

Normung und/oder anwendungsorientierte Standardisierung von Lysimeteranlagen

G. v. UNOLD und J. FANK

Abstract

Lysimeters are excellent technical tools covering the scale between laboratory setups and field measuring setups. Presupposed the correct design, they incorporate high precision water - and solutes balancing features under field/country side conditions and are therefore usable for hydrological, agricultural, bioremediation and climatic investigations, waste risk assessment and soil science research. Lysimeters, well known since nearly one century, ran through a technical revolution the last 10 years. While Lysimeters initially measured water drainage only, they are available now as precise tools for any water flux & soil water measurement and determination of the water balance parameters. The interfaces to Aquifer and Atmosphere can be modeled now using precise parameters. The experiences on those new Lysimeter techniques lead to some principle statements on Lysimeter designs and standardization. The application point of view requires application-oriented construction, measurement equipment, and handling and data tools to fulfil the task-specific needs. Standardisation is needed for the prevention of mistakes, comparability of results with unique state of the art limitations. Basically, standards are necessary for Lysimeter production and maintenance.

Zusammenfassung

Lysimeter sind exzellente Werkzeuge für Bodenwasseruntersuchungen und damit verbundene Aufgaben. Sie vereinen die Vorteile von Feldversuchen mit deren natürlichen Klima-, Vegetations- und Bewirtschaftungsformen und der Präzision und Steuerbarkeit von Laborversuchen. Damit werden moderne Lysimeter insbesondere zur Wasserbilanzbestimmung und zu Stoffumsetzungs- oder

Stofftransportstudien eingesetzt. Mit einem präzisen Wägesystem ausgestattet können alle Niederschlagsformen, die Verdunstung, die Sickerwassermenge und die Änderung des gespeicherten Wasserinhaltes im Kontrollvolumen hoch aufgelöst und in kurzen Zeitintervallen gemessen werden. Die Lysimetertechnologie hat in den letzten Jahren entscheidende Fortschritte erzielt, wodurch neue Anwendungen ermöglicht wurden und bisherige Schwachpunkte weitgehend konstruktiv und modular - entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen - ausgeschlossen werden konnten. Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen ist es notwendig, Standards zu definieren, um sowohl Ergebnisse vergleichen zu können als auch systematische Fehlerquellen zu vermeiden. Für die Herstellung, die Wartung und den globalen Einsatz von Lysimetern sind Standards grundsätzlich notwendig. Dies steht jedoch teilweise im Gegensatz zur konstruktiv notwendigen Anpassung, die der Verschiedenheit der Gegebenheiten, Aufgabenstellungen und Skalen entgegensteht. Daher soll diskutiert werden:

- (i) wie können die anwendungsorientierten Erfordernisse in Ausstattung und Ausführungsform von Lysimetern standardisiert und genormt werden?
- (ii) Welche Standards bringen Vorteile für den Betrieb von Lysimetern und in der Vergleichbarkeit von Ergebnissen?
- (iii) In welchen technischen Punkten ist eine Normung von Lysimetern zielführend?

Einleitung und Problemstellung

Lysimeter sind - nach der in Europa gängigen Definition - Gefäße mit einem definiertem Bodenvolumen und Tiefe, die entweder ungestört oder gestört befüllt oberflächengleich in den Boden einge-

baut sind. Die Lysimetertechnologie erfährt eine andauernde Weiterentwicklung (BÖHM et al., 2002) und hat durch die Einführung neuer Gewinnungstechniken (z.B. MEISSNER und SEYFARTH, 2004) und moderner Wiegetechnik auch für landwirtschaftliche Felduntersuchungen (z.B. FANK et al., 2004 oder FANK und UNOLD, 2005) neue experimentelle Grundlagen geschaffen.

Moderne Lysimeter vereinen die Vorteile von Feldversuchen mit deren natürlichen Klima-, Vegetations- und Bewirtschaftungsformen und der Präzision und Steuerbarkeit von Laborversuchen. Damit werden moderne Lysimeter insbesondere zur Wasserbilanzbestimmung und zu Stoffumsetzungs- oder Stofftransportstudien eingesetzt. Mit einem präzisen Wägesystem ausgestattet können alle Niederschlagsformen, die Verdunstung, die Sickerwassermenge und die Änderung des gespeicherten Wasserinhaltes im Kontrollvolumen hoch aufgelöst und in kurzen Zeitintervallen gemessen werden (FANK, 2006).

Aufgrund der rasanten Entwicklung sind derzeit sehr unterschiedliche Formen von Lysimetern und unterschiedliche Messeinrichtungen implementiert, was die Vergleichbarkeit von Messergebnissen erschwert bzw. unmöglich werden lässt. Ein Arbeiten mit Daten von "fremden" Lysimetern erfordert einen hohen Aufwand in der Erarbeitung der Datengrundlage für weiterführende Auswertungen (wenn überhaupt möglich), da die verfügbaren Daten unterschiedlicher Messherkunft und unterschiedlicher Datenqualität sind. Es ist die Frage zu diskutieren, inwieweit eine Standardisierung von Komponenten der Lysimetertechnik dieses Problem verkleinern könnte, ohne auf anwendungsspezifische Erfordernisse verzichten zu müssen.

Autoren: DI Georg von UNOLD, UMS Umweltanalytische Messsysteme GmbH, Gmunder Straße 37, D-81379 MÜNCHEN, gvu@ums-muc.de und Univ.-Doz. Dr. Johann FANK, Joanneum Research, Institut für WasserRessourcenManagement, Elisabethstraße 16/II, A-8010 GRAZ

Standardisierung von anwendungsorientierten Ausführungsformen der Lysimeter

Konstruktionsmerkmale und lysimeterspezifische Eigenheiten

Das ideale Lysimeter hat die Oberfläche der zu untersuchenden Fläche oder Region und eine Höhe, die zumindest den ersten Grundwasserstauer einschließt. Aus praktischen Gründen ist ein repräsentativer Ausschnitt zu wählen, der die Variabilitäten der relevanten Parameter berücksichtigt. Für die Untersuchung in ebenen Tallandschaften erscheint die Einrichtung von einem oder mehreren Intensivmesspunkten, die mit Lysimetern ausgestattet sind, zielführend, wobei die räumliche Variabilität der Parameter durch dezentrale Messpunkte mit geringerem Ausstattungsaufwand ergänzt werden sollten.

Zur Erfassung repräsentativer Parameter des Wasser- und Stoffkreislaufs erscheint eine Lysimeteroberfläche von einem Quadratmeter in der Regel als ausreichend für sandige und lehmige Böden und dicht wachsende Pflanzenbestände zu sein. Die Höhe des Lysimeters ist in Abhängigkeit von den vorliegenden Bodenverhältnissen und der Anwendung zu wählen. Grundsätzlich sollte die Lysimeterunterkante unterhalb der hydraulischen Wasserscheide liegen, sodass die Fließrichtung des Bodenwassers an der unteren Randbedingung ausschließlich nach unten gerichtet ist. Kann dies nicht realisiert werden, ist ein entsprechender Ausgleich des Bodenwasserflusses technisch zu gewährleisten. Für sandige Standorte genügt meist eine Tiefe von einem Meter, größere Lysimetertiefen (z.B. 2 Meter), die aber in der Errichtung mit einem erheblichen Mehraufwand zu kalkulieren sind und bei wägbaren Lysimetern eine geringere Auflösung der Gewichtserfassung nach sich ziehen sind grundsätzlich zu bevorzugen.

Besondere Bedeutung gewinnt auch die Frage des Materials der Lysimeterwandungen. Hier wird zur Verwendung Material der Typen 1.4301 oder 1.4307 vorgeschlagen, wobei die Schweißnähte höher legiert und passiviert sein sollten.

Lysimeterbefüllung versus monolithische Entnahme

Natürlich entstandene Böden sind in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften hinsichtlich Wassertransport, Stofftransport und Stoffumsetzung komplex und einzigartig. Textur und Struktur, Lagerungsdichte, Retentions- und Fließverhalten sind verschieden und können synthetisch nur unter definierten Annahmen nachgebildet werden. Daher sollten Lysimeter monolithisch gewonnen werden, sofern naturidentische Untersuchungen angestrebt werden.

Die natürlich bedingte Varianz von Böden widerspricht dem Sinn vergleichender Untersuchungen bzw. von Versuchswiederholungen. Sollen in einer Anlage Untersuchungen von Auswirkungen gezielt unterschiedlicher Randbedingungen auf gleichen Böden durchgeführt werden, so bestimmt diese Varianz die Zahl der Monolithen und Wiederholungen. Je feinkörniger die Böden, umso höher ist die Anzahl an erforderlichen Lysimetern. In solchen Fällen erscheint es im Sinne der Vergleichbarkeit sinnvoll Lysimeter mit homogenisierten Horizonten unter Beibehaltung der natürlichen Lagerungsdichte zu befüllen, auch wenn der Bezug zum tatsächlichen Verhalten damit aufgegeben wird. Von besonderer Bedeutung erscheint dies bei Stofftransportuntersuchungen (FANK, 2002). Daher wird vorgeschlagen, bei Versuchen mit befüllten Lysimetern Untersuchungen an zumindest einem monolithischen Lysimeter in den Versuchsplan zu integrieren. Dies nicht zuletzt deshalb um bei Fragen der Stoffumsetzung Hinweise auf nötige Versuchsvorlaufzeiten zu erhalten.

Bei Verwendung befüllter Lysimeter ist eine Bodenprofilansprache und die Entnahme und Analyse von ungestörten Stechzylinderproben am Standort der Materialentnahme jedenfalls erforderlich. Bei der Verfüllung sind Verdichtungshorizonte zu vermeiden, da diese in einem höhengestaffelten Sägezahnprofil der Wasserleitfähigkeiten resultieren würden (BAUMGARTL, 2001). Befüllte Lysimeter setzen sich durch Umverlagerung, seitlich eingebaute Sonden können dabei zur Rissbildung im Boden führen. Weiterhin findet - bedingt durch die Wärmeausdehnung des Lysimeterzy-

linders, der geostatischen Auflast und dem Reibungsverhalten des Lysimetermaterials an der Lysimeterwandung - eine dynamische Setzung statt.

Um der Argumentation der Schaffung von artifiziellen Präferenzfließpfaden im Zuge der monolithischen Entnahme oder der Befüllung entgegenzutreten zu können sollten nach der Instrumentierung sowohl bei monolithischen wie auch bei befüllten Lysimetern Tracerversuche mit konservativen Tracern durchgeführt werden, um das Fließverhalten zu überprüfen und artifizielles Fließen durch Risse oder Randspalten ausschließen zu können (FANK, 2006).

Das Bodenwasser ist der Hauptenergie- und Stoffträger im Zuge der Verlagerung von Wasser und Stoffen im Lysimeter. Die Gewinnung des Bodenwassers im ungesättigten Bereich setzt jedenfalls den Einsatz von Unterdrucksystemen voraus. Die Auswahl der entsprechenden Saugkerzen zur Bodenwasserbeprobung sollte dem DIN19715-Entwurf entsprechen. Saugkerzen aus Siliziumcarbid entsprechend dem BAM-Test 2006 sollten dem TUM-Testverfahren genügen. Das Wirkdruckpotential bei Einsatz der Saugkerzen sollte zeitkontinuierlich mit 60 hPa unter dem Matrixpotential angelegt werden.

Messung und Bestimmung der Inputparameter

Niederschläge wie Regen, Tau, Reif oder Bewässerungs- und Düngermengen (z.B. Gülle) können bei wägbaren Lysimetern mit einer Auflösung von 0,01 kg bzw. 0,01 mm Wassersäule bei 1 m² Oberfläche präzise und direkt an der feldidentischen Bodenoberfläche gemessen werden. Im Zuge von Schneefallereignissen kann das Wasseräquivalent von Schnee exakt gewogen werden. Zur Vermeidung von Druckübertragungsbrücken im Zuge des Abschmelzvorganges der Schneedecke über den Lysimeterspalt hinweg muss die Schneedecke des Lysimeters von der im natürlichen Umfeld entkoppelt werden (z.B. durch Freistechen eines Ringspaltes). Ein Überstand des Lysimeterzylinders von 30 mm gegenüber der Bodenoberfläche genügt bei mittlerer und geringer Verdichtung der Bodenoberfläche, um Regenwasserüberstau einsickern zu lassen. Wasser von Starkniederschlagsereignissen bzw. raschen

Tauprozessen der Schneedecke die über den Lysimeterrand in den Lysimeterspalt abfließen, müssen gesondert aufgefangen und dem Lysimeter wieder zugeführt werden (z.B. durch Infiltration des aufgefangenen Wassers unterhalb der Frosttiefe).

Sickerwassermessung und untere Randbedingung

Bodenwasserflüsse sind unmittelbar abhängig vom hydraulischen Gradienten. Sofern die natürliche Sickerwasserbildung in Höhe und Dynamik im Lysimeter gemessen werden soll muss das feldidentische Matrixpotential auf das Lysimeter übertragen werden (STENITZER und FANK, 2007). Das Matrixpotential des Feldes wird auf die durch einen Saugkerzenrechen im Lysimeter ausgebildete Matrixpotentialfläche übertragen. Die Erfordernisse werden technisch durch Tensiometermessungen im Feld und im Lysimeter (in gleicher Tiefe knapp über dem Lysimeterboden und im gleichem Bodenhorizont), dem Einbau des Saugkerzenrechens an der Lysimeterunterseite, einer bidirektionalen Pumpe und einer Steuereinheit sowie einem Wasservorratstank realisiert. Durch den Entzug von Wasser aus dem Lysimeter bzw. der Zuführung in das Lysimeter muss es möglich sein, langfristig feldidentische Potentiale und damit Flüsse am unteren Lysimeterrand zu generieren.

Inseleffekte und Temperaturregime

Im Lysimeter muss eine zum Feld vergleichbare Situation hinsichtlich der relevanten Parameter herrschen. Insbesondere bodenhydrologische, mikroklimatische und vegetative Prozessgrößen sind vergleichbar zu halten. Neben der Vermeidung von Insel- (Oasen-) effekten durch geeignete Wahl der Pflanzenbedeckung muss auch das Temperaturregime im Freiland und im Lysimeter übereinstimmen. Sowohl mikrobiologische und chemische Prozesse als auch die Viskosität des Wassers sind temperaturabhängig. Entsprechend sind Köcher, Zylinder, Konus und Sockel den feldidentischen, thermischen Bedingungen anzupassen. Dies kann einerseits durch die Wahl eines geeigneten Lysimetermaterials und andererseits durch die Vermeidung von Luftaustausch oder

Luftzirkulation zwischen Serviceschacht und Lysimeter erreicht werden. Bei Verwendung von Edelstahl für das Lysimeter wird eine maximale Wandstärke des Lysimeterzylinders von 4 mm als Kompromiss zwischen Festigkeit und minimierter Wärmeleitung vorgeschlagen. Der Ringspalt zwischen Lysimeter und Köcher sollte 10 mm +/- 6 mm nicht überschreiten.

Messintervalle, Datenhaltung, Visualisierung und Interpretation

Messintervalle werden je nach Untersuchungsgegenstand zeitkontinuierlich oder prozessgesteuert gewählt. Die Aufzeichnungsintervalle sind abhängig von der Relevanz und Variabilität der Messgröße. Da hydrologische Phänomene wie Niederschlag und Verdunstung praktisch zeitgleich ablaufen wird vorgeschlagen, die Wiegedaten von Lysimetern aus denen die Wasserkreislaufparameter berechnet werden, in einem Intervall von 1 Minute zu erfassen. Für Wetterdaten erscheint derzeit ein Speicherintervall von 10 Minuten als ausreichend (FANK, 2007), für Daten der bodenphysikalischen in-situ Messung sollte zumindest ein einstündiges Intervall vorgesehen werden. Die Daten werden vorzugsweise auf Datensammlern abgelegt, die erfassten Daten sollten in definierten Intervallen ausgelesen und einer automatisierten oder teilautomatisierten technischen Plausibilitätskontrolle zugeführt werden. Die heutigen Computerbetriebssysteme ermöglichen bei einer direkten Ankopplung der Datensammler an einen Steuerrechner eine automatisierte Datenakquisition und erste Qualitätsprüfung - idealerweise gekoppelt mit der Füllung entsprechender Datenbankmanagementsysteme. Die Verwendung von Datenbanken und die daran gekoppelte Möglichkeit der prompten und interaktiven Visualisierung von kausal zusammenhängenden Messgrößen erleichtert die manuelle Verifizierung und Freigabe der Daten. Prozessbeeinflussende Randbedingungen wie Bewirtschaftung, Wartungsarbeiten oder Störfälle sind begleitend zu protokollieren.

Lysimeter-Sonderformen

Neben den bisher angesprochenen klassischen Lysimeterformen zur Erfassung des vertikalen Wasserflusses und des

daran gekoppelten Stofftransportes existieren in der Literatur eine große Zahl von Formen, die einerseits nicht der klassischen Definition von Lysimetern genügen (z.B. Bodenwassermessstationen, "virtuelle Lysimeter", alle Formen der Sickerwassersammler aber auch als Naturlysimeter bezeichnete natürliche Kleinsteinzugsgebiete etc.) oder andererseits derzeit einer Standardisierung nicht zuführbar erscheinen.

Klassische zylindrische Lysimeter können derzeit nicht für Hangmessungen eingesetzt werden, da Hangzugswasser nicht oder nur näherungsweise unter Störung der hydraulischen Gradienten gemessen werden kann. Die Erfassung des Interflow ist in zylindrischen Lysimetern durch fehlende Lateralgradienten weitgehend ausgeschlossen. Entsprechende Weiterentwicklungen, wie sie beispielsweise von KNOCHE et al. (2005) vorgestellt wurden sind spezielle Entwicklungen, die nur hinsichtlich ihres generellen Ansatzes auch in anderen Bereichen verwendet werden können. Waldlysimeter, wie sie beispielsweise von MÜLLER (2005) erläutert wurden, sind Besonderheiten, bei denen ein standardisiertes Design die Möglichkeiten anwendungsspezifischer Untersuchungen eher stören würde. In diesen Bereich sind auch Entwicklungen einzuordnen, die unter bestimmten Rahmenbedingungen den Wasser- und Stoffhaushalt nicht nur in seiner vertikalen sondern auch in der lateralen Komponente messtechnisch zu erfassen suchen (RUPP et al., 2005).

Diskussion und Ausblick

Die rasante Entwicklung der Lysimetertechnik in den letzten Jahren legt es nahe, rechtzeitig über eine Standardisierung nachzudenken, um einerseits eine klare Begriffsdefinition einzubringen und andererseits auch hinsichtlich der Errichtungskosten von Lysimetern durch eine Komponentenbauweise deutliche Verbesserungen erreichen zu können. Bei allen Vorteilen einer Normung der Lysimeterbauweise (Vergleichbarkeit der Ergebnisse, Vermeidung systematischer Fehlerquellen, Kostenersparnis bei Errichtung und Wartung etc.) sollte aber als wesentlicher Aspekt die Berücksichtigung individueller Anforderungen, die den örtlichen Gegebenheiten und der

fachlichen Zielsetzung Rechnung tragen müssen, jedenfalls erhalten bleiben.

Aus unserer Sicht erscheinen die in dieser Arbeit angesprochenen Punkte durchaus reif für eine Standardisierung zu sein. Darauf aufbauend wurden seitens UMS für vier Anwendungsbereiche Standard - Feldlysimeter entwickelt (UNOLD und FANK, 2007) und in Kooperation mit Forschungspartnern implementiert. Diese vier Feldlysimertypen bzw. -erweiterungen sind:

HYDROLYS zur Erfassung der Wasserkreislaufparameter,

METEOLYS als Erweiterung zur Messung der meteorologischen Parameter für die Berechnung der Referenzverdunstung,

AGROLYS als Messsystem zur Erfassung der Wasser- und Stoffflüsse unter ackerbaulich genutzten Flächen bei maschineller Bewirtschaftung und

das "Scientific Field Lysimeter" zur differenzierten Erfassung der Horizontwassersituationen und der Schnittstellen zu Atmosphäre und Aquifer.

Literatur

BÖHM, K.E., 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 und H. VEREECKEN, 2002: Lysimeter - Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte. Beiträge zur Hydrogeologie, 53, 115-232, Graz.

BAUMGARTL, Th., 2001: Wie homogen sind künstlich befüllte Zylinder? In: 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 139-140.

FANK, J., 2002: Die Bedeutung von Herkunftsflächen von Lysimeterböden und der gestörten Befüllung für den Nitrataustrag aus "Schwerkraftlysimetern". - In: KLOTZ, D. [Hrsg.]: Untersuchungen zur Schadstoff-Migration in Lysimetern, GSF-Bericht 05/02, 17-23, München.

FANK, J., 2006: Monolithic field lysimeters for precise weighing - a basis for balancing water flow. Proceedings of the international Symposium "Soil physics and rural water management - Progress needs and challenges", September 28-29, 2006, 89-92, Vienna / Austria.

FANK, J., 2007: Die Gras - Referenzverdunstung: Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit von Messgeräten und Messintervall. Bericht über die 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, a.a.O., HBLFA Raumberg-Gumpenstein.

FANK, J., E. STENITZER, F. FEICHTINGER, P. CEPUDER, 2004: Messdaten und Modellkalibration an der Forschungsstation Wagna und daraus abzuleitende Anforderungen an Messstellen zur Kalibration von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen. In: KLOTZ, D. (Hrsg.): Untersuchungen zur Sickerwasserprognose in Lysimetern. GSF-Bericht 02/04, 79-86, München.

FANK, J. und G. v. UNOLD, 2005: Wägbare monolithische Lysimeter unter maschineller Freilandbewirtschaftung (Wagna - Austria). 11.

Gumpensteiner Lysimetertagung "Lysimetrie im Netzwerk der Dynamik von Ökosystemen" vom 5. - 6. April 2005, 55-60, Gumpenstein.

KNOCH, D., A. SCHRAMM und R. MARSKI, 2005: Hanglysimeterstudie zur Wasser- und Stoffdynamik einer 2-Schicht-Bodenabdeckung für Halden des Erzbergbaus. 11. Gumpensteiner Lysimetertagung "Lysimetrie im Netzwerk der Dynamik von Ökosystemen" vom 5. - 6. April 2005, 77-80, Gumpenstein.

MEISSNER, R. and M. SEYFAHRT, 2004: Measuring water and solute balance with new lysimeter techniques. SuperSoil 2004: 3rd Australian New Zealand Soils Conference, 5 - 9 December 2004, University of Sydney, Australia. Published on CDROM. Website www.regional.org.au/au/asssi/

MÜLLER, J., 2005: 30 Jahre forsthydrologische Forschung auf der Großlysimeteranlage in Britz - Zielstellung und Ergebnisse. 11. Gumpensteiner Lysimetertagung "Lysimetrie im Netzwerk der Dynamik von Ökosystemen" vom 5. - 6. April 2005, 29-32, Gumpenstein.

RUPP, H., R. MEISSNER, P. LEINWEBER, B. LENNARTZ und M. SEYFARTH, 2005: Ein neues Lysimeter zur Messung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Niedermoorstandorten (einschließlich lateraler Komponenten). 11. Gumpensteiner Lysimetertagung "Lysimetrie im Netzwerk der Dynamik von Ökosystemen" vom 5. - 6. April 2005, 67-69, Gumpenstein.

STENITZER, E. und J. FANK, 2007: Schwerkraft-versus Unterdruck-Lysimeter - Eine Simulationsstudie. Beiträge zur Hydrogeologie, Graz (in Druck).

UNOLD, G. v. und J. FANK, 2007: Modular Design of four standardized field lysimeter solutions. Air, soil & pollution. Special Issue (in review).