

# Spezifische Anwendungen in der Lysimeterforschung

Bernhard Wimmer<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag soll ein Überblick gegeben werden, in welchen Forschungsbereichen neben der Land- und Forstwirtschaft sowie neben allgemeinen hydrologischen Fragestellungen der Einsatz der Lysimetrie sich als vorteilhaft erwiesen hat. Breite Anwendung findet die Lysimetrie vor allem in der Abfallwirtschaft und der Altlastenforschung wie z.B. in der Charakterisierung abgelagerter Abfälle, für Eignungstests von Oberflächenabdeckungen von Deponien und für die Gefährdungsabschätzung von Altlasten sowie die Entwicklung von in-situ Verfahren für die Altlastensanierung. Die hohe Anzahl der in diesen Bereichen durchgeführten Untersuchungen lässt den Rückschluss zu, dass in Zukunft mit einem zunehmenden Einsatz der Lysimetrie in diesen Forschungsbereichen zu rechnen ist.

*Schlagwörter:* Altlasten, Abfälle, Deponie, Oberflächenabdeckung, Wasserhaushaltsschicht

## Summary

Initially lysimeters were applied in agricultural and hydrologic research areas. Here an overview is given how lysimeter experiments were adopted for the investigation of the behaviour of pollutants in landfills and contaminated land. Lysimeter research is also widely used to compare alternative with conventional cover systems of landfills and to carry out groundwater risk assessments at contaminated sites. Taking into account the high number of experiments in these research areas it is expected that in future the application of lysimeter research will still increase for these specific purposes.

*Keywords:* Contaminated land, waste, alternative landfill cover, evapotranspiration layer

## Einleitung

Während in der Lysimetrie ursprünglich landwirtschaftlich-ökonomische Aspekte wie die Erforschung eines effizienten Düngemitelesatzes oder einer optimalen Bewässerungssteuerung im Vordergrund standen, erfolgte in den letzten Jahrzehnten eine Entwicklung der Lysimeterforschung zu Fragestellungen des Umweltschutzes, hauptsächlich des Grundwasserschutzes und der Bodenbelastung, hin. Dabei werden laut LANTHALER (2004) fast zwei Drittel der Lysimeter für ackerbauliche Fragestellungen, beinahe ein Viertel für die Grünlandforschung und ca. 1 % für forstwirtschaftliche Fragestellungen eingesetzt. Neben diesem großen Anwendungsgebiet der Lysimetrie in der Landwirtschaft kann ein weiteres Einsatzgebiet der Lysimeterforschung identifiziert und zusammengefasst werden, das sich mit abfallwirtschaftlichen und altlastenspezifischen Fragestellungen beschäftigt. Es geht dabei vor allem darum, das Verhalten von anorganischen und organischen Schadstoffen in Umweltsystemen, die durch Abfälle und Kontaminationen hervorgerufen wurden, zu charakterisieren, negative Auswirkungen und Risiken dieser Stoffe auf Boden, Grundwasser, Vegetation und schlussendlich auf den Menschen zu erkennen und Strategien zu entwickeln, bereits aufgetretene Schäden zu sanieren bzw. einen Beitrag zu leisten, um diesbezüglich zukünftige Risiken zu vermeiden. Das Ziel dieses Beitrages ist es, einen Überblick über diese „spezifischen“ Anwendungen der Lysimetrie außerhalb der land- und forstwirtschaftlichen Forschung zu geben

und beispielhaft einige Erkenntnisse und Forschungsergebnisse aus diesen Bereichen aufzuzeigen. Selbstverständlich treten auch Überschneidungen dieses Bereiches mit den Themen der landwirtschaftlichen Forschung auf. So kann z.B. das Aufbringen von Klärschlämmen oder Abwässern auf landwirtschaftlich genutzten Böden einerseits als Entsorgung von Abfällen oder andererseits als Düngemaßnahme betrachtet werden. In diesem Beitrag wird versucht, diese Themen aus dem Blickwinkel der Abfallwirtschaft und deren Folgen auf die Umwelt zu betrachten. Ein häufiges Anwendungsgebiet der Lysimetrie stellt die Untersuchung von Kontaminationen dar, die aus der Anwendung landwirtschaftlicher Produktionsmittel wie z.B. Pflanzenschutzmittel heraus auftreten können oder indirekt verursacht werden, wie z.B. durch den Eintrag veterinärmedizinischer Rückstände in den Boden beim Einsatz organischer Düngemittel. Da dieser Themenbereich eng mit landwirtschaftlichen Fragestellungen verknüpft ist sowie den Rahmen dieses Beitrages sprengen würde, soll er an dieser Stelle nicht behandelt werden.

## Allgemeines

Die hier behandelten spezifischen Anwendungen der Lysimeterforschung für den Themenkomplex Abfallwirtschaft und Altlasten sind durchaus umfangreich. Für eine strukturierte Darstellung wurde versucht, diese folgendermaßen zu gliedern, wobei Überschneidungen zwischen den Forschungsthemen häufig auftreten:

<sup>1</sup> Austrian Research Centers GmbH - ARC, Abteilung Umweltforschung, A-2444 SEIBERSDORF

\* Ansprechpartner: bernhard.wimmer@arcs.ac.at

- Verhalten von Abfällen im Deponiekörper
- Oberflächenabdeckung von Deponien, Altablagerungen und Halden
- Altlasten und Kontaminationen verursacht durch industrielle und gewerbliche Tätigkeiten sowie Einsatz von Recyclingmaterialien
- Verhalten von Schadstoffen aus Abwasser, Klärschlamm und diversen weiteren Quellen auf den Boden.

### Verhalten von Abfällen im Deponiekörper

Die von Deponien austretenden Emissionen wie Sickerwasser oder Deponiegas (Methan,  $\text{CO}_2$ , Spurengase) sind abhängig von der Zusammensetzung der abgelagerten Abfälle und den Abbauvorgängen in den Ablagerungen. Für die Untersuchung dieser Prozesse inklusive der Erfassung des Wasserhaushaltes von Deponien ist die Anwendung der Lysimetertechnik nahe liegend. Prinzipiell kann eine vollständig gegen den Untergrund abgedichtete Abfalldeponie als eine (doch etwas überdimensionale) Lysimeteranlage angesehen werden. Als Beispiel dazu kann die Versuchsdeponie Breitenau angeführt werden (DÖBERL et al. 2002). Aus mehreren Gründen ist es allerdings schwierig durch Betrachtung gesamter Deponien allgemein gültige Rückschlüsse zu ziehen. So ist einerseits die Heterogenität der abgelagerten Abfälle sowohl innerhalb einer Deponie als auch im Vergleich zu anderen Deponien als sehr hoch zu betrachten. Andererseits führen häufig Ausfällungen im Bereich der Drainageleitungen an der Basis der Deponien zu Problemen bei der Sickerwasserfassung. Weiters ist häufig bei älteren Ablagerungen unklar, ob die Basisabdichtung funktionstüchtig ist, wodurch Unsicherheiten bei der Berechnung der Wasserbilanzen entstehen (WIMMER et al. 2006). Es wurden daher neben Laboruntersuchungen zahlreiche Lysimeterversuche eingerichtet, um die Prozesse im abgelagerten Müll unter definierten Randbedingungen verfolgen zu können.

Bereits 1982 führte EHRIG (zitiert in: Zentraler Fachdienst Wasser – Boden – Abfall – Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1992) Lysimeterversuche zum Abbauverhalten von Abfällen und zur Erfassung der Sickerwasserzusammensetzung durch. Auch an der TU Braunschweig wurde ein Müll-Lysimeter errichtet (COLLINS und SPILLMANN 1982).

In den Jahren 1989 bis 2000 wurden in Thailand im Zuge von 3 Projekten 3 bis 7,5 m hohe Lysimetergefäße mit Hausmüll befüllt und die Entwicklung der Sickerwasserzusammensetzung sowie des Gashaushaltes unter tropischen Bedingungen verfolgt (KARNCHANAWONG et al. 2003). Eine stabile Methanphase im Abfallkörper konnte bereits im ersten Versuchsjahr erreicht werden. Unterschiede in den Konzentrationen der Sickerwässer waren vor allem durch das Auftreten von Regenzeiten und Trockenzeiten bedingt. Der Abfallkörper wurde lediglich mit 0,2 m Boden überdeckt. Der Einfluss der Oberflächenabdeckung auf die Abfalldeponierung konnte aus diesen Versuchen nicht erfasst werden.

Auch TRÄNKLER et al. (2005) beschreiben das Verhalten von Hausmüll mit teilweise hohen organischen Gehalten un-

ter tropischen Bedingungen an Hand einer Lysimeterstudie. Dabei wurden an 6 Lysimetern des AIT (Asian Institut of Technology) unterschiedliche Abdeckvarianten getestet.

In jüngerer Zeit stand in diesem Bereich die Auswirkung von Vorbehandlungen des Abfalls auf das Ablagerungsverhalten im Vordergrund. So untersuchten z.B. KETTERN et al. (1999) das Deponieverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall mit Hilfe von Lysimeterversuchen. Die Ergebnisse zeigten, dass durch eine mechanisch-biologische Vorbehandlung mit einer deutlichen Verkürzung der Nachsorgephase gerechnet werden kann. So wurde die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration um ca. 80 % reduziert und die kumulierte TOC-Fracht sank um ca. 50 %. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch BIDLINGMAIER und WIDMANN (2005), die das Verhalten von thermisch, mechanisch und mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen in einem Großlysimeterversuch (3 Lysimeter zu je 115 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen) verfolgten.

Ein nicht zu unterschätzendes Problem bei der Deponietechnik stellen Ausfällungen in den Drainageleitungen der anfallenden Sickerwässer dar. Mit Hilfe einer Lysimeterstudie untersuchten CARDOSO et al. (2006), unter welchen Bedingungen und bei welchen Abfallarten mit Ausfällungen in den Sickerwassersammelleitungen zu rechnen ist. Die stärksten Ausfällungen, meist in Form von Kalk, traten dabei bei einer gemischten Ablagerung von Hausmüll und von Überresten aus der Müllverbrennung auf.

Auch das Auslaugverhalten von Hausmüllverbrennungsschlacke wurde in einigen Lysimeterexperimenten untersucht (z.B. KLOTZ 2007, PÜTZ et al. 2005, BODE 2005).

Neben der Erfassung der Sickerwasserzusammensetzung spielt der Gashaushalt von Deponien eine große Rolle. WIMMER et al. (2006) verfolgten in einem Lysimeterversuch den Verlauf der Deponiegaszusammensetzung von ca. 20 Jahre altem Hausmüll (Abbildung 1).

Es zeigte sich, dass sich unter einer mineralischen Dichtschicht abhängig von der Temperatur Methangaskonzentrationen im Müllkörper zwischen 20 % und 60 % einstellten, während unter durchlässigen Wasserhaushaltsschichten kaum mehr eine Methangasbildung beobachtet werden

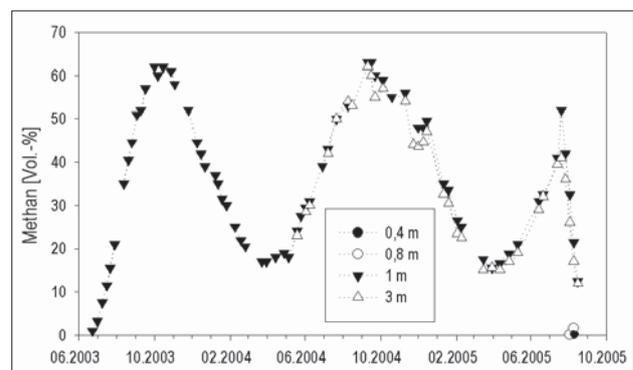


Abbildung 1: Methankonzentration im Müllkörper des Altlastenlysimeters Seibersdorf unter einer mineralischen Dichtschicht. Geringe Gehalte an Methan wurden zu Versuchsende auch in der mineralischen Dichtschicht (0,8 m) und in der Oberflächenabdeckung (0,4 m) registriert.

konnte. Bei der Interpretation der Daten ist allerdings zu beachten, dass sich in Deponien meist hohe über den Jahresverlauf konstante Temperaturen über 30°C ausbilden, die Temperatur im Lysimeterversuch jedoch stark von den Außentemperaturen beeinflusst wurde.

## Oberflächenabdeckungen von Deponien, Ablagerungen und Halden

Für die Ermittlung der Funktionstüchtigkeit von Oberflächenabdeckungen bzw. -abdichtungen von Deponien, Ablagerung oder Halden können Lysimeteruntersuchungen als die wahrscheinlich am häufigsten angewandte Versuchsmethodik angesehen werden. Es werden dabei unterschiedlichste Dichtungssysteme wie mineralische Dichtschichten, Kunststoffbahnen, Geotextilien, Bentonitmatten, Kapillarsperren miteinander verglichen. Aus der Erkenntnis heraus, dass die Lebensdauer der Dichtschichten beschränkt ist und dass eine vollständige Konservierung des Abfallkörpers nicht als nachhaltige Sanierung oder Sicherung angesehen werden kann, werden in jüngerer Zeit auch die Auswirkungen offener Abdeckungen, sogenannte Wasserhaushaltsschichten (oder auch Evapotranspirationsschichten) untersucht. Diese sollen ein Eindringen einer beschränkten Menge von Luft und Wasser und somit das Ausreagieren und Auslaugen des Abfallkörpers gewährleisten. Die für diese Fragestellung eingesetzten Lysimeteranlagen weichen häufig vom „klassischen“ Lysimeterdesign (Stahlzylinder mit rundem Querschnitt, Oberfläche waagrecht) ab. In vielen Fällen werden direkt auf Deponieböschungen Versuchsfelder eingerichtet, die randlich und gegen den Untergrund mittels Kunststoffolie abgedichtet sind und auf diese Weise die Erfassung von Sickerwasser ermöglichen.

BOLLIN et al. (2005) beschreiben eine Versuchsfeldanlage am Deponiestandort Deetz. Dabei werden 7 technische Dichtungen mit 2 unterschiedlich mächtigen Wasserhaushaltsschichten verglichen. Zwischenergebnisse nach 3 Versuchsjahren zeigten bereits, dass bei fortschreitender Etablierung der Vegetation auf den Wasserhaushaltsschichten die Sickerwasserbildung stark rückläufig ist (MELCHIOR und STEINERT 2007). Auf der Deponie Karlsruhe-West sind ebenfalls Versuchsfelder eingerichtet, um die Gleichwertigkeit von alternativen Oberflächenabdeckungen mit dem Regelabdichtungssystem nachzuweisen (GERLACH 2004). In den ersten Untersuchungsjahren zeigte sich, dass eine Oberflächenabdeckung bestehend aus einer mineralischen Dichtschicht und einer darunter lagernden Kapillarschicht die Sickerwasserbildung auf < 0,7 % des Niederschlages reduzierte. Sehr häufig wird für die Abdichtung von Deponien und Ablagerungen eine verdichtete Lage aus Lehm oder Ton eingebracht (mineralische Dichtschicht), welche mit einer meist zwischen 0,5 bis 1 m mächtigen Rekultivierungsschicht abgedeckt wird. In einigen Lysimeteruntersuchungen konnte bereits gezeigt werden, dass die Lebensdauer dieser Art von Abdichtungen auf Grund von Frost- und Austrocknungseffekten beschränkt ist und in Zukunft diese nicht mehr zur Anwendung kommen sollten (DREXLER 2001, HENKEN-MELLIES und GARTUNG 2004, WIMMER 2006). In den USA wurden ebenfalls umfangreiche Programme durchge-

führt, in denen alternative Oberflächenabdeckungen an mehreren Orten untersucht wurden. Im „Alternative Cover Assessment Project (ACAP)“ wurde ein Vergleich konventioneller Abdichtungssysteme mit alternativen, auf dem Wasserspeicher-Prinzip beruhenden Abdeckungen durchgeführt (ALBRIGHT et al. 2004, ROESLER et al. 2002). Dabei zeigte sich, dass auch an humiden Standorten konventionelle Oberflächenabdichtungen mit mineralischen Dichtschichten ähnlich hohe Sickerwasserraten wie Evapotranspirationsschichten aufwiesen.

Um Materialien zur Herstellung von Oberflächenabdeckungen für Abraumhalden oder Bergbaufolgefächern zu testen, wurden ebenfalls einige Lysimeterexperimente durchgeführt (z.B. HOEPFNER 2008, BRAUNISCH 2008, WOLFSFELD und ARLT 2005). HERMSMEYER et al. (2002) untersuchten die Einsetzbarkeit von feinkörnigem Abfallmaterial aus dem Kalibergbau zur Oberflächenabdeckung von Halden. Dabei traten 39 % des angefallenen Niederschlages als Sickerwasser auf. Eine Mischung dieses Materials mit einem Rückstandsprodukt aus der Steinkohleverstromung ergab eine Sickerwasserbildung von 24 %. Nach der Versuchsdauer wurde eine ausreichende Entsalzung des Deckschichtmaterials festgestellt, um ein Graswachstum zu ermöglichen.

## Altlasten und Kontaminationen verursacht durch industrielle und gewerbliche Tätigkeiten sowie Einsatz von Recyclingmaterialien

Der Einsatz von Lysimeter in der Altlastenforschung ist weit verbreitet. Ziel dieser Untersuchungen ist es einerseits unter möglichst naturnahen Bedingungen die Schadstoffmigration in einem kontaminierten Bodenbereich zu ermitteln (z.B. HAEFNER et al. 2007, KLOTZ und SCHRAMM 2007, Lysimeteranlage Wielenbach des Bayerischen Landesamts für Umwelt) andererseits können durch Lysimeteruntersuchungen auch der Einsatz von Methoden zur Altlastensanierung getestet werden. COX et al. (2000) beschreiben eine Lysimeteranlage am Oak Ridge National Laboratory, welche ursprünglich errichtet wurde, um das Verhalten von gering radioaktiven Stoffen zu untersuchen. Die 6 Lysimeterbehälter (Durchmesser 2,5 m, 4 m tief) wurden umgebaut, um in-situ Bioremediationsprozesse wie z.B. das Einbringen von Nährstoffen, Belüftung, Elektronenakzeptoren oder -donatoren zu verfolgen. KRENN et al. 2002 beschreiben den erfolgreichen Einsatz des Altlastenlysimeters Seibersdorf, um on-site Sanierungsvarianten auszutesten.

Die Einsetzbarkeit von Lysimetern für die Erkundung von Altlasten ist in der Praxis als eher eingeschränkt zu betrachten. Häufig ist man mit einer hohen Heterogenität der Schadstoffverteilung am kontaminierten Standort konfrontiert. Die Entnahme einer ausreichenden Anzahl von Monolithen würde den Kostenrahmen der meisten Routineuntersuchungen sprengen. Ebenfalls reicht der zeitliche Rahmen einer Lysimeteruntersuchung unter natürlichen Witterungsbedingungen kaum aus, um eine verlässliche Vorhersage des Schadstoffverhaltens zu gewährleisten. Lysimeter können allerdings zur Überprüfung von diversen

Laborverfahren (Elutionsversuche) und zur Kalibrierung von Simulationsprogrammen herangezogen werden, wie dies z.B. auch in den letzten Jahren im Rahmen des Forschungsverbundes „Sickerwasserprognose“ in umfangreichem Maße geschehen ist (KLOTZ 2007, PÜTZ et al. 2005, KP INGENIEURGESELLSCHAFT für WASSER und BODEN MBH 2008).

Der Einsatz von Asche aus der Müllverbrennung oder Bauschutt als Recyclingmaterial für diverse Anwendungen (z.B. Unterbaumaterial für den Straßenbau) wird ebenfalls mit Hilfe von Lysimeterstudien nachgegangen, um das langfristige Verhalten der Aschen vor allem in Hinblick auf eine Gefahr der Grundwasserkontamination abzuschätzen (STEGEMANN et al. 1995, PÜTZ et al. 2005).

### Verhalten von Schadstoffen aus Abwasser, Klärschlamm und diversen weiteren Quellen auf den Boden

Das Verrieseln von Abwässern oder das Aufbringen von Klärschlämmen auch auf landwirtschaftlich genutzte Böden wird seit langem praktiziert. Welche Möglichkeiten, aber auch Gefahren (z.B. Anreicherung von Schadstoffen sowie Beeinträchtigung des Grundwassers), damit verbunden sind, bedarf eingehender wissenschaftlicher Untersuchung.

DUGAN (1980) untersuchte mit Hilfe von Lysimetern die Möglichkeit, Abwasser durch eine Bodenfiltration zu reinigen. Er stellte dabei fest, dass nur Phosphor und Schwebstoffe in größerem Ausmaße zurückgehalten werden konnten. Der Rückhalt von gelösten Stoffen wie z.B. Ammonium und auch von Bakterien war nur mäßig, was auf eine Überladung der Lysimeterböden mit Schadstoffen zurückgeführt wurde. In allen untersuchten Böden wurde ein Zusetzen des Porenraums festgestellt. ARONSSON und BERGSTROM (2001) untersuchten in Lysimetern den Einsatz einer Weidenvegetation zur Behandlung von Abwasser vor allem in Hinblick auf den Stickstoffaustrag. Sie konnten dabei zeigen, dass nach einer Etablierung der Vegetation der Stickstoffaustrag niedrig bis vernachlässigbar ist, wenn die Raten der korrespondierenden Stickstoffausbringung 160-190 kg N pro Jahr betragen. Auch CARLANDER (2006) beschäftigte sich in ihrer Dissertation mit der Ausbringung von Abwasser auf den Boden, allerdings in Hinblick auf die Ausbreitungspfade von Pathogenen. In einem Lysimeterexperiment konnte sie nachweisen, dass in einem sandigen Boden Viren stark zurückgehalten wurden. Bei dem untersuchten tonigen Boden hingegen wurde eine rasche Verlagerung der untersuchten Viren festgestellt. Das Aufbringen von Abwasser stellt daher unter bestimmten Bedingungen ein beträchtliches Risiko in Hinblick auf eine virale Infektion dar.

Neben verschiedenen Recyclingprodukten und Abfällen aus Bergbau und Industrie untersuchten BODE und BECKER (2005) auch vom Straßenverkehr kontaminiertes Bankettschälgut und Kehrgut aus der Straßenreinigung mittels Lysimeter und diversen Extraktionsverfahren. Die Autoren wiesen darauf hin, dass die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen nur in geringem Maße mit der Zusammensetzung der Lysimetersickerwässer übereinstimmen.

### Schlussfolgerungen und Perspektiven für spezifische Lysimeteranwendungen

An Hand der hohen Anzahl durchgeführter und aktueller Forschungsprojekte wird deutlich, dass der Einsatz von Lysimetern für Untersuchungen im Rahmen der Abfallwirtschaft und Altlastenforschung eine durchaus wesentliche Bedeutung hat. Für manche Fragestellungen wie die Bewertung von Deponieoberflächenabdeckungen oder die Auswirkungen von Abwasserverrieselung ist die Lysimetermethode als die Standardmethode zu betrachten. Da bezüglich einer geregelten Abfallwirtschaft und eines systematischen Aufarbeitens bestehender Altlasten weltweit ein großer Aufholbedarf gegeben ist, ist auch zu erwarten, dass die Anwendung von Lysimeteruntersuchungen für diese Fragestellung in nächster Zeit noch weiter zunehmen wird. Auch in Österreich sind Bestrebungen in Gange, Altlasten rascher einer Risikobewertung zu unterziehen und wenn notwendig zu sanieren. Trotz umfangreicher Forschungstätigkeiten, wie z.B. das in Deutschland durchgeführte Forschungsvorhaben „Sickerwasserprognose“, steht nach wie vor kein verlässliches und allgemein akzeptiertes Instrumentarium zur Verfügung, womit eine gesicherte Abschätzung der Grundwassergefährdung an einem Altlastenstandort geleistet werden kann.

Große Unsicherheiten existieren nach wie vor auch bei der Quantifizierung von Methangasemissionen aus Deponien bzw. der Methanoxidation in Oberflächenabdeckungen. Auch hier könnte die Lysimeterforschung bei Berücksichtigung entsprechender Rahmenbedingungen wertvolle Beiträge leisten.

Das Verhalten von Mikroorganismen im Untergrund wie z.B. beim biologischen Abbau organischer Schadstoffe oder bezüglich der Verlagerung von Pathogenen können ebenfalls als Forschungsgebiete betrachtet werden, in denen Lysimeter Ziel führend eingesetzt werden können.

### Literatur

- ALBRIGHT, W.H., C.H. BENSON, G.W. GEE, A.C. ROESLER, T. ABICHOU, P. APIWANTRAGOON, B.F. LYLES and S.A. ROCK, 2004: Field Water Balance of Landfill Final Covers. *Journal of Environmental Quality*, 33, 2317-2332.
- ARONSSON, P.G. and L.F. BERGSTROM, 2001: Nitrate leaching from lysimeter-grown short-rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type. *Biomass and Bioenergy*, 21, 3, 155-164(10).
- BIDLINGMAIER, W. und R. WIDMANN, 2005: Ablagerungs- und Emissionsverhalten von Restabfällen nach unterschiedlichen Arten der Vorbehandlung –Synopsis. *Materialien*, Band 69, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. Essen 2005.
- BODE, R., 2005: Auslaugung anorganischer Schadstoffe aus Abfall- und Altlastmaterialien. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen.
- BODE, R. und K.-W. BECKER, 2005: Austrag von Schwermetallen aus deponierten Abfällen: Vergleich der Konzentrationen in Lysimeter-Ausläufen mit Prognosen aus verschiedenen Labor-Extraktionsverfahren. In: Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Bericht zur 12. Gumpensteiner Lysimetertagung.
- BOLLIN, K.P., S. RAABE, S. MELCHIOR und B. STEINERT, 2005: Alternative Oberflächenabdichtungen für Deponien - Erste Ergebnisse

- aus den Versuchsfelderuntersuchungen Deponiestandort Deetz. In: EGLOFFSTEIN, BURKHARDT, CZURDA (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 12. Erich Schmidt Verlag, 2005.
- BRAUNISCH, F., 2008: Untersuchungen zum Aufbau einer funktional optimierten Rekultivierungsschicht auf einer hochbasischen Aschendeponie. In: Ökologie und Umweltsicherung, Band 30/2008, Universität Kassel, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz, Universität Kassel, Witzenhausen.
- CARDOSO, A.J., A.D. LEVINE, B.S. NAYAK, V.J. HARWOOD and L.R. RHEA, 2006: Lysimeter comparison of the role of waste characteristics in the formation of mineral deposits in leachate drainage systems. *Waste Management Research*, 2006, 24:560-572.
- CARLANDER, A., 2006: Assessment of Microbial Health Hazards Associated With Wastewater Application to Willow Coppice, Coniferous Forest and Wetland Systems. Dissertation. Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences. Department of Crop Production Ecology, Uppsala.
- COLLINS, H.-J. and P. SPILLMANN, 1982: Lysimeter for Simulating Sanitary Landfills. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 180, 5, 852-863.
- COX, C.D., D.E. NIVENS, S. RIPP, M.M. WONG, A. PALUMBO, R.S. BURLAGE and G.S. SAYLER, 2000: An Intermediate-Scale Lysimeter Facility for Subsurface Bioremediation Research. *Bioremediation Journal*, <http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713400853~db=all~tab=issueslist~branches=4-v44,1>, 69-79.
- DÖBERL, G., R. HUER, J. FELLNER, O. CENCIC und P.H. BRUNNER, 2002: Neue Strategien zur Nachsorge von Deponien und zur Sanierung von Altlasten (Strandezza). Endbericht. Technische Universität, Wien.
- DREXLER, K., 2001: Überprüfung der Wirksamkeit von mineralischen Oberflächenabdichtungen in Bayern. In: EGLOFFSTEIN (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2001, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 122. Erich Schmidt Verlag, 2001.
- DUGAN, G.T., 1980: Leachate quality from lysimeters treating domestic sewage. Honolulu (HI): Water Resources Research Center, University of Hawaii at Manoa. WRRRC technical report, 131.
- GERLACH, A., V. GIURGEA und H. HÖTZL, 2004: Übertragung von Lysimeteruntersuchungen auf ein größeres Umfeld unter besonderer Berücksichtigung der numerischen Wasserhaushaltsmodellierung mit HELP. In: KLOTZ, D. (Hrsg.): Untersuchungen zur Sickerwasserprognose in Lysimetern. GSF-Bericht 02/04.
- HAEFER, K., S. SCHMIDT, U. HAFERKORN, C. NITSCHKE, F. RICHTER und K.-J. GENSCHE, 2007: Lysimeteruntersuchungen zu Schadstoffmigrationsprozessen im Bereich kontaminierter Flächen des Ökologischen Großprojektes „SOW Böhlen“. In: Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Bericht zur 12. Gumpensteiner Lysimetertagung.
- HENKEN-MELLIES und E. GARTUNG, 2004: Long-term observation of alternative landfill capping systems – field tests on a landfill in Bavaria. *Land Contamination & Reclamation*, 12 (1), 2004.
- HERMSMEYER, D., R.R. VAN DER PLOEG, R. HORTON und J. BACHMANN, 2002: Lysimeter study of water and salt dynamics in a saline metallurgical waste. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165, 2, 211-219.
- HOEPFNER, U., 2008: Oberflächenbarrieren bei der Sanierung radioaktiver Altlasten der Wismut. In: HENKEN-MELLIES, U. (Hrsg.): Weiterbetrieb von Deponien sowie Stilllegung, Abdichtung und Nachsorge von Deponien. 19. Nürnberger Deponie-Seminar, 24.-25.4.2008. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Nürnberg, Bd. 87, 61-72.
- KARNCHANAWONG, S., W. SONKLIN, S. SUPREEYA and S. KARNCHANAWONG: Long Term Study of Landfill Lysimeters and Shallow Well Water Contamination from Landfill in Thailand. Department of Environmental Engineering, Chiang Mai University, Thailand: <http://www.swlf.ait.ac.th/data/Kasetsart%20University%20National%20Seminar%20on%20Solid%20Waste%20Landfill%20Ma/Long%20Term%20Study.pdf>
- KETTERN, J., K. BILLMAIER und K.T. DREES, 1999: Rotte- und Emissionsverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll und Keim- und Staubbelastung im Sortierbereich. Abschlussbericht. Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH-Aachen e.V.; <http://opus.bibliothek.fh-aachen.de/opus/volltexte/2005/77/>
- KLOTZ, D., 2007: Lysimeteruntersuchungen zum Test von Laborverfahren zur Quelltermbestimmung von Altlasten-Materialien. In: Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Bericht zur 12. Gumpensteiner Lysimetertagung.
- KLOTZ, D. und K.-W. SCHRAMM, 2007: Verhalten organischer Schadstoffe in Altlastenlysimetern. In: Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Bericht zur 12. Gumpensteiner Lysimetertagung.
- KP INGENIEURGESELLSCHAFT für WASSER und BODEN MBH, 2008: BMBF Förderschwerpunkt „Sickerwasserprognose“: Vergleich der Transportmodelle. Abschlussbericht.
- KRENN, A., W. FRIESL und M.H. GERZABEK, 2002: Das Altlastenlysimeter Seibersdorf – Testung der Wirksamkeit von on site Sanierungsmethoden. In: DEPOTECH 2002 – Konferenzbericht der 6. Depotech Fachtagung, Leoben, Nov. 2002.
- MELCHIOR, S., B. STEINERT und S. RAABE, 2008: Zwischenergebnisse der Versuchsfelder der MEAB zu alternativen Oberflächenabdichtungssystemen auf der Deponie Deetz. Fachtagung der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung ASA e.V., Potsdam.
- LANTHALER, C., 2004: Lysimeter Stations and Soil Hydrology Measuring Sites in Europe – Purpose, Equipment, Research Results, Future Developments. Diplomarbeit. Karl-Franzens-Universität, Graz.
- MELCHIOR, S. und B. STEINERT, 2007: Zwischenergebnisse der Versuchsfelder der MEAB zu alternativen Oberflächenabdichtungssystemen auf der Deponie Deetz. Fachtagung der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung ASA e.V., Potsdam. [http://www.asa-ev.de/uploads/media/11\\_Vortrag\\_Melchior.pdf](http://www.asa-ev.de/uploads/media/11_Vortrag_Melchior.pdf)
- PÜTZ, TH., H. RÜTZEL und H. VEREECKEN, 2005: Absicherung der Sickerwasserprognose von schwach kontaminierten Materialien mit Großlysimetern. In: Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Bericht zur 11. Gumpensteiner Lysimetertagung.
- ROESLER, A.C. and C.H. BENSON, 2002: Field Hydrology and Model Predictions for Final Covers in the Alternativ Assessment Program – 2002. *Geo Engineering Report No. 02-08*. William H. Albright Desert Research Institut.
- STEGEMANN, J.A., J. SCHNEIDER, B.W. BAETZ und K.L. MURPHY, 1995: Lysimeter Washing of Msw Incinerator Bottom Ash. *Waste Management & Research*, 13, 2, 149-165.
- TRÄNKLER, J., C. VISVANATHAN, P. KURUPARAN und O. TUBTIMTHAI, 2005: Influence of tropical seasonal variations on landfill leachate characteristics-results from lysimeter studies. *Waste Manag.*, 25(10):1013-20.
- WIMMER, B., R. NEUGSCHWANDTNER, I. FRITZ, J. RAUBER, M.H. GERZABEK und T.G. REICHENAUER, 2006: Evapotranspirationsschichten zur Abdeckung von Altablagerungen. In: GERZABEK M.H. und T.G. REICHENAUER: Innovative in-situ Methoden zur Sicherung und Sanierung von Altablagerungen und Altstandorten. Facultas Verlag. Wien.

WOLFSFELD, N. und K.-J. ARLT, 2005: Messung der realen Wasserhaushaltsentwicklung in verschiedenen Oberflächenabdichtungssystemen. In: EGLOFFSTEIN / BURKHARDT / CZURDA (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2005. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 135. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

ZENTRALER FACHDIENST Wasser – Boden – Abfall – Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1992: Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen – Leitfaden Deponiegas. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.