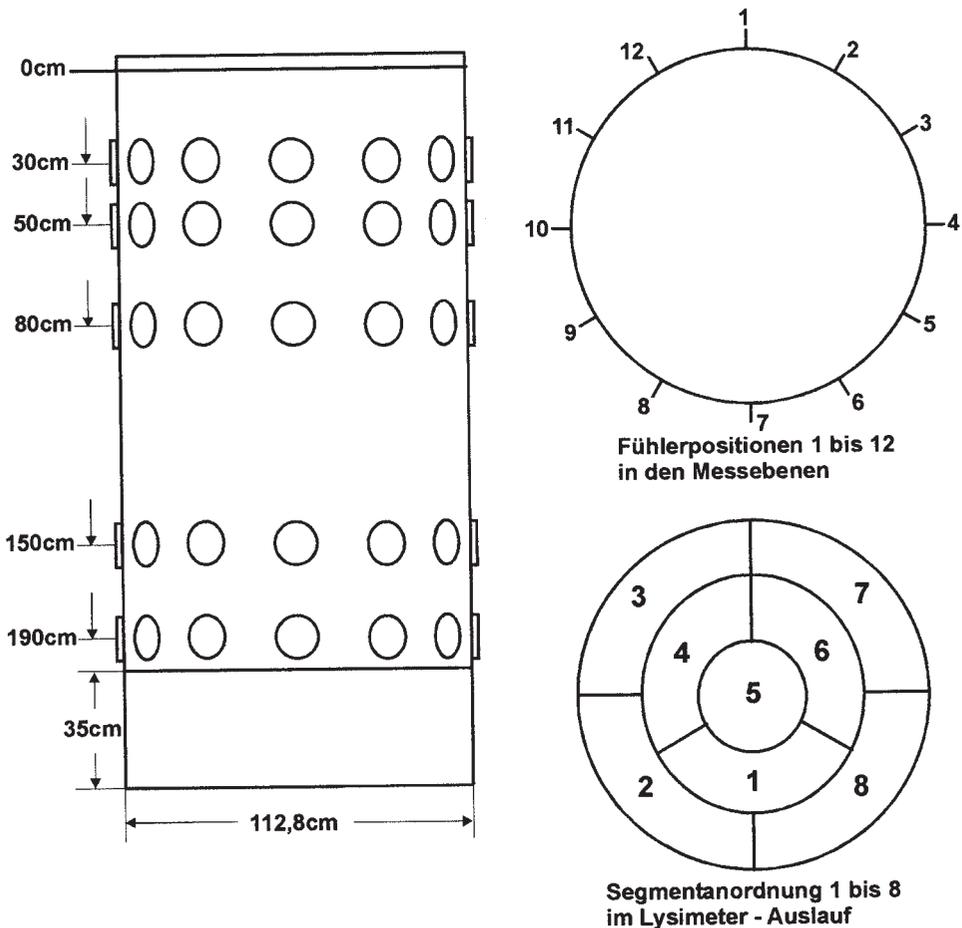


Fig. 10.1: Ansicht eines Intensiv-Lysimeters mit Filterboden (links), Draufsicht auf den achtfach unterteilten Filterboden des Intensiv-Lysimeters (rechts unten) und Positionierungsorte der Messsonden und Saugkerzen in den vier Ebenen 50 cm bis 190 cm (rechts oben).  
View of an intensive lysimeter with filter bed (left), top view at the filter bed of the intensive lysimeter, with its eight-fold division being clearly visible (bottom right) as well as the locations of the measuring heads and the suction lines at the five levels between 30 cm and 190 cm (top right).

und TDR-Sonden sind Saugkerzen zur Bodenwasserentnahme eingesetzt. In monolithisch entnommene, feinkörnige Lysimeter geschieht der seitliche Einbau der Messsonden und Saugkerzen in erbohrte, kreiszylindrische Hohlräume, für die handgeschütteten Kies-Lysimeter erfolgt der Einbau der Messsonden in verflanschten Führungsrohren vor dem Einbau des Bodensediment-Systems. Die eingebauten Messsonden sind schräg nach unten, ca. 25° gegenüber der Horizontalen geneigt, der Abstand der Messsondenmitte zur Lysimeterwand beträgt ca. 260 mm. Im Allgemeinen sind in jeder Ebene der Lysimeter je ein Tensiometer, eine TDR-Sonde und eine Saugkerze (außer 190 cm ab GOK) eingebaut (Fig. 10.1). Die Filterböden der Lysimeter bestehen aus Edelstahl, sie haben folgende Abmessungen:

Innendurchmesser: 1204 mm,  
Wanddicke: 8,0 mm,  
Bodenblechstärke: 10,0 mm,  
Mächtigkeit: 350 mm.

In die Filterböden ist das Bodenblech zum Auslauf hin mit einem Gefälle von 5 % eingeschweißt. Im Allgemeinen sind die Filterböden nicht unterteilt, sie sind mit einem Volumenfilter, bestehend aus einer dreifach abgestuften Quarzsediment-Schüttung und einem Kunststoffvlies, befüllt.

Die vier Lysimeter der GSF-Anlage („**Intensiv-Lysimeter**“)

Nr. 9 (Standort Scheyern): pseudovergleite Braunerde/Schluffe,  
Nr. 14 (Standort Hohenwart): Kolluvium über Braunerde/kiesige Sande,  
Nr. 18 (Standort Feldkirchen): Rendzina/Kiese,  
Nr. 24 (Standort Hohenwart): Braunerde/Sande

sind mit einem achtfach geteilten Filterboden (Fig. 10.1) von gleicher Flächengröße (12,5 dm<sup>2</sup>) zur Registrierung von Bypassflüssen ausgestattet, in die Ebenen 50 cm, 80 cm und 150 cm unter GOK der Lysimeter Nr. 9, 14 und 24 sind mehrere Tensiometer und mehrere TDR-Sonden zur Registrierung der Saugspannung und des Wassergehaltes eingebaut.

### 10.3. Registrierung der Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung in den Messsondenebenen

Zur Bestimmung der Sickerwassergeschwindigkeit und zur Beschreibung des Wasserhaushaltes ist für die einzelnen Horizonte des Bodens die Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung Voraussetzung (F. KASTANEK, 1995). Sie kann in den Sedimenten der Bodenhorizonte indirekt in kleinskaligen Laborsäulen mit großer Genauigkeit oder direkt in den Böden/Lysimetern durch Messungen mit TDR-Sonden (Wassergehalt) und Tensiometern (Saugspannung) bestimmt werden.

In Fig. 10.2 sind für einen Kies (eingebaut im Lysimeter Nr. 18) die Ergebnisse der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung nach Labor- und Lysimeteruntersuchungen (in vier Messtiefen) dargestellt. Beide Untersuchungen liefern im Allgemeinen verschiedene Ergebnisse, da sie nicht unter den gleichen Randbedingungen erfolgen (D. KLOTZ et al., 2001):

- In der Laborsäule (Volumen: ca 1,5 dm<sup>3</sup>) ist im Gegensatz zu dem Lysimeter (Volumen: 2 m<sup>3</sup>) das Sediment homogener und dichter (für Lysimeter mit händischer Befüllung) eingebaut.
- In dem Lysimeter erfolgt die Wassergehalts- und die Saugspannungs-Bestimmung zwar in einer Tiefe, aber mit Sonden, die verschiedene Reichweiten aufweisen und einige Dezimeter voneinander entfernt eingebaut sind.
- Im Labor bleibt während des Messvorgangs die Lagerung bzw. das Gefüge (und die Durchlässigkeit) der Sedimente ungestört (konstant). Im Lysimeter ändern sich insbesondere in den oberflächennahen Schichten laufend die Lagerungsverhältnisse (durch Bodenbearbeitung, Durchwurzelung, Gefriervorgang, Trockenrisse) und die Durchlässigkeit (wegen dem Temperaturgang und der damit verbundenen Viskositätsänderung des Wassers).
- In den Laborsäulen erfolgt der Wasserfluss in breiter Front als Matrixfluss, im Lysimeter zu einem Großteil nach großen Niederschlagsereignissen in Kurzschlüssen als Bypassfluss, der im Allgemeinen nicht von beiden Sonden registriert wird.

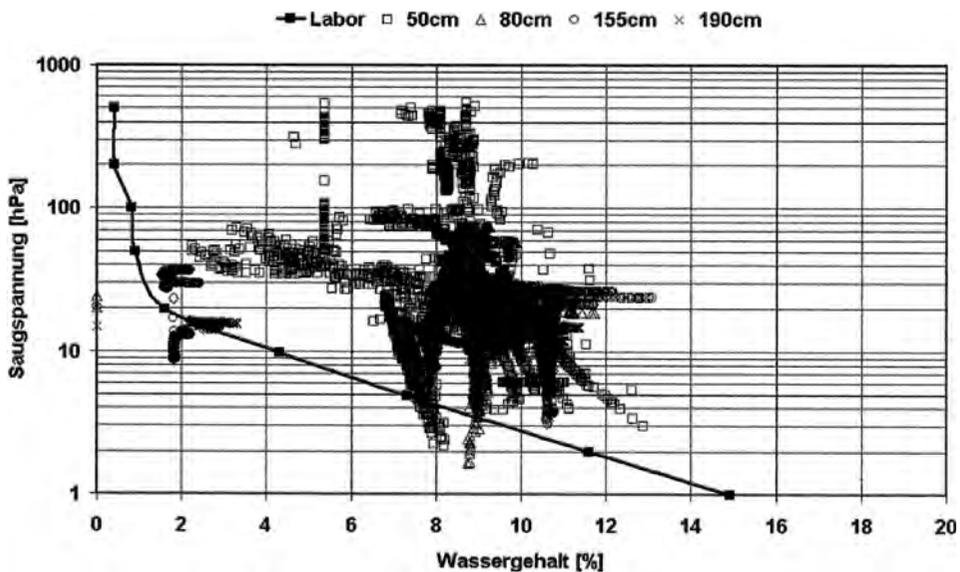


Fig. 10.2: Labor- (durchgezogene Kurve) und Lysimeterergebnisse (Messpunkte) der Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung für einen Kies (Lysimeter Nr. 18 für das Jahr 1999) in Messtiefen 50 cm bis 190 cm.

Laboratory results (uninterrupted line) and lysimeter results (measuring beads) of the water content/soil moisture tension relationship for one type of gravel (lysimeter No. 18, in 1999) at a depth of between 50 cm and 190 cm.

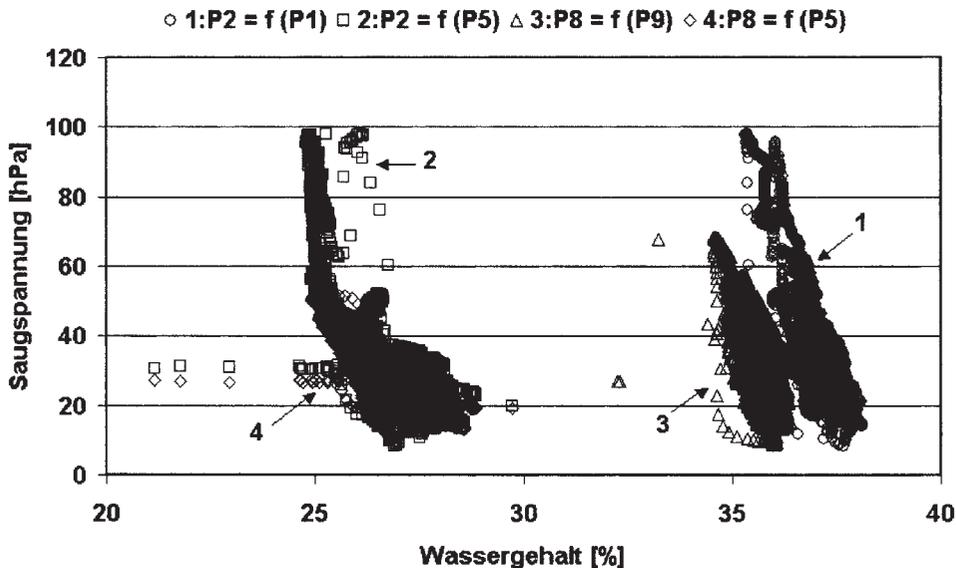


Fig. 10.3: Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung für einen Sand (Lysimeter Nr. 15, M-Horizont) für nahe (1 und 3) und ferne Positionierungen (2 und 4) der Sonden. Fühlerpositionen siehe Fig. 10.1. Water content/soil moisture tension relationship for one type of sand (lysimeter No. 15, M horizon) for close (1 and 3) and remote locations (2 and 4) of the measuring heads. Locations of measuring heads are shown in fig. 10.1.

- Im Labor wird die Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung ohne Beregnung bestimmt, auf das Lysimeter erfolgen diskontinuierlich Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Menge, die den Wassergehalt laufend verändern.

Die Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung ist sowohl von der Messtiefe in einem Sediment (Fig. 10.2) als auch vom Einbauabstand der Messsonden abhängig. In Fig. 10.3 sind für das Lysimeter Nr. 15, Messtiefe 50 cm die registrierten Ergebnisse an je zwei TDR-Sonden und Tensiometern gegeneinander dargestellt. Es zeigen sich unterschiedliche Ergebnisse, je nachdem ob die Sonden nah (1 und 3, Fig. 10.3) oder fern (2

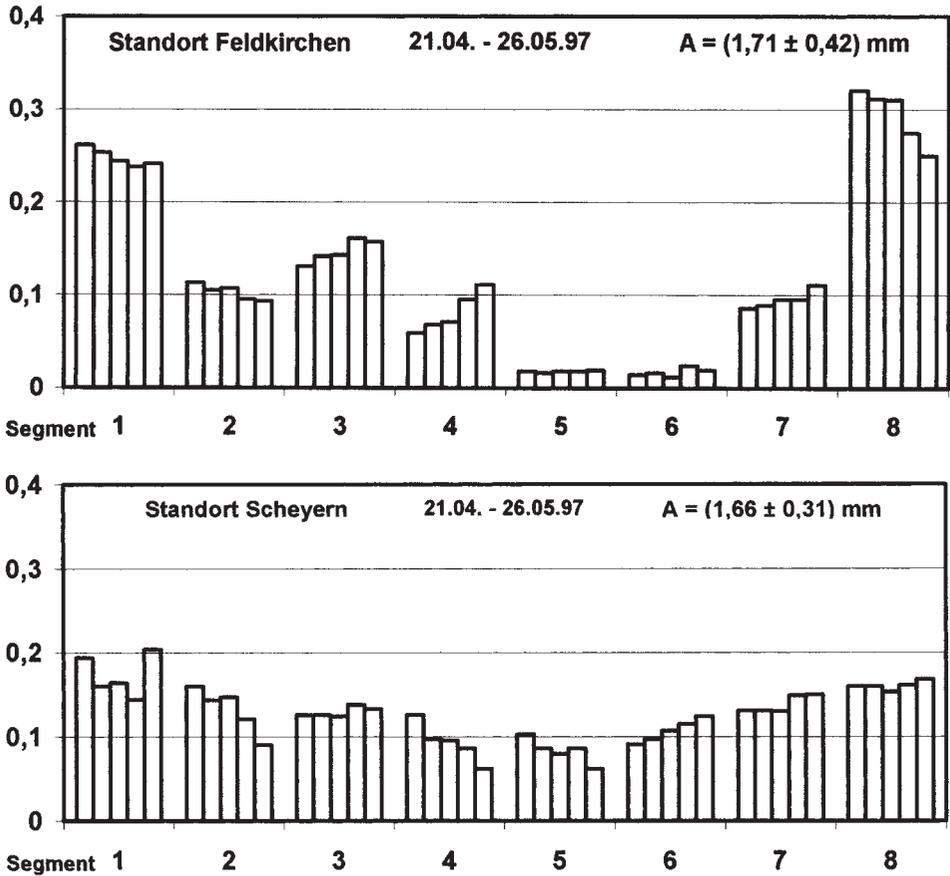


Fig. 10.4: Prozentuale Sickerwassermengen in den acht Auslaufsegmenten des Lysimeter Nr. 18 (oben) und Nr. 9 (unten) für reine Matrixflüsse ( $A$  = Grundwasserneubildung pro Woche) für den Zeitraum bis 28. 04. 1997 (1. Balken je Segment) und bis 26. 05. 1997 (5. Balken je Segment). Die Niederschlagshöhen betrugen für 07. 04. bis 21. 04. 1997: ( $9,5 \pm 3,6$ ) mm/Woche, für 21. 04. bis 26. 05. 1997: ( $6,1 \pm 2,8$ ) mm/Woche.

The percentages of the leakage water quantity from the eight outlet segments of lysimeter Nos. 18 (top) and 9 (bottom) for pure matrix flows ( $A$  = groundwater formation per week) for the period up to April 28<sup>th</sup>, 1997 (first bar per segment) and up to May 26<sup>th</sup>, 1997 (fifth bar per segment). The precipitation level amounted to ( $9.5 \pm 3.6$ ) mm/week for the period between April 7<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup>, 1997 and to ( $6.1 \pm 2.8$ ) mm/week for the period between April 21<sup>st</sup> and May 26<sup>th</sup>, 1997.

und 4, Fig. 10.3) voneinander positioniert (Fig. 10.1) sind. Ursachen dafür sind Inhomogenitäten (d. h. mögliche verschiedene Wassergehalte) im Sediment und der Einfluss von „punktförmig“ auftretenden Bypassflüssen in einer horizontalen Lysimeter-ebene.

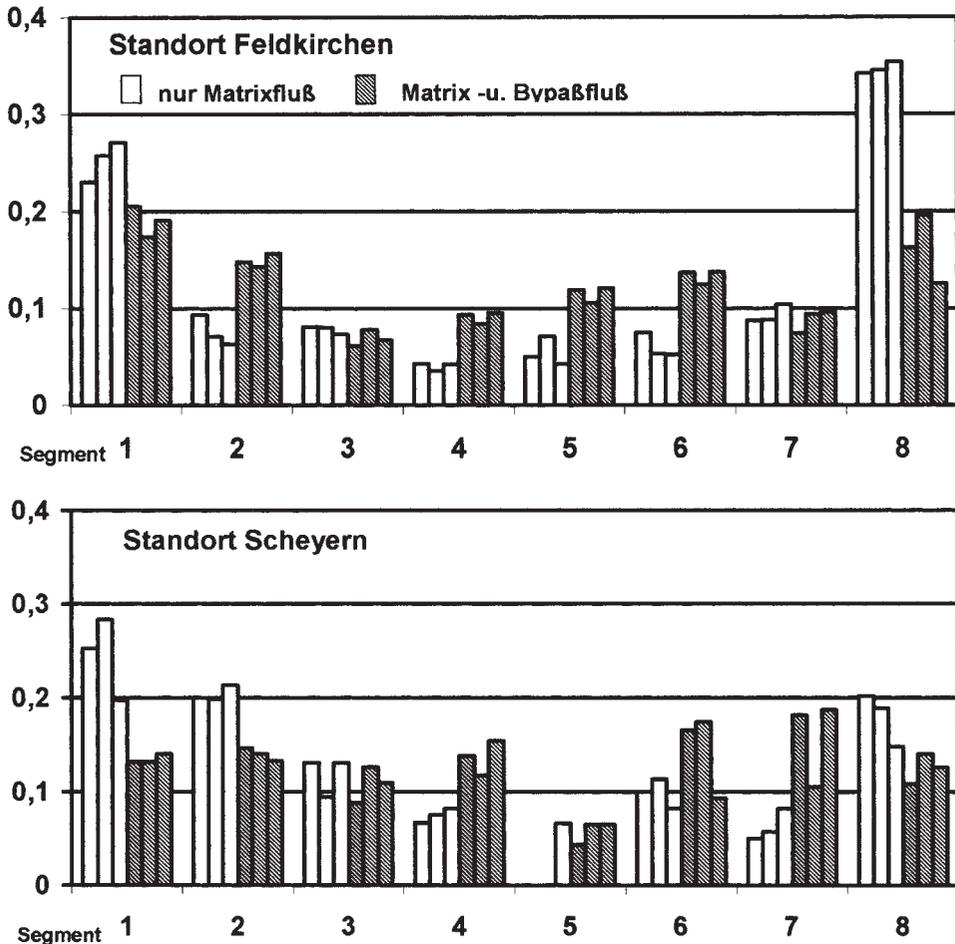


Fig. 10.5: Prozentuale Sickerwassermengen in den acht Auslaufsegmenten des Lysimeters Nr. 18 (oben) und Nr. 9 (unten) für reine Matrixflüsse M (Zeitraum I: 05. 10. bis 26. 10. 1998) und für Matrix-/Bypassflüsse A (Zeitraum II: 26. 10. bis 16. 11. 1998). Für I gilt:  $N = (19,0 \pm 2,8)$  mm/Woche,  $M$  (Nr. 18) =  $(1,2 \pm 0,3)$  mm/Woche,  $M$  (Nr. 9) =  $(0,7 \pm 0,2)$  mm/Woche. Für II gilt:  $N = (59,7 \pm 31,2)$  mm/Woche,  $M$  (Nr. 18) =  $(30,1 \pm 6,6)$  mm/Woche,  $M$  (Nr. 9) =  $(33,2 \pm 14,2)$  mm/Woche.  $N$  = Niederschlagsmenge.

The percentages of the leakage water quantity from the eight outlet segments of lysimeter Nos. 18 (top) and 9 (bottom) for pure matrix flows M (period I: October 5<sup>th</sup> to 26<sup>th</sup>, 1998) and for matrix/bypass-flows A (period II: October 26<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup>, 1998). Values applying to I:  $N = (19.0 \pm 2.8)$  mm/week,  $M$  (No. 18) =  $(1.2 \pm 0.3)$  mm/week,  $M$  (No. 9) =  $(0.7 \pm 0.2)$  mm/week. Values applying to II:  $N = (59.7 \pm 31.2)$  mm/week,  $M$  (No. 18) =  $(30.1 \pm 6.6)$  mm/week,  $M$  (No. 9) =  $(33.2 \pm 14.2)$  mm/week.  $N$  = volume of precipitation.

## 10.4. Untersuchungen zu den Bypassflüssen

Die in den acht Auslaufsegmenten der Intensiv-Lysimeter registrierten Sickerwassermengen sollten bei homogener Lagerung der Sedimente und ohne Kurzschlüsse gleich, d. h. 12,5 % der Gesamtmenge sein. Aber sowohl die in den Segmenten des Lysimeters Nr. 18 mit händischer Füllung als auch in den der Lysimeter Nr. 9, 14 und 24 mit monolithischer Füllung registrierten Sickerwassermengen sind untereinander sehr verschieden (D. KLOTZ, 2001a), aber im Allgemeinen für geringe Niederschlagsmengen (< 10 mm/Woche) näherungsweise prozentual konstant (Fig. 10.4).

Weist das Lysimeter einen bestimmten (bodenspezifischen) Wassergehalt auf und treten „Starkregenereignisse“ (Niederschlagshöhen > 10 mm/Woche) auf, so ändern sich die in den Segmenten registrierten prozentualen Sickerwassermengen (Fig. 10.5). Eine Zunahme der prozentualen Sickerwassermenge in einem oder mehreren Auslaufsegmenten bedeutet ein Auftreten von zusätzlichen Bypassflüssen:

- Für das Intensiv-Lysimeter Nr. 18 (Standort Feldkirchen) treten in den Segmenten 2, 4, 5 und 6 zusätzlich zu den Matrixflüssen Bypassflüsse auf,
- für das Intensiv-Lysimeter Nr. 9 (Standort Scheyern) in den Segmenten 4, 6 und 7.

Die „Bypassfluss-Segmente“ können sich insbesondere in den Sommerhalbjahren nach Trockenperioden und zu Beginn des Winterhalbjahres (Wurzelverrottung) ändern.

Der Anteil der Bypassflüsse an der Grundwasserneubildung kann aus diesen Untersuchungen abgeschätzt werden. Er ist abhängig von der Jahreszeit, der Niederschlagsmenge und der angebauten Frucht (D. KLOTZ, 2001a). Der Anteil der Bypassflüsse an der Grundwasserneubildung liegt für die Jahre 1996 bis 2000 zwischen ca. 20 % (grobkörniger Boden: Lysimeter Nr. 18) und ca. 30 % (feinkörniger Boden: Lysimeter Nr. 9).

## 10.5. Zusammenfassung

Bei der Untersuchung des Wasserhaushaltes und der Schadstoffmigration in Lysimetern ist die Kenntnis der hydraulischen Parameter (Wassergehalt, Saugspannung) und der Art des Sickerwasserflusses (Matrix-, Bypassfluss) notwendig. Die Werte des Wassergehaltes und der Saugspannung müssen über die Lysimetertiefe in unmittelbarer Nähe bestimmt werden. Eine Trennung von Bypass- und Matrixflüssen kann durch eine Segmentierung des Lysimeterauslaufes erfolgen.

# 11. Altlastenlysimeter Seibersdorf – Lysimetereinsatz zur Gefährdungsabschätzung von Altlasten

(A. KRENN, J. RIESING, M. H. GERZABEK)

## 11.1. Einleitung

Alternative Sanierungs/Sicherungsverfahren werden neben der konventionellen Methode des Ausräumens und Verlagerns von Altlasten in eine Deponie immer wichtiger. Die nachhaltige Wirksamkeit dieser on site oder in situ Verfahren ist dabei zu prüfen und zu dokumentieren. So ist in Katzelsdorf seit 1992 eine Lysimeteranlage (G. RIEHL-HERWIRSCH et al., 1996) in Betrieb, in der ein on site Verfahren getestet wird.

Dieses Beispiel bildet aber die Ausnahme. Der Autor R. TEMMEL (1996) zeigt auf, dass es bisher nur geringe Berührungspunkte zwischen den Disziplinen Lysimeterforschung und Altlastensanierung gibt.

Am Areal des Forschungszentrums Seibersdorf wurde 1999 ein „Testsystem“ auf Basis der Lysimetertechnologie errichtet, welches unter „realistischen“ Verhältnissen ein Beobachten der Wirkung von verschiedenen Sanierungsverfahren zulassen soll. In diesem Projekt soll geklärt werden, ob dieses Testsystem (Lysimeterversuche) zur Eignungsfeststellung unterschiedlicher alternativer Behandlungsmethoden herangezogen werden kann und welcher Zeitraum für abgesicherte Ergebnisse notwendig ist.

Ein häufiger Kritikpunkt bei Lysimeterstudien ist die Möglichkeit von präferentiellen Wasserströmen, wobei insbesondere der Behälterrandbereich zu beachten ist. In den folgenden Ausführungen wird speziell der Frage nachgegangen, welche Maßnahmen gegen Randumläufigkeiten bei der Anlage getroffen wurden und welche Wirkung diese erzielten.

## 11.2. Material und Methode

### 11.2.1. Anlage

Es wurde ein Stahlbetonbauwerk errichtet, welches aus vier Kammern (jedes  $2 \times 3$  m) und einem die Kammern trennenden Kreuzgang besteht (Fig. 11.1). In dem Lysimeterkeller münden die Zu- und Ableitungen für Bewässerungseinrichtungen, Gas- und Wasserdrainagen sowie Temperatursonden und Saugkerzen, die in den vier vollständig umschlossenen Lysimetern eingebaut wurden. Die Kammern wurden vor dem Befüllen mit einer GFK-Beschichtung ausgekleidet und besitzen jeweils eine 2 m hohe Panzerglasscheibe aus Schauglas, um einen optischen Eindruck der Probekörper zu erhalten und um Setzungsvorgänge erkennen zu können.

Das gesamte Gebäude ist nachträglich mit einer Mindestüberdeckung von 0,5 m Boden eingeschüttet worden.

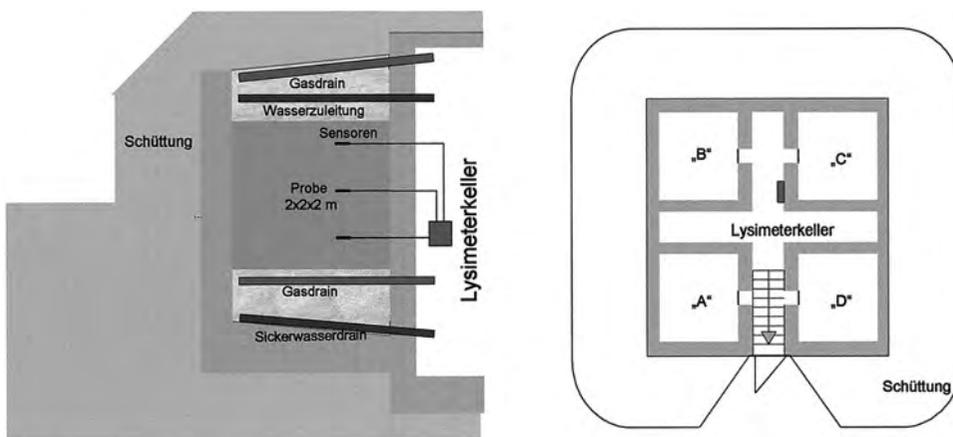


Fig. 11.1: Schemaskizze eines Lysimeters und der Anlage. Die Verfahren: „A“ – FlowMonta, „B“ – Biopuster, „C“ – Kontrolle, „D“ – Diagenetische Inertisierung.  
 Schema of the lysimeter facility: Treatments: „A“ – FlowMonta, „B“ – Biopuster, „C“ – Control, „D“ – Diagenetic Inertisation.

### 11.2.2. Eingebautes Ausgangsmaterial

Eine Probe des Ausgangsmaterials wurde auf die vorgeschriebenen Parameter laut ÖNORM S 2072 untersucht. Der 13-jährige kommunale Hausmüll kann in die in Tab. 11.1 wichtigsten dargestellten Fraktionen getrennt werden.

Bei einer Beurteilung nach ÖNORM S 2072 kann man den analysierten Hausmüll der Eluatklasse IIIb zuordnen. Ausschlaggebend ist dabei der CSB mit 142 mg/l. Die Analysenwerte bezüglich  $\text{NH}_4\text{-N}$  (27,2 mg/l), Ni (0,42 mg/l) und Mn (1,06 mg/l) würden eine Einschränkung auf Eluatklasse IIa bzw. IIb bedeuten.

Tab. 11.1: Charakterisierung des Ausgangsmaterials durch Beschreibung unterschiedlicher Korngrößenfraktionen.

*Characterization of waste material by description of particle size fractions.*

	> 10 mm	< 10 mm und > 2 mm	< 10 mm
Kunststoffe	19,1	2,4	
Holz	1,9		
Papier	0,3		
Glas	4,5	3,9	
Steine	7,5	1,2	
Metalle	4,2	0,7	
Keramik	1,9		
Rest			52,4
Anteil an Gesamtprobe	39,4 %	8,2 %	52,4 %

### 11.2.3. Angewendete Verfahren

In der beschriebenen Anlage (Fig. 11.1) wurden drei Sanierungs/Sicherungsverfahren angewendet. Es handelt sich dabei um drei sehr unterschiedlich wirkende Verfahren. Eines erhöht durch eine verstärkte Bodenbelüftung den mikrobiellen Abbau der organischen Substanz des Altmaterials (T. MATTHÄUS & N. ORD, 1996), hingegen wird bei zwei weiteren Verfahren die hydraulische Leitfähigkeit stark herabgesetzt (G. RIEHL-HERWIRSCH et al., 1996, T. DE BEYER, 1996).

Letztere beiden Verfahren unterscheiden sich nicht nur durch die in die Bodenmatrix einzubringenden Stoffe (Tone, Aschen, Montanwachs etc.), sondern auch durch deren unterschiedliche räumliche Wirkung. Bei einer Variante wird die Rezeptur in die Altmaterialmatrix eingemischt, im anderen Fall soll eine „Dichtschicht“ unterhalb der Altlast eine hydraulische Trennung bewirken. Das Schadstoffpotential soll dabei in beiden Fällen durch Mechanismen wie Pufferung, Fällung, Bindung und Einbau noch verstärkt herabgesetzt werden.

Im Juli 1999 wurden die vier Varianten kontrolliert in die Lysimeter eingebracht (Tab. 11.2) und nach dem Überlagern mit einer Quarzkiesschicht (bzw. dem zusätzlichen Einbringen von Bewässerungsleitungen bei der Kontrollvariante „C“ und bei Variante „B“, Biopuster) nach oben hin wasser- und gasdicht abgeschlossen.

Tab. 11.2: Überblick über Einbaumengen und resultierende Dichten der einzelnen Varianten.  
Weights of compacted waste for each lysimeter and resulting density values.

Varianten	Feuchtgewicht [kg]	Feuchtdichte [t/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte [t/m <sup>3</sup> ]	Trockengewicht [kg]
FlowMonta	7746	1,1	0,7	5036
Biopuster	8597	1,2	0,8	5308
Kontrolle	8923	1,2	0,8	5604
Diagenetische Inertisierung	12300	1,6	1,1	7452

#### 11.2.4. Maßnahmen beim Einbau gegen bevorzugte Wasserwegigkeiten

Die Wirkung von zwei Verfahren besteht vor allem durch die Herabsetzung der hydraulischen Leitfähigkeit. Bei diesen Varianten würde sich das Vorhandensein von Randumläufigkeiten stark auf die Ergebnisse auswirken. Aus diesem Grund, aber auch, weil wir es mit einem sperrigen und sehr heterogenen Medium zu tun haben, wurden mehrere konstruktive Maßnahmen getroffen, um Kurzschlussströme zu verhindern (Fig. 11.2):

1. Der Lysimeterquerschnitt verjüngt sich nach unten in jede Richtung um ca. 5 cm. Nachträgliche Setzungen lassen daher eher ein verstärktes Anpressen des Abfallmaterials an die Wände erwarten als das Auftun neuer Wegsamkeiten.
2. In drei Ebenen wurde beim Einbau ein randlicher Lehmkeil eingebracht. Durch die Auflast wird das Lehmmaterial angepresst und wirkt somit als zusätzliche Sickerwegverlängerung. Ähnliches wird von D. L. CORWIN (2000) vorgeschlagen. Er verwendet dabei horizontale randliche Ringe, die denselben Effekt haben sollen.
3. Zur Kontrolle der Wirksamkeit der Maßnahmen wurden Randdrainagen unterhalb der Probewürfel eingebaut.

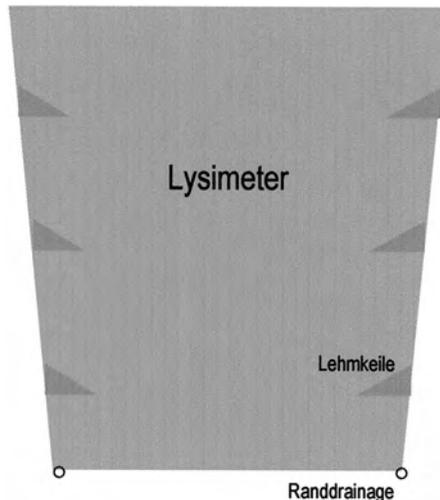


Fig. 11.2: Schematische Darstellung der getroffenen Maßnahmen gegen Randumläufigkeiten im Lysimeter.

Strategies against preferential pathways.

### 11.3. Ausgewählte Ergebnisse und Erfahrungen

Bei den obigen Ausführungen wurde speziell auf die Maßnahmen bezüglich der Wasserbeweglichkeiten eingegangen. Im Folgenden werden speziell die Sickerwassermengen gezeigt, bevor anschließend allgemeine Erfahrungen mit der Anlage zusammengefasst werden.

Das sich bildende Sickerwasser, welches den Probewürfel vertikal durchströmt hat, wird quantifiziert und dient zur Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit und von Frachten an Inhaltsstoffen, die aus dem Probekörper ausgelaugt werden. Variante „A“ und „D“ sind vor Versuchsbeginn überstaut worden und zeigen ähnliche Sickerwasserbildungsraten in den Sammeldrainagen bzw. Randdrainagen. Figur 11.3 stellt den kumulativen Sickerwasseranfall von Variante „D“ dar. Es zeigt sich dabei, dass das Mengenverhältnis zwischen Randdrainagen und Gesamtsickerwassermengen dem den Drainagen zuzurechnenden Flächenverhältnis entspricht. Die Vorkehrungen gegen eine bevorzugte Verlagerung von Wasser im Randbereich der Lysimeter waren somit ausreichend.

Die Ganglinien lassen eine Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit in den Varianten zu. Die in Fig. 11.4 dargestellten Werte bestätigen die Ergebnisse der Laborbestimmungen. Es konnten  $k_f$ -Werte im Bereich zwischen  $10^{-9}$  m/s und  $10^{-12}$  m/s nachgewiesen werden.

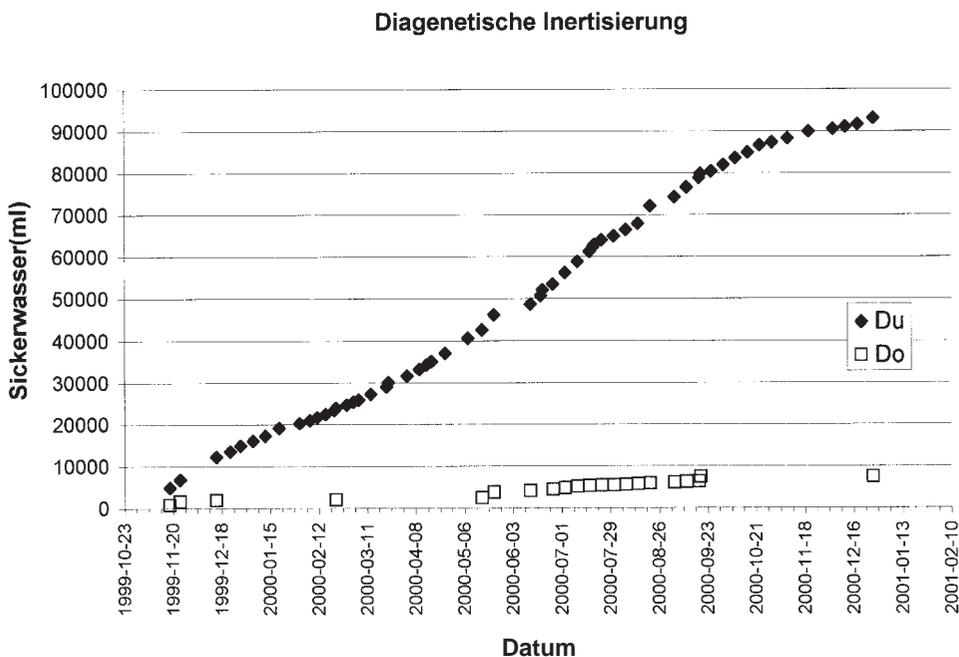


Fig. 11.3: Kumulative Sickerwasserbildungsraten am Beispiel von Variante „D“ (Diagenetische Inertisierung). Separate Darstellungen der Sickerwassermengen für den zentralen Bereich (Du) und den Randbereich (Do).  
Cumulative seepage fluxes of lysimeter „D“. Separate graphs for central drains (Du) and edge drains (Do).

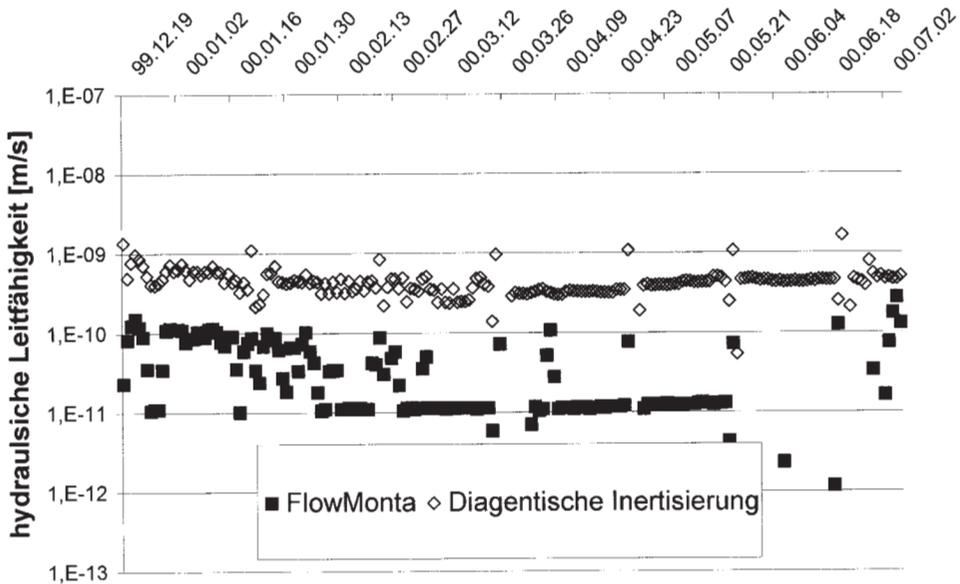


Fig. 11.4: Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit der Varianten „A“ (FlowMonta) und „D“ (Diagenetische Inertisierung).  
 Prediction of hydraulic conductivity for treatment “A” (FlowMonta) and “D” (Diagenetic Inertisation).

Aus den bisherigen Untersuchungen konnten folgende Erfahrungen gemacht werden:

1. Erkennbare Qualitätsunterschiede der Sickerwässer: Aus den bisherigen Analysen der Sickerwässer ist nicht nur optisch sondern auch aus den Analysedaten ein Qualitätsunterschied zwischen den sanierten Varianten und der Kontrolle feststellbar.
2. Die Vorkehrungen gegen eine „bevorzugte Verlagerung“ von Wasser entlang der Grenzflächen sind wirksam und ausreichend.
3. Gasproduktion nur bei Kontrolle gemessen: Eine deutliche Gasproduktion konnte nur bei der Kontrolle festgestellt werden. Nach einem Beobachtungsjahr konnte aber auch bei den anderen Varianten eine leichte Tendenz zur Gasproduktion erkannt werden. Dies spiegelt sich auch in der Änderung der Gaskonzentrationen wider.
4. Temperaturgradienten im Probekörper: Die Beobachtung der Temperaturverläufe in mehreren Messebenen im Probekörper zeigt deutlich den Unterschied der Temperaturleitfähigkeiten der Varianten. Die Variante „Diagenetische Inertisierung“ zeigt dabei die stärkste Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur.

#### 11.4. Zusammenfassung

Alternative Sanierungs/Sicherungsverfahren werden neben der konventionellen Methode des Ausräumens und Verlagerns von Altlasten in eine Deponie immer wichtiger. Die Wirkung dieser on site oder in situ Verfahren ist dabei zu prüfen und zu dokumentieren. Am Areal des Forschungszentrums Seibersdorf wurde 1999 ein „Testsystem“ auf Basis der Lysimetertechnologie errichtet, welches unter „realistischen“ Ver-

hältnissen ein Beobachten der Wirkung von verschiedenen Sanierungsverfahren zulassen soll. In diesem Projekt soll geklärt werden, ob dieses Testsystem (Lysimeterversuche) zur Eignungsfeststellung unterschiedlicher alternativer Behandlungsmethoden herangezogen werden kann und welcher Zeitraum für abgesicherte Ergebnisse notwendig ist.

In der beschriebenen Anlage wurden drei Sanierungsverfahren angewendet und mit einer Kontrollvariante verglichen. Es handelt sich dabei um drei sehr unterschiedlich wirkende Verfahren. Eines erhöht durch eine verstärkte Bodenbelüftung den mikrobiellen Abbau der organischen Substanz des Altmaterials, hingegen wird bei zwei weiteren Verfahren die hydraulische Leitfähigkeit stark herabgesetzt

Die Verschiedenheit der Verfahren und auch die Tatsache, dass es sich beim Probenmaterial um sperriges, heterogenes und „aktives“ Material handelt, bedingt eine Berücksichtigung in der Konstruktion. Es wird auf die Besonderheiten der Anlage eingegangen, es werden die Verfahren kurz beschrieben und erste Ergebnisse vorgestellt. Speziell wird der Frage nachgegangen, welche Maßnahme gegen Randumläufigkeiten bei der Anlage getroffen wurden und welche Wirkung diese erzielten.

## Dank

Dieses Projekt wird über die Kommunalkredit Austria AG vom Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft gefördert.

## 12. Anforderungen, Erfahrungen, Konzepte zum Lysimeteereinsatz für Bergbaufolgelandschaften (S. KNAPPE)

### 12.1. Einleitung

Die Braunkohlegewinnung im Mitteldeutschen Braunkohlenrevier südlich von Leipzig erfolgt seit 1920 in Großtagebauen. In dem ca. 700 km<sup>2</sup> großen, regionalgeologisch dem Weißelsterbecken zuzuordnenden Gebiet werden zukünftig 240 km<sup>2</sup> Land durch Tagebaue überbaggert sein. Im Ergebnis des Braunkohlentagebaus werden hier rund 170 km<sup>2</sup> Kippenlandfläche sowie 70 km<sup>2</sup> Seefläche (E. HILDMANN, 1993) hinterlassen. Gegenwärtig wechseln aktiver Bergbau und Bereiche, die zur Flutung vorbereitet werden, mit gefluteten Restlöchern und rekultivierten Flächen, die z. T. bereits vor Jahrzehnten in die landwirtschaftliche Nutzung genommen wurden. Für den Wasser- und Stoffhaushalt der Bergbaufolgelandschaften und die Wechselwirkungen zwischen Kippe, See und Grundwasser ergeben sich dabei spezifische Probleme zur Stoff- und Wasserbewegung in der ungesättigten Zone.

In den folgenden Ausführungen sollen anhand weniger ausgewählter Ergebnisse aus Lysimeterexperimenten zur Quantifizierung der Wasserhaushaltsgrößen und der Migration von anorganischen Komponenten unter landwirtschaftlich genutzten, rekultivierten Kippenböden Schlüsse gezogen und Erfahrungen über

- die Möglichkeiten der Nutzung von Lysimetern für Kippen mit hoher Heterogenität im Substrataufbau – Stellung der Lysimeter im Rahmen eines Konzeptes zum „scaling up“;
- die Grundausstattung an Messtechnik und Anforderungen an verwendete Materialien,

- spezifische Messtechnik für Untersuchungen von Bodenluft sowie Austrag gasförmiger Komponenten mit Sickerwasser oder an die Umgebungsluft,
- die Probleme und Besonderheiten bei der Bestimmung von im Boden- bzw. Sickerwasser gelösten Stoffen bzw. Ionenbilanzen zur Validierung geochemischer Modelle
- Vorstellung eines neuen Onlinemesssystems „SAMSON“

vermittelt werden.

## 12.2. Anforderungen, Erfahrungen, Konzepte

### 12.2.1. Möglichkeiten der Nutzung von Lysimetern für Kippen mit hoher Heterogenität

Die hier dargestellten Erfahrungen und Konzepte wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes, welches sich mit den Veränderungen der Boden-, Sicker- und Grundwasserbeschaffenheit im Zuge der Restlochflutung und danach durch die Wechselwirkung zwischen den Kompartimenten Boden/Bodenwasser/Sickerwasser – Grundwasser/Aquifer – See/Seesediment befasst, gewonnen. Die hier betrachteten Lysimeteruntersuchungen stellen dabei nur eine Ebene der im Rahmen eines „scaling up“

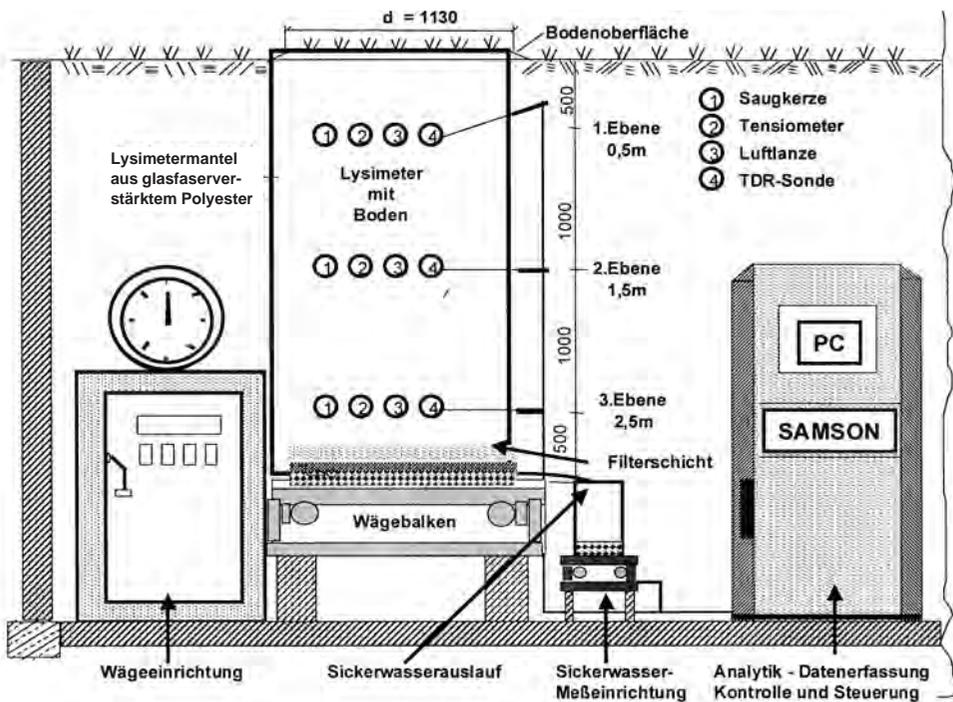


Fig. 12.1: Lysimeter – Prinzipskizze der für rekultivierte, langjährig landwirtschaftlich genutzte Bergbauböden verwendeten 3 m tiefen, monolithischen, wägbaren und mit Messsensorik in drei Tiefen ausgestatteten Lysimeter.

*Lysimeters: basic sketch of lysimeters employed for cultivated mine soils used for many years in agriculture. The lysimeters are 3 m tall, monolithic, ponderable, and fitted with measuring sensors at three depths.*

stattfindenden Aktivitäten dar. Sie sind vor allem mit geohydrochemischen Grundlagenuntersuchungen, Bach- und Säulenversuchen, gekoppelt und sollen Daten zur geohydrochemischen Modellierung liefern.

Die Untersuchungen wurden an drei, je 3 m tiefen, monolithischen, wägbaren, mit Messensorik in drei Tiefen ausgestatteten Lysimetern – Prinzipskizze siehe Fig. 12.1 – sowie zwei 2,2 m tiefen, geschütteten, wägbaren, mit Messensorik in vier Tiefen ausgestatteten Lysimetern (Bauartbeschreibung siehe Kap. 9.2) und an einer Sickerwasser-Grundwasser-Messeinrichtung mit bodenhydrologischem Messplatz – Aufbau siehe Fig. 12.2 – mit Messensorik in fünf Tiefenstufen von 0–2 m und von 3–23 m Tiefe durchgeführt.

Die Lysimeter wurden auf der rekultivierten Kippe Espenhain bei Leipzig gewonnen. Zur Kennzeichnung der geologischen, bodenkundlichen und hydrologischen Gegebenheiten wurde in Fig. 12.3 ein Schema des Aufbaues einer Kippe, die der Abbautechnologie im Südraum Leipzig entspricht, dargestellt.

Die Bodenform (Profilbeschreibung siehe Fig. 12.4) entspricht einem Regosol aus Kipp-Sandlehm, schwach karbonathaltig, über tiefem Fein- und Mittelsand, schwach schluffig, schwach bis stark kohlehaltig (AG BODEN, KA 4, 1994, M. WÜNSCHE & J. THUM, 1990, E. WEISE, 1996). Am Substrat der ca. 70 cm starken Deckschicht ist vorwiegend Geschiebemergel und nur im geringen Maße Geschiebelehm und Schmelzwassersand quartärer Herkunft beteiligt. Darunter steht die Absetzerverkippung vom Abraam aus flöznahe Bereiche (obereozäne bis mitteloligozäne Bornauer und Böhleener Schichten) an, die zu äußerst unregelmäßigem, kleinräumigen Wechsel von kohlefreien bis stark kohlehaltigen, meist feinkörnigen Sanden mit Schluff-, Ton- und Kohlebrocken führte.

Welche Schlussfolgerungen zur Nutzung von Lysimetern aus Böden und Substraten rekultivierter Kippen können aus dem hier aufgezeigten Aufbau einer Kippe, die vor allem durch eine hohe sowohl klein als auch mittelskalige Heterogenität gekenn-

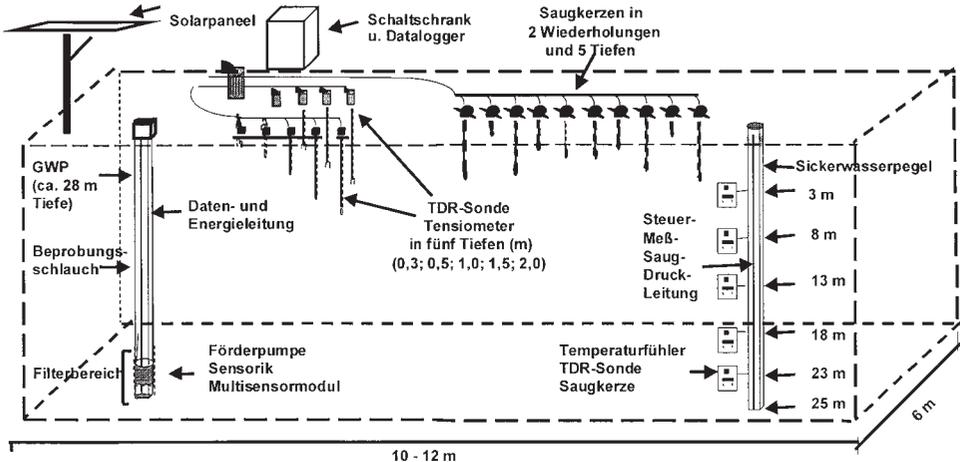


Fig. 12.2: „Virtuelle“ Lysimeter – Prinzipskizze des Aufbaues des bodenhydrologischen Messplatzes und des Sickerwasser-Grundwasser-Messsystems auf der Kippe Espenhain im Südraum Leipzig.

Virtual lysimeters: basic sketch of the structure of the soil hydrology measuring station and the leachate/groundwater measuring system at Espenhain dump south of Leipzig.

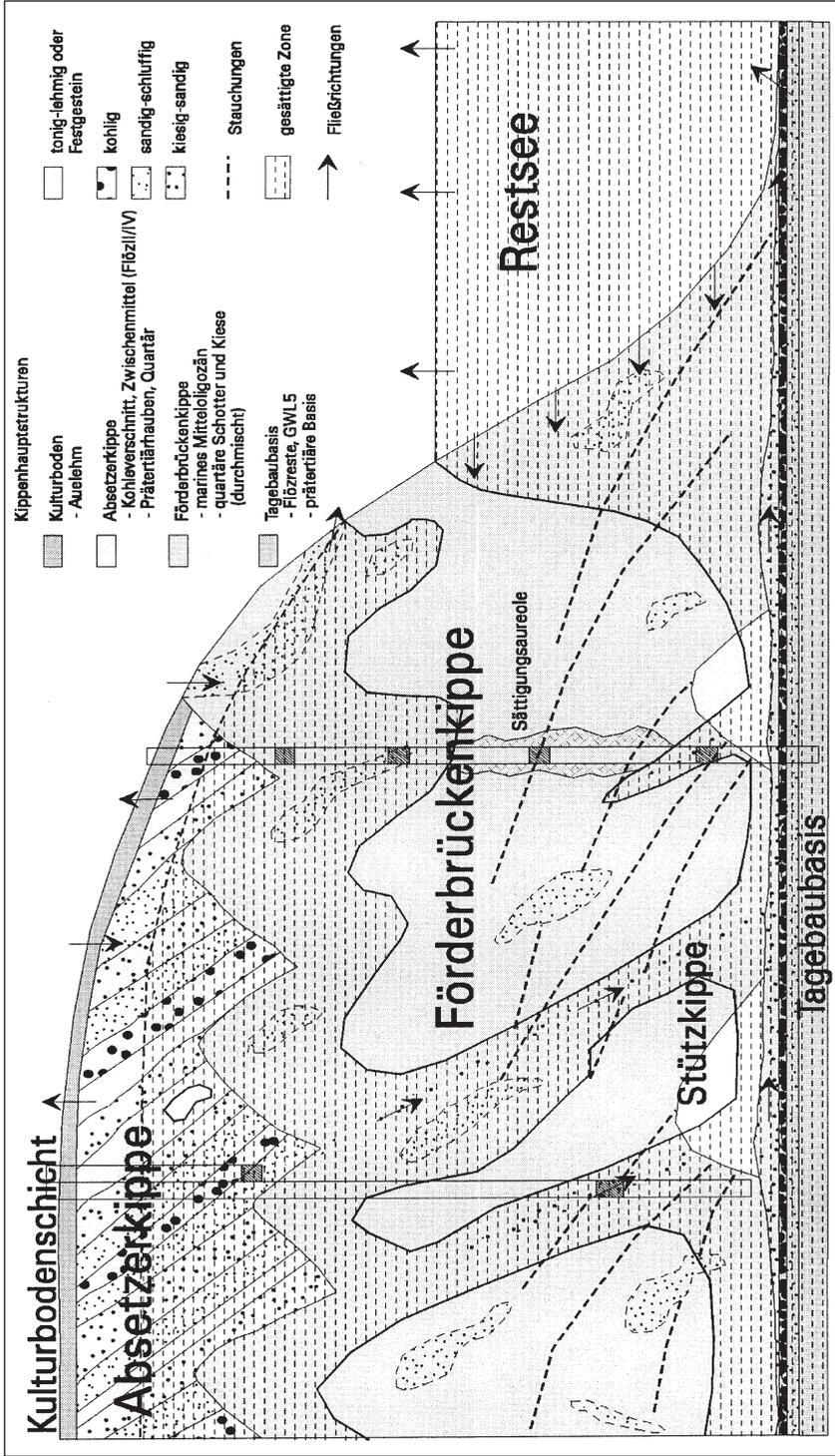


Fig. 12.3. Schematischer Kippenaufbau im Mitteldutschen Braunkohlenrevier mit möglicher Lage von Sickerwasser-Grundwasser-Messsystemen (nach W. GLÄSER, persönliche Mitteilung).  
 Diagram of the structure of the dump in the central German coalfield showing the possible position of leachate/groundwater measuring systems (after W. GLÄSER, personal information).

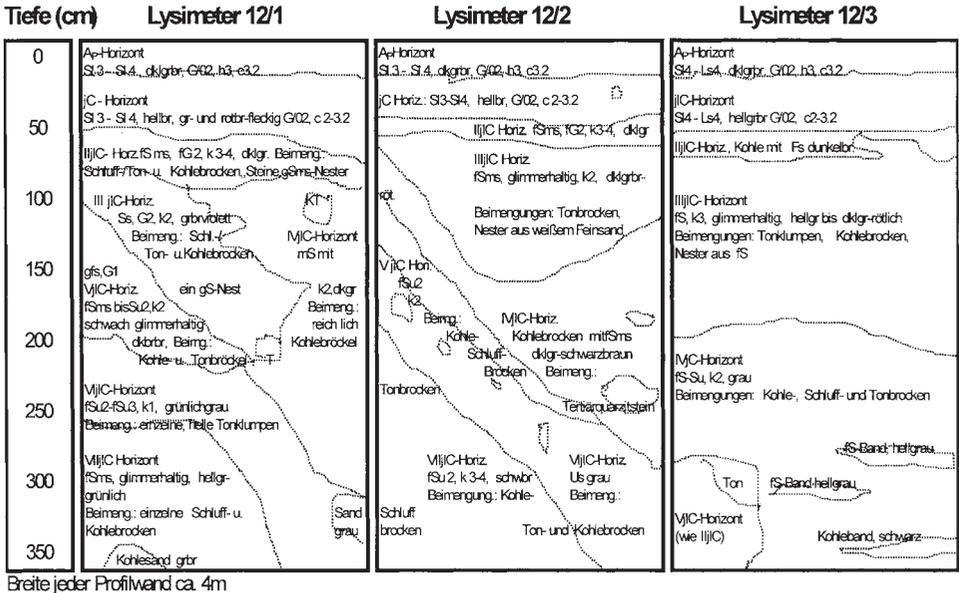


Fig. 12.4: Profilbeschreibungen der Lysimeterentnahmestellen 12/1–12/3 auf der rekultivierten Kippe Espenhain. (AG BODEN, KA 4, 1994). Bodenform: Regosol aus Kipp-Sandlehm, schwach karbonathaltig, über tiefem Fein- und Mittelsand, schwach schluffig, schwach bis stark kohlehaltig.

Profile descriptions of lysimeter sampling points 12/1–12/3 on three cultivated dump at Espenhain (AG BODEN, KA 4, 1994). Soil form: Regosol from sandy loam in dump, low in carbonate, on top of deep fine and medium sand, slightly silty, carbon content varies from low to high.

zeichnet ist, abgeleitet werden? Eine am UFZ existierende Arbeitsgruppe, die sich mit der ungesättigten Zone befasst, hat im Rahmen eines Projektes zur Kippenentwicklung bei Flutung von Tagebaurestlöchern festgestellt, dass Lysimeter zur Bearbeitung der Fragestellungen des Wasser- und Stoffhaushaltes rekultivierter Kippenböden Aussagen zulassen, die für eine Nutzung zum Verständnis der Hydrologie und der Geochemie des Kippenkörpers nur in Verbindung mit weiteren Untersuchungen geeignet sind. Eine Übertragung der Ergebnisse auf die Fläche und die Validierung von geochemisch-hydrologischen Modellen ist ohne ein entsprechendes „scaling“, bei dem dann die Lysimeter unabdingbar notwendiger Bestandteil werden, nicht möglich. Dieses „scaling up“ bindet die Lysimeter in Untersuchungen ein, die vom Mikromaßstab (z. B. Mineralogie, bodenkundliche, chemische, geologische, hydrologische Kennzahlen der Substrate) über Mikrokosmen und Säulenversuche zu Lysimetern und weitergehend zu in situ Untersuchungen auf der Kippe in „virtuellen“ Lysimetern wie bodenhydrologischen Messplätzen und Sickerwasser-Grundwasser-Messeinrichtungen als auch entsprechenden Pegeln mit Standorterkundungen (Kippenaufbau) bis zur Verwertung dieser Ergebnisse in entsprechenden Modellen führen.

In diesem Zusammenhang sind dann, ohne an dieser Stelle näher auf diese einzugehen, entsprechend den anstehenden Fragestellungen Entscheidungen zu treffen, ob mit monolithischen oder mit homogenisierten, geschütteten Lysimetern ein Problem beantwortet werden kann (F. REINSTORF et al., 2001).

## 12.2.2. Grundausrüstung an Messtechnik und Anforderungen an verwendete Materialien

Ausgehend vom bereits aufgezeigten Profil rekultivierter Kippenböden (Fig. 12.4), wie es für die mitteldeutschen Tagebaue im wesentlichen angenommen werden kann, wurden von uns die Wägbbarkeit und Lysimetertiefen von 3 m als unabdingbar angenommen. Damit lassen sich der Einfluss der 0,7–1 m tiefen, rekultivierten Bodenschicht und ein ausreichender Bereich des heterogenen, tertiären, verkippten Substrates sowohl aus der Sicht des Wasserhaushaltes als auch des Stoffhaushaltes genügend differenziert beschreiben. Wie aus der vorliegenden Fig. 12.5 zu den Wasserhaushaltsgrößen erkennbar ist, zeigen trotz des aufgezeigten heterogenen Profilaufbaues die Sickerwasserbildung, die Evapotranspiration und die Bodenwasservorratsänderung der drei Wiederholungen zeitlich und mengenmäßig nahezu identische Werte (nähere Angaben in S. KNAPPE et al., 1999). Wie Tracerversuche (S. KNAPPE et al., 2001) in diesen Lysimetern zeigten, sind an diesem gleichartigen Mengentransport jedoch sehr unterschiedliche Porenvolumen beteiligt. Dies führte dazu, dass in einem Lysimeter nach ca. 240 mm Sickerwasser nur 5–6 % des zugegebenen Deuteriums, in einem zweiten Lysimeter jedoch schon 28–30 % wiedergefunden wurden.

Durch die Ausstattung der Lysimeter mit weiterer Messtechnik (Fig. 12.6), insbesondere mit Tensiometern und TDR-Sonden konnte gezeigt werden, dass die Sickerwasserbildung und Evapotranspiration nur in der rekultivierten Schicht determiniert wird. In den geschütteten, kulturfeindlichen Substraten ohne Wurzeinfluss werden die Sickerwassermengen dann in einem, wie die Ergebnisse der TDR und Tensiometer zeigten, weitestgehend Feldkapazität aufweisendem Substrat nur weitergeleitet. Weitergehende Aussagen können durch die in den verschiedenen Ebenen eingebauten TDR-

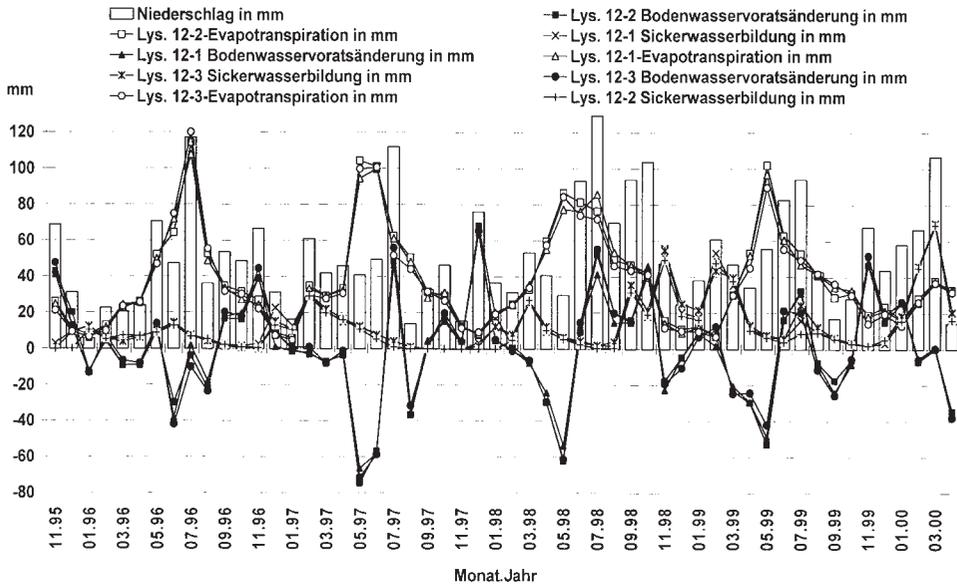


Fig. 12.5: Monatliche Niederschläge, Sickerwassermenge, Evapotranspiration und Bodenwasservorratsänderung der drei Lysimeter (12/1–12/3) von der Kippe Espenhain.  
 Monthly precipitation, leachate quantity, evapotranspiration and soil water quantity change of the three lysimeters (12/1–12/3) from the Espenhain dump.

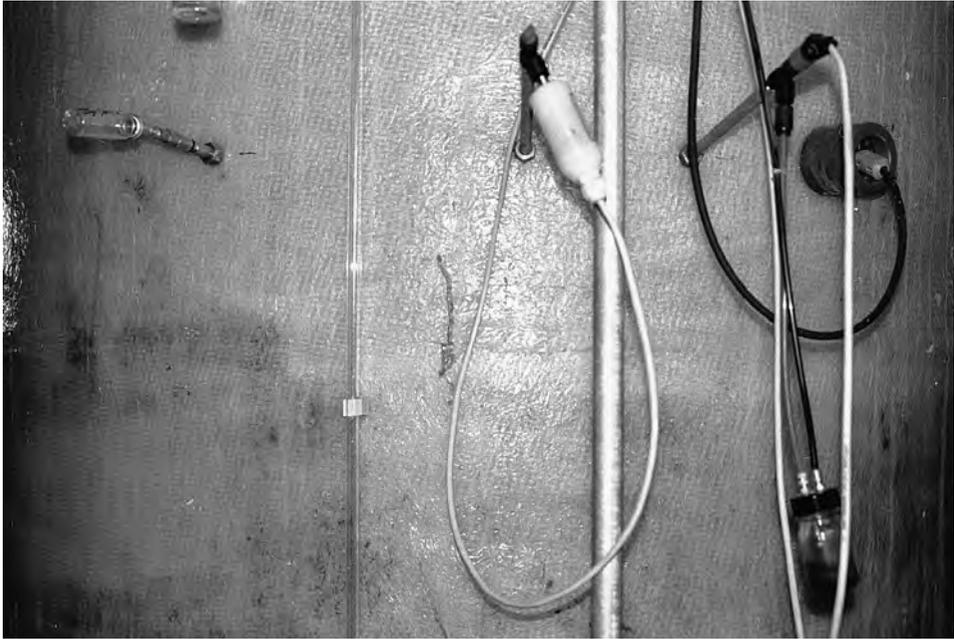


Fig. 12.6: Ausstattung der Lysimeter mit Messtechnik: je Messebene eine Luftlanze, ein Tensiometer, eine TDR-Sonde, eine Saugkerze und über das gesamte Lysimeter die Anzeige für den Grundwasserstand.

*Lysimeter measuring equipment: each measuring level is equipped with an air lance, a tensiometer, a TDR and a suction cup, while a water level indicator runs across the entire height of the lysimeter.*

Sonden und Tensiometer nicht abgeleitet werden. Da man nach dem Einbau kaum feststellen kann, in welchem Substrat sich die Messfühler befinden, sollte bei diesen Böden ein Verzicht auf letztere möglich sein.

Anders ist der Einbau von Saugkerzen zur Gewinnung von Bodenwasser zu sehen. Wie erwartet zeigen die chemischen Kennzahlen eine durch das heterogene Substrat bedingte sehr große Variabilität sowohl innerhalb (drei Ebenen) eines als auch zwischen den Lysimetern. Ohne auf Einzelheiten einzugehen, kann dies durch Analyseergebnisse, die in drei Tiefen im Bodenwasser und im Sickerwasser ermittelt wurden, gezeigt werden (Tab. 12.1).

Die z. T. sehr hoch mineralisierten Wässer sind bei sehr hohen Leitfähigkeiten durch extreme Sulfatgehalte, verbunden mit pH-Werten von 1–3 gekennzeichnet. Aus der uns bekannten Tatsache wurden die Anforderungen an das Lysimetermaterial abgeleitet. Da neben den niedrigen pH-Werten noch weitere Elemente (Fe, Mn, Schwermetalle) in bemerkenswerter Menge zu erwarten waren, kam nur ein chemisch inertes Stoff als Lysimetermantel in Frage. Der von uns verwendete glasfaserverstärkte Polyesterharz hat sich dabei (einschließlich der Materialstabilität bei der Gewinnung der Monolithe) ebenso bewährt, wie die bereits von J. SEEGER in Kap. 9 vorgestellten Materialien bei geschütteten Lysimetern.

Eine weitere technische Anforderung an Lysimeter mit Bergbauböden bzw. -substraten ergibt sich aus dem bei Flutung der Tagebaurestlöcher wieder ansteigenden

*Tab. 12.1: Leitfähigkeit, pH-Wert, Ammonium-, Sulfat-, Aluminium- und Schwermetallgehalte im Boden- und Sickerwasser in den Wiederholungen 12/1, 12/2 und 12/3 der Lysimeter mit Boden von der Kippe Espenhain.  
Conductivity, pH, levels of ammonium, sulphate, aluminium and heavy metals in the soil in the repeats 12/1, 12/2 and 12/3 of the lysimeters with soil from the Espenhain dump.*

	Lysimeter 12/1					Lysimeter 12/2					Lysimeter 12/3					
	0,5	1,5	2,5	3,0	0,5	1,5	2,5	3,0	0,5	1,5	2,5	3,0	0,5	1,5	2,5	3,0
Tiefe [m]	7,53	1,7	1,67	2,17	7,03	2,24	3,16	2,89	7,22	3,51	4,58	5,01				
pH	1,01	12,2	12,6	8,14	1,14	4,58	5,95	3,55	0,77	1,76	2,92	3,24				
LF [mS/cm]	0,29	3,87	8,47	6,18	0,48	1,89	5,63	2,13	0,29	0,87	1,75	2,00				
NO <sub>3</sub> [mg/l]	173	15,9	5,6	18,9	117	15,7	7,1	3,1	151	65,5	8,1	5,0				
NH <sub>4</sub> [mg/l]	3,2	21,5	6,1	12,5	2,8	25,4	5,5	12,7	3,1	4,7	8,4	5,4				
Al [mg/l]	0,21	123	390	522	8	66	1125	1,42	1,6	6,12	1,93	2,58				
Cd [µg/l]	0,3	1	5	14	2	4	2	4	0,4	2	1	1				
Cr [µg/l]	70	1100	2918	1660	201	350	2274	40	49	94	93	34				
Cu [µg/l]	10	328	538	304	66	202	30	13	12	48	17	10				
Ni [µg/l]	50	488	1668	856	246	456	4474	1714	93	148	798	851				
Pb [µg/l]	10	163	411	30	15	141	104	12	21	53	21	9				
Zn [µg/l]	640	860	1505	6690	7550	4958	13493	5779	1195	5580	9079	3114				
As [µg/l]	30	113	296	78	14	14	17	3	21	16	16	2				

Grundwasserstand. Um diesen entsprechend dem Anstieg in der Kippe nachzuvollziehen, erweist sich ein mit dem Lysimetergrund verbundenes, in der Höhe verstellbares Vorratsgefäß als ausreichend. Der Wasserstand kann an einem Steigrohr (Fig. 12.6) abgelesen werden. Zur Kontrolle der beim Wiederanstieg des Grundwassers wechselnden physikalischen und chemischen Bedingungen im Boden und Wasser kommen dann die bereits genannten Saugkerzen zum Einsatz.

### 12.2.3. Messtechnik für Untersuchungen von Bodenluft sowie Austrag gasförmiger Komponenten mit Sickerwasser oder an die Umgebungsluft

In den Kippenböden und in der Kippe selbst sind unter den kleinräumig stark wechselnden aeroben und anaeroben Bedingungen und damit verbundenen Wechsel der Redoxpotentiale (insbesondere bei Grundwasserwiederanstieg infolge Flutungsmaßnahmen) auch die Frage nach dem Verbleib und der Umsetzung von Stickstoff, aber auch die Quellen von neugebildetem Kohlendioxyd von Interesse.

Zur Lösung dieser Fragestellungen wurden Luftlanzen (Fig. 12.7) zur Entnahme von Bodenluft in drei Ebenen vorgesehen. Darüber hinaus kann mit dem Sickerwasser im



Fig. 12.7: Luftlanze mit Kapillare und angeschlossenem, heliumgefüllten Sammelgefäß.  
Air lance with capillary attached to a helium-filled collecting vessel.

Gleichgewicht befindliche Luft im Sickerwasserauslauf (Fig. 12.8) entnommen werden. Über spezielle methodische Fragen zur Beprobung und Auswertung sei auf die Autoren R. RUSSOW et al. (1999a, b) verwiesen.

Ergänzend sei bemerkt, dass gleichzeitig die Emissionen mit der Boxenmethode ermittelt werden.

#### 12.2.4. Probleme und Besonderheiten bei der Bestimmung von im Boden- bzw. Sickerwasser gelösten Stoffen bzw. Ionenbilanzen zur Validierung geochemischer Modelle – Vorstellung eines neuen Onlinemesssystems „SAMSON“

Um geochemische Modellierungen durchzuführen, sollten die Ergebnisse der Speziesanalytik möglichst unverfälscht zur Verfügung stehen. Letzteres ist am ehesten zu verwirklichen, wenn das zu untersuchende Boden- oder Sickerwasser ohne Kontakt mit der Umgebungsluft, möglichst unter Schutzgas und sofort nach der Entnahme in einem für die stark wechselnden Probenzusammensetzung geeigneten, für alle Proben örtlich und zeitlich gleichen, sich selbst kalibrierenden Messverfahren bestimmt werden können. Über den Stand der Entwicklung eines solchen Onlinemessgerätes (SAMSON) berichten D. LAZIK & B. MORGENEYER (1999, 2000).

Als erster Schritt wurde an die Lysimeter in der Lysimeterstation in Brandis eine Anpassung der SAMSON Entwicklung eingebaut, die im weiteren Ausbau noch er-

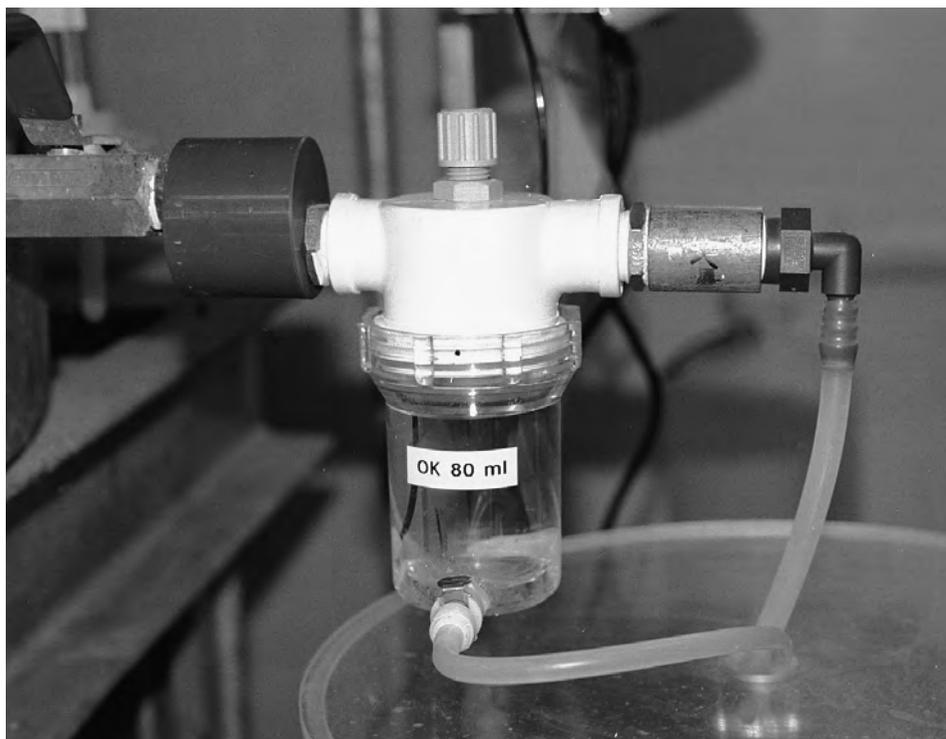


Fig. 12.8: Sickerwasserauslauf zur Entnahme von Sickerwasser und Bodenluft mit Kopplung an ein Gerätesystem SAMSON sowie Waage zur Messung der Sickerwassermenge.  
Leachate exit for sampling leachate and soil air coupled to a SAMSON apparatus system as well as scales to measure the quantity of leachate.



Fig. 12.9: Detail des Gerätesystems SAMSON. Automatische Durchflussmesszelle zur Bestimmung von pH-Wert, LF, Eh, Sauerstoffgehalt, Temperatur, Ammonium- und Nitratgehalt.  
 Detail of the SAMSON system: automatic flowmeter cell to determine the pH, conductivity, Eh, oxygen level, temperature, ammonium and nitrate content.

gänzt wird. Als Ziel galt zunächst die auf Tagesbeprobungen ausgerichtete Online-messung von sieben Parametern (pH-Wert, LF, Eh, Sauerstoffgehalt, Temperatur, Ammonium und Nitrat).

Zunächst erfolgt die Beprobung des Sickerwassers über ein vor Kontakt mit der Umgebungsluft geschütztes System (Fig. 12.8) aus inerten Materialien. Die Probe wird über Edelstahlkapillaren zu einem hydraulischen Interface mit 16 Eingängen geleitet. Vom Interface gelangt die Probenflüssigkeit in die eigentlichen, gekoppelten, mit entsprechender Sensorik (Elektroden bzw. Sensitroden) ausgestattete Messkette (Fig. 12.9). Die Ansteuerung bestimmter Lysimeter, der Probentransport und die eigentliche Messung sowie die Ergebnisaufzeichnung werden über einen PC gesteuert. Nach Beendigung der Messung in der Messkette kann das Probenmaterial für weitere Untersuchungen an einen Ionenchromatographen übergeben werden.

### 12.3. Zusammenfassung

Es werden Problemstellung, der Aufbau und ausgewählte Ergebnisse aus Lysimeteruntersuchungen mit rekultivierten Kippenböden aus dem Südraum Leipzig dargestellt. Aus diesen lassen sich folgende Anforderungen, Erfahrungen und Konzepte zum Lysimeteinsatz für Bergbaufolgelandschaften ableiten:

- Entsprechend der sowohl klein als auch mittelskaliig hohen Heterogenität von Kippen sind Lysimeter zur Bearbeitung der Fragestellungen des Wasser- und Stoff-

haushaltes rekultivierter Kippenböden nur in Verbindung mit Untersuchungen im Rahmen eines „scaling up“ geeignet. Dieses „scaling up“ bindet die Lysimeter in Untersuchungen ein, die vom Mikromaßstab (z. B. Mineralogie, bodenkundliche, chemische, geologische, hydrologische Kennzahlen der Substrate) über Mikrokosmen und Säulenversuchen zu Lysimetern und weitergehend zu in situ Untersuchungen auf der Kippe in „virtuellen“ Lysimetern (bodenhydrologischen Messplätzen und Sickerwasser-Grundwasser-Messeinrichtungen), Pegeln und Standorterkundungen reichen.

- Bedingt durch stark saures, hoch mineralisiertes Boden- und Sickerwasser sind für den Lysimeterbau nur korrosionsfeste Materialien aus Plaste (kein Edelstahl) zu verwenden.
- Die Ausrüstung der Lysimeter mit Tensiometern, TDR-Sonden, Temperaturfühler und insbesondere mit Saugkerzen und Luftlanzen ist für die Durchführung von Prozessstudien notwendig. Zur Simulation des Grundwasserwiederanstieges sind entsprechende technische Möglichkeiten vorzusehen.
- Um die hohen Anforderungen an die Datenerfassung für hydrogeochemische Versuche an Lysimetern mit Bergbausubstraten zu gewährleisten, ist der Einsatz eines automatischen Vielkanalprobenahme und -messsystems zur Online-Fluiduntersuchung (SAMSON) unter Schutzgas dringend anzuraten.

### **13. Allgemeine Anforderungen an Lysimeteranlagen und deren Betrieb – Technische Konzeption/Betreuung/Qualitätssicherung** (G. VON UNOLD)

#### **13.1. Einleitung**

Der Begriff Lysimeter ist weit gefasst und soll im Folgenden im Sinne einer Messanlage verstanden werden. Lysimeter sind offene Systeme, die aufgrund ihrer definierten Oberfläche und ihres definierten Bodenvolumens vielseitig einsetzbare Instrumente für die quantitative Bestimmung von in Böden ablaufenden Prozessen sind.

Sie sind je nach Bau und Ausstattung zur Beschreibung bodenkundlicher, hydrogeologischer, pflanzenkundlicher, mikrobieller oder chemischer Zusammenhänge nutzbar. Schwerpunktartig können Lysimeter zur quantitativen Bestimmung von Wasser- und Stofftransport und Stoffumsetzungsprozessen in der ungesättigten Bodenzone eingesetzt werden. Das damit implizierte eingefasste Bodenvolumen mit allen durch die Einfassung behafteten Systemgrenzen bewirkt einen Bruch zur natürlichen Situation, der mit zusätzlich wirkenden sogenannten Inseffekten (siehe Kap. 13.2.2) zu bewertenden Artefakten führt.

Durch die breite Definition des Begriffes wird weiter deutlich, dass Größe, Ausführungsform und örtliche Gegebenheiten individuell auf den Untersuchungszweck abgestimmt sein müssen und entscheidend für deren Eignung und die Qualität der Untersuchungsergebnisse sind.

Für die Qualitätssicherung in der Planungs- und Bauphase sowie im Betrieb ist die Bewertung und Abstimmung aller Punkte der Prozesskette „Lysimeter“ notwendig (vgl. Fig. 13.8). Diese besteht grob aus Zieldefinition, Anforderungsprofil und Konzeption, der Ausführungsform (Fig. 13.1), der Entnahme und Einfassung des Bodens, dem Betrieb mit technischer Wartung und wissenschaftlicher Betreuung. Im Betrieb wird anhand einer systematischen Prozessanalyse die Bewertung zur Systemoptimierung vorgenommen.



meters bei insbesondere wägbaren Lysimetern) nahe an den Lysimeterzylinder zu legen, um den Einfluss des Spaltes oder der Manschette gering zu halten (Fig. 13.2).

Weiters sollen die Lysimeteroberflächen unbeeinflusst von Treppenabgängen, Bäumen, Gebäuden oder sonstigen, das Mikroklima beeinflussenden Faktoren sein.



Fig. 13.2: Inseleffekte.  
Island effects.

### 13.2.3. Erhalt des natürlichen Wasserflusses

Sofern der Lysimeterbodenaufbau nicht als synthetische Matrix genutzt werden soll, muss auf den Erhalt der den Wasserfluss beeinflussenden Faktoren wie Porengefüge, Lagerungsdichte, Randverdichtung oder Randspalten und Oberflächenbeschaffenheit geachtet werden. Makroporen oder Randspalten können einen großen Einfluss auf die Wasserbewegung haben. Ein Beispiel dafür zeigt der in Fig. 13.3 abgebildete Farbtracerversuch.

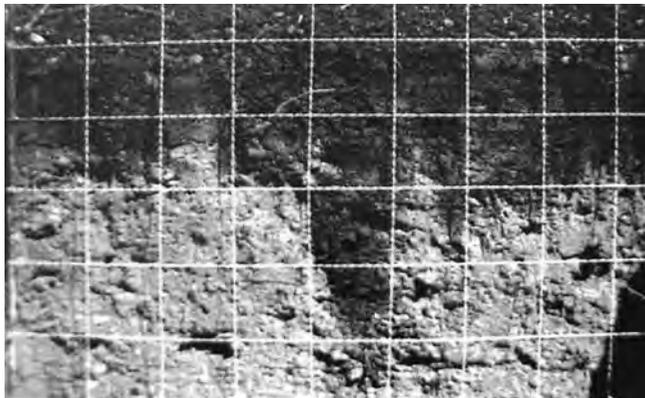


Fig. 13.3: Brilliant blue Tracer Versuch. Raster: 10 cm × 10 cm (H. THEURETZBACHER, 1997).  
Brilliant blue tracer experiment. Raster: 10 cm × 10 cm (H. THEURETZBACHER, 1997).

Sofern eine Übertragung auf das Freiland gewünscht ist, sollte der im Gelände gegebene Wasserfluss an der Bodensäulenunterkante im Lysimeter simuliert werden. Das kann mittels keramischer Platten geschehen, die mit dem adäquaten atmosphärischen Unterdruck der im Gelände in der entsprechenden Bodentiefe gemessenen Wasser-spannung beaufschlagt werden. Für die Planung der Lysimeterhöhe muss definiert werden, in welchen Tiefen welche Prozesse stattfinden und welche Funktionen die „Systemgrenze“ Boden und Filterboden haben.

#### **13.2.4. Thermische Vergleichbarkeit**

Durch die Einfassung bedingt ist ebenfalls eine thermische Störung. Da üblicherweise Edelstahlzylinder zum Einsatz kommen, deren thermische Leitfähigkeit weit über der insbesondere trockener Böden liegt, muss auf die Temperierung des Gebäudes geachtet werden. Weiter heizt sich der Zylinderüberstand bei Sonnenschein stark auf – und kühlt in der Nacht stärker ab, sodass er auf das aus Bilanzierungsgründen nötige Maß von ca. 2 cm beschränkt bleiben sollte. Bei etwa 5 cm erkennt man den Einfluss besonders im Winter, wo die nördliche Bodensichel der Lysimeteroberfläche deutlich schneller schneefrei wird, während die südliche länger schneebedeckt bleibt.

#### **13.2.5. Verwendung chemisch inerter Werkstoffe**

Je nach Untersuchungsgegenstand sind die eingesetzten Materialien zu wählen. Außer für Schwermetalluntersuchungen können Edelstahlgefäße der Werkstoffe 1.4301/1.4305 (Handelsname V2A) oder der höher resistente 1.4571 (Handelsname V4A) verwendet werden. Grundsätzlich sind die Schweißnähte aus höher legierten Stählen einzusetzen und sämtliche Oberflächen chemisch zu beizen (passivieren). Dies gilt auch für die Siebeinlagen des Filterbodens oder alle anderen mit dem Boden und dem Bodenwasser in Berührung kommenden Teile.

Sofern Schwermetalle untersucht werden, sollte das Lysimetergefäß innen mit einem PE-Mantel (nicht eingefärbtes hochdichtes Polyethylen HDPE 600 oder 1000 ohne Additive wie Stabilisatoren oder Weichmacher) ausgekleidet werden.

#### **13.2.6. Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit bestehenden Lysimetern**

Vor der Konzeption sollte recherchiert werden, welche vergleichbaren Studien mit bestehenden Lysimetern durchgeführt wurden. Sofern möglich, sollten diese Lysimeter konstruktiv berücksichtigt werden, damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

#### **13.2.7. Stabiler Betrieb ohne Störungen über mehrere Jahrzehnte**

Die Konstruktion ist so auszulegen, dass der Langzeitbetrieb ohne Störung der Bodensäule gesichert ist. Daher sind sämtliche das Lysimetergefäß selbst betreffenden konstruktiven Details wie Material, Verbindungs- und Dichtelemente mit hoher rechnerischer Sicherheit und auf eine nominelle Lebensdauer von 50 Jahren auszulegen.

#### **13.2.8. Einsetzbarkeit für zukünftige Aufgabenstellungen**

Da die Lebensdauer von Lysimetern üblicherweise den momentanen Untersuchungsgegenstand überdauert, sollte eine universelle Nutzbarkeit berücksichtigt werden. Daher sollte der Spalt zwischen Lysimeterzylinder und Köcher ca. 5 cm betragen, um über Bohrungen im Zylinder eine spätere Bestückung mit Sonden zu ermöglichen. Dieser Spalt verjüngt sich am oberen Ende. Vorteilhaft ist ferner, wenn

genügend Raum und Arbeitsfreiheit im Lysimeterkeller gegeben ist, um ergänzende Untersuchungen und zukünftige Techniken einsetzen zu können.

### 13.2.9. Normen und Richtlinien

Für den Bau sind die jeweiligen Bauauflagen und Arbeitsschutzrichtlinien gültig. „Unterirdische Lagerräume“ mit für Lysimeterkeller üblichen Spannweiten sind je nach regionaler Bestimmung anzeigepflichtig, aber teilweise genehmigungsfrei. Statische Gutachten sind jedenfalls sinnvoll. Für Untersuchungen des Stoffhaushaltes ist die OECD Richtlinie, „Guidance Document for the Performance of Out-door Lysimeter Studies“ gültig. Allgemeine Informationen liefert die DVWK-Empfehlung zum Bau und Betrieb von Lysimetern (DVWK, 1980).

## 13.3. Zieldefinition und Anforderungsprofil

Die Zieldefinition beinhaltet Zweck und Gegenstand des Lysimeters. Daraus wird möglichst präzise ein fachlich fundiertes Anforderungsprofil erstellt. Von folgenden Fragestellungen wird ausgegangen:

### 1. Soll das Lysimeter wägbar sein?

Zur Bilanzierung des Wasserhaushaltes haben sich elektronisch wägbare Lysimeter gut bewährt. Neben der präzisen Erfassung von Niederschlägen ist die Gewichtsinformation eine redundante Information zur Wasserabfluss- oder Wassergehaltsmessung.

### 2. Sollen Bodenwasserproben aus verschiedenen Tiefen gewonnen werden?

Je nach Bodenart sind im Lysimeterzylinder Bohrungen für Sonden vorzusehen. In welcher Abstufung, ist von den Bodenhorizonten abhängig. Dazu werden im Vorfeld die Bodenprofile der Entnahmestandorte aufgenommen. Bei der Entnahme der Bodensäule werden vom umgebenden Boden Proben gezogen und archiviert.

### 3. Sollen Wasserspannung und Wassergehalt gemessen werden und in welchen Tiefen?

Sofern das Lysimeter nicht als „black box“ zwischen Oberfläche und Sickerwasserablauf dienen soll, liefern Tensiometer und TDR-Sonden Informationen über Retentionspotenzial, den Wasserfluss und den Porenraum in den entsprechenden Tiefen/Horizonten. Dadurch kann die Wasserbewegung über die Bodenmächtigkeit partial beobachtet und bewertet werden.

### 4. Welche Parameter müssen bekannt sein?

Zur Berechnung der Wasser- und Energiebilanz sind Niederschläge, Evaporation und gegebenenfalls die Transpiration zu bestimmen. Die entsprechenden klimatischen Parameter sind daher zu erfassen. Steht eine Klimamessstation in der Nähe zur Verfügung? Zur Berechnung von Stoffverlagerung sind Niederschläge zu erfassen. Für Stoffumsetzungsprozesse werden weiter in den jeweiligen Bodenhorizonten Probenahme oder chemische Sensoren erforderlich.

### 5. Welche Simulationsmodelle können eingesetzt werden?

Für die Wahl der Klimamessparameter sind die in Frage kommenden mathematischen Modelle zu bewerten.

### 6. Welche Böden/Pflanzen/Nähr- und Schadstofffrachten sollen untersucht werden?

Welche Materialien dürfen verwendet werden? Sofern Bodenwasserproben gewonnen werden sollen, ist die gesamte Gewinnungskette zu spezifizieren. Die ent-

nommene Menge sollte minimal gehalten werden. Definition von Kerzenmaterial, Verbindungs- und Dichtstoffe, Schlauchmaterial, Sammelflaschenmaterial, Lagerungstemperatur, Licht, Analytik, Fehlerabschätzung und Prozessoptimierung, Ringversuche zur Kontrolle sind nötig.

#### **7. Mikrobiologische Untersuchungen?**

Hier sind präzise Miniaturtemperatursensoren, insbesondere nahe Geländeoberkante, wobei die Eigenerwärmung und Kabeltemperatur zu berücksichtigen sind, zu verwenden. Um Querbeeinflussung zu vermeiden, sollten keine Profilsonden in Tiefen von 0–30 cm eingesetzt werden. Sofern die Lysimeter bewirtschaftet werden, müssen die Sonden nach Lage und Tiefe entsprechend gekennzeichnet sein. Gefüllte Lysimeter oder Monolithen dürfen nach der Entnahme nicht zwischengelagert werden, sondern müssen unmittelbar in den Lysimeterkeller verbracht werden.

#### **8. Welche Arbeitsgruppen betreiben vergleichbare Lysimeter?**

Der Erfahrungsaustausch und das Einholen von Erfahrungswerten ist wichtig. Einen guten Überblick über aktuelle Lysimeterstudien bietet die Österreichische Arbeitsgruppe Lysimeter. Es gibt in Deutschland ca. 20 Lysimeteranlagen, in Westeuropa ca. 70 Anlagen. Der direkte Erfahrungsaustausch hat sich bewährt, da in Veröffentlichungen konstruktive Fehler oder Nachteile teilweise nur sehr selten beschrieben werden.

#### **9. Welche Empfehlungen sind zu berücksichtigen?**

Die Österreichische Arbeitsgruppe Lysimeter befasst sich intensiv mit Lysimeteruntersuchungen und stellt über [www.lysimeter.at](http://www.lysimeter.at) zahlreiche Publikationen zur Verfügung. Für Untersuchungen des Stoffhaushaltes ist die OECD Richtlinie (2000), „Guidance Document for the Performance of Out-door Lysimeter Studies“ gültig. Allgemeine Informationen liefert die DVWK (1980).

#### **10. Welcher finanzielle und personelle Aufwand ist für Errichtung und Betrieb zu erwarten?**

Eine präzise Kalkulation für die Errichtung ist für die Qualität der Lysimeter ebenso entscheidend wie die Kalkulation der laufenden Betreuungskosten für die Qualität der Dokumentation und der Untersuchungsziele.

### **13.4. Realisierung**

#### **13.4.1. Entnahme**

##### **13.4.1.1. Boden**

Grundsätzlich ist vor der Entnahme der Boden auf seine Eignung für den Untersuchungsgegenstand zu prüfen. Schluff- und Feinsandböden weisen ein vergleichsweise gutes Retentionspotenzial bei hoher Wasserleitfähigkeit nahe der Sättigung auf. Weiters sind die möglichen Fehler bei der Entnahme weniger gravierend als bei tonigen Böden. Daher werden diese Bodentypen bevorzugt verwendet, sofern die Wahl gegeben ist. Es ist dringend darauf zu achten, dass der Bodenaufbau homogen ist. Etwaige Tonlinsen oder Makroporengänge in tonigen Böden (z. B. durch alte Wurzelgänge) oder Gänge von Wühlmäusen, Maulwürfen können den Monolithen unbrauchbar machen. Bei lehmigen oder tonigen Böden ist die Monolithengewinnung sehr sorgfältig durchzuführen. Die Lagerungsdichte und Feuchtigkeit spielen hier eine besondere Rolle. Risse durch Steine oder Wurzeln beim Abscheren können über sehr lange Zeiträume bestehen bleiben – Wurzelgänge und Makroporen führen zu präferenziellem Fluss und sind „langzeitstabil“!

### 13.4.1.2. Wahl des Standortes

Für die monolithische Entnahme (Fig. 13.4) muss der Standort mit entsprechend schwerem Gerät erreichbar sein. So wiegt ein Bodenmonolith von 1 m<sup>2</sup> Oberfläche und 2 m Höhe



1, Stechen ohne Verdichtung



2, Freigraben



3, Abscheren + Filterboden setzen

Fig. 13.4: *Monolithische Entnahme* (H. STEINDL, 1996).  
*Monolithic uptake* (H. STEINDL, 1996).

zwischen 3500 und 5500 kg. Dieser muss gehoben und transportiert werden können. Höhe und Gewicht des Transporters sowie Zufahrtswege müssen berücksichtigt werden. Bei der Auswahl des Standortes sollte weiter auf Grundwasserabstand, Rückverfüllbarkeit und „kooperative Umgebung“ (Pächter, Eigentümer) geachtet werden.

#### 13.4.1.3. Anforderungen an Maschinen und Bauarbeiter

Alle Maschinen müssen leckölfrei arbeiten und gut gewartet sein. Die Arbeiter sind vor der Entnahme hinsichtlich der für den Monolithen wichtigen Punkte einzuweisen. Dies beinhaltet, dass der abgegrenzte Bereich nicht begangen werden darf, der Zylinder ohne Rütteln exakt axial eingeführt werden muss, etwaige Störungen wie Steine oder Wurzeln dem Betreuer sofort zu melden sind. Die Kraft während des Eindrückens wird protokolliert. Es darf keine Kontamination des Monolithen stattfinden. Hilfsmittel wie Wasser, Fette oder dergleichen dürfen nicht verwendet werden. Bei allen Unsicherheiten muss rückgefragt werden. Bei Schwermetalluntersuchungen sollte auf Abrasion der Werkzeuge und deren Material geachtet werden.

#### 13.4.1.4. Monolithische Entnahme

Sie wird für alle bindigen, strukturierten und aggregierten Böden eingesetzt. Abgesehen von Mittel-, Grobsand- und Kiesböden sollten daher alle Böden monolithisch entnommen werden, sofern der Bezug auf den natürlichen Boden gegeben sein soll. Dabei dürfen weder Bodeneigenschaften verändert- noch die Systemgrenzen gestört werden.

Zunächst wird das Bodenprofil aufgenommen. Je heterogener der Boden ist, umso enger muss der Abstand zwischen den Sondierbohrungen um den zu stechenden Boden sein, wobei vier Bohrungen üblicherweise ausreichend sind. Diese Bodenprofile werden für zukünftige Arbeiten bewertet, fotografiert und archiviert.

Die monolithische Entnahme erfolgt durch Ausstechen einer Bodensäule direkt in den axial geführten Lysimeterzylinder. Dabei spielen Lagerungsdichte und Bodenfeuchte eine wichtige Rolle. Zur Entnahme sollten Böden feucht, aber nicht staunass sein. Dadurch wird das Boden- und Porengefüge weitgehend erhalten, bei geringer Wandreibung während des Stechens. Je dichter und feinkörniger der Boden, umso größer sind die Scherkräfte und damit die mechanische Anforderung an die Entnahmevorrichtung. Je sandiger der Boden, umso mehr muss das den Zylinder umgebende Bodenmaterial entfernt werden. Der Vorlauf der Schneide beträgt dabei nur noch wenige Zentimeter.

Die Stechvorrichtung muss derart gebaut sein, dass ein Kippen des Zylinders bei heterogener Lagerungsdichte oder durch Steine und Wurzeln etc. ausgeschlossen ist, um durch Randklüfte entstehende Randabflüsse auszuschließen. Beim Stechen selbst kann in den ungestörten Boden bis in die gewünschte Tiefe vorgedrungen werden oder der umgebende Boden wird mit dem Eindrücken des Zylinders sukzessive entfernt. Durch das Entfernen reduziert sich der Stechwiderstand deutlich. Wichtig für den Erhalt der Lagerungsdichte ist, dass der Boden durch das Stechen im Zylinder nicht gestaucht wird. Um dies zu überprüfen wird die Bodenoberkante vor und nach dem Stechen mit dem ursprünglichen Niveau überprüft. Eine etwaige Verdichtung geht in das Qualitätsprotokoll ebenso ein wie die Dokumentation über Bodenprofile, Fotos des umgebenden Bodens, Protokollierung der Scherkräfte, Wasserspannungen oder Wassergehalt, der Gerätschaften und der beteiligten Personen.

Abgeschert wird der Monolith durch Scherplatten. Diese haben den Nachteil, dass der Boden an der Scherfläche verdichtet wird, das Porenvolumen wird geringer und damit auch die Wasserleitfähigkeit. Der nachteilige „Kapillarsprung“ zum Filterboden

wird dadurch nochmals verstärkt. Besonders wirkt sich dieser Effekt bei mehrkörnigen und tonigen Böden aus.

Ideenexkurs: Eine konstruktive Weiterentwicklung wäre eine „Scherplattenfräse“, die etwa vergleichbar zur Kettensäge das Scherplattenvolumen nicht verdichtet, sondern abtransportiert.

Eine weitere zu prüfende Variante ist das Vereisen der Unterkante. Dabei könnte anstelle einer Scherplatte die Unterkante vereist werden. Der Monolith wird gezogen und um 180° gekippt. Nach dem Auftauen wird die Bodenunterkante plan abgezogen und der Filterboden „auf dem Kopf“ aufgesetzt. Erst nach dessen Montage wird das Lysimeter wieder um 180° in seine natürliche Ausgangslage geschwenkt.

Der Transport des Monolithen sollte auf einem luftgefederten Tieflader erfolgen. Bei schlecht gefederten Fahrzeugen können Monolithen durch Rütteln deutlich verdichtet werden.

#### 13.4.1.5. Gestörte oder verfüllte Lysimeterböden

Dies betrifft Sand- und Grobsandböden, Kies- und Schotterböden und ist bei sachgerechter Vorgehensweise möglich und sinnvoll. Der Boden wird schichtweise (etwa 5 cm Schichten) abgetragen, in nach Ort und Tiefe eindeutig gekennzeichnete Säcke eingefüllt, kühl, dunkel und feucht zwischengelagert und wieder rückverfüllt. Dokumentiert werden vor dem Einfüllen der Böden Lagerungsdichte und Feuchte. Problematisch an verfüllten Lysimetern ist, dass die Bodeneigenschaften bindiger Böden gestört werden. Die Ausbildung natürlicher Porengefüge und Aggregation kann synthetisch nicht wieder hergestellt werden. Eine schichtweise Rückverdichtung durch Rütteln bewirkt an der Verdichtungsoberfläche eine deutliche Reduzierung des Porenraumes bzw. eine Verdichtung an der Rütteloberfläche, die sich zur Schichtunterkante auf ein Minimum abbaut (T. BAUMGARTL, 2001). Dadurch kann ein sägezahnartiges Wasserleitfähigkeitsgefüge entstehen. Daher sollten verfüllte Lysimeter nur minimal rückverdichtet werden und mehrere hydrologische Jahre zur Regenerierung erhalten, um durch Wasserfluss, Tau- und Frostperioden, Vegetation, mikrobielle und biologische Prozesse annähernd den ursprünglichen Bodenaufbau wieder zu erhalten. Auch der Setzvorgang und die Abweichung zur ursprünglichen Lagerungsdichte wird protokolliert. Das Rückverfüllen sollte generell manuell unter Beobachtung der Rückfüllhöhe geschehen. Sofern die oberste Schicht nicht in gleicher Weise wieder eingebracht werden kann, wird sie kühl und feucht, aber nicht unter Luftausschluss, zwischengelagert und im kommenden Jahr aufgebracht.

#### 13.4.1.6. Grobsand, Kies und Schotter

Diese sollten gestört verfüllt werden, wobei auch hier Setzungserscheinungen, Auswaschung von Feinkompartimenten und Verschlammungseffekte auftreten können. Auch diese Lysimeter brauchen je nach Körnung und Heterogenität ein bis mehrere hydrologische Jahre zur Regenerierung.

#### 13.4.1.7. Terminwahl und Wasserspannung des Bodens für die Bodenentnahme

Der Boden sollte bei der monolithischen Entnahme weder zu nass noch zu trocken sein. Je feuchter der Boden, umso geringer ist der Stehwiderstand. Andererseits besteht die Gefahr des Verlustes der Struktur oder der Bodenaggregate. Ist der Boden zu trocken kommt es zu hohen Scherkräften und Rissen. Daher sollte die Wasserspannung des Bodens bei etwa 50–300 hPa liegen.

Bei bewirtschafteten Lysimetern sollte die Entnahme und das Einstellen in den Lysimeterkeller vor dem Winter, spätestens aber vor Beginn der Vegetationsphase beginnen.

#### 13.4.1.8. Qualitätssicherung

Sämtliche Schritte sind eindeutig nach Standort, Termin, Version und Bearbeiter zu protokollieren. Daneben werden Bodenprofile, Bodendichteprofile, Wassergehalte, Wasserspannungen vor der Entnahme erfasst. Der wissenschaftliche Betreuer hält die eingesetzten Messverfahren und deren Messgenauigkeit (Kalibrierung), Wetter, sämtliche an der Entnahme beteiligten Geräte, Materialien, Personen oder Firmen fest. Filme und Fotos sowie die Protokolle sind langfristig für die mit Lysimeterarbeiten betrauten Personen verfügbar. Neben dem Verdichtungsgrad beim Stechen wird weiters die Füllhöhe vor und nach dem Transport aufgemerkt. Der LKW-Fahrer gibt ein Fahrprotokoll ab. Zuletzt liegt der gesamte Prozess der Lysimetergewinnung in einem Protokoll vor.

### 13.4.2. Lysimetergefäß

#### 13.4.2.1. Allgemeines

Eine Oberflächengröße von einem Quadratmeter ist für die meisten Untersuchungen ausreichend. Sie ist auf die Anforderung der jeweiligen Anwendung abzustimmen. So werden Waldlysimeter deutlich größer ausgelegt, wenn Wurzelaktivitäten erhalten bleiben sollen. Für Laborversuche/Säulenversuche/Mikrokosmenanlagen werden kleinere Oberflächen gewählt.

Generelles Problem ist die Rissbildung beim Austrocknen tonhaltiger oder organischer Böden. Die Risse treten in erster Linie an der Einfassung auf und haben daher eine andere Struktur als die Rissbildung im Freiland. Trocknungsrisse reichen je nach Boden im Lysimeter von 5–60 cm. Dieses Phänomen muss jedenfalls bei der Wiederbefeuchtung berücksichtigt werden, da die Aufsättigung vorzugsweise von außen nach innen erfolgt.

#### 13.4.2.2. Einfassung

Man unterscheidet:

- **Zylindrische Einfassung:** Gut bewährt haben sich Kreisquerschnitte wegen ihrer Verformungsfestigkeit. Bedingt durch das Gewicht der Bodensäule wirken hohe radiale Schub- und Scherkräfte, die von der Lysimeterwandung abgefangen werden müssen. Wegen Ihrer Verformungsfestigkeit sind zylindrische Lysimeter auch beim Stechen vorteilhaft.
- **Rechteckige Einfassung:** Bei Rechtecklysimetern wirken diese Kräfte senkrecht auf die Wandung und müssen daher mit zunehmender Tiefe durch entsprechend größere Wandstärken und Versteifungsprofile abgefangen werden. Um Randabflüsse zu vermeiden, sollten auch innen horizontale Lamellen angebracht werden. Weiter betehen hier geometrisch bedingte „Inseln“ in den Eckbereichen.
- **Vieleckige Einfassung:** Sie ist in der Herstellung teuer und bietet keine weiteren Vorteile.

#### 13.4.2.3. Lysimeterzylinder

Die Höhe des Lysimeterzylinders ist abhängig von der Bodenmächtigkeit des zu untersuchenden Bodens im Freiland und des Grundwasserabstandes. Eine Höhe von 2 m hat sich bei zahlreichen Anlagen etabliert. Sofern der kapillare Anschluss im Gelände simuliert werden soll, kann am Lysimeterboden eine „hängende Wassersäule“ über keramische Platten appliziert werden. Der angelegte atmosphärische Unterdruck ent-

spricht dem hydrostatischen Potenzial des Grundwasserabstandes. Umgekehrt kann Wasser eingestaut werden, wenn der Grundwasserspiegel über dem Lysimeterboden liegt.

Zu berücksichtigen ist weiter die verschiedene Wärmeausdehnung von Stahl und Boden. Unter natürlichen Gegebenheiten kann sich der Boden nicht horizontal ausdehnen. Bedingt durch die Temperaturjahresgänge im Lysimeter werden sich strukturierte Böden über die Jahre zunehmend verdichten. Die Verdichtung resultiert aus der Materialausdehnung und dem dadurch bedingten Setzvorgang, wobei die Materialschrumpfung wegen der Scherwiderstände des Bodens eine Verdichtung bewirkt. Kunststoffe haben in der Regel 10-fach höhere Wärmeausdehnung als Stahl.

#### 13.4.2.4. Filterboden

Er ist so auszuführen, dass freies Bodenwasser rückstaufrei ablaufen kann. Dabei sind Kapillarsprünge zwischen Boden und Filterboden zu vermeiden, damit sich diese nicht als Kapillarsperre auswirken. Üblicherweise werden als Filter gewaschene Quarzsande verwendet, die mit der Körnung der Bodensäulenunterseite beginnend nach unten hin zum Kies in die geneigte Bodenplatte verfüllt werden, jeweils durch ein inertes Geflecht (z. B. Edelstahl oder Glasfaser) gegen Auswaschung getrennt. Eine Sektorierung der Bodenplatte ist dann zu empfehlen, wenn stark heterogene, strukturierte Böden oder Sekundärporen gegeben sind. Ein Randsektor gibt Aufschluss, inwieweit die Lysimeterwandung Einfluss auf den Wasserfluss hat. Auch wenn im Routinebetrieb die Sektoren zu einer Mischprobe zusammengeführt werden, kann im Zweifelsfall über eine differenzierte Betrachtung der Sektoren der Randeinfluss (für tonhaltige Böden) bewertet werden. Der Filterboden wird mit dem Zylinder mechanisch fest und wasserdicht verbunden.

#### 13.4.2.5. Materialien, Beschichtung und Oberflächen

Das Material sollte chemisch inert sein, also keine Sorptionseffekte oder Additive enthalten, die mit den zu untersuchenden Stoffen kollidieren. Er sollte mechanisch fest und über mehrere Jahrzehnte formstabil bleiben. Gut bewährt hat sich hochlegierter Edelstahl (W 1.4571) mit den Legierungsbestandteilen Cr, Ni, Mo, mit passivierter Oberfläche und geschützten Schweißnähten. Je höher legiert der Stahl ist, umso säureresistenter ist er. Bei 2 m Höhe sollte die Wandstärke 6 oder 8 mm betragen.

Thermoplaste wie PE, PP oder PA sind nicht oder nur bedingt geeignet, da diese unter Last eine hohe plastische Verformung aufweisen (Kriechen). HDPE 600 oder 1000 kann als Beschichtungswerkstoff gewählt werden.

#### 13.4.2.6. Toleranzen und Schneidkante

Die Rundheit sollte bei zylindrischen 1-Quadratmeter-Lysimetern besser als  $\pm 5$  mm sein. Die beim Stechen voreilende Schneidkante wird zur Vermeidung von Verdichtung etwa  $30^\circ$  nach innen ausgebildet.

#### 13.4.2.7. Sondenbohrungen, Verschraubungen

Der Zylinder sollte in verschiedenen Tiefen Bohrungen mit ca. 50 mm Durchmesser haben, damit Sonden eingeführt werden können. Blind- und Sondenflansche für die Durchmesser 20 mm, 25 mm und 32 mm unter verschiedenen Einbauwinkeln sind handelsüblich lieferbar. Zylinder und Lysimeterboden sind nach dem Stechen – vor dem Verfüllen – kraftschlüssig miteinander zu verbinden und abzudichten.

### 13.4.3. Sickerwasserabflussmessung

Die Messung des Sickerwassers kann über gekapselte Kippzähler mit einer Auflösung von 100 ml (entsprechend 0,1 mm Niederschlag) erfolgen (Fig. 13.5). Handelsüblich werden diese mit einem Probenteiler angeboten, sodass für analytische Zwecke automatisch 1,25 % des Sickerwassers in Probenflaschen abgefüllt wird. Das überschüssige Wasser kann in Tanks gespeist werden.



Fig. 13.5: Kippzähler.  
Tipping counter.

### 13.4.4. Anforderungen an das Bauwerk

#### 13.4.4.1. Allgemeines

Das Bauwerk darf das Lysimeter klimatisch nicht wesentlich beeinflussen. Daher sind oberirdische Aufbauten wie Treppenabgang, Schienen, Einfassungen etc. minimal zu halten. Der Lysimeterköcher sollte maximal 5 cm „Luft“ zur Lysimeterwand haben. Direkt anschließend soll ein zum Lysimeter vergleichbarer Bodenaufbau anplaniert (vgl. Fig. 13.6) werden, damit der klimatische und vegetationsbedingte „Inseleffekt“ zwischen Lysimeteroberfläche und Umgebung minimal bleibt.

Die Lysimeter müssen von oben oder von unten in den Keller „gehängt“ werden können, ohne dass der umgebende Boden bzw. die Pflanzen gestört werden.

Es dürfen in der Nähe des Lysimeterkellers, insbesondere in der Hauptwindrichtung, keine Bauwerke oder sonstige Hindernisse stehen. Ideal ist eine Freifläche von 1 ha.

Die Fläche muss vor unbefugtem Zutritt, Wühlmäusen, Hasen etc. durch einen Zaun und Sichtkontrollen geschützt werden.

Passive Blitzschutzvorkehrungen müssen dem Gebäude und der Messtechnik angepasst sein.

Jeder Lysimeterkeller sollte einen messtechnischen Serviceraum sowie einen Laborserviceraum zum Wasserprobenhandling besitzen.

Der Flurabstand muss ausreichend sein. Anderenfalls ist mit Sperrbeton oder anderen, wasserdichten Materialien zu arbeiten, um statisch ein „Aufschwimmen“ des Kellers zu verhindern.

Die Konstruktion sollte die nachträgliche Wägung der Lysimeter ermöglichen.

Sicherheitsauflagen für Personenschutz wie Belüftung, Zutritt etc. müssen berücksichtigt werden.

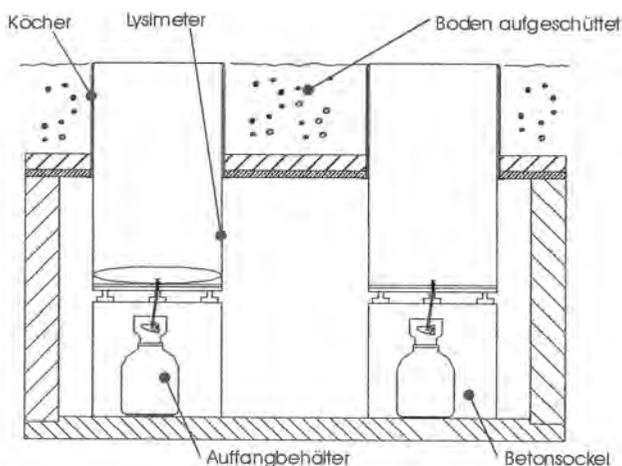


Fig. 13.6: Schematischer Schnitt durch einen Lysimeterkeller.  
Schematic cross-section through a lysimeter cellar.

#### 13.4.4.2. Vermeidung von Inseleffekten

Die Beschaffenheit der Bodenoberfläche um das Lysimeter muss der Lysimeterbodenoberfläche entsprechen, ebenso bei bewirtschafteten Lysimetern.

Der das Lysimeter umgebende Boden muss dem Lysimeterboden entsprechen, sofern die Lysimeter bepflanzt werden. Dabei ist wichtig, dass die das Lysimeter umgebenden Pflanzen vergleichbar zu den Lysimeterpflanzen sind, um „Inseleffekte“ zu vermeiden.

Etwaige Manschetten um das Lysimeter sollten so klein wie möglich gehalten werden, da diese stets eine mikroklimatische und vegetative Störung bedingen. Der Lysimeterköcher kann oben einen etwa 20 cm hohen konischen Kragen haben, der sich nach oben hin dem Lysimeterzylinder bis auf wenige Millimeter nähert. Dieser Kragen muss justierbar sein. Der Lysimeterzylinder selbst hat eine Tropfnase, die über den Kragenrand reicht (Dr. W. BERGER, Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft).

Sofern der Luftaustausch zum Keller verhindert werden soll, kann mit ringförmigem, geneigtem witterungsbeständigem Druckluftschlauch gearbeitet werden.

Der Lysimeterkeller muss die gleiche Temperatur wie der umgebende Boden haben.

#### 13.4.4.3. Wägbare Lysimeter

Bei wägbaren Lysimetern müssen die das Lysimeter umgebenden Materialien mechanisch hart sein – dürfen sich also weder plastisch noch elastisch verformen oder schwin-

gen. Die Fundamente sind entsprechend massiv auszubilden. Aus messtechnischen Gründen ist eine Dreipunktauflagerung sinnvoll. Um bei einem Bruttogewicht von 6000 kg eine Auflösung von 25 g zu erreichen, ist eine marktverfügbare Präzisionsmesstechnik (Fig. 13.7) einzusetzen. Dabei sind die parallele Erfassung von Feuchte und Temperatur sowie Luftdruck aus kompensatorischen Gründen nötig. Sämtliche Zuleitungen wie Sondenkabel, Sickerwasserschläuche müssen kraftfrei über kardanische Aufhängungen zugeführt werden. Dichtungen, die das Lysimeter mit dem Köcher/Gebäude verbinden, dürfen keine Vertikalkräfte übertragen.

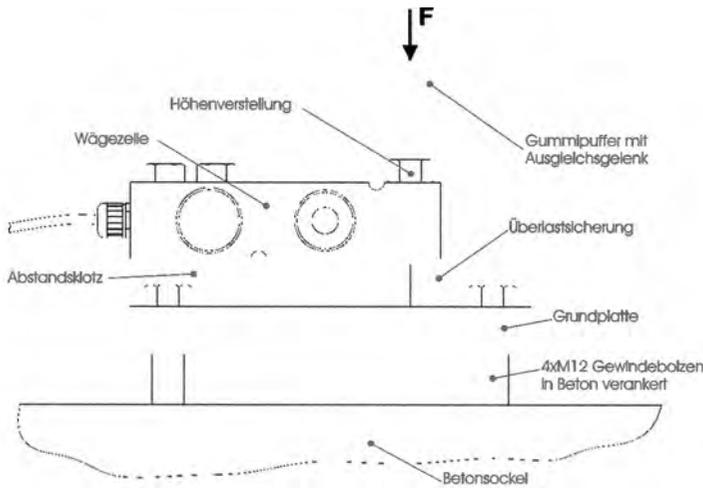


Fig. 13.7: Wägezelle.  
Weighing box.

### 13.4.5. Tracerversuche

Für radioaktive Tracerversuche oder kontaminierte Lysimeter sind die entsprechenden Strahlenschutz oder Gefahrstoffverordnungen zu beachten. Beim Einsatz von Bromid als Tracer sollte beachtet werden, dass ionenselektive Nitratsensoren extrem quersensitiv auf Bromid reagieren und damit nicht mehr eingesetzt werden können. Grundsätzlich werden Tracerversuche zur Quantifizierung der Stoffverlagerung und Sickergeschwindigkeit eingesetzt und liefern damit wertvolle Hinweise im Lysimeterbetrieb.

## 13.5. Anforderungen an den Betreiber

Die Anforderungen an den Betreiber sind vielfältig und umfassen die folgenden Punkte:

### 1. Bewirtschaftung

Die Bewirtschaftung der Lysimeterflächen und umgebenden Flächen müssen von einem auf die Lysimeter und die Untersuchung geschulten Mitarbeiter nach einem Bewirtschaftungsplan erfolgen. Der Zustand wird protokolliert und in regelmäßigen Zeitabständen fotografiert. Sämtliche das Lysimeter betreffende Aktionen werden in PC-gestützten Protokollbüchern dokumentiert.

## 2. Wartung

Die Wartung der Mess- und Anlagentechnik sowie der Analysetechnik erfolgt in festgelegten Intervallen und wird protokolliert. Diese ist als qualitätssichernde Maßnahme zwingend erforderlich.

## 3. Messwerte und Messergebnisse

Die Messwerte müssen zeitnah und fachkundig überprüft und freigegeben werden. Dazu erhält jeder Messwert neben Datum/Uhrzeit einen Zustandswert. Dieser differenziert nach fehlerhaft, freigegeben und beinhaltet als Schlüssel die Messtoleranz, den Manipulations- oder Veränderungszustand und den Bearbeiter. Die Messwerte sollten dringend in einer Datenbank verwaltet werden, damit diese nach festzusetzenden Suchkriterien für verschiedenste Untersuchungen zur Verfügung stehen. Für die Überprüfung der Messwerte und zur Freigabe der Messwerte als Messergebnisse sind Verifizierungstools und eine Visualisierungssoftware vorzusehen.

## 4. Bodenwasserproben

Die Bodenwasserprobenahme erfolgt unter Berücksichtigung der in Fig. 13.8 dargestellten Prozesskette und wird nach Gewinnungsverfahren, Entnahmestort und Datum protokolliert und eingelagert.

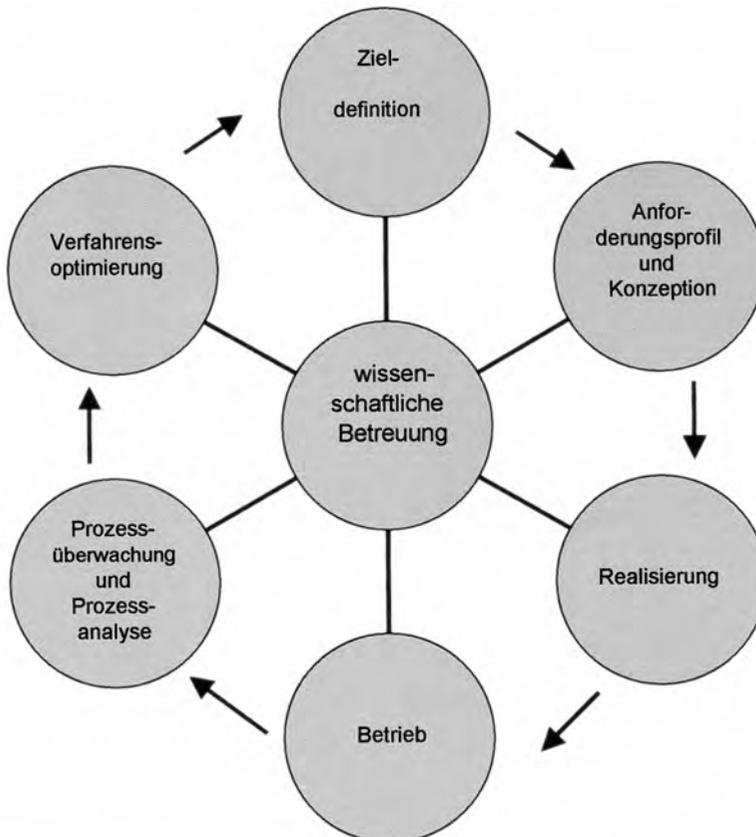


Fig. 13.8: Prozesskette Lysimeter.  
Multi-process lysimeter.

## **5. Schulung und Mitarbeitertraining**

Alle mit dem Lysimeterbetrieb befassten Mitarbeiter sollen im entsprechenden Arbeitsbereich routinemäßig geschult werden. Die Information der beteiligten Personen und Wissenschaftler über aktuelle und geplante Untersuchungsziele, Jahres- und Projektpläne erfolgt ergänzend.

## **6. Kosten und Management**

Sämtliche Aufgaben müssen finanziell bewertet und nach Arbeitsaufwand geplant und umgesetzt werden. Der dadurch entstehende administrative Aufwand sowie der Aufwand zur Führung von Protokollen und Pflege der Datenbank und Darstellung der Resultate sollte nicht unterschätzt werden.

## **13.6. Wissenschaftliche Betreuung und Qualitätssicherung**

Die Prozesskette bildet alle qualitätsrelevanten Bereiche der Prozesskette ab (Fig. 13.8). Diese sind generell zielorientiert. Dadurch ist es möglich, Interaktionen und Rückwirkungen hinsichtlich ihrer Effizienz zu bewerten und dadurch den Gesamtprozess zu optimieren. Für alle Prozessbereiche werden Arbeitsanweisungen erstellt und die Vorgehensweise protokolliert. Für kommende Projekte und neue Mitarbeiter ist eine eindeutige Historie der Anlage und der einzelnen Lysimeter wichtig. Auch aus dieser Sicht ist ein datenbankgestütztes Protokollsystem vorteilhaft. Die Kategorien können nach den Prozessbereichen – oder einer feineren Abstufung – eingerichtet werden.

## **13.7. Zusammenfassung**

Bei Lysimeteranlagen handelt es sich um langfristige Einrichtungen, die einerseits nach standardisierter Vorgehensweise errichtet und betrieben werden sollen, andererseits die Flexibilität für kurzfristige und neue Untersuchungsziele haben müssen. Daher sind bei der individuellen Planung allgemeine Anforderungen zu berücksichtigen, die sich am Untersuchungsgegenstand, den örtlichen, personellen und finanziellen Gegebenheiten orientieren. Schließlich ist für die Qualität des Lysimeters die gesamte Prozesskette von Zieldefinition, Planung, Bau, Betrieb, Prozessüberwachung und Prozessoptimierung zu betrachten, damit mit dem Lysimeter als universell nutzbarem Messsystem für alle mit Boden, Wasser und Pflanze befassten Untersuchungen hochwertige Ergebnisse erzielt werden können.

## **Dank**

Die Erfahrungswerte in diesem Beitrag stammen von verschiedenen, teilweise seit mehr als 15 Jahren laufenden Lysimeterprojekten. Gedankt sei an dieser Stelle unseren geschätzten Kunden, die mit unterschiedlichsten Vorgaben Lysimeterprojekte in Zusammenarbeit mit uns konzipiert und erstellt haben. Insbesondere gilt mein Dank der Österreichischen Arbeitsgruppe Lysimeter, der Arbeitsgruppe Experimentelle Umweltsimulation des Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft sowie dem Institut für Hydrogeologie und Geothermie der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH in Graz für die stets offene Zusammenarbeit. Die personell bedingte technische Sichtweise der dargestellten Zusammenhänge im wissenschaftlichen Kontext bitte ich zu entschuldigen.

## Zusammenfassung (A. LEIS)

Ursprünglich für die Untersuchung der Nährstoffbewegung vor mehr als 300 Jahren entwickelt, stellen Lysimeter heute ein unentbehrliches Hilfsmittel für die Untersuchung vieler Fragen des Bodenwasserhaushaltes und der damit zusammenhängenden Transport- und Verlagerungsvorgänge von gelösten und suspendierten Inhaltsstoffen des Bodenwassers dar. Der Begriff des Lysimeters, welcher streng genommen einen gestört oder ungestört mit Boden befüllten Behälter umschreibt, mit dem der Abfluss in vertikaler Richtung als Sickerwasser punktuell gemessen werden kann, wird heute oft auch im übertragenen Sinne gebraucht. Als Beispiele sind die Begriffe Naturlysimeter oder „virtuelles“ Lysimeter genannt. Auch mit Saugkerzen bestückte Bodenprofile werden verschiedentlich als „Lysimeter“ bezeichnet.

Nach wie vor eines der wichtigsten Anwendungsgebiete für Lysimeteruntersuchungen ist die Untersuchung der Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushaltes. Hier nehmen wägbare Lysimeter eine Ausnahmestellung ein, da sie die einzigartige Möglichkeit bieten, die Evapotranspiration direkt und sehr präzise zu messen. Steht hingegen die Ermittlung der Sickerwassermenge im Vordergrund, liefern oft auch schon konstruktiv wesentlich weniger aufwendige Kleinlysimeter oder Sickerwassersammler brauchbare Ergebnisse. Daneben werden für die Untersuchung des Bodenwasserhaushaltes in den letzten Jahren verstärkt bodenhydrologische Messprofile mit Sensoren für die Bestimmung von Bodentemperatur, -wassergehalt und Saugspannung eingesetzt. Diese teilweise auch als „virtuelle“ Lysimeter bezeichneten Messprofile gestatten unter Zuhilfenahme von numerischen Bodenwasserhaushaltsmodellen eine Berechnung der Sickerwassermenge, deren Genauigkeit allerdings sehr stark von der Güte der Inputparameter abhängt.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet für Lysimeteruntersuchungen ist die Frage des Stofftransportes und der Stoffumsetzungen in der ungesättigten Zone. Auch hierfür bieten Lysimeter die Möglichkeit des Zugriffs auf die im Sickerwasser enthaltenen Stoffe. Aufgrund der räumlichen Heterogenität des Bodens erhält man mit Lysimeteruntersuchungen jedoch stets nur punktuelle Informationen. Um die daraus entstehenden Unsicherheiten zu minimieren, empfiehlt es sich, die Versuchsanlage so auszuführen, dass Konzentrationsmessungen im Sickerwasser zeitlich und räumlich aufgelöst und mit mehreren Wiederholungen durchgeführt werden können. Wünschenswert sind in diesem Zusammenhang auch Weiterentwicklungen in der Onlinemesstechnik chemischer Parameter, die es gestatten, bei möglichst geringer Systemstörung einen integralen Messwert für den zu untersuchenden Porenbereich zu erhalten.

Generell gilt, dass Lysimeter, insbesondere wenn sie monolithisch befüllt wurden, von allen experimentellen Versuchssystemen mit Ausnahme des Feldversuches das System repräsentieren, das die Realität am besten abbildet. Allerdings ist zu beachten, dass Lysimeteruntersuchungen immer mit Fehlern behaftete Punktmessungen sind, wobei einerseits die Lysimeterfehler an sich, aber auch die Heterogenität natürlicher Böden eine entscheidende Rolle spielen.

- Es ist deshalb wichtig, Lysimetermessungen durch zusätzliche Untersuchungen zu begleiten, wobei sich besonders die Methoden der Tracerhydrologie bewährt haben, um komplexe Sachverhalte aufzutrennen und differenziert zu bewerten.
- Bei der Untersuchung des Wasserhaushaltes und der Stoffmigration in Lysimetern ist die Kenntnis der hydraulischen Parameter (Wassergehalt, Saugspannung) und der Art des Sickerwasserflusses (Matrix-, Bypassfluss) notwendig. Die Werte des

Wassergehaltes und der Saugspannung müssen über die Lysimetererteufe in unmittelbarer Nähe bestimmt werden. Eine Trennung von Bypass- und Matrixflüssen kann durch eine Segmentierung des Lysimeterauslaufes erfolgen.

- Eine Überprüfung der Ergebnisse von Lysimetermessungen mit anderen unabhängigen Verfahren ist sinnvoll und sollte nach Möglichkeit immer durchgeführt werden.
- Für die Kalibrierung und Validierung von physikalisch basierten Modellen sind Lysimeteruntersuchungen unverzichtbar, setzen aber ein sehr genaues Arbeiten voraus.
- Eine direkte Übertragung von Lysimeterergebnissen in die regionale Skala auf interpretativem Weg ist aufgrund der angeführten Punkte praktisch nicht möglich. Hier bieten aber numerische Modelle, die auf der Grundlage von fachkundig durchgeführten Lysimeterexperimenten kalibriert wurden, eine vielversprechende Möglichkeit zur Regionalisierung von Grundwasserneubildung und Stoffbefrachtung.

Neben den klassischen Einsatzgebieten werden Lysimeter zunehmend auch für neue Fragestellungen eingesetzt, z. B. als Flussbettlysimeter zur Abschätzung der Sickerverluste aus einem Flussbett.

Auch für Untersuchungen mit radioaktiven Isotopen zum Transport sowie Verbleib von Xenobiotika und zum Transfer von Radionukliden im System Boden/Pflanze sind Lysimeter die Methode der Wahl, da nur in diesem Versuchssystem der Radioisotopeneinsatz möglich ist.

Ein weiteres relativ junges Anwendungsgebiet für die Lysimeterforschung ist der Bereich der Altlastensanierung. Hier gab es in der Vergangenheit nur relativ wenig Berührungspunkte. Neue Untersuchungen zeigen aber, dass Lysimeterstudien auch in diesem Bereich eine sehr wertvolle Ergänzung für herkömmliche Untersuchungsverfahren darstellen können.

Ebenfalls hohe Anforderungen an die Lysimetertechnik stellt der Einsatz von Lysimetern für die Untersuchung des Wasser- und Stoffhaushaltes rekultivierter Kippenböden. Bedingt durch stark saures, hoch mineralisiertes Boden- und Sickerwasser sind für den Lysimeterbau in diesem Bereich nur korrosionsfeste Materialien aus Kunststoff verwendbar, Edelstahl sollte vermieden werden.

Abschließend seien stellvertretend für die Fülle an Einzelergebnissen einige prinzipielle Erfahrungen für den Bau und Betrieb von Lysimetern genannt:

- Die Zylinderform wird heute generell für Lysimeterkörper bevorzugt, weil zylindrische Lysimeter Spannungen besser auffangen als Kastenlysimeter.
- Der Einsatz von Monolithlysimetern ist generell gestört befüllten Lysimetern vorzuziehen, da erstere die natürliche Bodenbeschaffenheit besser repräsentieren. Eine gestörte Befüllung ist nur bei Sand- und gröberen Böden legitim; Monolithe sollen unbedingt eingesetzt werden, wenn Matrix- und Makroporenfluss beobachtet werden sollen.
- Sofern Lysimeter verfüllt werden, darf die Rückverdichtung nur durch natürliches Quellen und Schrumpfen erfolgen. Bei Rückverdichten mit Rüttlern treten an der jeweiligen Verdichtungsoberfläche extreme Dichten und Versiegelungseffekte auf, welche die Fließbedingungen natürlich gelagerter Böden stark verfälschen können.
- Um Oaseneffekte zu vermeiden, sind Lysimeter unbedingt in den umgebenden Pflanzenbestand einzubinden, wengleich unterschiedliche Wuchshöhen teilweise unvermeidbar sind.
- Ob Sickerwasser mittels Freiauslauf oder Unterdruck gewonnen werden soll, ist in Abhängigkeit von der Bodenart und der jeweiligen fachlichen Fragestellung zu entscheiden.

- Der Einbau von Sonden in skelettreiche Böden soll generell zusammen mit dem aus den Bohrlöchern entnommenen Bodenmaterial erfolgen, wobei zu empfehlen ist, größere Steine vorher zu entfernen.
- Lysimeterplanung, -errichtung und laufende Wartung brauchen neben einer angemessenen Budgetierung sowohl eine kompetente fachliche Betreuung als auch eine professionelle technische Betreuung.

Einen guten Überblick über die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Lysimeterforschung bietet die Österreichische Arbeitsgruppe Lysimeter. Sie versteht sich als interdisziplinäre Plattform für Wissenschaftler aus den Bereichen der Hydrologie, der Hydrographie, der Hydrogeologie, der Bodenkunde sowie der Land- und Forstwirtschaft.

## Literatur

- ABDULRAZZAK, M. J. & H. J. MOREL-SEYTOUX (1983): Recharge from an ephemeral stream following wetting front arrival to water table.– *Water Resources Research*, **19/1**, 194–200, Washington D.C. (Am. Geophys. Union).
- AG BODEN, KA 4 (1994): *Bodenkundliche Kartieranleitung*.– 4. Aufl., 392 S., 33 Abb., 91 Tab., Hannover.
- ANDERSON, J. P. E. (1975): Einfluß von Temperatur und Feuchte auf Verdampfung, Abbau und Festlegung von Diallat im Boden.– *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **7**, 141–146, Weinheim.
- BAEV (1991): *Österreichische Karte 25 V, Aspang Markt, Kartenblatt 106*.– Bundesamt für Eich und Vermessungswesen, Wien.
- BAUMGARTL, T. (2001): „Wie homogen sind künstlich befüllte Lysimeter“.– Bericht der BAL über die 9. Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24.–25. April 2001, 139–140, Gumpenstein.
- BECKMANN, T., M. KÜCKE, K. HASENPUSCH & H. J. ALTEMÜLLER (1992): Einbaubedingte Gefügeänderungen in der Bodenzone um keramische Saugkerzen.– *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, **155**, 247–250, ISSN 1436-8730.
- BEIER, C. & K. HANSEN (1992): Evaluation of porous cup soil-water samplers under controlled field conditions: comparison of ceramic and PTFE cups.– *J. Soil. Sci.*, **43/2**, 261–271, ISSN 0022-4588.
- BILO, M. (1991): Untersuchungen zum Transfer des durch den Reaktorunfall von Tschernobyl abgelagerten Radiocäsium vom Boden in die Pflanze.– Diss., Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 114 S., Tübingen.
- BÖHM, K. (1996): Erste Ergebnisse der Sickerwasseranalysen.– Bericht der BAL über die 6. Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ vom 16.–17. April 1996, 47–53, Gumpenstein.
- BÖHM, K. & J. HÖSCH (1997): Anlagenzustand der Lysimeterstation Hirschstetten am Beispiel einzelner Parameter.– Bericht der BAL über die 7. Lysimetertagung „Lysimeter und nachhaltige Landnutzung“ vom 7.–9. April 1997, 141–145, Gumpenstein.
- BÖHM K. & J. HÖSCH (2000): Der Einfluss von Anbau- und Umbruchzeitpunkten einer Winterzwischenfrucht auf die Wasserversorgung des Bodens.– *VDLUFA-Schriftenreihe*, **55/2**, 140–144, Darmstadt.
- BÖHM K. & J. HÖSCH (2001a): Zwischenfruchtanbau als Instrument der Stoffkonservierung.– Bericht der BAL über die 9. Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24.–25. April 2001, 51–56, Gumpenstein.
- BÖHM K. & J. HÖSCH (2001b): Potentiale des Zwischenfruchtanbaues am Beispiel der Stickstoffdynamik im Lysimeterversuch.– *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, **96, II**, 397–398, Oldenburg.
- BÖHM, K., J. HÖSCH, & M. DACHLER (1997): Lysimeteranlage Hirschstetten/Wien – Konzeption – Aufgaben – Ziele.– *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, **85, II**, 843–846, Oldenburg.

- BRUMHARD, B. & F. FÜHR (1992): Verhalten von [2,6-<sup>14</sup>C]Clopyralid (Lontrel) in einer sandigen Pseudogley-Braunerde bei Nachaufspritzung zu Zuckerrüben.– Unveröff. interner Bericht des Institutes für Radioagronomie IRA 7/92, Forschungszentrum Jülich GmbH, 95 S., Jülich.
- BUNDESANZEIGER (2001): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV).– Köln (Bundesanzeiger Verlag).
- CEPUDER, P. (1993): Versuchsergebnisse von Kleinlysimetern an unterschiedlichen Standorten.– Bericht der BAL über die 3. Gumpensteiner Lysimetertagung „Lysimeter und ihre Hilfe zur umweltschonenden Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen“ vom 20.–21. April 1993, 35–48, Gumpenstein.
- CEPUDER, P. (1994): Lysimeter in Österreich.– Bericht der BAL über die 4. Lysimetertagung „Übertragung von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftlich genutzte Flächen und Regionen, 19.–20. April 1994, 125–126, Gumpenstein.
- CEPUDER, P. & H. SUPERSPERG (1991): Erfahrungen mit der Lysimeteranlage Groß-Enzersdorf.– Bericht der BAL über die Lysimetertagung „Art der Sickerwassergewinnung und Ergebnisinterpretation“ vom 16.–17. April 1991, 25–36, Gumpenstein.
- CEPUDER, P., Ch. SAILER & M. TULLER (1992): Feldmeßstellen zur Erfassung des Nitrataustrages aus landwirtschaftlich genutzten Flächen.– Die Bodenkultur, **43/4**, 295–306, Wien.
- CEPUDER, P., M. TULLER & M. K. SHUKLA (1997): Eignung von Sickerwassersammlern zur Bestimmung der Grundwasserneubildung.– Bericht der BAL über die 7. Lysimetertagung „Lysimeter und nachhaltige Landnutzung“ vom 7.–9. April 1997, 11–16, Gumpenstein.
- CHENG, H. H. & W. C. KOSKINEN (1986): Processes and factors affecting transport of pesticides to ground water.– In: GARNER, R. W. Y., R. C. HONEYCUTT & H. N. NIGG (Hrsg., 1986): Evaluation of Pesticides in Ground Water, ACS-Symposium Series **315**, 2–13, Washington D.C.
- CORWIN, D. L. (2000): Evaluation of a simple lysimeter-design modification to minimize sidewall flow.– Journal of Contaminant Hydrology, **42**, 35–49.
- DACHLER, M. (1992): Was können Krumenlysimeter?.– Bericht der BAL über die 2. Lysimetertagung „Praktische Ergebnisse aus der Arbeit mit Lysimetern“ vom 28.–29. April 1992, 33–38, Gumpenstein.
- DACHLER, M. (1996): Entstehungsgeschichte und Konzeption der Lysimeteranlage Hirschstetten.– Bericht der BAL über die 6. Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ vom 16.–17. April 1996, 27–32, Gumpenstein.
- DE BEYER, T. (1996): Hydrologische und geotechnische Untersuchungen einer verlaufsgesteuert horizontal injizierten Barriere mit Montanwachsanteil.– Unveröff. Diplomarbeit Teil 1, Lehrstuhl für Angew. Geol. der Univ. Karlsruhe, 68 S., Karlsruhe.
- DEYHLE, C. (1995): Die Lysimeteranlage Koblenz-Niederwerth – Aufbau, Meßwertverarbeitung und erste Ergebnisse zur Verdunstungsbestimmung.– Dtsch. Gewässerkd. Mitt., **39**, 49–57, Koblenz.
- DILLON, P. J. & J. A. LIGGETT (1983): An ephemeral stream-aquifer interaction model.– Water Resources Research, **19/3**, 621–626, Washington D.C. (Am. Geophys. Union).
- DUKE, H. R. & H. R. HAISE (1973): Vacuum extractors to assess deep percolation losses and chemical constituents of soil water.– Soil Sci. Soc. Am. J., **37**, 963–964, ISSN 0361-5995.
- DUST, M. (1995): Vergleich von Resultaten eines zweijährigen Lysimeterexperimentes zu Abbau und Transport von Clopyralid im Boden mit Ergebnissen der Simulationsrechnungen von WAVE und PELMO.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 154 S., Bonn.
- DVWK (1980): Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern.– DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, **114**, 1–45, Frankfurt/M. (Paul Parey, ISBN 3-490-11497-3).
- DVWK (1990): Gewinnung von Bodenwasserproben mit Hilfe der Saugkerzen-Methode.– DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, **M213**, 1–14, Frankfurt/M. (Paul Parey, ISBN 3-490-31797-1).
- EDER, G. (1991): Stickstoff- und Phosphoraustrag unter Dauergrünland, ermittelt in Lysimetern.– Bericht der BAL über die Lysimetertagung „Art der Sickerwassergewinnung und Ergebnisinterpretation“ vom 16.–17. April 1991, 45–53, Gumpenstein.
- EDER, G. (1999): Stickstoffausträge unter Acker- und Grünland, gemessen mit Schwerkraftlysimetern und Sickerwassersammlern.– Bericht der BAL über die 8. Lysimetertagung „Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft“ vom 13.–14. April 1999, 93–99, Gumpenstein.

- EVERS, C. (1993): Konzeption, Konstruktion und Validierung einer Applikationsspritze zur homogenen Ausbringung von radioaktiv markierten Spritzmittelbrühen auf Boden- und Pflanzenoberflächen.– Unveröff. interner Bericht des Institutes für Radioagronomie IRA 6/93, Forschungszentrum Jülich GmbH, 99 S., Jülich.
- FANK, J. (1999): Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefrachtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich).– Beiträge zur Hydrogeologie, 49/50, 101–388, Graz.
- FANK, J. (2001): Tracer investigations at the research station “Wagna” (Leibnitzer Feld, Austria) to detect the role of the unsaturated zone for groundwater protection.– In: SEILER, K. P. & S. WOHNLICH (Hrsg., 2001): New Approaches Characterizing Groundwater Flow.– Proceedings of the XXXI IAH International Association of Hydrogeologists Congress Munich, Germany, 10–14 September 2001, Vol. 1, 55–58, Munich/Lisse (Swets & Zeitlinger), Lisse/Abingdon/Exton (Pa)/Tokyo (A.A.Balkema Publishers).
- FANK, J. (2001b): Wasser- und Nitratbilanz des westlichen Leibnitzer Feldes.– Bericht der BAL über die 9. Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24.–25. April 2001, 97–100, Gumpenstein.
- FEICHTINGER, F. (1992): Erste Erfahrungen beim Einsatz eines modifizierten Feldlysimeters.– Bericht der BAL über die 2. Lysimetertagung „Praktische Ergebnisse aus der Arbeit mit Lysimetern“ vom 28.–29. April 1992, 59–62, Gumpenstein.
- FEICHTINGER, F. (1993): Das Lysimeter: Lern-, Beurteilungs- und Entscheidungshilfe in Umweltfragen.– Bericht der BAL über die 3. Lysimetertagung „Lysimeter und ihre Hilfe zur umweltschonenden Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen“ vom 20.–21. April 1993, 15–19, Gumpenstein.
- FEICHTINGER, F. (1999): Reduzierte Grundwasserbefrachtung durch veränderte landwirtschaftliche Bodennutzung im NÖ. Alpenvorland.– Bericht der BAL über die 8. Lysimetertagung „Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft“ vom 13.–14. April 1999, 121–123, Gumpenstein.
- FEICHTINGER, F. & E. STENITZER (1995): Die Auswirkungen veränderter Klima-, Boden- und Bewirtschaftungsdaten auf die Nitratdynamik in der ungesättigten Zone – modellmäßige Sensitivitätsanalyse.– Bericht der BAL über die 5. Lysimetertagung „Stofftransport und Stoffbilanz in der ungesättigten Zone“ vom, 25.–26. April 1995, 111–118, Gumpenstein.
- FENT, G. (1992): Lysimeterversuche zum Abbau- und Verlagerungsverhalten des herbiziden Wirkstoffes Amidosulfuron in verschiedenen Böden mit besonderer Berücksichtigung des Nachbarverhaltens unter Einbeziehung von Gewächshausuntersuchungen.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 115 S., Bonn.
- FETTWEIS, U. (2001): Vergleichende Untersuchungen zu Aufnahme- und Verlagerungsverhalten von <sup>14</sup>C-markierten Nitrifikationsinhibitoren in Lysimetern mit ungestörten Bodenmonolithen einer schwach pseudovergleyten sauren Braunerde.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 200 S., Bonn.
- FÜHR, F., W. STEFFENS, W. MITTELSTAEDT & B. BRUMHARD (1991): Lysimeter experiments with <sup>14</sup>C-labelled pesticides – an agroecosystem approach.– In FREHSE, H. (Hrsg., 1991): Pesticide Chemistry, VCH, 37–48, Weinheim.
- FÜHR, F., R. J. HANCE, J. R. PLIMMER & J. O. NELSON (1998): The Lysimeter Concept: ACS Symposium Series 699.– American Chemical Society, 163–176, Washington D.C.
- GATZWEILER, E. (1994): Das Langzeitverhalten der Herbizidwirkstoffe Chloridazon und 2,4-DP-P nach Praxisanwendung in zwei verschiedenen Böden der Bundesrepublik Deutschland.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 177 S., Bonn.
- GERZABEK, M. H. (1991): Die Lysimeteranlage des österreichischen Forschungszentrums Seibersdorf. Konzeption und Zielsetzung.– Bericht der BAL über die Lysimetertagung „Art der Sickerwassergewinnung und Ergebnisinterpretation“ vom 16.–17. April 1991, 63–69, Gumpenstein.
- GERZABEK, M. & A. KRENN, (1996): Errichtung der Lysimeteranlage Hirschstetten.– Bericht der BAL über die 6. Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ vom 16.–17. April 1996, 33–40, Gumpenstein.
- GIESLER, R., U. S. LUNDSTRÖM & H. GRIP (1996): Comparison of soil solution chemistry assessment using zero-tension lysimeters or centrifugation.– European Journal of Soil Science, 47/3, 395–405, ISSN 1351-0754.

- GROSSMANN, J., K.-E. QUENTIN & P. UDLUFT (1987): Sickerwassergewinnung mittels Saugkerzen – eine Literaturstudie.– Z. Pflanzenernähr. Bodenk., **150**, 258–262, ISSN 1436-8730.
- HANCE, R. & F. FÜHR (1992): Methods to study fate and behaviour of pesticides in the soil.– In: FÜHR, F. & R. J. HANCE (Hrsg., 1992): Lysimeter Studies of the Fate of Pesticides in the Soil.– BCPC Monograph, No. **53**, 9–18, Farnham.
- HANSPEL, M. (1986): Vergleichende Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Ergebnissen aus standardisierten Gefäß- und Lysimeterversuchen auf reale Feldbedingungen am Beispiel der Rückstandssituation in Pflanzen nach Spritzung von Goltix und Tribunil.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 218 S., Bonn.
- HARTGE, K. H. & R. HORN (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden.– 3. Aufl., 174 S., Stuttgart (Enke, ISBN 3 432 82123 9).
- HEADLY, J. V., J. R. LAWRENCE, B. N. ZANYK & P. BROOKS (1994): Transformation of the herbicide Diclofop-Methyl in a large-scale physical aquifer model.– Water Poll. Res. Jour. Can., **29**, 557–569, Burlington, Canada.
- HEITMANN-WEBER, B. (1992): Untersuchungen zu Abbau, Bindung und Verlagerung von Atrazin und Desethyl-Atrazin in einer Pseudogley-Braunerde im Vergleich zu einer Parabraunerde – Labor- und Lysimeterversuche nach praxisgerechter Applikation zu Mais.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 139 S., Bonn.
- HENZE, G. (1999): Umweltdiagnostik mit Mikrosystemen.– Wiley-VCH, ISBN 3-527-29846-0.
- HILDMANN, E. (1993): Braunkohlenbergbau und Landschaftseingriffe – neue Orientierung für die Folgelandschaft.– Ber. Z. Dt. Landeskunde, **1**, 55–56, Trier.
- HÖSCH, J. (1996): Erste Erfahrungen mit der Lysimeteranlage Hirschstetten.– Bericht der BAL über die 6. Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ vom 16.–17. April 1996, 55–58, Gumpenstein.
- HOLZMANN, H. (2000): Numerische Modellierung des Infiltrationsprozesses mittels HYDRUS-2D.– Interner Arbeitsbericht, 20 S., IWHW-BOKU, Wien.
- HOLZMANN, H. & B. WAKONIG (2001): Direct measurements of surface water and groundwater interactions by means of a riverbed lysimeter.– In: HOEBEN R., Y. VAN HERPE & F. P. DE TROCH (Hrsg., 2001): Proceedings of the Conference and Eighth General Assembly of the European Network of Experimental and Representative Basins „Monitoring and Modelling Catchment Water Quantity and Quality“, September 27–29, Ghent, Belgium.– ERB 2000 Proceedings, Ghent.
- HOLZMANN, H., V. KURAZ, H. P. NACHTNEBEL & B. WAKONIG (2001): Comparison and reliability of different techniques for riverbed infiltration measurements.– Slov. Journal of Hydrology and Hydrodynamics, Bratislava.
- HRADETZKY, R. (1999): Wasser- und Stoffbilanzen unterschiedlich lange vorgelagerter Mistmieten auf freier Ackerfläche (Oberes Glantal/Kärnten).– Bericht der BAL über die 8. Lysimetertagung „Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft“ vom 13.–14. April 1999, 151–152, Gumpenstein.
- HURLE, K. (1982): Untersuchungen zum Abbau von Herbiziden in Böden.– Acta Phytomedica, **8**, Beihefte zur Phytopathologischen Zeitschrift, Berlin/Hamburg (Paul Parey).
- JOHNSON, D. W., R. F. WALKER & J. T. BALL (1995): Lessons from Lysimeters: Soil N release from disturbance compromises controlled environment study.– Ecol. Applic. **5**, 395–400, Washington D.C.
- KALERIS, V. (1986): Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalen Grundwassermodellen.– Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, **62**, 137 S., Wien (Eigenverlag).
- KASTANEK, F. (1995): Kritische Bemerkungen zur Verwendung von Lysimetern.– Bericht der BAL über die 5. Lysimetertagung „Stofftransport und Stoffbilanz in der ungesättigten Zone“ vom 25.–26. April 1995, 92–102, Gumpenstein.
- KLAGHOFER, E. (1991): Bodenphysikalische Aspekte bei der Erfassung von gelösten Stoffen mit Hilfe von Lysimetern.– Bericht der BAL über die Lysimetertagung „Art der Sickerwassergewinnung und Ergebnisinterpretation“ vom 16.–17. April 1991, 19–23, Gumpenstein.
- KLAGHOFER, E. (1994): Antworten auf die 7 Fragen an uns Lysimeterbetreiber.– Bericht der BAL über die 4. Lysimetertagung „Übertragung von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und Regionen“ vom 19.–20. April 1994, 5–7, Gumpenstein.

- KLOTZ, D. (1998): Aufbau der Lysimetersäulen und ihr Einbau in die GSF-Lysimeteranlage Neuherberg.– In: KLOTZ, D. & K.-P. SEILER (Hrsg., 1998): Die GSF-Lysimeteranlage Neuherberg.– GSF-Bericht, **23/98**, 25–31, Neuherberg.
- KLOTZ, D. (2001a): Untersuchungen zu Bypass-Flüssen an den GSF-Intensiv-Lysimetern.– Bericht der BAL über die 9. Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24.–25. April 2001, 165–167, Gumpenstein.
- KLOTZ, D. (2001b): Stoff- und Partikelaustrag aus den Lysimetern der GSF-Anlage Neuherberg.– Bericht der BAL über die 9. Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24.–25. April 2001, 169–171, Gumpenstein.
- KLOTZ, D. & K.-P. SEILER, (2000): Grundwasserneubildung unter vier unterschiedlichen, landwirtschaftlich genutzten Böden.– In: KLOTZ, D. & K.-P. SEILER (Hrsg., 2000): Methoden der Sickerwassermodellierung – Theorie und Praxis.– GSF-Bericht, **18/00**, 180–182, Neuherberg.
- KLOTZ, D., H. GAUDLITZ & G. HINREINER (2001): Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung – ein Vergleich von Labor- und Lysimeteruntersuchungen.– Bericht der BAL über die 9. Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24.–25. April 2001, 181–183, Gumpenstein.
- KNAPPE, S., U. HAFERKORN, J. MATTUSCH & R. WENNRICH (1999): Wasser- und Stoffflüsse in rekultivierten, langjährig landwirtschaftlich genutzten Kippenböden im Südraum Leipzig.– Bericht der BAL über die 8. Lysimetertagung „Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft“ vom 13.–14. April 1999, 49–52, Gumpenstein.
- KNAPPE, S., R. RUSSOW, H. RUPP, W. RICHTER & R. MEISSNER (2001): Untersuchungen des Wasser- und Nitrattransportes in argrarisch genutzten, rekultivierten Kippenböden mittels Multi-tracer-Einsatz in Lysimetern.– Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch., **96/2** (2001), 421–422, ISSN-0343-1071.
- KRENN, A.: Wasserspannungskurven der Lysimeterböden des BFL mit der Drucktopfmethode.– Unveröffentlicht, Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, ARCS, Wien.
- KRENN, A. (1997): Die universelle Lysimeteranlage Seibersdorf – Konzeption.– Bericht der BAL über die 7. Lysimetertagung „Lysimeter und nachhaltige Landnutzung“ vom 7.–9. April 1997, 33–36, Gumpenstein.
- KRENN, A. & E. KLAGHOFFER (1996): Vergleich bodenphysikalischer Kennwerte in der Natur und im Lysimeter.– Bericht der BAL über die 6. Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ vom 16.–17. April 1996, 37–40, Gumpenstein.
- KUNTZE, H., G. RÖSCHMANN & G. SCHWERDTFEGER (1988): Bodenkunde.– 4. Aufl., Stuttgart (UTB Ulmer, ISBN 3-8001-2563-3).
- LAZIK, D. & B. MORGENEYER (1999): Durchflussmesszelle.– Deutsche Patentanmeldung, DPA München, 01. 06. 1999.
- LAZIK, D. & B. MORGENEYER (2000): SAMSON – automatisch arbeitendes Vielkanalprobenahme- und -Messsystem zur online-Fluiduntersuchung für den Labor- und Feldeinsatz.– Informationsmaterial des UFZ Leipzig-Halle GmbH.
- LENNARTZ, F., F. REINSTORF & U. KEESE (1997): Vergleichende bodenphysikalische Untersuchungen zwischen Lysimetern und ihren Herkunftsflächen am Beispiel von drei typischen Böden Mitteldeutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung; II. Mitteilung; Vergleich von Methoden zur Ermittlung bodenhydraulischer Kenngrößen anhand von Lysimeterdaten.– Modellierung des Sickerwassertransportes.– Arch. Acker-Pfl. Boden., **41**, 233–242, Berlin.
- LINNEMANN, V. (2002): Untersuchung des Transports von flüchtigen Kohlenwasserstoffen durch einen ungestörten Bodenkern in die Atmosphäre nach einer Kontamination des Grundwassers am Beispiel des Kraftstoffadditivs Methyl-tert-butylether (MTBE).– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 179 S., Bonn.
- MARQUES, R., J. RANGER, D. GELHAYE, B. POLLIER & Q. PONETTE (1996): Comparison of chemical composition of soil solutions collected by zero-tension plate lysimeter with those from ceramic-cup lysimeter in forest soil.– European Journal of Soil Science, **47/3**, 407–417, ISSN 1351-0754.
- MATTHÄUS, T. & N. ORD (1996): The Biopuster method – a new method for treatment of waste materials.– Environmental Protection Bulletin, **45**, 29–33, IChem, Rugby, UK.
- MEISSNER, R., H. RUPP, J. SEEGER & P. SCHONERT (1995): Influence of mineral fertilizers and different soil types on nutrient leaching: results of lysimeter studies in East Germany.– Land Degradation & Rehabilitation, **6**, 163–170, Chichester, West Sussex.

- MEISSNER, R., J. SEEGER & H. RUPP (1998): Lysimeter studies in East Germany concerning the influence of set aside of intensively farmed land on the seepage water quality.– *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **67**, 161–173, New York/Amsterdam/Tokyo/Singapore.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP & H. BALLA (1999): Assessing the impact of agricultural land use changes on water quality.– *Wat. Sci. Tech.*, **40/2**, 1–10, New York/Amsterdam/Tokyo/Singapore.
- MEISSNER, R., H. RUPP & M. SCHUBERT (2000): Novel lysimeter techniques – a basis for the improved investigation of water, gas and solute transport in soils.– *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **163** (6), 603–609, Weinheim.
- MEISSNER, R., H. RUPP & J. SEEGER (2001): Sickerwassermonitoring mit Hilfe von Lysimetern unterschiedlicher Bauart.– *Zbl. Geol. Paläont., Teil I*, H. 1/2, 33–50, Stuttgart.
- MÜLLER, J. (1996): Beziehungen zwischen Vegetationsstrukturen und Wasserhaushalt von Kiefern- und Buchenökosystemen.– *Mitteilungen der BFH*, Nr. **85**, Hamburg.
- MURER, E. (1995): Wassergüteefassungssysteme in der ungesättigten Bodenzone. Ergebnisbericht aus dem Grundwassersanierungs-Pilotprojekt „Obere Pettenbachrinne“, OÖ. Gewässer-verträgliche Landbewirtschaftung.– *Schriftenreihe des BAW*, **1**, 160–173, Wien.
- MURER, E. (2001): Der Beitrag von Lysimetermessungen zur Grundwassersanierung.– *Wasserland Steiermark*, Nr. **4/2001**, 22–24, Graz.
- MURER, E., S. BRANDSTETTER & A. NADLINGER (1996): Pilotprojekte zur Grundwassersanierung in Oberösterreich.– *Der Förderungsdienst*, Jg. **44**, H. **12/1996**, 410–413.
- MUSZINSKI, M. (1996): Trockene Deposition von Aerosolen aus einer simulierten Reaktor-Kernschmelze und Eintritt von darin enthaltenem <sup>137</sup>Cs und <sup>90</sup>Sr in die Nahrungskette.– *Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn*, 121 S., Bonn.
- NACHTNEBEL, H. P. & H. HOLZMANN (2001): Untersuchung der Abflußverhältnisse an der Leitha bei Nieder- und Mittelwasserführung.– *Unveröff. Endbericht des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau an den Auftraggeber, Universität für Bodenkultur, Wien*.
- NIEVERGELT, J. (1997): Lysimeterversuch 1981–1996: N-Auswaschung in Fruchtfolgen.– *Agrarforschung*, **4/5**, 209–212, Zürich/Reckenholz.
- OBERLÄNDER, H. E. & K. ROTH (1975): Die Umwandlung eines <sup>14</sup>C-markierten Düngers aus Gülle und Stroh im Boden.– *Bodenkultur*, **26**, 139–145, Wien.
- OECD (2000): „Guidance Document for the Performance of Out-door Lysimeter Studies“.– *OECD Richtlinie*.
- ÖNORM S 2072 (1990) Eluatklassen, Gefährdungspotential von Abfällen.– *Österreichisches Normungsinstitut, Wien*.
- POTSCHIN, M. (1999): Bodenwassergewinnung mittels Saugkerzen an extremen Standorten – Möglichkeiten und Grenzen.– *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, **162**, 193–199, ISSN 1436-8730.
- PRINTZ, H. (1995): Lysimeter- und begleitende Detailuntersuchungen zum Einfluss einer Maisstrohdüngung auf Abbau und Verlagerung des Herbizidwirkstoffs Methabenzthiazuron im Boden sowie zur Bedeutung des Co-Transportes unter Freilandbedingungen.– *Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn*, 179 S., Bonn.
- PÜTZ, Th. (1993): Lysimeterversuche zum Verlagerungsverhalten von Methabenzthiazuron und gelöstem organischen Kohlenstoff in einer Parabraunerde, Aufbau von zwei Klimamessstationen und Untersuchungen zur Validierung des Lysimetersystems.– *Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn*, 223 S., Bonn.
- RAMSPACHER, P. (1993): Erste Erfahrungen mit tensiometergesteuerten Unterdrucklysimetern zur Erstellung von Sickerwasserbilanzen (Lysimeterstation Wagna).– *Bericht der BAL über die 3. Lysimetertagung „Lysimeter und ihre Hilfe zur umweltschonenden Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen“ vom 20.–21. April 1993*, 67–72, Gumpenstein.
- RECHEIS, J. (1997): Lysimeter als Instrument in der landwirtschaftlichen Beratung.– *Bericht der BAL über die 7. Lysimetertagung „Lysimeter und nachhaltige Landnutzung“ vom 7.–9. April 1997*, 175–176, Gumpenstein.
- REINKEN, G. & F. FÜHR (1995): Ein Verfahren zur Überprüfung des Beizgrades von radioaktiv markierter Saatgutbeize auf Körneroberflächen im Rahmen von Lysimeterversuchen.– *Persönliche Mitteilung*.

- REINSTORF, F., S. KNAPPE, G. LAUDEL, R. MEISSNER, U. HAFERKORN & W. WALTHER (2001): Vergleichende Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt von rekultivierten und nicht-rekultivierten Kippenbodensubstraten des Braunkohlebergbaues (Lysimeterbeobachtungen).– Bodenschutz in einem vereinten Europa – Bodenkundlicher Kongress der DBG und ÖBG, 1.–9. September 2001, Wien.
- RIEHL-HERWIRSCH, G, P. CARNELL & M. HACKENBERG (1996): Diagenetische Inertisierung. Ein Immobilisierungsverfahren.– Kurzfassung des Endberichtes für die Präsentation 1996-09-01, Fa. Geinert, Katzelsdorf, Österreich.
- RODE, M. (1999): Quantification of Non-Point Source Pollution of Surface Waters.– In: River Basin Management – Challenge to Research.– UFZ-Bericht, Nr. 31/1999, 74–81, Leipzig.
- ROTH, D., R. GÜNTHER & S. KNOBLAUCH (1994): Technische Anforderungen an Lysimeteranlagen als Voraussetzung für die Übertragbarkeit von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftliche Nutzflächen.– Bericht der BAL über die 4. Lysimetertagung „Übertragung von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und Regionen“ vom 19.–20. April 1994, 9–21, Gumpenstein.
- ROTH, D., R. GÜNTHER & S. KNOBLAUCH (1994): Technische Anforderungen an Lysimeteranlagen als Voraussetzung für die Übertragbarkeit von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen.– Z. Bewässerungswirtschaft, 29/2, 194–216, ISSN 0049-8602.
- RUSSOW, R., S. KNAPPE, & U. HAFERKORN (1999a): Untersuchungen zum  $N_2O$ -Gehalt in der Bodenluft und zur  $N_2O$ -Emission sowie zum  $N_2O$ -Transport mit dem Sickerwasser an landwirtschaftlich genutzten Böden in Lysimetern.– Bericht der BAL über die 8. Lysimetertagung „Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft“ vom 13.–14. April 1999, 57–60, Gumpenstein.
- RUSSOW, R., S. KNAPPE & U. HAFERKORN (1999b): Vergleichende Untersuchung von  $N_2O$ -Gehalt in der Bodenluft und  $N_2O$ -Transport mit dem Sickerwasser an landwirtschaftlich genutzten Böden in Lysimetern.– Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch., 91/2, 867–870, ISSN-0343-1071.
- RUSSOW, R., S. KNAPPE & W. RICHTER (2001): Untersuchungen des Wasser- und Nitrattransportes in agrarisch genutzten, rekultivierten Kippenböden mittels Multitracer-Einsatz in Lysimetern.– Bericht der BAL über die 9. Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24.–25. April 2001, 89–92, Gumpenstein.
- SCHNÖDER, F. (1995): Das Verhalten von  $^{14}C$ -Fluoranthen und -Benzo(a)pyren sowie  $^{14}C$ -PCB 28 und -PCB 52 im Agrarökosystem – Lysimeterversuche mit einer Parabraunerde aus Löß.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 161 S., Bonn.
- SCHWABACH, H. & H. ROSENKRANZ (1996): Lysimeteranlage Hirschstetten – Instrumentierung und Datenerfassung.– Bericht der BAL über die 6. Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ vom 16.–17. April 1996, 41–45, Gumpenstein.
- SEEGER, J., R. MEISSNER & H. RUPP (1999) Langzeituntersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Düngung und Bewirtschaftung auf das Auswaschungsverhalten relevanter Kationen und Anionen.– UFZ-Bericht, Nr. 24/1999, 221–224, Leipzig.
- SEEGER, J., R. MEISSNER, H. RUPP, L. MÜLLER & F. EULENSTEIN (1999): Erfahrungen beim Einsatz von konservativen Tracern als Hilfsmittel zur Übertragung von Lysimeterergebnissen auf Freilandflächen.– GSF-Bericht, 01/99, 37–42, Neuherberg.
- SHEPHERD, M. A. & E. I. LORD (1996): Nitrate leaching from a sandy soil: the effect of previous crop and post-harvest soil management in an arable rotation.– J. Agr. Sci., 127, 215–229, Cambridge.
- SHEPHERD, M. A. & J. WEBB (1996): The effect of crop cover on aquifer recharge.– Bericht der BAL über die 6. Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ vom 16.–17. April 1996, 11–13, Gumpenstein.
- SEILER, K.-P. (1994): Barriere Boden.– Wasser, 33–39, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg.
- SEILER, K.-P., S. V. LOEWENSTERN & S. SCHNEIDER (2000): The role of bypass- and matrix flow in the unsaturated zone for groundwater protection.– In: O. SILILO (Hrsg., 2000): Groundwater: Past achievements and future challenges, 307–311, Rotterdam/Brookfield (A.A. Balkema).
- SIMUNEK, J., K. HUANG & M. Th. VAN GENUCHTEN (1998): The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0.– Research Report No. 144, 164 pp, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.

- SIMUNEK, J., M. SEJNA & M. T. VAN GENUCHTEN (1999): The HYDRUS-2D software package. User manual of the program.– U.S. salinity lab., Riverside California.
- STEFFENS, W. & J. WIENEKE (1974): Eine Spritztechnik zur Applikation kleiner Lösungsmengen auf Pflanzenorgane.– *Landwirtschaftliche Forschung*, **27**, 38–45, Berlin.
- STEFFENS, W., F. FÜHR, W. MITTELSTAEDT, H. FÖRSTEL & J. KLAES (1986): Tschernobyl-Unfall: Abschätzung der Aufnahme des abgelagerten Cs-137 und Sr-90 über die Wurzel. Verlagerung von Cs-137 und Sr-90 im Boden.– *Atomwirtschaft*, **XXXI**, 389–392, Düsseldorf.
- STEFFENS, W., F. FÜHR, W. MITTELSTAEDT, J. KLAES & H. FÖRSTEL (1988): Untersuchung des Transfers von <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co und <sup>54</sup>Mn vom Boden in die Pflanze und der wichtigsten, den Transfer beeinflussenden Bodenparameter.– *Berichte der Kernforschungsanlage Jülich*, Nr. **2250**, 121 S., Jülich.
- STEFFENS, W., W. MITTELSTAEDT, A. STORK & F. FÜHR (1992): The lysimeter station at the Institute of Radioagronomy of the Research Center Jülich GmbH (KFA), Germany.– In: FÜHR, F. & R. J. HANCE (Hrsg., 1992): *Lysimeter Studies of the Fate of Pesticides in the Soil*.– BCPC Monograph, No. **53**, 21–34, Farnham.
- STENITZER, E. (1988): Irrigation scheduling with gypsum blocks to save water and prevent leaching of nitrate.– *Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Regional Conference on Agricultural Water Management*, Vol. **4**, 379–392, Dubrovnic, Yugoslavia.
- STENITZER, E. & L. GASSNER: Bodentemperaturdaten 1997, 1998, 1999 aus dem Weinviertel.– Unveröffentlicht, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT), Petzenkirchen.
- STENITZER, E & L. GASSNER: Empirisch erhobene Wasserspannungsdaten aus dem pannonischen Raum.– Unveröffentlicht, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT), Petzenkirchen.
- STORK, A. (1995): Windkanalanlage zur Bestimmung gasförmiger Verluste von Umweltchemikalien aus dem System Boden/Pflanze unter praxisgerechten Bedingungen mit direkten luftanalytischen Methoden unter Nutzung der <sup>14</sup>C-Traceranalytik.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 399 S., Bonn.
- STORK, A., U. TRAUB-EBERHARD & F. FÜHR (Hrsg., 1991): Langzeitverhalten von Pflanzenschutzmitteln in Böden.– Unveröff. Bericht, 2. Lysimeter-Workshop vom 22. bis 23. 11. 1990 in Neustadt-Mußbach, Landes- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Weinbau und Gartenbau, 26 S., Neustadt-Mußbach.
- STORK, A., C. EVERS, W. MITTELSTAEDT & F. FÜHR (1994): A new sprayer for the homogeneous application of radioactive spray mixtures onto soil and plants in lysimeter experiments.– *Proceedings of the 8<sup>th</sup> IUPAC-Kongress "Pesticide Chemistry"*, Washington, 04–09 July 1994, 722 p., Washington.
- TEMMELE, R. (1996): Lysimeterforschung und Altlastensanierung in Österreich.– Bericht der BAL über die 6. Lysimetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes“ vom 16.–17. April 1996, 16–17, Gumpenstein.
- THEURETZBACHER, H. (1997): Makroporosität und präferentielle Sickerbewegung in der wasserungesättigten Zone des Kleineinzugsgebiets Höhenhansl, Pöllau.– Unveröff. Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität, Graz.
- THIELERT, W. (1984): Aufnahme und Nachlieferung von [benzol-U-<sup>14</sup>C]Triadimenol über die Karyopse und aus den Beizhöfen nach Saatgutbeizung von Wintergerste und Winterweizen mit einer Trockenbeizformulierung.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 165 S., Bonn.
- TOTH, J. D. & R. H. FOX (1998): Nitrate Losses from a Corn-Alfalfa Rotation: Lysimeter Measurement of Nitrate Leaching.– *J. Environ. Qual.*, **27/5**, 1027–1033, ISSN 0047-2425.
- TRÖLTZSCH, C.-M. (1995): Einfluß unterschiedlicher Bewässerungsverfahren und Wirkstoffaufwandmengen von [<sup>14</sup>C]Imidacloprid auf die Beizhofausbildung, die Aufnahme und Wirkung in Baumwollpflanzen nach Saatgutbeizung.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 231 S., Bonn.
- VAN DER KAMP, G. & R. SCHMIDT (1997): Monitoring of total soil moisture on a scale of hectares using groundwater piezometers.– *Geophys. Res. Letters*, **24**, 719–722, Washington D.C.
- VAUCLIN, M., D. KHANJI & G. VACHAUD (1979): Experimental and numerical study of a transient, two-dimensional, unsaturated-saturated water table recharge problem.– *Water Resources Research*, **15/5**, 1089–1101, Washington D.C. (Am. Geophys. Union).

- WEBSTER, C. P., M. A. SHEPHERD, K. W. T. GOULDING & E. LORD (1993): Comparisons of methods for measuring the leaching of mineral nitrogen from arable land.– *J. Soil. Sci.*, **44/1**, 49–62, ISSN 0022-4588.
- WEISE, E. (1996): Dokumentation der Lysimetersäulenentnahmestellen auf der Innenkippe im Braunkohlentagebau Espenhain.– Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Bereich Boden und Geologie, Freiberg/Sachs.
- WENDLING, U. (2001): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden.– *KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, **48/1**, 96–101, Hennef.
- WENZEL, W. W., R. S. SLETTEN, A. BRANDSTETTER, G. WIESHAMMER & G. STINGEDER (1997): Adsorption of trace metals by tension lysimeters: nylon membrane vs. porous ceramic cup.– *J. Environ. Qual.*, **26**, 1430–1434, ISSN 0047-2425.
- WESSEL-BOTHE, St., St. PÄTZOLD, Ch. KLEIN, G. BEHRE & G. WELP (2000): Adsorption von Pflanzenschutzmitteln und DOC an Saugkerzen aus Glas und Keramik.– *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, **163/1**, 53–56, ISSN 1436-8730.
- WGEV (1991): Wassergüte-Erhebungsverordnung.– Bundesgesetzblatt der Republick Österreich.
- WÜNSCHE, M. & J. THUM (1990): Bodensubstrate und Bodenentwicklung der landwirtschaftlich genutzten Flurkippe Espenhain.– *Arch. f. Naturschutz und Landschaftsforschung*, **4**, 217–229, Berkshire (Harword).
- WÜSTEMEYER, A. (2000): Abbau und Transport von Ethidimuron und Methabenzthiazuron in einer Parabraunerde – Beitrag zur Validierung des Lysimeterkonzepts.– Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 131 S., Bonn.
- YOUNG, M. M., P. J. WIERENGA & C. F. MACINO (1996): Large weighing lysimeters for water use and deep percolation studies.– *Soil Science*, **161**, 491–501, Berlin/Heidelberg/New York (Springer Verlag).
- ZELLER, A., K. ROTH & H. E. OBERLÄNDER (1966): Die Bildung von Huminsäuren aus <sup>14</sup>C-markierter Pflanzensubstanz im Boden.– *Naturwissenschaften*, **53**, 384 S., Berlin.
- ZOJER, H., P. RAMSPACHER & J. FANK (1991): Die kombinierte Lysimeteranlage Wagna.– Bericht der BAL über die Lysimetertagung „Art der Sickerwassergewinnung und Ergebnisinterpretation“ vom 16.–17. April 1991, 55–62, Gumpenstein.

## Summary (A. LEIS)

Originally lysimeters were developed more than 300 years ago for investigating the movement of nutrients in the soil zone. Today, lysimeters represent an essential tool for solving many questions concerning soil water balance and associated solute transport processes. A lysimeter is a container filled with disturbed or undisturbed soil by which outflow in vertical direction can be measured as infiltration water. In a broader sense this includes “virtual” lysimeter and natural lysimeter. Also, soil profiles equipped with suction cups are often described as lysimeter.

Assessment of the different components of the soil water balance is still one of the most important area of application of lysimeter studies. Here weighing lysimeters take a special position since they offer a unique possibility to determine the evapotranspiration directly and precisely. However, if the main purpose of the study is for determining the infiltration water quantity, the use of less expensive little lysimeters or infiltration water collectors is enough to obtain useful results. In addition, soil profiles equipped with sensors for measuring soil temperature, soil water content and soil water tension are used since some years for determining the soil water balance. These profiles, sometimes also described as “virtual” lysimeters, allow calculating the infiltration water quantity based on the use of numerical water balance models. The precision of the calculation, however, strongly depends on the quality of the input parameters.

Another important application area of lysimeter investigations is in the study of transport and fate of different substances in the unsaturated zone. Lysimeters offer a unique possibility to trace the substances on their way through the unsaturated zone. However, lysimeter investigations provide point information only and do not show the spatial heterogeneity of the soil condition. To mini-

mize the uncertainties arising from the point information, it is highly recommended to design the lysimeter facility in such a way that it allows time-resolved and spatially-resolved concentration measurements. It is also recommended to make some repetitions. There is also a need to develop online measurement systems for chemical parameters, providing an integral measurement in a porous system with a low disturbance of the soil system.

Besides real field test sites, lysimeter results closely reflect the real system particularly if monolithic lysimeters are used. However, it should be taken into account that lysimeter investigations are point measurements with a higher degree of uncertainty. The uncertainty results on the one hand from the lysimeter faults itself and from the heterogeneity of the unsaturated zone on the other. Therefore, it is important to supplement lysimeter measurements with additional investigations.

- Lysimeter studies should be supplemented by tracer experiments.
- Detailed knowledge of the hydraulic parameters (soil water tension and soil water content) and the different kinds of soil water movement (matrix flow, bypass flow) is necessary for the estimation of the water balance and of the solute transport in lysimeters. The water content and the water tension values will have to be determined through the lysimeter depth in the immediate vicinity. Separation of bypass and matrix flow can be done by segmentation of the lysimeter outlet.
- The results of lysimeter measurements should be confirmed by other independent methods.
- For the calibration and validation of physically based models lysimeter investigations are indispensable if they are done accurately.
- For reasons mentioned earlier, a direct transfer of lysimeter investigations to a regional scale is practically impossible. However, numerical models calibrated using lysimeter data with a good knowledge of the local situation offer a promising possibility for the regionalization of ground water recharge and the entry of pollutants.

Lysimeter are finding new areas of application, e.g. a riverbed lysimeter is used for estimating the infiltration from a riverbed. Lysimeters are well suited for the application of radioactive isotopes for determining the transport and the fate of Xenobiotika as well as for assessing the transfer of radionuclides in the soil-plant system.

Recently lysimeters have been used in abandoned waste disposal sites to evaluate the efficiency of different in situ remediation techniques. There were only relatively few links between lysimeter research and in situ remediation techniques in the past. Apparently, the first results from lysimeter investigations revealed important information that complement the conventional investigation methods.

Another new area of application of lysimeter technology is for the assessment of the water and solute balance in cultivated dump soils originating from mining landscapes. Because the soil in such landscapes is acidic and the leachate is highly mineralized and corrosive, in such cases plastic materials should be used for the construction of lysimeters; use of stainless steel should be avoided.

Finally, based on the results obtained from different lysimeter studies, the following conclusions can be drawn:

- The cylindrical form is today generally preferred, because cylindrical lysimeter adsorb tensions better than all other forms.
- Undisturbed monolith lysimeters are preferred because they closely represent the natural soil conditions. Disturbed lysimeters should be used only in sandy and coarse soils. To monitor matrix and bypass flow monolith lysimeters have to be used.
- Compaction of lysimeters should be done only by natural swelling and shrinking. Use of vibrators should be avoided as it leads to a strong compression of the sediments, ultimately resulting to distortion of the natural water flow conditions.
- To avoid oasis effects lysimeters have to be integrated into the surrounding plant, although the effect from the different heights of the plants is not avoidable.
- Decision on how infiltration water shall be obtained (by gravity or suction) has to be decided based on the soil type and the purpose of the study.
- In coarse soils the probes should be packed by the soil material taken from the drill holes. However, the bigger stones must be removed first.
- Planning, construction and regular maintenance of lysimeter facilities need appropriate scientific and a professional technical support. Of course, this requires an adequate budget.

The Austrian Lysimeter Study Group represents an interdisciplinary platform for scientists from the fields of e. g. hydrology, hydrography, hydrogeology, pedology, as well as agriculture and forestry. The group serves as a means of exchanging of ideas and experience on current developments in lysimeter research and attempts to disseminate innovative results.

Stichwörter: Lysimeter, Lysimeterbau, Schadstofftransport, Tracer, ungesättigte Zone  
Keywords: lysimeter, construction of lysimeters, contaminant migration, tracer, unsaturated zone



## Autorenverzeichnis

- Dipl.-Ing. Karin E. BÖHM, Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Abteilung Pflanzenernährung, Spargelfeldstraße 191, A-1226 Wien, Österreich. E-Mail: kboehm@bfl.at
- Dipl.-Ing. Dr. Peter CEPUDER, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 Wien, Österreich. E-Mail: h522t9@edv2.boku.ac.at
- Dr. Gerfried EDER, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, A-8952 Irdning, Österreich. E-Mail: Gerfried.eder@bal.bmlf.gv.at
- Univ.-Doz. Dr. Johann FANK, Institut für Hydrogeologie und Geothermie, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz, Österreich. E-Mail: johann.fank@joanneum.at
- Dipl.-Ing. Franz FEICHTINGER, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Pollnbergstraße 1, A-3252 Petzenkirchen, Österreich. E-Mail: ikt@baw.bmlf.gv.at
- Prof. Dr. Fritz FÜHR, Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre IV: Agrosphäre, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Deutschland. E-Mail: f.fuehr@fz-juelich.de
- Harald GAUDLITZ, GSF-Institut für Bodenökologie, D-85764 Neuherberg, Deutschland. E-Mail: gaudlitz@gsf.de
- Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Martin H. GERZABEK, ARC Seibersdorf research GmbH, A-2444 Seibersdorf, Österreich und  
Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur, Gregor-Mendel-Strasse 33, A-1180 Wien, Österreich. E-Mail: martin.gerzabek@arcs.ac.at
- Günter HINREINER, GSF-Institut für Hydrologie, D-85764 Neuherberg, Deutschland. E-Mail: hinreiner@gsf.de
- Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hubert HOLZMANN, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 Wien, Österreich. E-Mail: holz@edv2.boku.ac.at
- Dipl.-Phys. Dietmar KLOTZ, GSF-Institut für Hydrologie, D-85764 Neuherberg, Deutschland. E-Mail: klotz@gsf.de
- Dr. Siegfried KNAPPE, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenforschung, Theodor-Lieser-Straße 4, D-06120 Halle, Deutschland. E-Mail: knappe@bdf.ufz.de
- Dr. Andreas KRENN, ARC Seibersdorf research GmbH, A-2444 Seibersdorf, Österreich. E-Mail: andreas.krenn@arcs.ac.at
- Dr. Albrecht LEIS, Institut für Hydrogeologie und Geothermie, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz, Österreich. E-Mail: albrecht.leis@joanneum.at
- Prof. Dr. Ralph MEISSNER, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenforschung, Lysimeterstation Falkenberg, Dorfstraße 55, D-39615 Falkenberg, Deutschland. E-Mail: meissner@lysi.ufz.de

- Dipl.-Ing. Werner MITTELSTAEDT, Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre IV: Agrosphäre, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Deutschland. E-Mail: w.mittelstaedt@fz-juelich.de
- O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hans P. NACHTNEBEL, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 Wien, Österreich. E-Mail: nacht@edv2.boku.ac.at
- Dr. Thomas PÜTZ, Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre IV: Agrosphäre, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Deutschland. E-Mail: t.puetz@fz-juelich.de
- Ing. Johann RIESING, ARC Seibersdorf research GmbH, A-2444 Seibersdorf, Österreich. E-Mail: johann.riesing@arcs.ac.at
- Dr. Holger RUPP, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenforschung, Lysimeterstation Falkenberg, Dorfstraße 55, D-39615 Falkenberg, Deutschland. E-Mail: rupp@lysi.ufz.de
- Dipl.-Chem. Juliane SEEGER, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenforschung, Lysimeterstation Falkenberg, Dorfstraße 55, D-39615 Falkenberg, Deutschland. E-Mail: seeger@lysi.ufz.de
- Dipl.-Ing. Georg VON UNOLD, UMS GmbH, Gmundnerstraße 37, D-81379 München, Deutschland. E-Mail: gvu@ums-muc.de
- Prof. Dr. Harry VERECKEN, Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre IV: Agrosphäre, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Deutschland. E-Mail: h.verecken@fz-juelich.de