

Perspektiven in der Lysimetrie

Johann Fank^{1*}

Zusammenfassung

Aufgrund der geringen Rückantwortquote aus einer Fragebogenaktion an Lysimeterbetreiber wird versucht, Perspektiven der Lysimetrie aus jüngsten Arbeiten und den Informationen der Exkursion der Arbeitsgruppe Lysimeter im September 2008 in die Neuen Bundesländer der BRD abzuleiten.

Im Bereich der Lysimetertechnik erscheint eine gewisse Standardisierung hin zu monolithischen wägbaren Lysimetern erkennbar zu sein. Dies wurde erst durch die Verfügbarkeit entsprechender Sensorik möglich. Auch in der Behandlung der „Unteren Randbedingung“ sind innovative Entwicklungen erkennbar.

Im Bereich der Lysimeteranwendung werden Innovationen einerseits in der Bergbaufolgelandschaftsforschung, der Klimawandelfolgeforschung aber auch im Bereich der Hydrologie und der Agrarwissenschaften sichtbar. Der Bedeutung der „Unteren Randbedingung“ der Lysimeter sollte im Zuge von Stofftransportuntersuchungen noch stärkere Beachtung geschenkt werden.

Aus der Forderung, verstärkt gekoppelte komplexe Gesamtsysteme untersuchen zu wollen, wird die Entwicklung von Lysimetern zur Erfassung der Interaktion von Atmosphäre – Boden – Ungesättigte Zone und Grundwasser ebenso notwendig sein, wie die Erarbeitung von entsprechenden Einrichtungen zur Messung von Hangwasserflüssen.

Schlagwörter: Lysimeter, Hydrologie, Land- und Forstwirtschaft, Altlasten, Modellierung

Summary

Perspectives on lysimetry will be derived from scientific papers and information gathered at the excursion of the Lysimeter Research Group in September 2008, which led us to the newly-formed German states, because the reply on a questionnaire that has been sent to operators of lysimeters on future use of their lysimeters was very low.

In technical aspects a trend towards the implementation of weighable monolithic lysimeters is visible. The development of new sensor techniques and measuring devices is the basis. To handle the lysimeter's lower boundary innovative developments are to be recognized.

Lysimeter investigations are more intensive used in the area of post-mining reclamation, in research on the consequences of global climate change effects on the water cycle, in hydrology and agronomy, in forestry and in brownfield assessment. It will be necessary to consider the relevance of the lysimeters lower boundary in a more intensive way in solute transport investigations.

Research on coupled complex systems will lead to the development of new types of lysimeters to investigate the interaction of atmosphere – soil – unsaturated zone and groundwater as well as water flow and transport in hilly areas.

Keywords: lysimeter, hydrology, agriculture, forestry, brownfields, modelling

Einleitung

Zur Erfassung von Forschungstendenzen und zukünftigen Perspektiven der Lysimeteranwendung wurde ein Fragebogen an Lysimeterbetreiber der Europäischen Lysimeterplattform (www.lysimeter.at) und an weitere Forschungseinrichtungen, die sich mit Lysimetern beschäftigen, versandt. Die Rückmeldungen auf diese Anfrage waren nur wenige, in den meisten Fällen war eine künftige Orientierung der Lysimeteranlagen im Vergleich mit den bisherigen Nutzungen nicht ersichtlich.

Aus diesem Grunde wurde versucht, die Perspektiven der Lysimeterforschung aus jüngster Literatur sowie aus Informationen, die im Zuge der Exkursion der Lysimeter Research Group im September 2008 in die Neuen Deutschen Bundesländer verfügbar gemacht wurden, abzuleiten. Naturgemäß ist die Beschreibung von künftigen Perspektiven

nicht umfassend, sondern fokussiert auf den Erfahrungen des Autors.

Perspektiven der Lysimetrie

Die künftigen Perspektiven der Lysimetrie werden in diesem Beitrag aus zwei unterschiedlichen, sich aber naturgemäß überschneidenden Winkeln betrachtet: einerseits werden aktuelle Entwicklungen in der Lysimetertechnik angesprochen – diese wurden auch im Rahmen eines Workshops in München durch MEISSNER et al. (2008) näher beleuchtet –, andererseits wird die Umsetzung der Lysimetertechnik in unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten diskutiert.

Lysimetertechnik

Im Bereich der Lysimetrie scheint sich in den letzten Jahren der Einsatz von monolithischen Lysimetern im Vergleich

¹ Joanneum Research, Institute of Water Resources Management - Hydrogeology and Geophysics, Elisabethstraße 16/II, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: johann.fank@joanneum.at



Abbildung 1: Entnahmetechniken für ungestörte Bodenmonolithen nach MEISSNER et al. 2007 a (links), TAKAMATSU et al. 2007 (rechts) und Monolithentnahme an der Forschungsstation Wagna (Mitte).

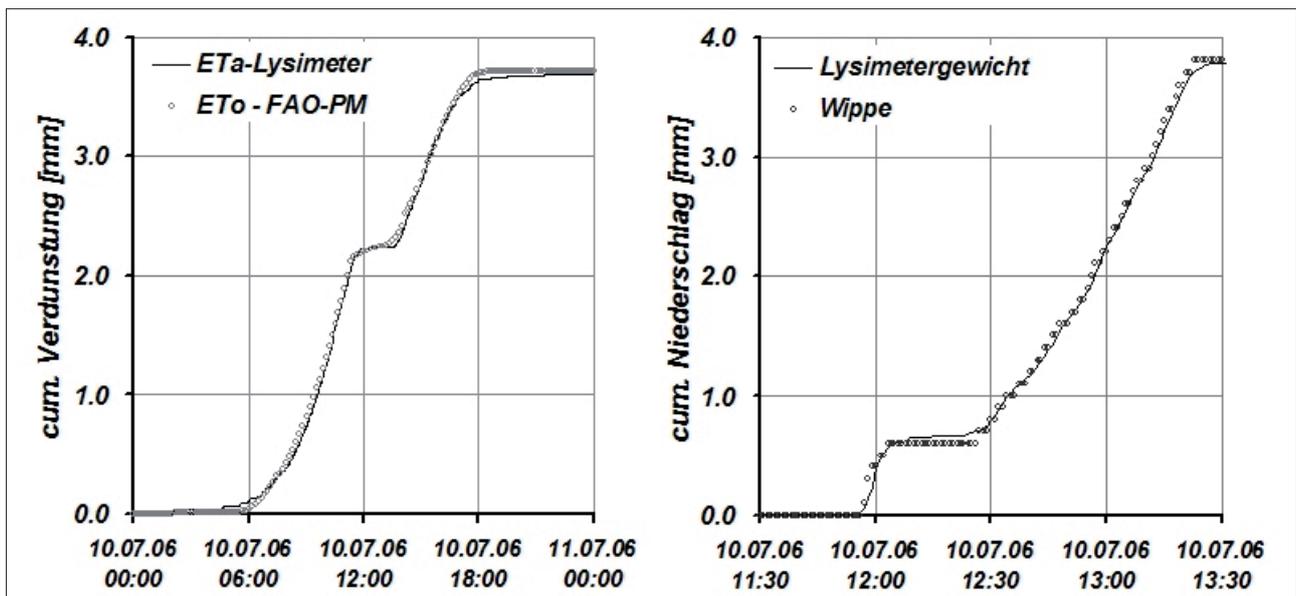


Abbildung 2: Präzisionslysimeter Wagna 10. Juli 2006: links: Vergleich der gemessenen Gras-Verdunstung mit der nach ALLEN et al. (2006) berechneten Gras-Referenzverdunstung; rechts: Summenkurve des Minutenniederschlags aus der Auswertung des Lysimetergewichtes und aus den Daten der Niederschlagswippe der ZAMG.

zu befüllten deutlich stärker durchzusetzen. Dies vor allem in jenen Bereichen in denen Wasserfluss- und Stofftransportverlagerung in natürlichen Systemen untersucht wird. Möglich war diese Entwicklung in erster Linie durch die Verbesserung der Entnahmetechnik auch großvolumiger Monolithe in unterschiedlichen Böden und Sedimenten. In *Abbildung 1* sind unterschiedliche Monolith-Entnahmeverfahren im praktischen Einsatz dargestellt.

Vor allem für die Anwendung in feinklastischen Böden und Sedimenten wurden automatisierte Entnahmeverrichtungen auf der Basis von Schneidetechniken (MEISSNER et al. 2007 a) bzw. auf Basis der Sprialbohrtechnik (TAKAMATSU et al. 2007) diskutiert. Dazu wurden Möglichkeiten zur vorhergehenden Modellierung des Schneidvorganges und damit einer Optimierung der Entnahme vorgestellt (PÜTZ et al. 2008). In grobklastischen und inhomogenen Sedimenten erscheint mir die offene Monolithentnahme mit Abtragung des Umgebungsmaterials und langsamen genau senkrechten Eindrückens des Entnahmezylinders die bessere Variante darzustellen, da dadurch eine dauernde Kontrolle des Sediments an der Entnahmeschneide möglich ist. Gerade in Sedimenten inhomogener Kornstruktur, in dem auch sehr grobe Steine zu finden sind, ist diese Kontrolle zur

Vermeidung der Schaffung präferentieller Fließwege an der Lysimeterwandung entscheidend. An den Präzisionslysimetern in Wagna konnte mittels Tracerversuchen für inhomogene Sande, Kiese und Grobkomponenten nachgewiesen werden, dass präferentielle Flüsse an der Lysimeterwandung vernachlässigbar sind (FANK und DURNER 2008).

Wesentlich in der Wandlung der Lysimeter vom einfachen Feldmessgerät zu wägbaren Präzisionsinstrumenten war die Weiterentwicklung der Wiegetechnologie, die es heute erlaubt, auch große Lysimetervolumina mit einem Gewicht von > 5 Tonnen mit sehr hoher Auflösung kurzintervallig zu erfassen. Dadurch wurde es möglich, auch sehr zeitkritische Größen wie Tau-, Nebel- und Reifbildung mit Hilfe von Lysimetern zu messen (MEISSNER et al. 2007 b). Eine entsprechende Auswertung der Gewichtsganglinien erlaubt eine sehr detaillierte Messung der Verdunstung und auch des Bestandniederschlags, wie in *Abbildung 2* für das Gras-Referenzlysimeter am Versuchsfeld in Wagna dargestellt ist. Damit konnte für den Standort Wagna die Signifikanz des FAO-PM Berechnungsverfahrens (ALLEN et al. 2006) aus 10'-Wetterdaten zur Ermittlung der Gras-Referenzverdunstung nachgewiesen werden.

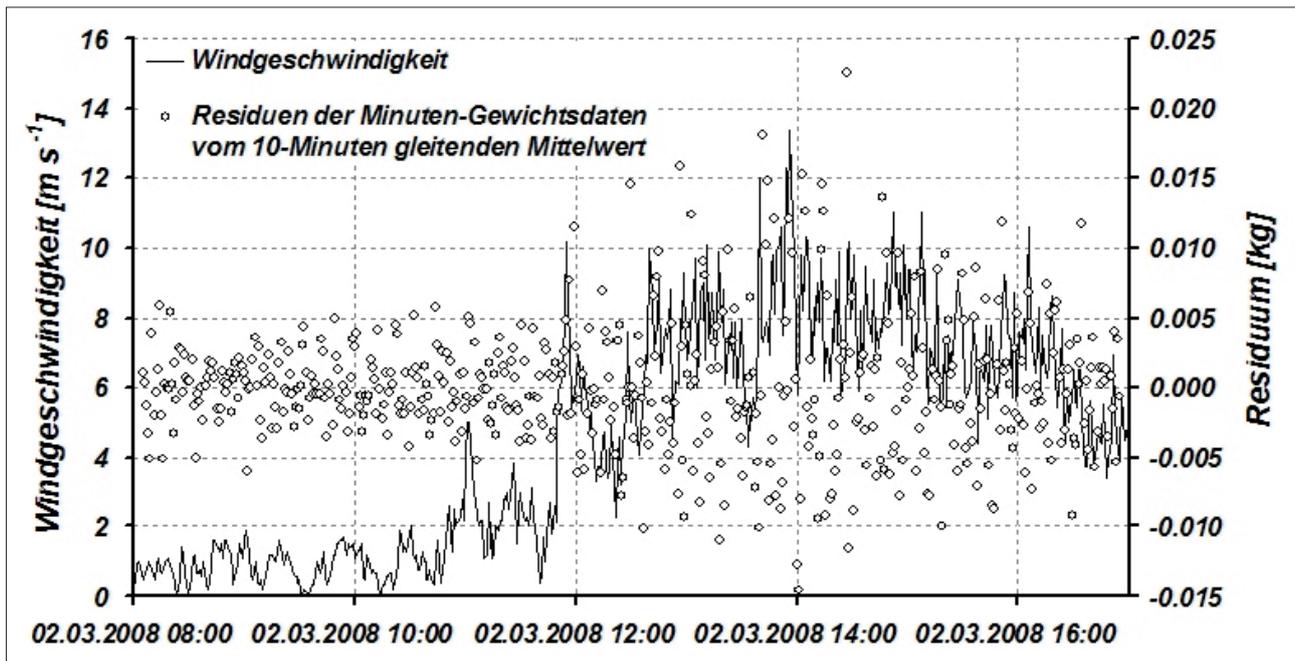


Abbildung 3: Präzisionslysimeter Wagna: Auswirkung von Änderungen der Windgeschwindigkeit auf die Genauigkeit der Wägedaten.

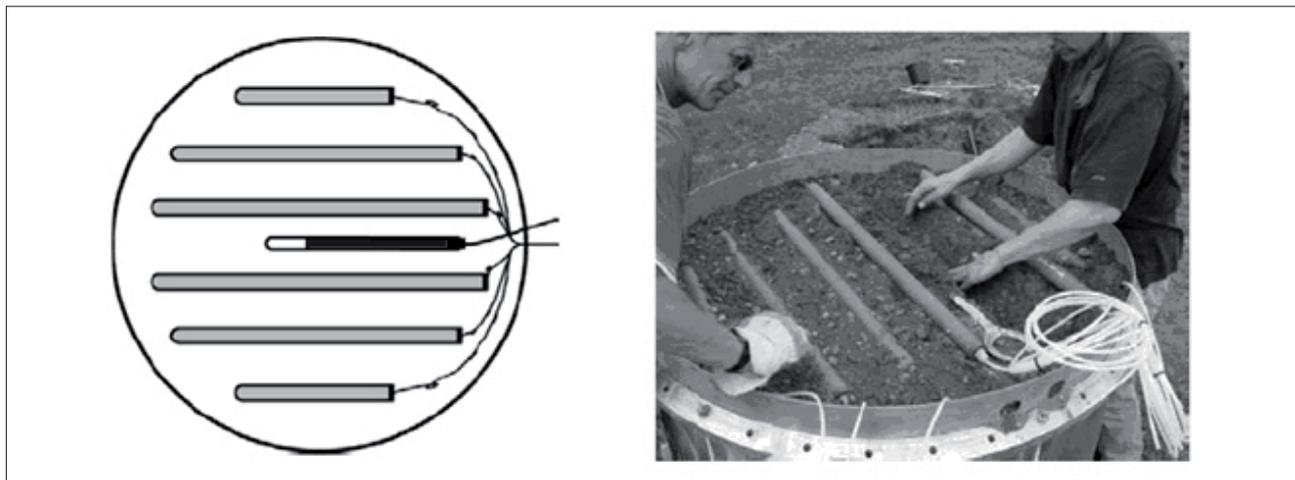


Abbildung 4: Schematischer Aufbau und Foto des Saugkerzenrechs (VON UNOLD 2008).

Durch eine entsprechende Verteilung des Lysimetergewichtes auf drei Wiegezellen, die in Y-Form angeordnet sind, kann auch der Windeinfluss auf die Lysimetergewichtsmessung minimiert werden. Wie in *Abbildung 3* dargestellt, steigt die Messgenauigkeit bei höheren Windgeschwindigkeiten zwar an, die Messgenauigkeit des Lysimetergewichtes liegt aber auch bei Windspitzen von etwa 15 m/s am Versuchsfeld Wagna bei < 0.05 kg bzw. bei einer Oberfläche von 1 m² bei < 0.05 mm Wasseräquivalent. Bei Windgeschwindigkeiten von < 5 m/s, wie sie am Versuchsfeld typisch sind, liegt die Messgenauigkeit der Lysimeterwaage bei < 0.01 kg bzw. mm.

Wesentliche Fortschritte wurden in den letzten Jahren auch in der Behandlung der Unteren Berandung der Lysimeter und deren Bedeutung für Fließ- und Transportprozesse ge-

macht. In diesem Zusammenhang liegen die Schwerpunkte derzeit auf zwei unterschiedlichen Konzepten:

- Integration eines künstlichen Grundwasserspiegels in das Lysimeter, der im Idealfall automatisiert an die natürlichen Verhältnisse im Freiland angepasst wird (BETHGE et al 2005). Dadurch wird auf Höhe des Grundwasserspiegels ein Potential von 0 gegenüber dem Atmosphärendruck geschaffen. Durch die Wägung und die gemessenen Grundwasserzu- und -abflüsse kann die Grundwasserneubildung von grundwasserbeeinflussten Standorten bestimmt werden.
- Einbau eines Saugkerzenrechs (VON UNOLD 2008) am unteren Ende des Lysimeters (*Abbildung 4*). An diese Saugkerzen wird das im Freiland in gleicher Tiefe und im gleichen Horizont gemessene Potential als Unterdruck

angelegt und automatisch nachgeführt. Durch den Einsatz einer bidirektionalen Pumpe (STEINS 2008) kann dabei nicht nur die Sickerwassermenge gemessen sondern auch aufsteigendes Kapillarwasser messtechnisch erfasst werden.

Mobilfunktechnologie und das Internet erlauben es dem Betreiber zu jeder Zeit aktiv in das Geschehen einzugreifen. Gerade in der Startphase einer Messstation bedarf es intensiver Kontrolle über die Sensorik und die Steuerung. Bei der Nutzung moderner Sensortechnologie können Regelparameter über das Internet online an den Datenlogger übergeben werden, Wartungsfunktionen können remote durchgeführt werden, oder effektiv vor dem Besuch der Station geplant werden. Die Betreiber der Messstation haben Zugang zu den Messdaten und weiteren angebotenen Systemen wie z.B. Videoüberwachung und Bodenwasserprobeentnahme (STEINS 2008).

Flexible Datenbanksysteme in Verbindung mit der Datenfernübertragung werden in Zukunft den Wissenschaftler

noch stärker von lästigen Aufgaben der Datenverwaltung entlasten. Ein Beispiel für eine derartige Applikation, die neben der Datenverwaltung auch die Visualisierung und Auswertung übernehmen kann wurde von ROCK und FANK (2008) am Beispiel der Lysimeteranlage Wagna vorgestellt.

Lysimeteranwendung

Während wägbare Präzisionslysimeter in mehreren Lysimeterstationen bereits seit längerem implementiert sind, wurden im Jahr 2004 am Versuchsfeld Wagna zwei wägbare unterdruckgesteuerte Präzisionslysimeter als mechanisch bewirtschaftbare Feldlysimeter implementiert. Die Vorgangsweise zur ortsüblichen maschinellen Bewirtschaftung der Lysimeter ist in *Abbildung 5* dokumentiert.

Die beiden zylindrischen Feldlysimeter sind oberflächengleich in jeweils ein 1 000 m² großes ackerbaulich bewirtschaftetes Versuchsfeld derart eingebaut, dass nach Ausbau

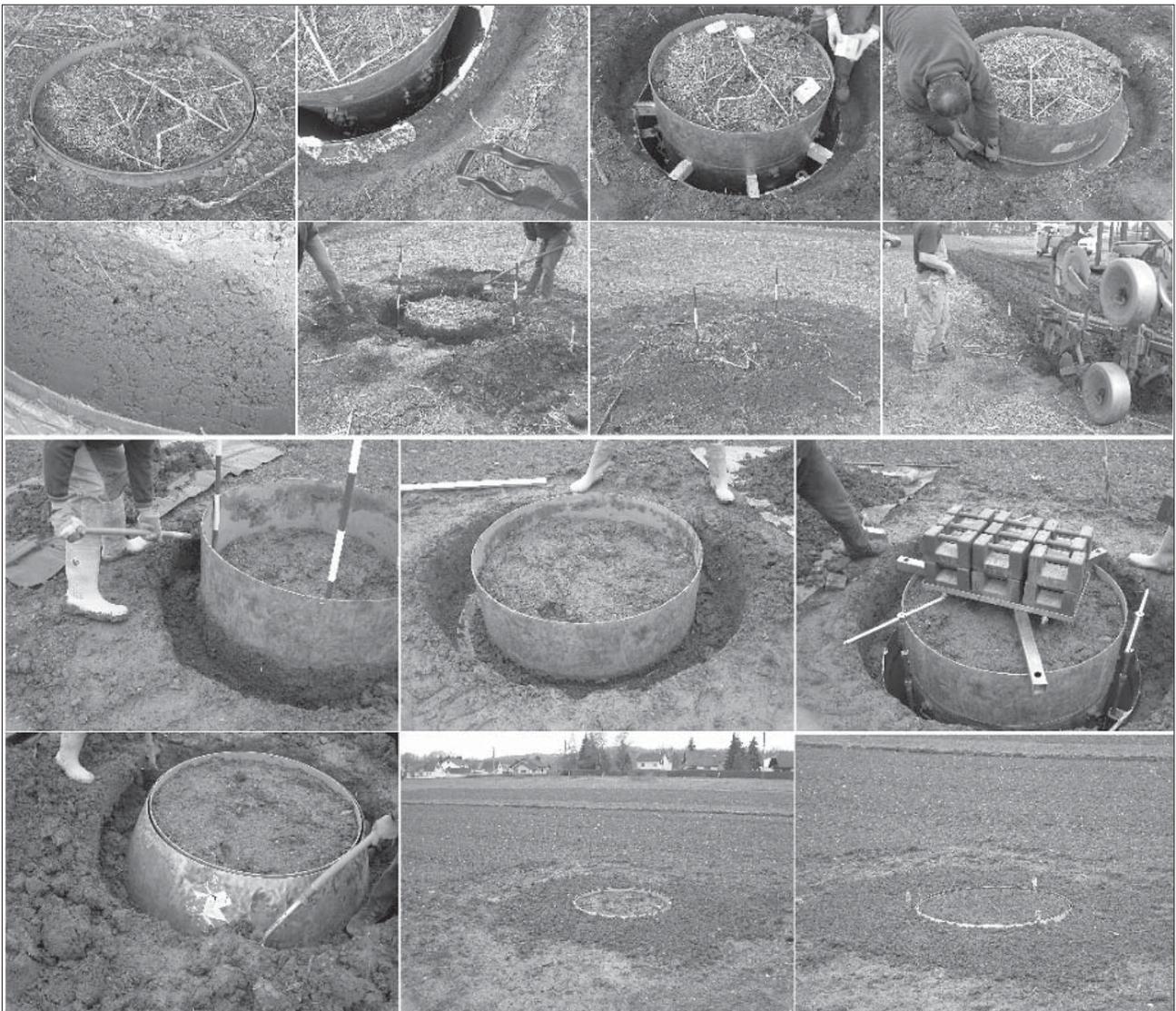


Abbildung 5: Präzisionslysimeter Wagna: Bildfolge zur Beschreibung der Vorbereitungsarbeiten, der mechanischen Bewirtschaftung und des anschließenden Aufbaus des Präzisionslysimeters.

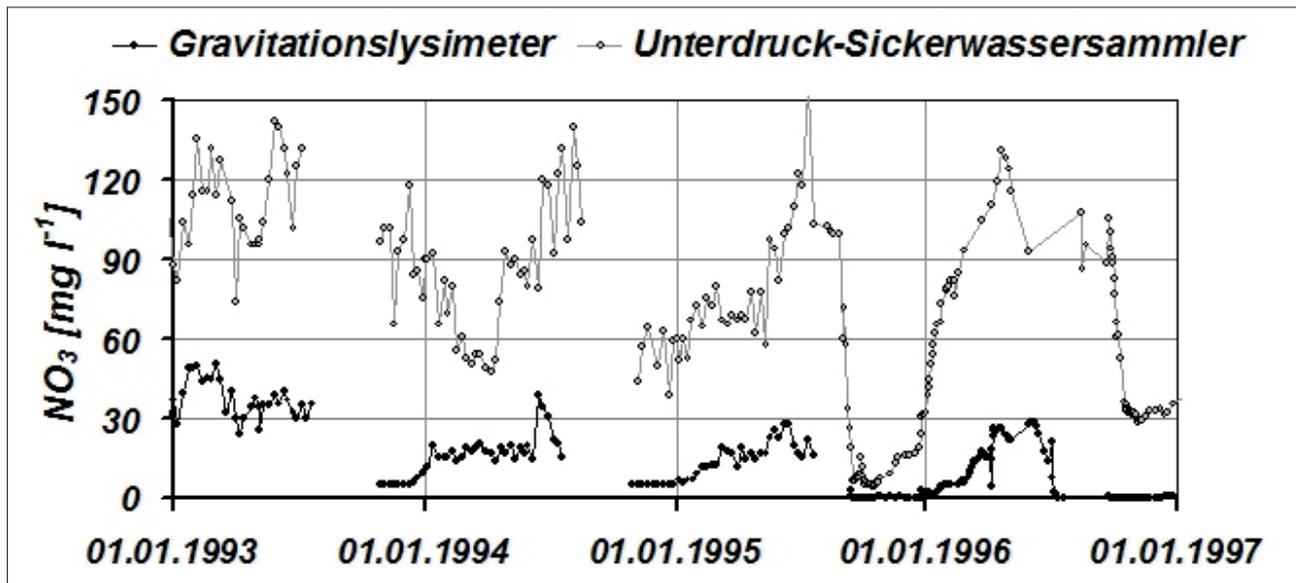


Abbildung 6: Vergleich der Nitratkonzentration im Sickerwasser eines Gravitationslysimeters und eines gesteuerten Unterdruck – Sickerwassersammlers am Versuchsfeld Wagna unter gleichen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen.

der obersten 35 cm der Lysimeterzylinder das Lysimeter, wie das gesamte Versuchsfeld gepflügt und bewirtschaftet werden kann. Nach der Saatbeetbereitung werden die Bewirtschaftungsringe wieder eingebaut und das Lysimeter über die Spindeltriebe wieder auf die Wiegezellen gestellt. Diese Art der Feldlysimeter liefert präzise Daten zur Validierung von Modellen der Wasserbewegung, des Stoffumsatzes und des Stofftransportes und kann die Lücke zwischen der Laborskala und der Feldskala schließen (FANK 2008). Die Vorteile der Präzisions-Feldlysimeter liegen in einer möglichst realistischen Nachbildung natürlicher Feldsysteme, sind aber naturgemäß aufwändig in der Errichtung und die Anzahl von Wiederholungen ist dadurch stark eingeschränkt. Im Gegensatz dazu haben Lysimeterstationen den Vorteil, dass unterschiedliche Versuchsanstellungen an verschiedenen Böden an einem Standort getestet werden können, wobei die Infrastruktur aufgrund der vielfachen Wiederholungen naturgemäß wesentlich kostengünstiger ist. Der Nachteil ist dabei, dass für wesentliche Prozesse des Wasserkreislaufs – wie die Messung der Verdunstung – ein einheitlicher Bestand und Boden auf einer größeren Umgebungsfläche eine Grundvoraussetzung darstellt. Die Bewirtschaftung der Lysimeter in Lysimeterstationen kann üblicherweise nur manuell durchgeführt werden, was im Vergleich zu Freilandversuchen sicherlich deutliche, im Detail aber nicht bekannte Unterschiede in den Ergebnissen darstellt.

Wie bereits erwähnt, haben sich in den letzten Jahren zur Untersuchung von Wasser- und Stoffflüssen in naturnahen Systemen monolithische gegenüber befüllten Lysimetern immer stärker durchgesetzt. Befüllte Lysimeter haben dagegen im Bereich der Altlastenerkundung und der Beurteilung der Wirkungsweise von Deponieabdeckungen ihre Berechtigung, da hier auch im Freilandssystem künstliche Profile geschaffen werden.

Von derzeit noch unterschätzter Bedeutung für Wasser- und Stofftransportuntersuchungen ist der Einsatz von gesteu-

erten Unterdrucklysimetern im Vergleich zu Gravitationslysimetern. Auch im Bereich von landwirtschaftlichen Untersuchungen zu Fragen des Stoffaustuges werden aus Kostengründen noch gerne einfachere Schwerkraftlysimeter eingesetzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in jedem Gravitationslysimeter vor dem Austritt aus dem Lysimeter ein gesättigter Bereich aufgebaut werden muss, in dem unkontrollierte Stoffumsetzungen passieren können (und auch passieren). Für die Frage des Wasserflusses wurde der Einfluss der Unteren Randbedingung von STENITZER und FANK (2008) untersucht. Dabei wurde als Ergebnis festgehalten, dass auf seichtgründigen Böden und bei deutlich positiver Wasserbilanz der Fehler in der Größenordnung von < 10 % ist, bei tiefgründigen Böden in trockenen Gebieten allerdings der Einfluss eines angelegten Unterdruckes von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung der Grundwasserneubildung sein kann.

Um die Problematik der Auswirkung unterschiedlicher Randbedingungen an der Unterseite von Lysimetern auf den Stickstoffumsatz und -transport zu veranschaulichen ist in *Abbildung 6* vergleichend die Ganglinie der Nitratkonzentration aus einem Gravitationslysimeter und einem unterdruckgesteuerten Sickerwassersammler der Forschungsstation Wagna bei gleicher Bewirtschaftung und gleichen Bodenverhältnissen dargestellt. Bei annähernd vergleichbaren Sickerwassermengen und auch bei annähernd gleichem Transportverhalten von Tracern in den beiden Systemen ist der Stickstoffaustag (auch unter Berücksichtigung gemessener Ammonium und Nitritkonzentrationen im Sickerwasser) aus dem Gravitationslysimeter nur ein Bruchteil desjenigen aus dem in der Versuchsfläche eingebauten Sickerwassersammler, obwohl die Erträge und damit die Stickstoffentzüge durch die Pflanzen am Lysimeter deutlich unter denjenigen des Versuchsfeldes lagen. Obwohl der Gravitationslysimeter künstlich befüllt wurde, wird der gravierende Unterschied in den gemessenen Nitratwerten den Prozessen von Stoffumwandlungen zugeordnet, da aus

den Messdaten der Jahre 1991 und 1992 die Konsolidierung des geschütteten Lysimeters erkennbar war.

Gerade im Hinblick auf den Klimawandel und dessen Folgen für den Wasserkreislauf auf der einen Seite und im Zusammenhang mit der Anforderung der Gesamtbetrachtung komplexer natürlicher Systeme ist die Entwicklung neuer Lysimetertypen für unterschiedliche Anwendungen künftig zu forcieren. Als Beispiel sei hier die Entwicklung eines horizontal monolithisch gestochenen und wägbaren Lysimeters für Untersuchungen des Wasser- und Stofftransportes in Niedermoorgebieten (RUPP et al. 2007) genannt. Die Entwicklung in der Lysimeter- und Sensortechnologie lässt es aber auch durchaus möglich erscheinen, Messinstrumente zur quantifizierenden Erfassung von Hangwasserflüssen und der dabei ablaufenden Stofftransportprozesse zu entwickeln. Gleiches gilt auch für die gemeinsame Erfassung von Wasser- und Stofftransportprozessen in Böden - Ungesättigter Zone – Grundwasser, wobei aufbauend auf derzeitige Grundwasserlysimeter nicht nur die hydraulische Wirkung, sondern auch der Stoffaustausch zwischen dem Grundwasser außerhalb und innerhalb des Lysimeters beobachtet werden sollte.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Aufgrund der aktuellen Entwicklungen der Sensortechnologie und des konsequenten Einsatzes in der Lysimeterbauweise erscheint die Anwendung von Lysimetern für unterschiedliche Untersuchungsziele erst am Anfang zu stehen. Durch die Entwicklungen im Bereich der Monolithentnahme und die Verwendung von standardisierten Komponenten konnten die Kosten für den Aufbau komplexer Lysimeter so weit reduziert werden, dass deren Einsatz in Langzeituntersuchungen des Umweltmonitorings sich deutlich erhöhen wird. Gleichzeitig liefern moderne Lysimeter die besten Datensätze für die Validierung von Wasserbewegungs- und Stoffumsatz- und -transportmodellen in der Ungesättigten Zone. Angedachte Entwicklungen der Lysimetertechnologie zur Erfassung von Hangwasserflüssen bzw. von Lysimetern zur integrativen Erfassung von Wasser- und Stoffflüssen im Gesamtsystem Atmosphäre – Boden - Ungesättigte – Zone – Grundwasser lassen neue Monitoringaufgaben wie die Beobachtung der Wechselwirkung zwischen Oberflächen- und Grundwasser - ein wesentlicher Datensatz für ökologische Fragestellungen - oder die Auswirkung von Überflutungsflächen auf die Grundwassersituation ins Blickfeld rücken.

Literatur

- ALLEN, R.G., W.O. PRUITT, J.L. WRIGHT, T.A. HOWELL, F. VENTURA, R. SNYDER, D. ITENFISU, P. STEDUTO, J. BERENGENA, J.B. YRISARRY, M. SMITH, L.S. PEREIRA, D. RAES, A. PERRIER, I. ALVES, I. WALTER and R. ELLIOTT, 2006: A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81, 1-22, Elsevier.
- BETHGE-STEFFENS, D., R. MEISSNER und H. RUPP, 2005: Ein wägbares Grundwasserlysimeter zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung von Flussauestandorten. *Proceedings der 11. Gumpensteiner Lysimetertagung*, 147-148, Irdning.
- FANK, J., 2008: Monolithic field Lysimeter – a precise tool to close the gap between laboratory and field scaled investigations. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-04959, 2008 SRRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-04959 EGU General Assembly 2008.
- FANK, J. and W. DURNER, 2008: Testing Fringe Effects for Bromide Transport in High Precision Weighable Field Lysimeters. 2nd Workshop Lysimeters for Global Change Research: Biological Processes and the Environmental Fate of Pollutants, April 23-25, Book of Abstracts, 34, München.
- MEISSNER, R., J. FANK, T. PÜTZ and S. RETH, 2008: Technological Progress in Lysimeter Research. 2nd Workshop Lysimeters for Global Change Research: Biological Processes and the Environmental Fate of Pollutants, April 23-25, Book of Abstracts, 11, München.
- MEISSNER, R., H. RUPP, M. SEYFARTH und H. FRIEDRICH, 2007 a: Verfahren zur Entnahme von monolithischen Bodensäulen, insbesondere mit großem Volumen, sowie Lysimeter zur Durchführung des Verfahrens. Deutsches Patent erteilt am 21.06.2007 mit der Nummer 102005062896.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP, M. SEYFARTH und H. BORG, 2007 b: Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation Lysimeter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2007, 170, 335-344.
- ROCK, G. und J. FANK, 2008: Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern/3.1. Wägbare monolithische Feldlysimeter in Wagna: Messdatenerfassung und Auswertekonzepte.– In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): *Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.– Beiträge z. Hydrogeologie*, 56, (in Druck), Graz.
- PUETZ, Th., J. SCHILLINGS, R. SIEVERING and H. VERECKEN, 2008: Impact on a soil monolith during lysimeter filling. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-08480, 2008 SRRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-08480 EGU General Assembly 2008.
- RUPP, H., R. MEISSNER, P. LEINWEBER, B. LENNARTZ and M. SEYFARTH, 2007: Design and Operability of a Large Weighable Fen Lysimeter. *Water Air Soil Pollut* (2007) 186:323–335.
- STEINS, A., 2008: Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern/2. Anforderungen an die Messtechnik zur Umsetzung moderner Datengewinnungskonzepte.– In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): *Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.– Beiträge z. Hydrogeologie*, 56, (in Druck), Graz.
- STENITZER, E. und J. FANK, 2008: Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern/4.2. Schwerkraft- versus Unterdrucklysimeter – eine Simulationsstudie.– In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): *Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.– Beiträge z. Hydrogeologie*, 56, (in Druck), Graz.
- TAKAMATSU, T., M.K. KOSHIKAWA, M. WATANABE, H. HOU and T. MURATA, 2007: Meso-scale indoor lysimeter with undisturbed monolithic Andosol to investigate the behaviour of solutes in soil. *European Journal of Soil Science*, 58 (1), 329-334.
- VON UNOLD, G., 2008: Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern/ 1. Modulare Konzepte der Lysimetertechnologie für differenzierte Anwendungsbereiche und deren Einordnung in die Skalenproblematik.– In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): *Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.– Beiträge z. Hydrogeologie*, 56, (in Druck), Graz.