



Ifz
raumberg
gumpenstein

Lehr- und Forschungszentrum
Landwirtschaft
www.raumberg-gumpenstein.at

13. Gumpensteiner Lysimetertagung

Lysimeter - Perspektiven in Forschung
und Anwendung

Lysimeters - perspectives in research
and application

am 21. und 22. April 2009

Organisiert von:
Lehr- und Forschungszentrum für
Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein
Arbeitsgruppe Lysimeter



lebensministerium.at

www.raumberg-gumpenstein.at

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).

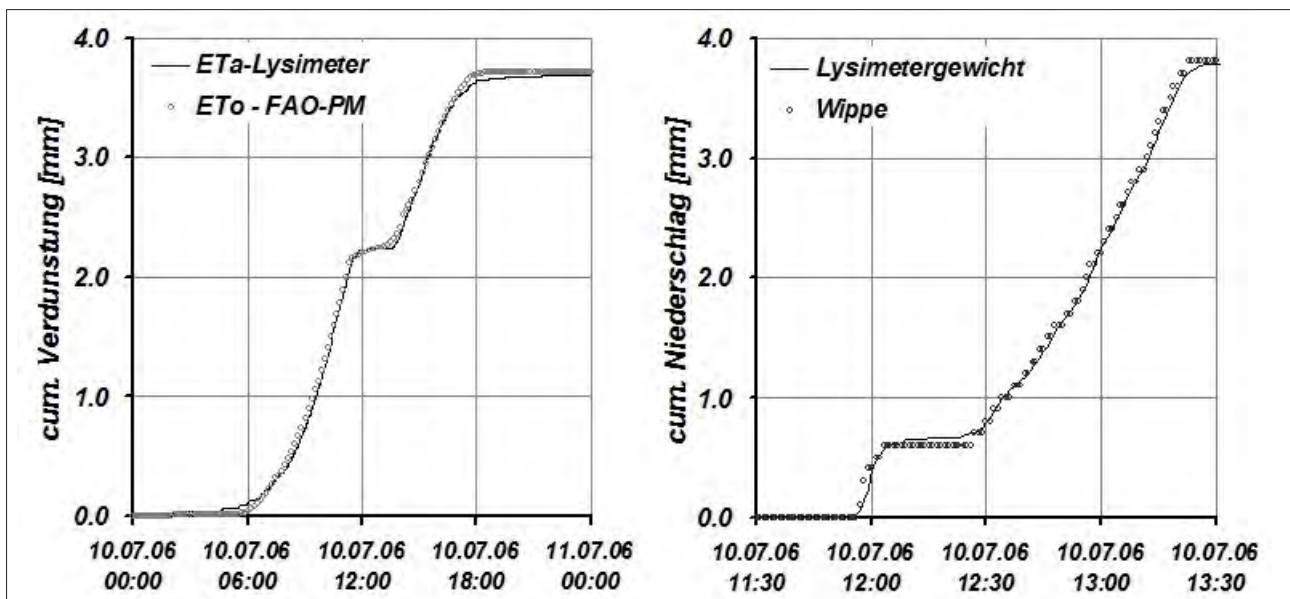


Abbildung 2: Präzisionslysimeter Wagna 10. Juli 2006: links: Vergleich der gemessenen Gras-Verdunstung mit der nach ALLEN et al. (2006) berechneten Gras-Referenzverdunstung; rechts: Summenkurve des Minutenniederschlags aus der Auswertung des Lysimetergewichtes und aus den Daten der Niederschlagswippe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

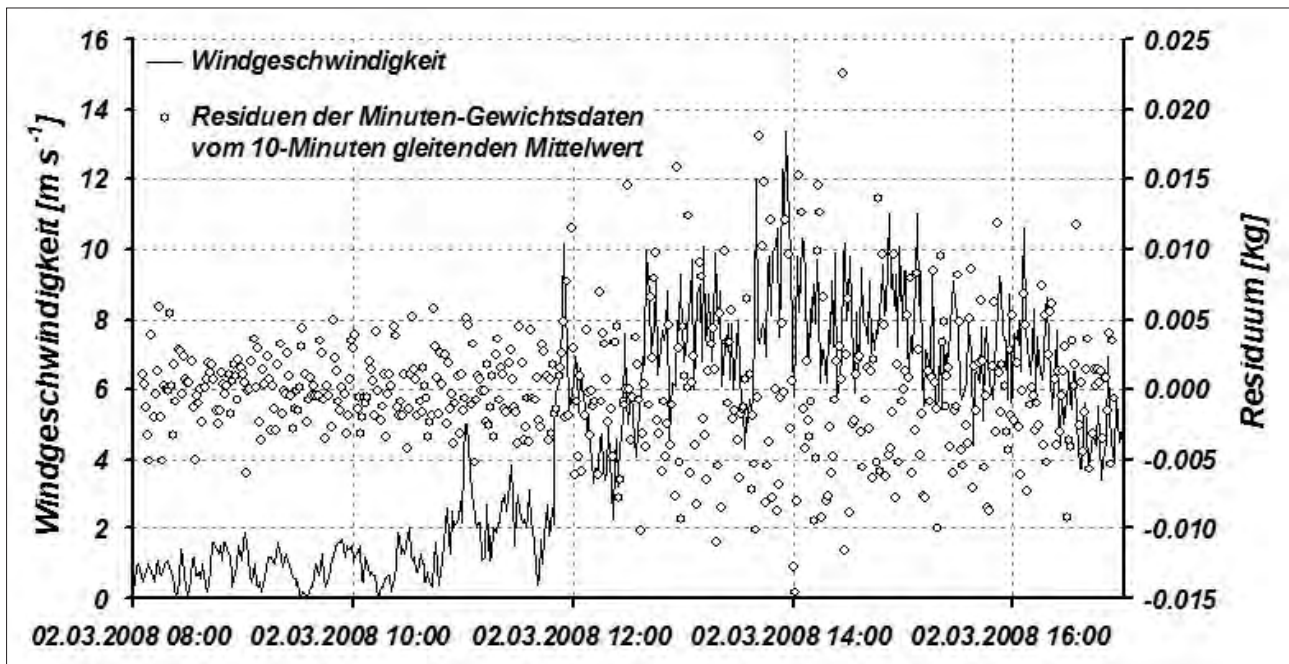


Abbildung 3: Präzisionslysimeter Wagna: Auswirkung von Änderungen der Windgeschwindigkeit auf die Genauigkeit der Wägedaten.

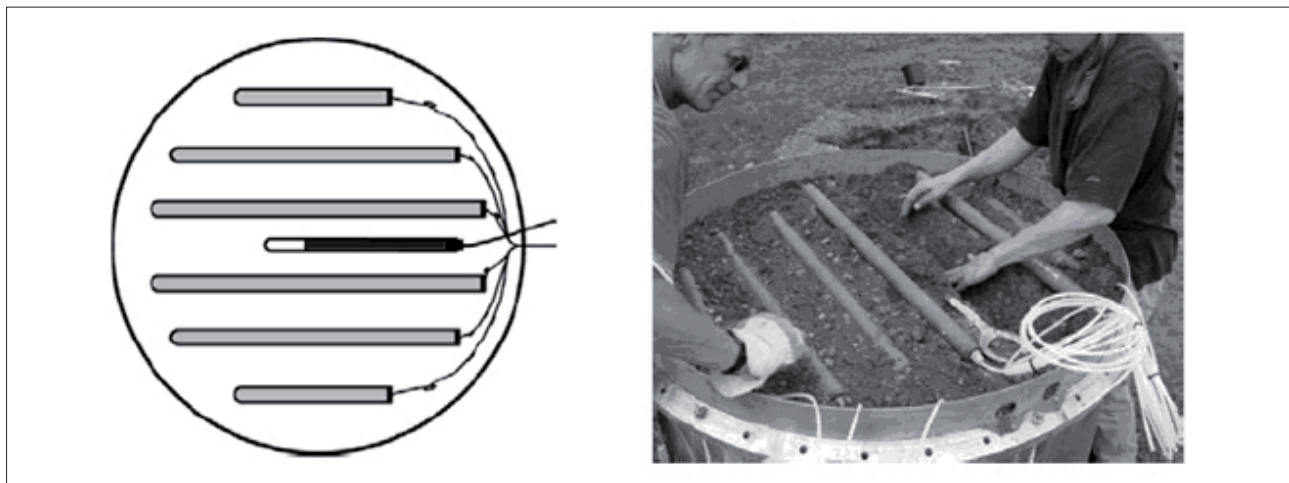


Abbildung 4: Schematischer Aufbau und Foto des Saugkerzenrechs (VON UNOLD 2008).

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

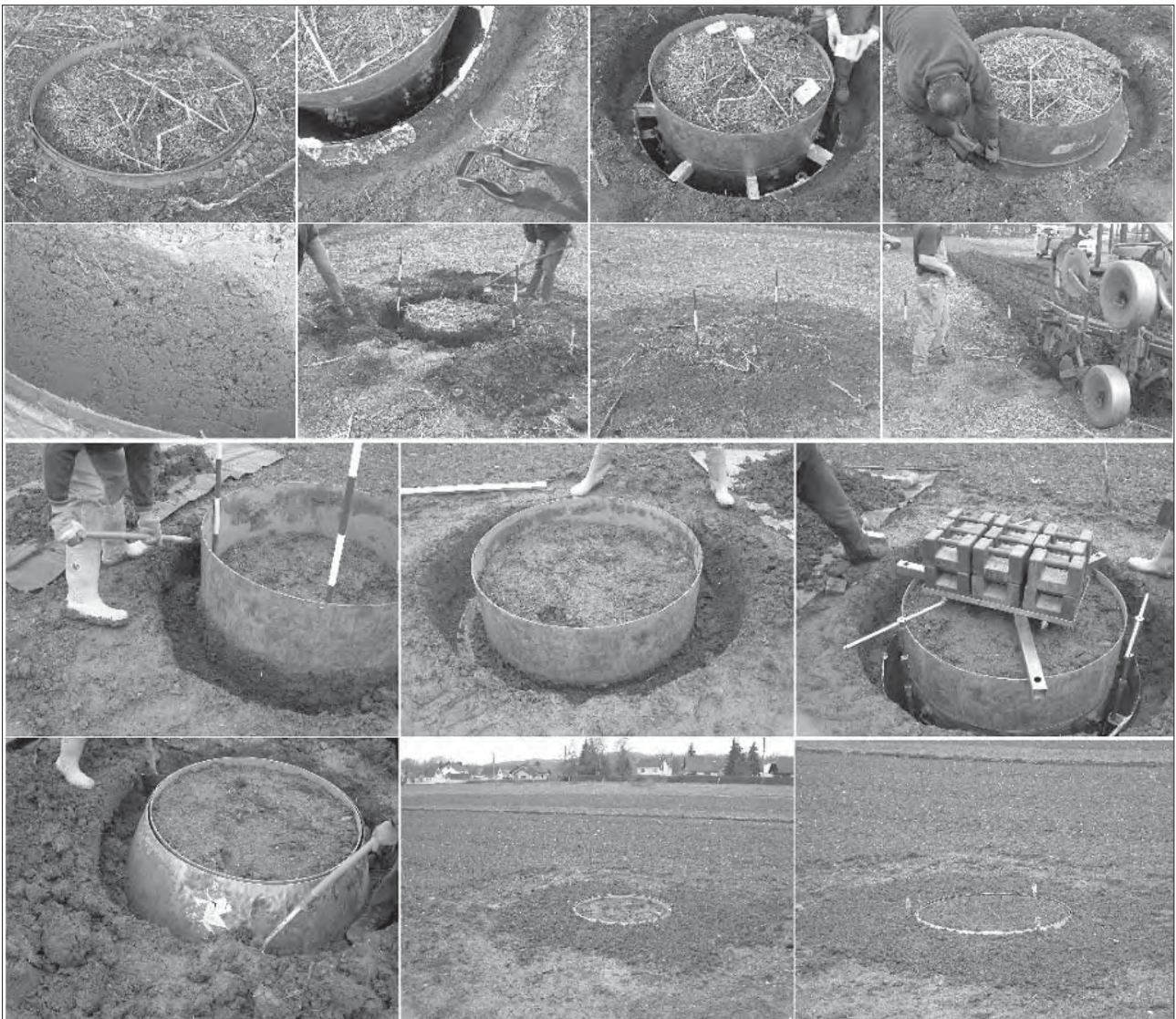


Abbildung 5: Präzisionslysimeter Wagna: Bildfolge zur Beschreibung der Vorbereitungsarbeiten, der mechanischen Bewirtschaftung und des anschließenden Aufbaus des Präzisionslysimeters.

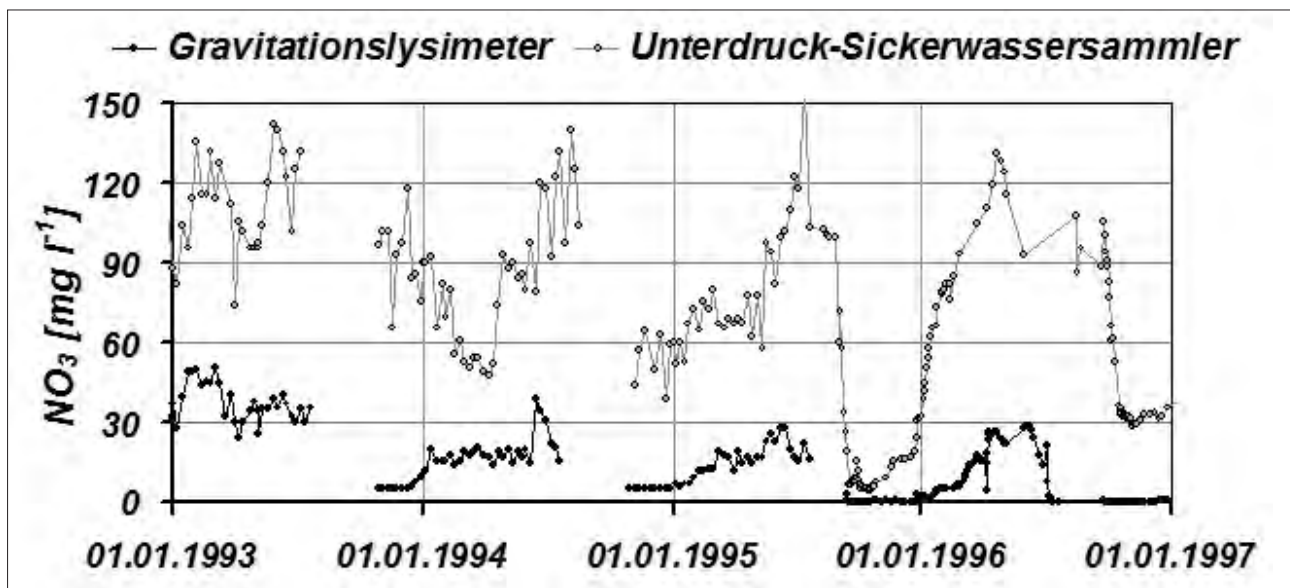


Abbildung 6: Vergleich der Nitratkonzentration im Sickerwasser eines Gravitationslysimeters und eines gesteuerten Unterdruck – Sickerwassersammlers am Versuchsfeld Wagna unter gleichen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen.

der obersten 35 cm der Lysimeterzylinder das Lysimeter, wie das gesamte Versuchsfeld gepflegt 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 Stoffaustrages 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 Flusssauenstandorten. *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.

Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz

Volker Prasuhn^{1*}, Ernst Spiess¹ und Manfred Seyfarth²

Zusammenfassung

Am Standort Zürich-Reckenholz ist auf dem Gelände der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART eine neue Groß-Lysimeteranlage gebaut worden. Sie umfasst 72 Lysimetergefäße mit jeweils 1 m² Oberfläche und 150 cm Tiefe. Die Anlage ist unterkellert, alle Gefäße sind also von unten zugänglich. Die 72 Böden wurden alle monolithisch genommen. Es wurden drei verschiedene Ackerböden (lehmmige Parabraunerde über Schotter, sandig-lehmige Parabraunerde über Grundmoräne, lehmig-schluffige, pseudovergleyte Braunerde über Grundmoräne) eingesetzt. 12 Lysimeter sind wägbare und mit folgenden Messsonden ausgestattet: Tensiometer, Temperatur, Bodenfeuchte und Saugkerzen in jeweils vier Bodentiefen (10, 30, 60 und 90 cm) und zweifacher Wiederholung. Die restlichen 60 Lysimeter sind nicht wägbare und es wird nur die Sickerwassermenge über Kippwaagen erfasst. Alle Lysimeter werden für agronomische Versuche genutzt. Im Vordergrund stehen Untersuchungen zum Sickerwassertransport und zur Nitratauswaschung bei verschiedenen Anbausystemen, Bodenbearbeitungsverfahren, Düngungsvarianten und Bodentypen. Alle Versuche sollen in dreifacher Wiederholung durchgeführt werden. Der Bau der Anlage ist Ende 2008 abgeschlossen worden, erste Versuche werden ab Frühjahr 2009 durchgeführt.

Schlagwörter: Nitratauswaschung, Wassertransport, Sickerwasser, Bodenmonolith, Lysimetertechnik

Summary

At the Zürich-Reckenholz location a new lysimeter station was built at the campus of the Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Center ART. Altogether 72 lysimeters were monolithically excavated, each with 1 m² surface area and a depth of 150 cm. All lysimeters can operate from a walkable basement. Three different agricultural soils (loamy luvisol over gravel, sandy-loamy luvisol over ground moraine, loamy-silty gleyic cambisol over ground moraine) were installed. 12 of the lysimeters are weighable and were instrumented with tensiometers, temperature sensors, suction cups and TDR-probes in four depths (10, 30, 60, and 90 cm), each with two replicates. 60 lysimeters are non-weighable and the seepage water is measured by a tipping counter. All lysimeters are used for agronomic experiments. The main focus is the water flow and nitrate leaching by different cropping systems, cultivation, fertilization, and soil types. All experiments have three replicates. The construction of the lysimeter station was finished by the end of 2008. The first experiments will start in spring of 2009.

Keywords: nitrate leaching, water transport, seepage water, soil monolith, lysimeter technique

Einleitung

Lysimeterforschung hat in der Schweiz eine lange Tradition (GEERING 1943). Nach 1970 wurden in der Schweiz Lysimeterstationen an verschiedenen Orten von unterschiedlichen Institutionen gebaut und mit verschiedenen Zielsetzungen betrieben. Die Zusammenstellung von BGS (1989) weist 9 Standorte mit 247 Lysimetern, davon 158 Lysimeter mit einer Oberfläche von ≥ 1 m² auf. Bei fast allen dieser Lysimeter wurde der Boden schichtweise eingefüllt, nur drei Lysimeter wurden monolithisch genommen. Einige dieser Anlagen sind mittlerweile in die Jahre gekommen und wurden bereits aufgegeben. Im März 2009 wurde die Lysimeteranlage in Bern-Liebefeld mit 64 Lysimetern ebenfalls endgültig aufgegeben. Als Ersatz hierfür ist an der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART in Zürich eine neue, hochmoderne Lysimeteranlage mit 72 Gefäßen gebaut worden. Damit setzt die Gruppe Gewässerschutz von ART bei ihren zukünftigen Schwerpunkten in der Forschung verstärkt auf Lysimeter. Die neue Anlage wird nicht nur die Anlage in Bern-

Liebefeld ersetzen, sondern soll zusammen mit weiteren Lysimeteranlagen in Eschikon und Tänikon, die die Gruppe Gewässerschutz kürzlich übernommen hat, eine umfassende Bearbeitung aktueller Problemfelder im Bereich Landwirtschaft - Gewässerschutz - Nitratauswaschung ermöglichen. Neben der nachfolgend beschriebenen neuen Lysimeteranlage werden die bestehenden 12 wägbaren Lysimeter (3,1 m² Oberfläche) am Standort Reckenholz, 4 wägbare Lysimeter (3,1 m²) am Standort Eschikon und 9 Feld-Lysimeter (1 m²) am Standort Tänikon zukünftig von der Gruppe Gewässerschutz ART wissenschaftlich genutzt.

Die Gewinnung der 72 Bodenmonolithe und der Bau der Lysimeteranlage – der wohl größten Lysimeteranlage dieser Art in Europa – sollen im Folgenden beschrieben werden.

Gewinnung von 72 Bodenmonolithen

Zur Gewinnung exakter Bodenmonolithe wurden die speziell entwickelten und national sowie international bewährten Verfahren der Umwelt-Geräte-Technik GmbH eingesetzt (SEYFARTH et al. 2001; MEISSNER et al. 2004, 2005,

¹ Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Reckenholzstraße 191, CH-8046 ZÜRICH

² Umwelt-Geräte-Technik GmbH (UGT), Eberswalderstraße 58, D-15374 MÜNCHENBERG

* Ansprechpartner: volker.prasuhn@art.admin.ch

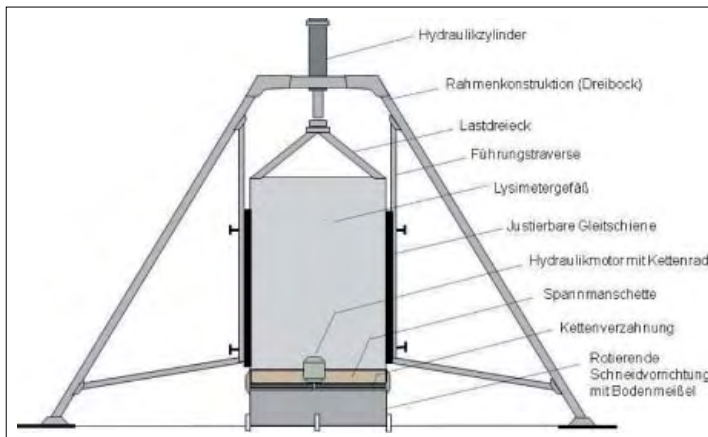


Abbildung 1: Gewinnungstechnik für die Bodenmonolithe.



Abbildung 2: Abschervorrichtung für Bodenmonolithe.

2007, 2008). Die Entnahme von Bodensäulen mit hoher Präzision und ungestörter Bodenstruktur wird dabei ohne Einsatz schwerer Gewinnungstechnik ermöglicht. Sie erfolgte an drei verschiedenen Standorten in der Schweiz (12 Monolithen in Schafisheim: lehmige Parabraunerde über Schotter; 48 Monolithen in Grafenried: sandig-lehmige Parabraunerde über Grundmoräne; 12 Monolithen in Zürich-Reckenholz: lehmig-schluffige, pseudovergleyte Braunerde über Grundmoräne).

Die Stechvorrichtung (Abbildung 1) gewährleistet eine lotrechte Führung des Lysimetergefäßes bis zur Entnahmetiefe des Monolithen und schneidet mit Hilfe einer Fräsvorrichtung, die mit dem Lysimetergefäß fest verbunden ist, die Kontur des Bodenmonolithen vor. Durch die stirnseitig an das Lysimetergefäß angebrachte Umlaufschneide wird die Endkontur des zu gewinnenden Bodenmonolithen ausgebildet. Das Lysimetergefäß nimmt dabei formgetreu die Bodensäule in sich auf. Durch die Reduzierung der Mantelreibung infolge des Fräsvorgangs werden nur geringe axiale Kräfte zum Stechen der Lysimeter benötigt. Der Bodenmonolith wird bei der Gewinnung daher nicht deformiert und behält so seine natürliche Struktur.

Beim Erreichen der Entnahmetiefe wird mittels eines hydraulisch angetriebenen Scherblechs oder mittels Scherlamellen die Bodensäule vom umgebenden Bodenbereich abgetrennt. Wegen des möglichen Steinbesatzes im Unterboden wurde die Scherblechtechnik favorisiert. Nachdem das Scherblech den Monolith vollständig abgeschert hat, dient es durch die Profilhalterung an der Abschervorrichtung gleichzeitig als temporärer Verschluss des Lysimetergefäßes, so dass der Monolith nach dem Abtrennen gesichert aus der Entnahmegrube gehoben werden kann (Abbildung 2).

Insgesamt wird durch den Einsatz leichter Technik der Gewinnungsstandort nur minimal beeinträchtigt, und es werden keine besonderen Anforderungen an die Beschaffenheit des Geländes gestellt.

Parameter der Lysimeter-Entnahmetechnologie

- Vermeidung von Randläufigkeiten zwischen Bodenmonolith und Lysimetergefäß durch speziell bodenangepasste Werkzeuge (Meißel und Scherlamellen).

- Keine Beeinträchtigung der monolithischen Bodenstruktur durch Stauchung oder Pressung (keine Deformationen) bzw. Gefügeveränderungen durch Schlagen mit der Baggerschaufel.
- Axiale Führung des ausgerichteten Lysimetergefäßes bis zur Entnahmetiefe, Vermeidung von Grundbrüchen im Monolith.
- Einsatz leichter mobiler Entnahmetechnik als Voraussetzung für den Einsatz unter schwierigen Geländebedingungen sowie hohe Produktivität und Kostenersparnis durch Maschineneinsatz.
- Erkennen von Hindernissen wie Steine, Einlagerungen o.a. durch die Möglichkeit der visuellen Beobachtung, Aufzeichnung und Eingriff über den Frässpalt.
- Leichte Umsetzbarkeit der Entnahmetechnik z.B. bei Antreffen qualitätsbeeinträchtigender Hindernisse wie größere Steine, Einlagerungen o.a. am Standort.
- Gut sichtbares Bodenprofil durch intakte Entnahmegruben. Möglichkeit zur Profilansprache, Bodenkartierung und Entnahme von Bodenproben für chemische und physikalische Bodenuntersuchungen nach Entnahme des Monolithen.
- Minimale Beeinträchtigung des Standortes durch die Entnahmetechnologie. Es müssen, um den Monolithen überhaupt gewinnen zu können, keine umlaufenden Bodengruben ausgehoben werden, die den Standort um ein Mehrfaches des Monolithvolumens beeinträchtigen.

Bei der Entnahme von 48 Bodenmonolithen am Standort Grafenried mit der UGT-Entnahmetechnologie wurden diese Vorteilswirkungen erfolgreich umgesetzt und eine Minimierung des Flächenverbrauchs erreicht. In Abbildung 3 ist das Entnahmeschema für diese Bodenmonolithe angegeben und zeigt, dass die Entnahmegruben für die Monolithe praktisch unmittelbar von zwei Seiten angrenzend bis zu einem Abstand von nur 50 cm angeordnet werden können (Abbildung 4). Damit wird einerseits verfolgt, dass die Bodenmonolithe in ihrer Horizont-Ausbildung vom Ansatz her recht einheitlich und damit gut vergleichbar aufgebaut sind - zum anderen wird erreicht, dass der Flächenverbrauch minimiert ist. Durch das Anlegen zweier Entnahme-Transecte minimieren sich weiterhin die zurückzulegenden Wegstrecken und damit die Beeinträchtigungen

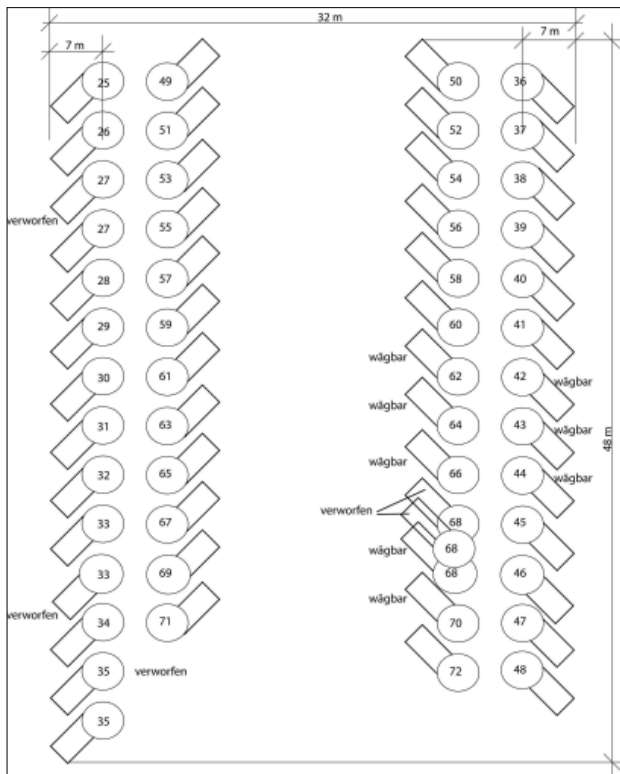


Abbildung 3: Schema der Monolithentnahme für 48 Monolithe am Standort Grafenried.



Abbildung 4: Flächenverbrauch bei der Monolithgewinnung am Standort Grafenried.

des Standortes von der Entnahmestelle bis zur Position des Abtransports der Monolithe. Die insgesamt in Anspruch genommene Fläche am Standort Grafenried beschränkt sich auf 32 x 48 m. Der Standort selbst ist nach geringfügiger Bodenauffüllung im Bereich der Entnahmegruben bereits wieder in landwirtschaftlicher Nutzung.

Noch vor Ort werden die gewonnenen Monolithe basal verfiltriert. Zum Einsatz kam ein dreistufiger Filteraufbau in den Korngrößen 0,1 - 0,5 mm; 0,71 - 1,25 mm; 3,15 - 5,6 mm. Das zertifizierte Quarzsand-Filtermaterial ist inert und durch Vorbehandlung (Glühen und Waschen) so gereinigt, dass die Sickerwässer in ihrer stofflichen Zusammensetzung



Abbildung 5: Monolith-Schwenkvorrichtung.

zung nicht verfälscht werden. Zum Einbau der Filterung werden die Monolithe mit Hilfe einer speziell entwickelten hydraulischen Schwenkvorrichtung um 180° axial gedreht (Abbildung 5). In dieser Position werden 15 cm Boden aus dem unteren Bereich des Lysimeters manuell entfernt und durch den dreistufigen Kiesfilter ersetzt. Danach erfolgt der Verschluss des Lysimeterbodens, der Monolith wird um 180° zurückgedreht und ist zum Abtransport vom Standort bereit.

Zu je sechs Einheiten wurden die je rund 3,2 t schweren Monolithe auf luftgefederten LKW-Sattelauflegern unter Einsatz spezieller Transportsicherungen zur Lysimeterstation nach Zürich-Reckenholz gefahren und mittels Auto-drehkran in die Lysimeteranlage eingestellt.

Bau der Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz

Die Lysimeteranlage ist entsprechend der zukünftigen Aufgabenstellung für 72 Bodenmonolithe konzipiert worden. Die Lysimeteraufständerung erfolgt in zwei unterschiedlichen Varianten und erfüllt die Anforderungen sowohl für die wägbaren und gleichzeitig absenkbaaren Lysimeter sowie für die Lysimeter, die nur zur Sickerwassergewinnung dienen.

Die wägbaren Lysimeter stehen auf Stahltraversen, die in drei Ebenen justierbar sind und es ermöglichen, dass die Lysimetergefäße mit den Bodenmonolithen problemlos aus der Wägeposition mit Hilfe eines Spezial-Hubtisches in die Absenkposition gefahren werden können. Arretiert von

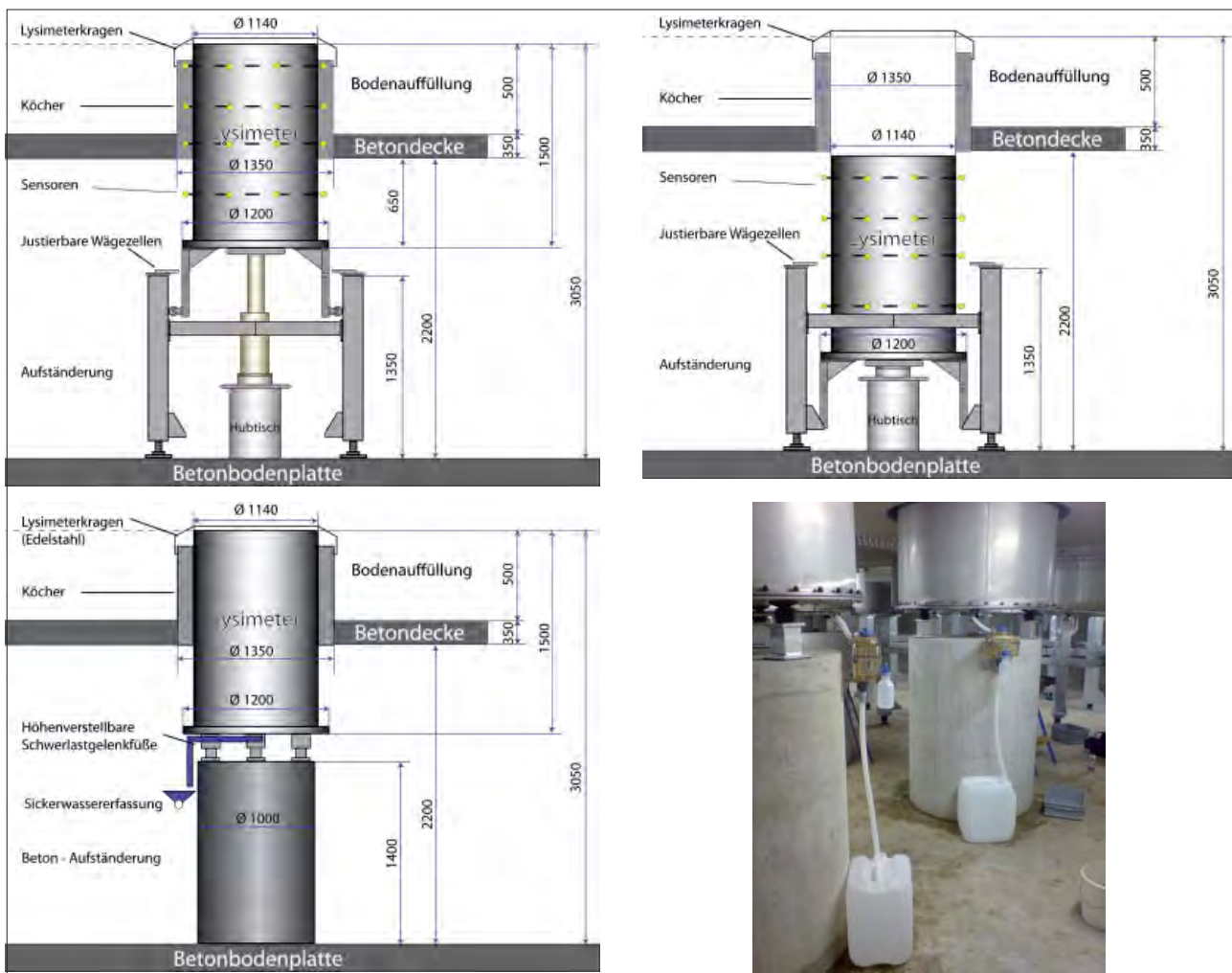


Abbildung 6: Aufständerung für wägbare (oben) und nicht wägbare (unten) Lysimeter.

der unteren Halterung der Stahlständer können so jederzeit technische Inspektionsmaßnahmen an allen Sensoren, den Wägezellen sowie am Pflanzenbestand witterungsunabhängig und ohne großen Aufwand in der Lysimeterstation durchgeführt werden (Abbildung 6). Die nicht wägbaren Lysimeter stehen auf Betonsockeln. Mit je drei einstellbaren Schwerlastgelenkfüßen kann das Lysimeter in drei Ebenen justiert werden (Abbildung 6).

Nach dem Antransport der Bodenmonolithe von insgesamt drei Standorten der Schweiz in das Gelände von ART wurden die Lysimeter in die bauseitig fertig gestellte Lysimeteranlage nach dem Schema in Abbildung 7 eingestellt. Nach der Montage der Lysimeterkragen und der Ansaat einer Winterbegrünung ist die Lysimeterstation für die inneren Montage- und Installationsarbeiten vorbereitet (Abbildung 8).

Messtechnische Ausstattung und Datenerfassung

Die Lysimeter-Instrumentierung ist entsprechend der Aufgabenstellung in zwei technisch unterschiedliche Ausstattungsniveaus ausgeführt. Die für die Sickerwassererfassung vorgesehenen Lysimeter sind mit 100 ml-Kippwaagen

ausgestattet und registrieren die Sickerwasser-Fließrate. Gleichzeitig wird eine Teilprobe für die chemischen Wasseranalysen in einer separaten Probenflasche gewonnen.

Die wägbaren Lysimeter, deren Monolithe alle drei Standorte repräsentieren, sind zusätzlich mit kompletter bodenhydrologischer Messtechnik ausgestattet, um alle Parameter des Wasser- und Stoffhaushalts zu erfassen. In vier Messebenen (10, 30, 60 und 90 cm) werden mit zweifacher Wiederholung die Bodensaugspannung sowie die Bodenfeuchte und Bodentemperatur kontinuierlich erfasst. Eine Saugkerzenanlage ermöglicht für jedes Lysimeter eine tiefen- und tensionsabhängige Perkolatentnahme. Die Sickerwasserrate wird wiederum mittels Kippwaagen realisiert. Die Evapotranspiration wird durch eine hochpräzise Wägung ermittelt. Die Wasserbilanz wird dadurch messtechnisch geschlossen darstellbar.

Mit dem Einsatz einer neuartigen Lysimeter-Wägetechnik ist die Präzision, mit der die Monolithmasse bestimmt werden kann, nochmals deutlich angehoben. Das neue Wägesystem umfasst dabei den neuentwickelten digitalen Wägemonitor UGT WM 100 mit großem graphikfähigem LCD-Display (Abbildung 9) sowie die neuentwickelten Scherstabwägezellen. Zusätzlich zur zentralen Datener-

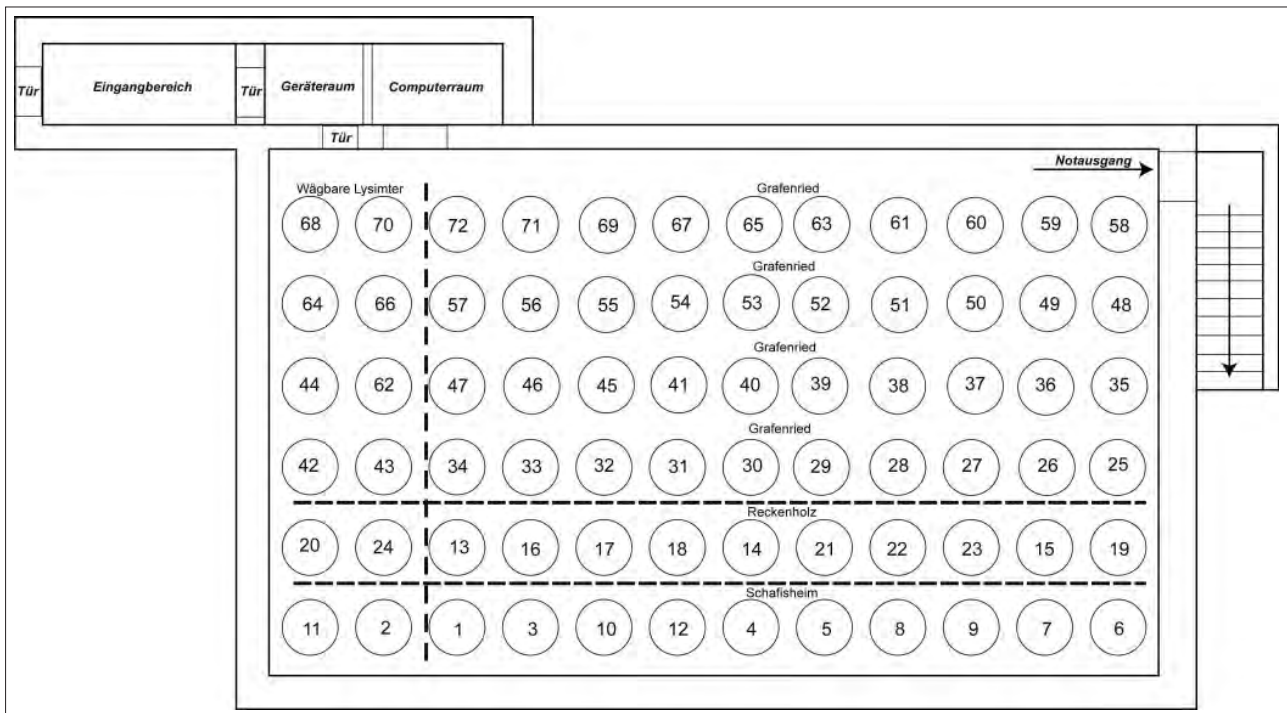


Abbildung 7: Aufstellung der Lysimeter in der Lysimeteranlage.



Abbildung 8: Blick auf die 72 Lysimeter nach Montage der Lysimeterkragen.

fassung ermöglicht der neue Wägemonitor die direkte Kommunikation mit dem angeschlossenen Lysimeter. Im Lysimetermodus können außer wägetechnischen Einstellungen und Messintervall-Veränderungen auch die Messkurven des Masseverlaufs aus zurückliegenden Messperioden graphisch dargestellt werden. Unregelmäßigkeiten sind so direkt bei der Inspektion am Lysimeter erkennbar. Durch den Einsatz einer neuen Generation von Wägezellen, bei denen die Teilungswerte gegenüber den bislang verfügbaren Präzisions-Wägezellen verdoppelt wurden, können Wägeergebnisse praktisch auf unter 10 g genau gesichert werden. Ausschlaggebend ist hierfür nicht nur der hohe Teilungswert, sondern auch der um 80% reduzierte Summenfehler aus Nullpunkttrift, Temperaturkoeffizient und Kriechfehler.



Abbildung 9: Wägemonitor UGT WM 100

Zur Erfassung der Wasserspannung im Bodenmonolith werden Tensiometer (Typ 160) in den vorgegebenen Messebenen eingesetzt. Außer zur Berechnung der Gradienten für die Beurteilung der Bodenwasserbewegung im Monolithen dienen die Tensionswerte auch als Steuergrößen für die Saugsondenanlagen. Die Untersuchung von Wasserinhaltsstoffen im Perkolat wird durch den Einsatz von keramischen Saugkerzen ermöglicht. Die Größe des anzulegenden Unterdrucks der Vakuumanlage wird separat aus den aktuellen Saugspannungswerten des Bodens berechnet und über die Mikrorechnersteuerung in der Saugsondenanlage realisiert.

Datenerfassungseinheit

Die Datenerfassung erfolgt direkt mittels Zentral-Computer, der in das Netzwerk von ART eingebunden ist (Abbildung 10). Die Datenerfassungseinheit ermöglicht die Online-

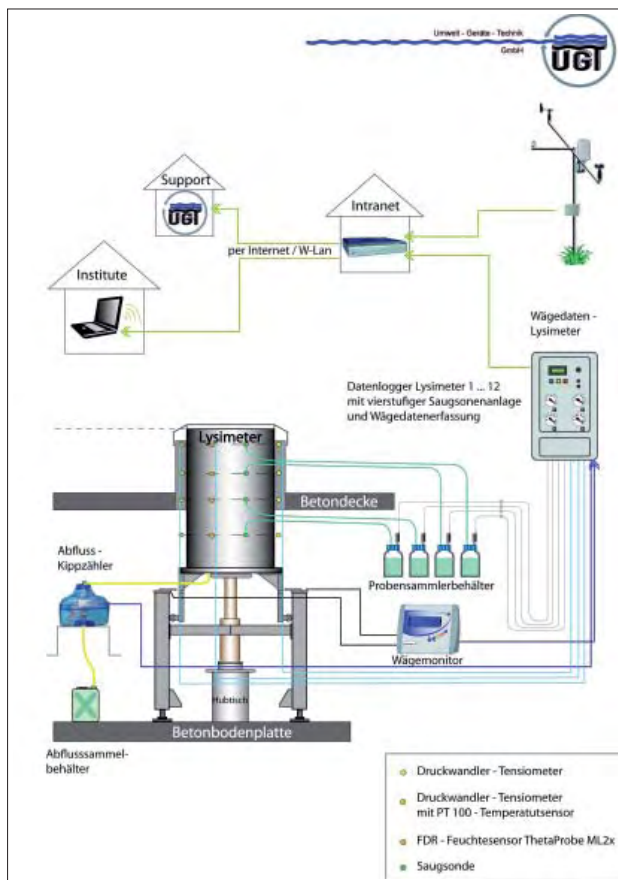


Abbildung 10: Schema des Datenerfassungssystems der neuen Lysimeteranlage.

Aufzeichnung aller Messdaten der Lysimeteranlage und realisiert zudem auch alle notwendigen Steuerungsaufgaben. Pro Lysimeter werden so sämtliche Tensiometer, Bodenfeuchtesonden, Temperatursonden, Kippzähler sowie das Wägesystem zentral verwaltet und auch alle Steuerungs- und Überwachungsaufgaben ausgeführt. Automatisch werden Störungsmeldungen versandt und es besteht die Möglichkeit, über das eingerichtete Netzwerk Steuerungsparameter zu verändern.

Die ermittelten Daten werden in einer komplexen Datenbank verwaltet und stehen Wissenschaftlern je nach Zugriffsberechtigung aufgearbeitet zur Verfügung. Bei der Erarbeitung der Konzeption zur Datenerfassung und -verwaltung wurde berücksichtigt, bestehende Messanlagen von ART wie die vorhandene alte Lysimeteranlage und die Wetterstation mit in das Datennetz einzubinden.

Ausblick

Alle Lysimeter sollen für agronomische Versuche genutzt werden. Im Vordergrund der Untersuchungen stehen der Sickerwassertransport und die Nitratauswaschung bei verschiedenen Anbausystemen, Bodenbearbeitungsverfahren, Düngungsvarianten und Bodentypen. Damit knüpfen die Versuche inhaltlich an die bisherigen Fragestellungen auf den bestehenden Lysimeteranlagen in Zürich-Reckenholz, Bern-Liebefeld und Tänikon an (STAUFFER 2000, STAUFFER & SPIESS 2001, NIEVERGELT 2002, ANKEN et al.

2004, STAUFFER & SPIESS 2005). So sollen der biologische Landbau und die integrierte Produktion verglichen, Pflügenbau und Mulchsaat/Direktsaat simuliert, verschiedene Düngungsintensitäten und Düngerformen (mineralisch, organisch) untersucht, neue Düngungsverfahren getestet (Cultan) und verschiedene Kulturübergänge (mit und ohne Zwischenkultur) beurteilt werden. Die Versuche sollen vorwiegend in dreifacher Wiederholung zwecks statistischer Sicherheit durchgeführt werden. Weiterhin werden viele dieser Versuche auf drei verschiedenen Ackerböden (lehmige Parabraunerde über Schotter, sandig-lehmige Parabraunerde über Grundmoräne, lehmig-schluffige Braunerde über Grundmoräne – alles typische und weit verbreitete Ackerböden des schweizerischen Mittellandes) durchgeführt. Die Komplexität des zu behandelnden Themas und die Reproduzierbarkeit der Resultate erklären die große Dimension der Anlage mit 72 Gefäßen. Der Bau der Anlage ist Ende 2008 abgeschlossen worden. Nach Abschluss einer ersten umfassenden Testphase zur Verifizierung aller Messergebnisse nimmt die neue Lysimeteranlage planmäßig im Frühjahr 2009 ihren Messbetrieb auf.

Literatur

- ANKEN, T., P. STAMP, W. RICHNER und U. WALTHER, 2004: Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung gepflügter und direktgesäter Parzellen. FAT-Schriftenreihe Nr. 63, 101 S.
- BGS (Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz), 1989: Lysimeterdaten von Schweizerischen Messstationen. Bodenwassergehalt, Sickerwasser, Niederschlag und Evaporation. BGS-Dokument 4, 123 S.
- GEERING, J., 1943: Ergebnisse der Oerlikoner Lysimeterversuche. Berichte der Schweiz. Bot. Ges. 53A, 221-245.
- MEISSNER, R. and M. SEYFARTH, 2004: Measuring water and solute balance with new lysimeter techniques. Paper presented at the 3rd Australian and New Zealand soil science conference, Sydney, December 2004.
- MEISSNER, R., M. SEYFARTH, H. FRIEDRICH, H. RUPP, M. BEUTER und K. KESSLER, 2005: Vorrichtung zur monolithischen Entnahme von Bodensäulen. Deutsches Patent DE 100,48,089,6, 8 Juli 2005.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP, M. SEYFARTH and H. BORG, 2007: Measurement of dew, fog and rime with a high precision gravitation lysimeter. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 170, 335-344.
- MEISSNER, R., H. RUPP and M. SEYFARTH, 2008: Advances in outdoor lysimeter techniques, Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 8: 217-225.
- NIEVERGELT, J., 2002: Nitrat und Fruchtfolgen 20 Jahre lang beobachtet. Agrarforschung 9, 28-33.
- SEYFARTH, M., R. MEISSNER und H. RUPP, 2001: Verfahren und Vorrichtung zur Entnahme großvolumiger Bodenmonolithen. Bericht über die 9. Lysimetertagung, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft, 231-232.
- STAUFFER, W., 2000: Sickerwasser und Erträge verschiedener Fruchtfolgen. Agrarforschung 7, 535-540.
- STAUFFER, W. und E. SPIESS, 2001: Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen auf die Nitratauswaschung. Agrarforschung 8, 324-329.
- STAUFFER, W. und E. SPIESS, 2005: Einfluss unterschiedlicher Nutzung und Düngung auf Sickerwassermenge und Nitratauswaschung. In: Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung. Bericht über die 11. Gumpensteiner Lysimetertagung. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irtding, 213-215.

Windeinfluss auf die Lysimetermessungen in Groß-Enzersdorf

Reinhard Nolz¹, Gerhard Kammerer¹ und Peter Cepuder^{1*}

Zusammenfassung

Lysimeter sind Instrumente zur Erfassung wichtiger Komponenten des Wasserkreislaufs. In wägbarer Ausführung können auch kurzfristige Änderungen des Bodenwassergehalts gemessen werden. Mit Hilfe der Wasserbilanzgleichung lässt sich aus Gewichtsänderung, Sickerwasser- und Niederschlagsmenge die Verdunstung in einem definierten Zeitintervall berechnen. Die Lysimeteranlage als Bestandteil der agrar-meteorologischen Station in Groß-Enzersdorf bietet die Möglichkeit, diese Bilanzgrößen mit hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen. Vollelektronische Messsysteme und automatische Datenspeicherung ermöglichen relativ kurze Messintervalle und damit eine detaillierte Betrachtung der untersuchten Parameter. Die 15 Minuten-Gewichtsdaten der Lysimeter in Groß-Enzersdorf zeigen jedoch zeitweilig Differenzen benachbarter Messwerte, die durch eine Wasseraufnahme oder -abgabe nicht erklärbar sind. Solche größeren Schwankungen sind auf Windeinflüsse zurückzuführen. Die Untersuchung ergab für einen Tag mit Windgeschwindigkeitswerten größer 5 m/s eine Standardabweichung von $\pm 0,096$ mm, welche größer ist als die Wiegegenauigkeit ($\pm 0,06$ mm).

Schlagwörter: Wind, Lysimeter, Wiegegenauigkeit, Messfehler

Summary

Lysimeters are tools to determine important components of the water cycle. Weighing lysimeters offer the possibility of measuring changes of the soil water content. By means of the water balance equation, the evapotranspiration in a defined time interval can be computed from weight changes, amount of precipitation and percolation water. The lysimeter station with the agricultural-meteorological station in Groß-Enzersdorf provides the possibility to measure these parameters with high temporal resolutions. Precise measuring systems and automatic data storage make it possible to shorten the measuring intervals and give a more detailed view of the examined parameters. However, the 15 minutes weighing data of the lysimeters in Groß-Enzersdorf show differences in adjacent values that cannot be interpreted as gain or loss of water. For a day with a wind velocity above 5 m/s the analysis delivered a standard deviation of ± 0.096 mm, which is larger than the weighing error (± 0.06 mm).

Keywords: wind, lysimeter, weighing accuracy, measuring error

Einleitung

Die Lysimeteranlage an der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf wurde 1983 errichtet. Sie wird vom Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien betrieben. Den Kern bilden zwei wägbare Lysimeter mit einer kreisförmigen Oberfläche von 2,9 m² und einer Tiefe von 2,5 m (CEPUDER et al. 1991). Die Lysimeter dienen zur Erfassung von Verdunstung und Sickerwasser. Die Wiegedaten zeigen zeitweilig Schwankungen, die nicht auf eine Wasseraufnahme oder -abgabe, sondern auf den Windeinfluss zurückzuführen sind.

In der Literatur finden sich einige Untersuchungen betreffend Genauigkeit und Windeinfluss auf die Gewichtsmessungen von wägbaren Lysimetern mit Hebel-Gegengewicht-Wiegensystemen. CASTEL (1997) nennt Windböen als Hauptursache für die Störung der Lysimeter (quadratische Oberfläche 4x4 m, Tiefe 1,5 m, Messfehler kleiner 0,06 mm), da diese Gewichtsänderungen von 0,6 bis 1,9 mm Wasseräquivalent verursachen können. VAN BAVEL und MEYERS (1962) berichten von Windeinflüssen bis zu ± 1 mm auf einer 1 m²

großen Lysimeteroberfläche bei einer Wiegegenauigkeit von 0,01 mm. Nach HOWELL et al. (1995) entsteht einer der größten Wiegefehler durch die Kraft, die der Wind auf die Lysimeteroberfläche ausübt. Für die Lysimeterbehälter mit 3x3 m Oberfläche und 2,3 m Tiefe gibt er eine Genauigkeit von $\pm 0,05$ mm pro Stunde bzw. $\pm 0,1$ mm pro Tag an. Jedoch steigt die Standardabweichung von Messreihen über 0,42 mm ab einer 2-m-Windgeschwindigkeit von 5 m/s. Die wägbaren Lysimeter in Coshocton, Ohio, U.S. (MALONE et al. 1999), arbeiten mit einer Messgenauigkeit kleiner 0,05 mm. Zwei von drei Lysimetern werden signifikant vom Wind beeinflusst. Der Fehler ist kleiner 0,1 mm für eine stündlich gemittelte 10-m-Windgeschwindigkeit zwischen 3,6 und 4,5 m/s (entspricht 2,7 und 3,4 m/s in 2 m Höhe). Dieser Fehler ist für tägliche Daten vernachlässigbar, nicht jedoch für kürzere Zeitintervalle. In den meisten Fällen wurden diverse Mittelungsverfahren eingesetzt um das Problem zu lösen, was laut den jeweiligen Autoren jedoch nur teilweise gelang.

In dieser Arbeit wird der Windeinfluss auf die Messungen der Lysimeteranlage Groß-Enzersdorf untersucht.

¹ Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

* Ansprechpartner: peter.cepuder@boku.ac.at

Material und Methoden

Die Basis für die Datenauswertung in Bezug auf den Windeinfluss bilden die Wiegedaten und die Sickerwassererfassung des Gras-Referenz-Lysimeters der Lysimeteranlage Groß-Enzersdorf, sowie Niederschlag und Windgeschwindigkeit der Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) in Groß-Enzersdorf des Jahres 2006. Die Auswertung und Darstellung erfolgte mittels Standard-Software.

Das Wiegesystem wurde mehrmals teilerneuert und besteht derzeit aus den beiden Lysimeterbehältern, die über eine mechanische Hebelwaage mit Gegengewicht mit einer Wiegezelle verbunden sind. Das Signal wird über einen analogen Trägerfrequenz-Messverstärker (0-10V) verstärkt, mittels A/D-Wandler digitalisiert und auf einem lokalen PC-Server gespeichert. Die automatische Ablesung der Wiegedaten erfolgt nach einem Zufallsprinzip alle paar Sekunden. Aus diesen Werten wird ein gleitendes Mittel errechnet und regelmäßig gespeichert. Die Messinter-

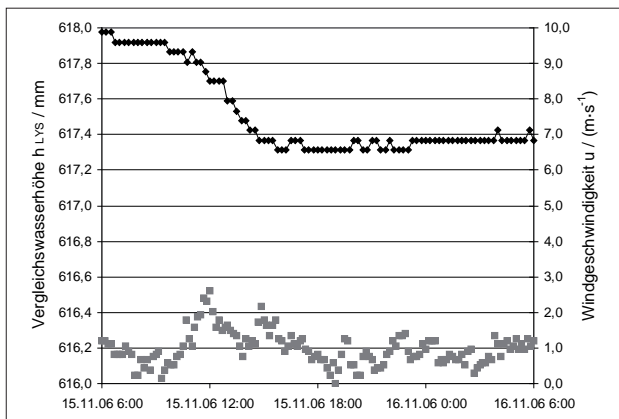


Abbildung 1: Wiegedaten des Gras-Referenz-Lysimeters – angegeben als Vergleichswasserhöhe im 15-Minuten-Intervall – und 10-Minuten-Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe am 15.11.2006 (Windgeschwindigkeitsmittel = 1,0 m/s, Temperaturmittel im Abschnitt = 10,3 °C).

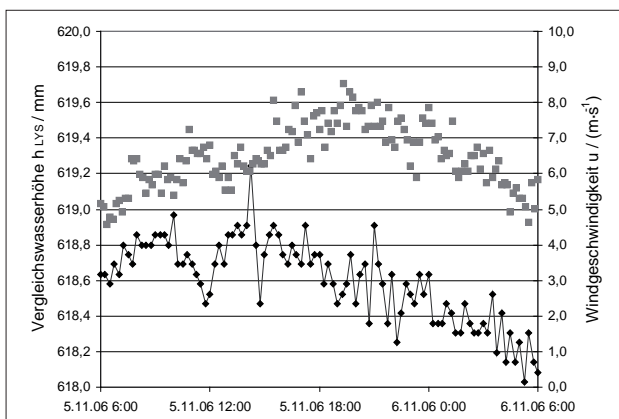


Abbildung 2: Wiegedaten des Gras-Referenz-Lysimeters – angegeben als Vergleichswasserhöhe im 15-Minuten-Intervall – und 10-Minuten-Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe am 5.11.2006 (Windgeschwindigkeitsmittel = 6,5 m/s, Temperaturmittel im Abschnitt = 8,3 °C).

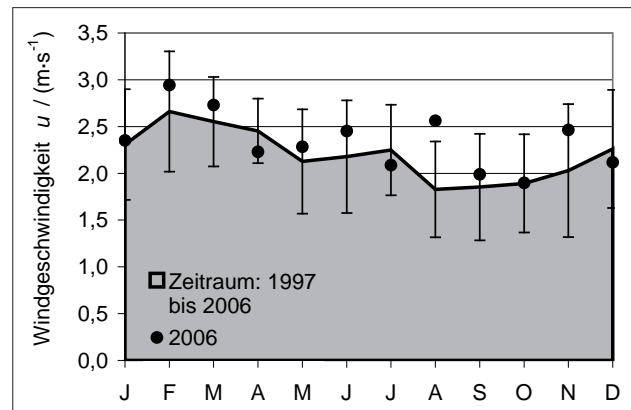


Abbildung 3: Monatsmittel der 2-m-Windgeschwindigkeit von 1997 bis 2006 mit Standardabweichung (graue Fläche mit Balken) und Monatsmittel der 2-m-Windgeschwindigkeit von 2006 (Punkte).

valle wurden seit Errichtung der Lysimeteranlage immer wieder verkürzt. Die Aufzeichnung erfolgte ursprünglich stündlich und wurde 2003 auf 15-Minuten-Intervalle eingestellt. Seit Oktober 2007 werden die Daten alle 10 Minuten gespeichert. Die Wiegedaten wurden damit an die 10 Minuten-Daten der ZAMG-Wetterstation, welche der Lysimeteranlage angegliedert wurde, angeglichen. 2003 und 2007 wurde das Wiegesystem kalibriert. Die digitale Messauflösung des Wiegesystems beträgt $\pm 0,06$ mm Wasseräquivalent (Abbildung 1). Differenzen zeitlich benachbarter Messwerte betragen mitunter ein Mehrfaches davon, wie sich an manchen Wiegedaten ablesen lässt (Abbildung 2). In beiden Abbildungen ist auch die gemessene Windgeschwindigkeit im betreffenden Zeitreihenabschnitt dargestellt. Der Vergleich der Änderung der Vergleichswasserhöhe im Lysimeter und der Windgeschwindigkeit legt den Schluss nahe, dass ein Zusammenhang zwischen den Änderungen der beiden Größen besteht.

Ergebnisse

Eine kurze statistische Auswertung soll einen Überblick über die Windverhältnisse bei der Lysimeteranlage Groß-Enzersdorf geben. Das monatliche Mittel der 2-m Windgeschwindigkeit über 10 Jahre (1997 bis 2006) zeigt keinen ausgeprägten Jahresgang (Abbildung 3). Die höchsten Werte traten im Februar und März auf, die niedrigsten im August und September. Die Monate August und November des Jahres 2006 waren von überdurchschnittlich hohen Windgeschwindigkeitswerten geprägt.

Die Abbildung 4 zeigt den durchschnittlichen Tagesgang der Windgeschwindigkeit 2006. Die höchste Windgeschwindigkeit von fast 3 m/s tritt typischerweise zwischen 13 und 14 Uhr auf. Die geringste Windgeschwindigkeit wurde während der Nachtstunden gemessen. Aus Abbildung 2 und Abbildung 4 ist ersichtlich, dass für die Untersuchung von Windeinflüssen die Angabe der täglichen Windgeschwindigkeitsmittel nicht ausreicht. Vielmehr interessieren die Spitzenwerte und die Anzahl der Messwerte, die von hoher Windgeschwindigkeit beeinflusst sind.

In Abbildung 5 ist dargestellt, wie häufig die Windgeschwindigkeit (10-Minuten-Intervall, 2 m Höhe) einen bestimmten

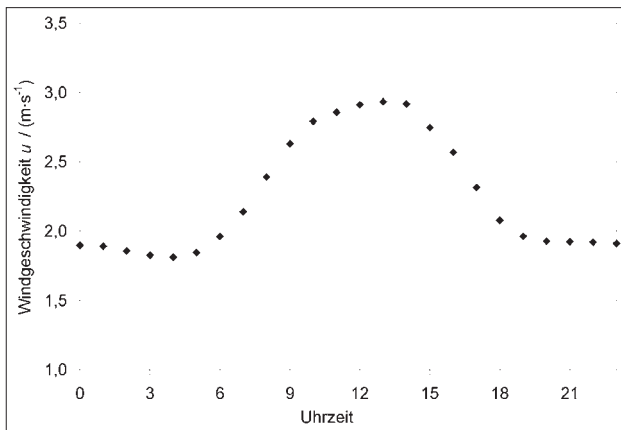


Abbildung 4: Tagesgang der stündlichen 2-m-Windgeschwindigkeit 2006.

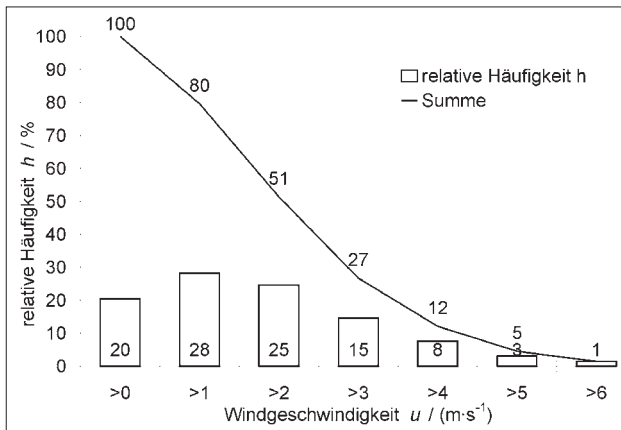


Abbildung 5: Relative Häufigkeit und Summenlinie der 2-m Windgeschwindigkeit (im 10-Minuten-Intervall) im Jahr 2006 laut entsprechender Klasseneinteilung.

Wert überschreitet. Demnach waren 5% der in Groß-Enzersdorf 2006 gemessenen Windgeschwindigkeitswerte größer als 5 m/s (vgl. HOWELL et al. 1995). Ein Tag, an dem fast alle Messwerte über dieser Marke liegen, ist der 5.11.2006 (Abbildung 2). Dieser „Windtag“ wurde für die Auswertung ausgewählt.

Die Lysimeterdaten (Wiegung und Sickerwasser) liegen in 15-Minuten-Intervallen vor, die 10-Minuten-Wetterdaten stammen von der ZAMG. Im untersuchten Zeitraum liefen die Zeitachsen von der Aufzeichnung der Wiegedaten und der Wetterdaten nicht synchron. Aus diesem Grund wurde die Zeitachse der Wiegedaten so verschoben, dass sich nach einer Linearinterpolation auf die Zeitachse der Wetterdaten eine gute Übereinstimmung mit der Niederschlagskurve ergab. Anschließend wurden die Niederschläge (0,5 mm am 5.11.) von den Wiegedaten abgezogen. Die anfallende Sickerwassermenge betrug kontinuierlich 0,1 mm pro Tag und wurde vernachlässigt. Daraus ergeben sich die windbeeinflussten Messwerte laut *Abbildung 6*. Da die tatsächliche Verdunstung und damit die vom Windeinfluss befreite Lysimeterablesung nicht bekannt ist, wurde sie durch eine Ausgleichsfunktion ersetzt, die mittels Kurvenanpassung gefunden wurde. In *Abbildung 6* sind eine sinusförmige Funktion, eine Sigmoidfunktion und eine Ausgleichsgerade

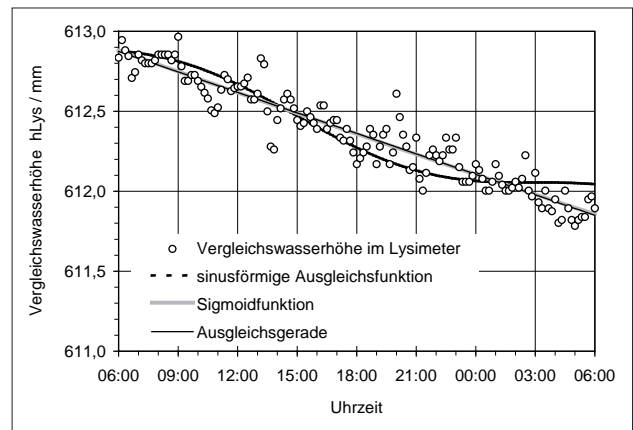


Abbildung 6: Vergleichswasserhöhe im Lysimeter mit verschiedenen Ausgleichskurven für den Windtag 5.11.2006.

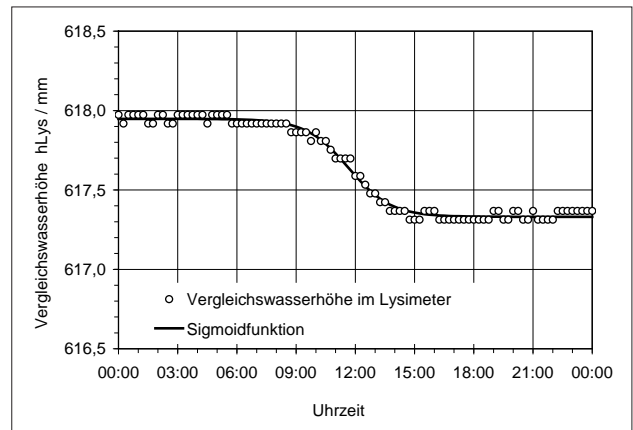


Abbildung 7: Vergleichswasserhöhe im Lysimeter mit Ausgleichskurve für den windstillen Tag 15.11.2006.

dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß und die Abweichungen der Messwerte von der jeweiligen Ausgleichsfunktion sind in *Tabelle 1* aufgelistet.

Im Vergleich dazu zeigen *Abbildung 7* und *Tabelle 2* die Messwerte an einem windstillen Tag (15.11.2006, *Abbildung 1*).

Diskussion

Aus *Tabelle 1* und *Tabelle 2* ist ersichtlich, dass an einem Tag mit einer Windgeschwindigkeit größer 5 m/s die Standardabweichung der Messwerte von einer Ausgleichsfunktion größer ist als die Messgenauigkeit des Wiegesystems ($\pm 0,06$ mm). Verglichen mit der Standardabweichung an einem windstillen Tag ist die Ungenauigkeit mehr als dreimal so hoch. Die absolute Abweichung pro Messung kann diesen Wert noch übersteigen.

Weitere Untersuchungen sollten klären, wie sich die Windgeschwindigkeit zum Messfehler verhält und ab wann dieser signifikant wird. Die vorliegenden Daten sind für diese Zwecke ungeeignet; es sollten daher spezielle Lysimeterversuche durchgeführt und hierbei in wesentlich kürzeren Intervallen (etwa 10 s) gemessen werden. Zusätzlich sollte die Verdunstung getrennt erfasst werden. Dann sollte es möglich sein festzustellen, ob mit der Windgeschwindigkeit nicht nur die Standardabweichung der Lysimeterablesung steigt,

Tabelle 1: Windtag 5.11.2006; Ausgleichsfunktionen und Abweichungen.

	Maximale Abweichung in mm	Minimale Abweichung in mm	Standardabweichung in mm	Bestimmtheitsmaß
Sinusförmige Funktion	0,290	-0,441	0,123	0,8315
Sigmoidfunktion	0,276	-0,337	0,096	0,9061
Ausgleichsgerade	0,278	-0,334	0,096	0,9060

Tabelle 2: Windstillen Tag 15.11.2006; Ausgleichsfunktion und Abweichungen.

	Maximale Abweichung in mm	Minimale Abweichung in mm	Standardabweichung in mm	Bestimmtheitsmaß
Sigmoidfunktion	0,051	-0,073	0,028	0,9903

sondern sogar ein signifikanter funktionaler Zusammenhang (bereinigt um den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Verdunstung) besteht.

Literatur

- CASTEL, J.R., 1997: Evapotranspiration of a drip-irrigated Clementine citrus tree in a weighing lysimeter. Proc. 2nd Int. Symp. on Irr. of Hort. Crops. Ed. K.S. Chartzoulakis. Acta Hort. 449, vol. 1., pp. 91-98, ISHS 1997.
- CEPUDER, P. und H. SUPERSPERG, 1991: Erfahrungen mit der Lysimeteranlage Groß-Enzersdorf. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, BAL-Bericht.
- HOWELL, T.A., A.D. SCHNEIDER, D.A. DUSEK, T.H. MAREK, J.L. STEINER, 1995: Calibration and Scale Performance of Bushland Weighing Lysimeters. In: Transactions of the ASAE, vol. 38(4), pp.1019-1024.
- MALONE, R.W., D.J. STEWARDSON, J.V. BONTA and T. NELSEN, 1999: Calibration and Quality Control of the Coshocton Weighing Lysimeters. In: Transactions of the ASAE, vol. 42(3), pp. 701-712.
- VAN BAVEL, C.H.M. and L.E. MEYERS, 1962: An automatic weighing lysimeter. Agricultural Engineering 43(10): 580-583, 586-588 (zitiert in HOWELL et al. 1995).

Accuracy of water flux measuring with a passive-wick water sampler in comparison to a high-precision gravitation lysimeter

Ralph Meißner^{1*}, Holger Rupp¹, Juliane Seeger¹ and Glendon Gee²

Zusammenfassung

In den letzten Jahren zeichnet sich in Europa ein zunehmender Trend bezüglich des Einsatzes von Lysimetern zur Messung von Wasser- und Stoffflüssen in Böden ab. Allerdings sind diese direkten Messtechniken im Vergleich zu indirekten Messmethoden relativ kostenintensiv. Besonders in den USA ist man darum bemüht, Wasser- und Stoffflüsse ebenfalls direkt zu messen, dabei aber erheblich kostengünstigere Messgeräte, wie z.B. wick sampler (Dochtsammler) zu entwickeln und einzusetzen. Im Mittelpunkt des Beitrages steht der mehrjährige Vergleich bezüglich der exakten Erfassung der Sickerwassermengen, die zum einen mit wick samplern vom Typ DDM und zum anderen mit technisch hochentwickelten wägbaren Gravitationslysimetern gemessen wurden. Die Abweichungen zwischen den beiden Systemen betragen bei der Sickerwassermenge weniger als 8 %. Es wurde festgestellt, dass wick sampler eine Alternative zu herkömmlich genutzten Gravitationslysimetern auf Standorten mit Grundwasserflurabständen > 2 m sind.

Schlagwörter: Dochtsammler, wägbares Gravitationslysimeter, Sickerwassermenge

Summary

In Europe the use of direct lysimetry methods for measuring water and solute fluxes in soils increased in the recent years. This technique ensures reliable drainage data, but it requires relatively high investment and maintenance expenses. Other research groups, especially in the USA, developed alternative techniques – passive-wick water samplers - that can directly measure water and solute fluxes without great expenses. In this paper we compare the function of a passive-wick sampler, especially the deep drainage meter type – DDM – with a high sophisticated weighable gravitation lysimeter regarding accuracy of seepage water measurement under field conditions in Germany for a time period of three years. Despite the detected inhomogeneities relating the seepage formation process the differences of seepage amount between the two systems ranged during the experimental period of less than 8%. The DDM is in comparison to the tested gravitation lysimeter a cost-effective measuring system. It delivers reliable measuring data regarding the seepage water quantity in sandy soils with adequate groundwater levels > 2 m.

Keywords: wick sampler, weighable gravitation lysimeter, seepage water quantity

Introduction

A suite of methods for measuring water and solute flux in and below the root zone have been developed over the years (WEIHERMUELLER et al. 2007). In the past few years, various research groups have initiated the development of alternative techniques that can directly measure water and chemical fluxes without great expense. The wick (fixed tension) water samplers (a special type of fluxmeter) control water pressure (or tension) at the drainage interface. Basically, they maintain a fixed tension on the soil using an inert wicking material, such as fiber-glass or rock wool. GEE et al. (2002, 2003) have further modified the wick lysimeter to capture both the water and solute fluxes using a solution sampling scheme that simultaneously takes solution samples for chemical analysis at the same point and time that flux is monitored.

Large weighable lysimeters and fluxmeters are both an appropriate tool to measure water and solute fluxes directly (MEISSNER et al. 2008). They considerably differ concerning the constructive complexity which is also reflected to the expenses of both measurement systems. The

fluxmeter can be assigned to the more simple construction types. By contrast, weighable lysimeters are part of high sophisticated technology and much more expensive than fluxmeters. Weighable gravitation lysimeter and passive-wick fluxmeter are widely used in practice. Both methods have pros and cons.

Therefore, the objective of this paper is

- to compare the function of a passive-wick water sampler with a high sophisticated weighable gravitation lysimeter regarding accuracy of measuring the amount of seepage water under field conditions in Germany and
- to give recommendations for practical applicability of each method.

Material and methods

Passive-wick water sampler design

The water fluxmeter of GEE et al. (2002) is essentially a wick-fluxmeter that can be installed below an active root zone to monitor drainage. They called this type deep draina-

¹ Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Department Soil Physics, Lysimeter Station Falkenberg, Dorfst. 55, D-39615 FALKENBERG

² Hydrology Group, Energy and Environmental Division, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA 99352, USA

* Correspondence: juliane.seeger@ufz.de

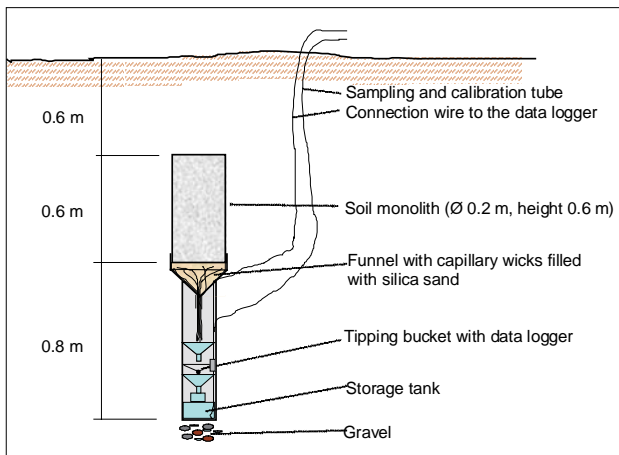


Figure 1: Schematic of DDM - water fluxmeter

ge meter (DDM; Figure 1). Capillary wick samplers or wick lysimeters are sampling devices which sample soil water by the gravitational potential (WEIHERMÜLLER et al. 2007) using an inert wick material such as fiberglass (HOLDER et al. 1991) or rock wool (BEN-GAL and SHANI 2002). Fiberglass wicks were used in the DDM. By applying a hanging water column using wicks, the drainage water is pulled out of the sampling device while the lower soil boundary is maintained at a pressure less than atmospheric resulting in an unsaturated soil (GEE et al. 2004). The DDM unit is compact, durable, and can be purchased commercially from Sledge Sales Consulting, Dayton, Oregon, USA.

Lysimeter design

Figure 2a shows a schematic of a weighable gravitation lysimeter equipped to measure water and solute flux.

This type of lysimeter has a surface area of 1.0 m² and a total depth of 2.0 m. The soil column in the stainless steel lysimeter vessel was monolithically extracted. The lower boundary was segmented to obtain information on the spatial heterogeneity of the water fluxes. Therefore, the lysimeter bottom is divided into 8 sections (Figure 2b). The internal segments are bordered by stainless steel walls of 0.2 m in height. Every segment is connected with a single tipping bucket to measure the amount of seepage water. Seepage of each segment is collected in an individual storage bin from which water samples can be taken additionally quantification of seepage and for chemical analysis.

The lysimeter was equipped with three shear stress cells, which are placed on top of stainless steel pedestals. Even at a total lysimeter mass of 4.000 to 4.500 kg this weighing system registers mass (weight) changes of up to 30 g (MEISSNER et al. 2007). Tensiometers, TDR (time-domain reflectometry) probes, thermometers and suction cups are installed at depths of 0.30 m, 0.90 m and 1.50 m. All measured data are stored in a data-logger, whose recording interval is chosen by the user.

Site and soil description

We tested two water fluxmeters (DDM 1 and DDM 2) and two gravitation lysimeters (numbers 211 and 212). The test sites are located in the Federal State of Saxony-Anhalt, Germany (Figure 3). Lysimeter 211 and 212 and the DDM 2 are located at the Helmholtz-UFZ lysimeter station at Falkenberg (52° 51' N; 11° 48' E). The DDM 1 is located at the small experimental catchment area "Schaugraben" (52° 46' N; 11° 46' E). The Schaugraben is tributary of the Elbe River in north-east Germany covering an area of about 2,500 ha. This catchment is about 10 km away in south-west direction from the Helmholtz-UFZ lysimeter station and matches to

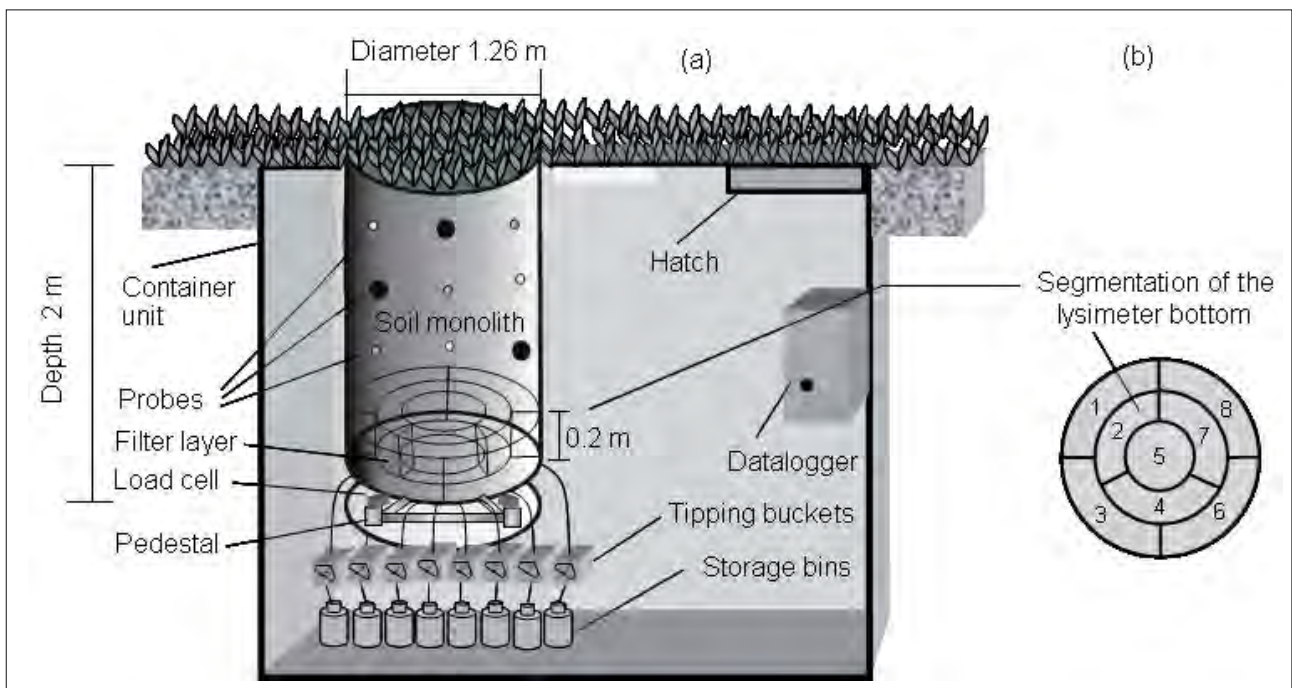


Figure 2: Scheme of a weighable gravitation lysimeter (a) with tipping buckets and (b) segmentation of the lysimeter bottom

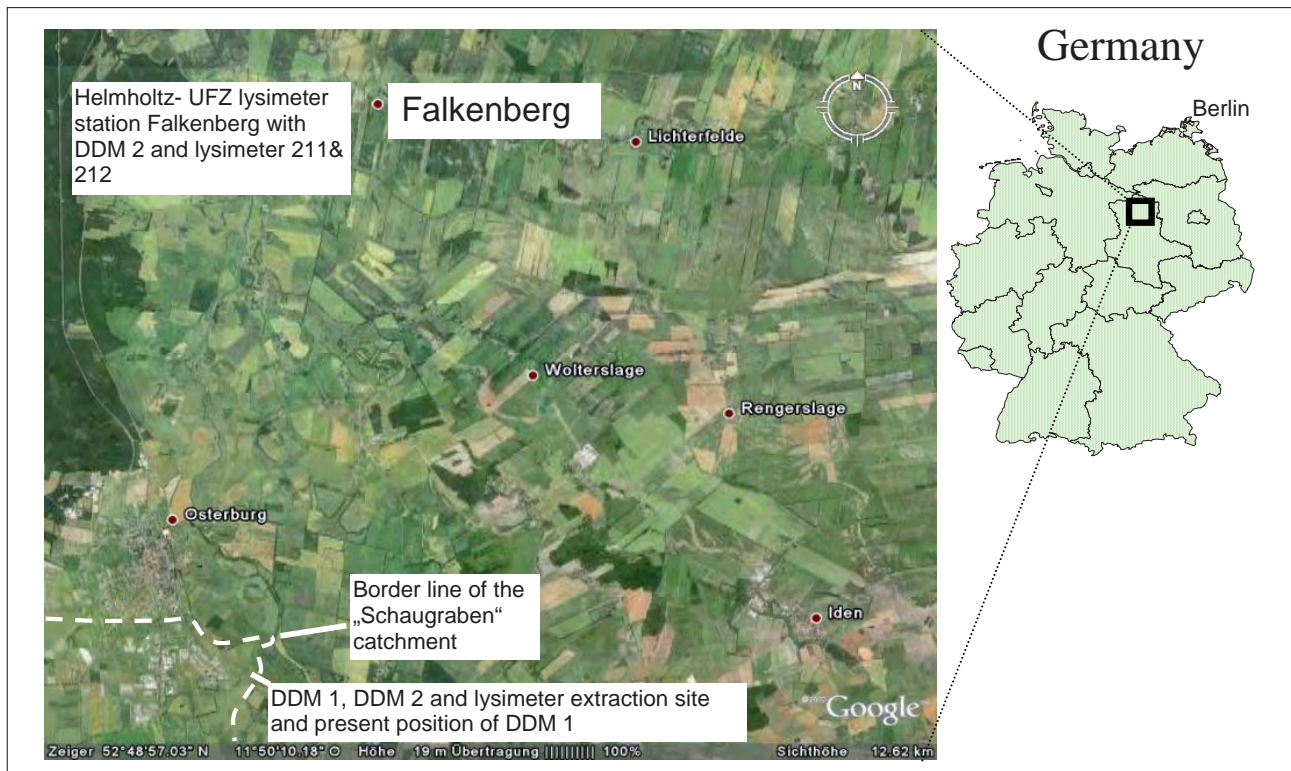


Figure 3: Geographical position of the DDM – sites, the gravitation lysimeter site and the extraction site of both

the location of the lysimeter in both meteorological factors and pedological parameters (MEISSNER et al. 2002a, CHAMBERS et al. 2006). The test sites are climatically allocated to the transition zone of the moderate climate. Precipitation averages to 536 mm per year (1986-2001; Falkenberg, Germany), with maximum precipitation occurring during June and July. Long-term mean evapotranspiration was 495 mm (1986-2001) and mean annual temperatures ranged from 7.3 to 10 °C (1986-2001).

Furthermore, we used an identical soil from the experimental catchment “Schaugraben” (52° 46' N; 11° 46' E) for filling DDM 2. The monoliths of lysimeter 211 and 212 as well as the site from which the soil of DDM 2 originated were characterized as Dystric Cambisol according to FAO soil classification (FAO 1990).

Installation of the measuring technique

In June 2003 we started with the installation of the DDM 1 at the “Schaugraben” field site. We installed the second fluxmeter (DDM 2) in the same year at the Helmholtz-UFZ lysimeter station at Falkenberg in neighbourhood (approximately 20 m) to the gravitation lysimeters. It is a precondition for using of the DDM that the groundwater table is durably > 2 m below the soil surface according to its construction. The groundwater level of the Schaugraben site (DDM 1) is strongly influenced by the adjacent ditch system. Therefore, a groundwater level of ≤ 2 m can not be always excluded, especially during wet periods. The DDM 2 (installed at Helmholtz- UFZ lysimeter station) was not affected by ascending groundwater table.

The two lysimeter vessels were monolithically filled in September 2001 at a grassland site in the Schaugraben catchment (52° 46' N; 11° 46' E). The cylindrical lysimeter monolith was collected by a newly developed extraction technology (MEISSNER et al. 2007).

The vegetation cover of both lysimeters and fluxmeters matched to the grassland vegetation at the extraction site. The recent agricultural management regimes of the lysimeters and the fluxmeters were similar but not equal. The lysimeters were managed as a typical regional grassland with mineral fertilization and 3 cuts per year. They got since 2001 a yearly fertilizer application rate of 20 gm⁻² nitrogen, 2.5 gm⁻² phosphorus and 11 gm⁻² potassium. Since installation of the fluxmeters the extraction site (DDM1) as well as the site at the Helmholtz- UFZ lysimeter station Falkenberg (DDM2) were not fertilized.

The amount of seepage water was continuously measured at the lysimeters. Data from both fluxmeters were collected once per week.

Results and discussion

Precipitation at the “Schaugraben” catchment and at the UFZ lysimeter station

Figure 4 presents the precipitation measured at the “Schaugraben” catchment and at the Helmholtz- UFZ lysimeter station at Falkenberg. As a result of three years measurements (May 2005 – April 2007) the precipitation amount at the in situ site (Schaugraben) exceed in total the amount

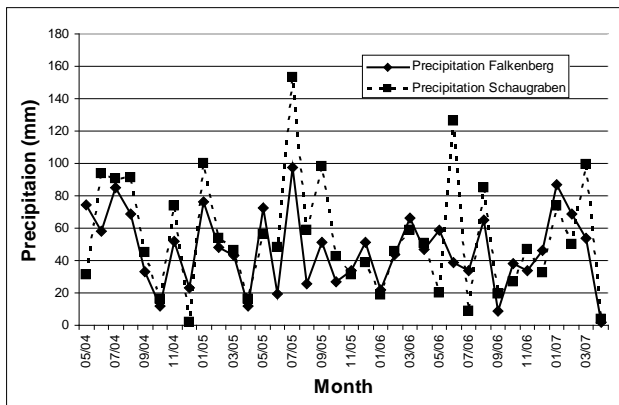


Figure 4: Precipitation at the Schaugraben catchment and at the Helmholtz- UFZ lysimeter station Falkenberg

of Falkenberg by approximately 276.5 mm. These differences were probably a result of mesoscale climate variations mainly caused by extreme events (e.g. thunderstorm with intense rain). For the two precipitation time series statistical comparisons (analysis of variance) were carried out (not shown). We didn't find statistically significant differences between the main-effects year, as well as hydrological winter or summer half year, and site. Therefore, both time series can be compared directly.

Seepage measured by DDM and lysimeter

The amount of seepage water measured by DDM and lysimeter is presented in Figure 5. Although DDM 1 and DDM 2 were installed at different sites, the measured amounts of seepage (weekly data) were closely correlated ($r_s = 0.82$). A total seepage amount of approximately 280.0 mm was measured at DDM 1 during the experiment. DDM 2 situated at Falkenberg showed in the reference period a slightly smaller level of seepage (in total 253.8 mm). This can be mainly explained by the lower level of precipitation at this site (see 3.2). The total amount of precipitation at Falkenberg fell below the value of the "Schaugraben" by 276.5 mm (between May 2004 until April 2007). The starting point of seepage formation was almost comparable. At the beginning of the experiment in May 2004 in both DDM's seepage occurred but the amounts differed. In the year 2005 the seepage formation began at DDM 1 two weeks earlier than at DDM

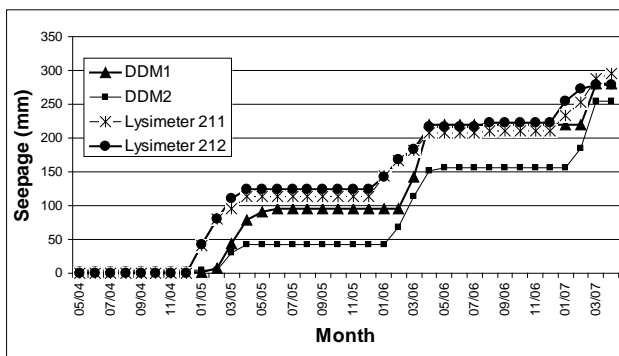


Figure 5: Seepage amount of DDM and lysimeter (sum curves)

2. But DDM 2 starts approximately 4 weeks before DDM 1 in the seepage periods 2006 and 2007. Seepage formation at DDM 1 lasted in 2005 four weeks longer than at DDM 2. In 2006, the discharge period of DDM 1 was compared with DDM 2 four weeks earlier completed. The seepage formation of both DDM's was completed in March 2007. At DDM 1 the natural site conditions were probably earlier reached in relation to the top soil compaction before the DDM installation. The effects observed at DDM 2 in 2005 can be ascribed to the installation which was completed in December 2003. Here, a longer period was needed for the soil consolidation to achieve the natural seepage regime. It is assumed that the soil physical parameters of the original site (bulk density) weren't reached until yet. The soil might be less compacted and therefore the seepage process was promoted.

As expected, the seepage of both lysimeters 211 and 212 was closely correlated ($r_s = 0.88$). The total amount of seepage was almost comparable. After 3 years of observation the seepage of lysimeter 211 was in comparison to lysimeter 212 only 17 mm higher. The temporal pattern of seepage formation was also comparable for both lysimeters. Looking at the monthly seepage data both lysimeters can be regarded as replications.

After an investigation period of three years we measured only a comparatively small difference in the amount of seepage between DDM and lysimeter. The average annual amount of seepage measured by the lysimeter method was 96 mm and marginally exceeded that of DDM (89 mm). The total amount of seepage measured by DDM and lysimeter showed to a large extend congruence. The relative difference between the smallest (DDM 2 ≈ 254 mm) and the highest amount (lysimeter 211 ≈ 296 mm) was 42 mm during the investigation period (May 2004 – April 2007). The seepage volume of lysimeter 212 and DDM 1 was almost identical (279 mm and 280 mm, respectively) and ranged between the values of DDM 2 and lysimeter 211, respectively. This result was surprising because the high sophisticated measurement technology like a weighable lysimeter was opposed to a comparatively simple low cost system (DDM) and no distinct difference regarding the amount of seepage were detected.

A difference of both systems consists in the temporal pattern of seepage formation. In average of three years, there was a time lag of approximately 4 up to 8 weeks between the recharge periods in lysimeter and DDM. This effect was probably caused by the different construction design of DDM and lysimeter. Both systems lysimeter and DDM differ in surface area. The DDM was featured by capillary wicks, which are situated at the bottom of the soil column and inside the first funnel ending at 1.3 m below ground level. The fiberglass maintains a fixed tension due to the hanging water column on the soil (HOLDER et al. 1991). The lysimeter surface area of 1.0 m² was also regarded as precise for seepage collection, because it is sufficient to reduce edge effects. Therefore, a considerable difference regarding the amount of seepage measured by lysimeter and DDM shouldn't be expected. But it has to be kept in mind that the usage of disturbed soil or materials in the DDM will change the natural texture and the spatial heterogeneity

with adverse impact on the water flux like already shown in lysimeter experiments (WEIHERMÜLLER et al. 2007). According to the lysimeter construction its lower boundary was exposed to the atmospheric pressure, resulting in an evolution of a water-saturated zone at the bottom of the lysimeter. Seepage was only possible if the soil pores at boundary layer (filter layer) were saturated and pressure overcomes atmospheric pressure. Therefore, the deepest layer of the transition zone between lysimeter bottom and atmosphere stays saturated and contains a certain amount of residual water at the end of the seepage period due to the lack of a hydraulic potential which is necessary to drain this layer. If leachate occurs again in the upper soil horizons the pore space at the boundary layer is filled up. If the pore water pressure exceeds atmospheric pressure seepage restarts. Therefore, the soil water content inside the boundary layer of the lysimeter was probably higher than that of the DDM. Under similar conditions (soil and climate), only a fixed amount of seepage was formed during the hydrological winter half year. This leachate volume occurred regardless of the measuring system. It became earlier effective for seepage at the lysimeter because of the postulated higher residual water content compared with the in the DDM. It was assumed that the time lag between seepage period in lysimeter and DDM can be attributed to this effect.

Conclusions

No significant distinctions occurred in long term measurement of seepage formation between both a passive-wick water sampler (deep drainage meter –DDM type) and weighable gravitation lysimeter. Despite the detected inhomogeneities relating the seepage formation process the differences of seepage amount between the two systems differed during the experimental period of three years less than 8 %. This was even more astonishing when considering the distinct smaller surface area of the DDM (0.03 m²) in relation to the lysimeter (1.0 m²).

The DDM is in comparison to a conventional gravitation lysimeter a cost-effective measuring system. It delivers

reliable measuring data regarding the seepage water quantity in sandy soils with adequate groundwater levels > 2 m. Further research is necessary to test the DDM with more cohesive soils as well as the acceptability of the DDM to measure seepage water quality.

References

- BEN-GAL, A. and U. SHANI, 2002: A highly conductive drainage extension to control the lower boundary condition of lysimeters. *Plant and Soil* 239, 9-17.
- CHAMBERS, P.A., R. MEISSNER, F.J. WRONA, H. RUPP, H. GUHR, J. SEEGER, J.M. CULP and R.B. BRUA, 2006: Changes in nutrient loading in an agricultural watershed and its effects on water quality and stream biota. *Hydrobiologia* 556, 399-415.
- FAO, 1990: Soil map of the world. Revised Legend. World Soil Resources Report 60, Rom.
- GEE, G.W., A.L. WARD, T.G. CALDWELL and J.C. RITTER, 2002: A vadose-zone water fluxmeter with divergence control. *Water Resour. Res.* 38, 16.1-16.7.
- GEE, G.W., Z.F. ZHANG and A.L. WARD, 2003: A modified vadose-zone fluxmeter with solution collection capability. *Vadose Zone J.* 2, 627-632.
- GEE, G.W., A.L. WARD, Z.F. ZHANG and A. ANANDACOOMARASWAMY, 2004: Use of Water Fluxmeters to Measure Drainage. pp. 321-331. In R. A. Cooke (ed), *Drainage VIII. Proceedings of the 8th International Drainage Symposium*, Mar. 21-24, Sacramento, California, ASAE, St. Joseph, Michigan.
- HOLDER, M., K.W. BROWN, J.C. THOMAS, D. ZABCIK and H.E. MURRAY, 1991: Capillary-wick unsaturated zone soil pore water sampler. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55. 5, 1195-1202.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP, M. SEYFARTH and H. BORG, 2007: Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. In: *J. Plant Nutr. Soil. Sci.*, 170.3, 335-344.
- MEISSNER, R., H. RUPP and M. SEYFARTH, 2008: Advances in Outdoor Lysimeter Techniques. In: *Water Air Soil Pollution: Focus* 8, 217-225.
- WEIHERMUELLER, L., J. SIEMENS, M. DEURER, S. KNOBLAUCH, H. RUPP, A. GOETTLEIN and T. PUETZ, 2007: In Situ Soil Water Extraction: A Review. *Journal of Environmental Quality* 36, 1735-1748.

Funktionsanalyse und Test großflächiger In-situ-Sickerwassersammler

Andre Peters¹ und Wolfgang Durner^{2*}

Zusammenfassung

In diesem Beitrag präsentieren wir ein neues modulares Rillenlysimetersystem, das den Einbau von großflächigen passiven Wasserauffangflächen in ungestörten Böden ermöglicht. Große Auffangflächen sind besonders dann notwendig wenn präferenzielle Fließwege am Wassertransport beteiligt sind. Um den Einfluss von diesen Sammelsystemen auf das natürliche Fließfeld im Boden zu untersuchen und somit auch die Repräsentativität der Messungen zu bewerten, wurde eine numerische 2D Simulationsstudie mit homogenen und heterogenen Böden durchgeführt. Die Studie zeigt, dass die Sammeleffizienz der Lysimeter stark von den bodenhydraulischen Eigenschaften, der Infiltrationsintensität und der Lysimetergröße abhängt. In homogenen Böden wird nur dann Wasser aufgefangen wenn die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit relativ gering ist. In homogenen Böden mit hoher gesättigter Leitfähigkeit können selbst sehr große Lysimeter mit einer Breite von 250 cm komplett umflossen werden. Außerdem steigt die Sammeleffizienz mit ansteigender Infiltrationsintensität und der Lysimetergröße. Heterogenitäten in den bodenhydraulischen Eigenschaften führen zu präferenziellen Fließwegen die kleine Beprobungsgeräte umfließen können. Eine Simulation mit einem inerten Tracer zeigt, dass der Durchbruch in das Lysimeter im Vergleich zum Durchbruch im unbeeinflussten Boden leicht verzögert erfolgt. Die Konzentrationen sind vergleichbar mit denen im unbeeinflussten Boden. Durch die Größe mittelt das Lysimeter die lokalen Durchbrüche, die in heterogenen Böden sehr unterschiedlich sein können. Um den Lysimetertypus unter realen Bedingungen zu testen, wurde ein Feldexperiment durchgeführt mit Lysimetern, die eine Fläche von 1,25 x 1,25 m hatten. Drei Lysimeter wurden direkt unterhalb einer 1,2 m mächtigen Schüttung installiert, vier weitere ca. 0,5 bis 1 m tiefer im ungestörten Boden. Die Lysimeter direkt unterhalb der Schüttung hatten eine Sammeleffizienz von ca. 45%. Ein Tracerexperiment zeigte, dass praktisch das gesamte aufgefangene Wasser aus präferenziellen Fließwegen stammte. Die anderen vier Lysimeter fingen kein Wasser auf, d.h. auch große wandlose Lysimeter können komplett umflossen werden, wenn nur Matrixfluss stattfindet.

Summary

We present a new modular plate system that allows installation of large zero tension lysimeter plates under undisturbed soils. Large sample devices are especially necessary if preferential flow paths are present. To investigate the influence of the lysimeter on the water flow field in the soil, and thus on the representativeness of the measurements, a numerical 2-D simulation study was conducted with homogeneous and heterogeneous soils. The study shows that the collection efficiency is highly dependent on the hydraulic functions, infiltration rate, and lysimeter size. If the soil is homogeneous, only in fine soils with relatively low saturated hydraulic conductivities, zero tension plate lysimeters are able to collect soil water. In homogeneous soils with high saturated conductivities even very large lysimeters (width 250 cm) perform very poor and can be bypassed completely by the soil water. Furthermore, the collection efficiency increases with increasing infiltration intensities and lysimeter sizes. Heterogeneities of soil hydraulic properties result into a network of flow channels that may bypass small sampling devices. Tracer transport simulations with an inert solute in a heterogeneous medium show that the solute breakthrough into the lysimeter occurs slightly retarded as compared to the free soil. Breakthrough concentrations are similar to the undisturbed soil. Due to its size, the lysimeter averages the local breakthrough curves, which can be considerably different at single points. To test the plate lysimeter performance under real conditions, a field study was conducted. The lysimeter size was 1,25 x 1,25 m. Three lysimeters were installed underneath a 1.2 m filling of contaminated silty sand. Four further lysimeters were installed in the undisturbed soils underneath the disturbed soil material. A tracer experiment with irrigation was conducted to investigate the collection efficiency of the lysimeters and the flow regime in the soil material. The three lysimeters directly underneath the filled soil material collected water regularly with a collection efficiency of 45%. The arrival of the tracers showed that almost all collected water came from preferential flow paths. The other four lysimeters did not collect any water. Thus, even large zero tension plate lysimeters can be completely circumvented if only matrix flow occurs.

Einleitung

Zur Bestimmung von Stofffrachten aus der ungesättigten Bodenzone ins Grundwasser ist es notwendig, sowohl die

chemische Zusammensetzung als auch die Sickerrate des Bodenwassers abzuschätzen. Die in Hinblick auf Menge und Qualität repräsentative Beprobung von Sickerwasser in einem ungestörten Boden ist bis heute ein ungelöstes

¹ Standortkunde und Bodenschutz, Institut für Ökologie, TU Berlin, Salzufer 11-12, D-10587 BERLIN

² Abt. Bodenphysik, Institut für Geoökologie, TU Braunschweig, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

* Ansprechpartner: w.durner@tu-bs.de

Problem, da jeder Einbau von Erfassungsinstrumenten mit erheblichen Rückwirkungen auf den Zustand des Systems verbunden ist. In der Natur kommen häufig heterogene Böden mit präferenziellen Fließfeldern vor (FLURY 1994). Hier ist das Problem der repräsentativen Beprobung noch schwieriger als in homogenen Böden.

Zur Beprobung von Sicker- bzw. Bodenwasser gibt es eine große Anzahl von Geräten mit unterschiedlichen Strategien und Geometrien. Eine kostengünstige Strategie ist die direkte Bodenprobennahme. Diese Methode lässt keine Aussagen über die Flüsse zu (ZHU et al. 2002), und aufgrund der Destruktivität ist eine wiederholte Beprobung desselben Bodenraumes nicht möglich. Eine zweite Strategie ist, dem Boden das Wasser mit einer gewissen Saugspannung zu entziehen. Dies kann entweder aktiv mithilfe von porösen Materialien wie Saugkerzen (HAGEDORN et al. 1999) oder Sauplatten (KOSUGI und KATSUYAMA 2004) erfolgen oder passiv mithilfe von Dochtlysometern (BOLL et al. 1992). Am häufigsten werden Saugkerzen eingesetzt. Ein großer Nachteil der Saugkerzen ist ihre limitierte Größe, die dazu führt, dass das Wasser in strukturierten heterogenen Böden hauptsächlich an ihnen vorbeifließt (HAGEDORN et al. 1999). Weiterhin können die angelegten Saugspannungen unter Umständen zu einer erheblichen Beeinflussung des natürlichen Fließfeldes führen (WEIHERMÜLLER et al. 2007). Eine dritte Strategie ist der Einsatz freidrainender Systeme, wie Drainagerohre oder freidrainende Lysimeter. Bei Flächen, die mit einem Drainagesystem ausgestattet sind, kann die Beprobung des Drainagewassers Aufschluss über die Stoffflüsse im Sickerwasser geben. Allerdings können Teile des Drainagesystems umflossen und das Drainagewasser vom Grundwasser gespeist werden (BERGSTROM 1987), wodurch Stoffkonzentrationen und Mengen falsch eingeschätzt werden. Mit monolithischen Lysimetern lassen sich nicht nur Konzentrationen, sondern auch Wasser- und Stoffflüsse messen. Allerdings können die Lysimeterwände präferenzielle Fließwege erzeugen (CAMERON et al. 1979) und die hohen Kosten limitieren den Einsatz in vielen Fällen.

Passive Plattenlysimeter haben i.d.R. keine oder nur kleine Seitenwände und fangen nur dann Bodenwasser auf, wenn das Matrixpotenzial oberhalb der Lysimeterfläche größer oder gleich Null ist (ZHU et al. 2002). In allen anderen Fällen wird das Wasser zu den trockeneren Böden in die Umgebung der Lysimeter fließen, was zu einer sehr geringen Sammeleffizienz führen kann (JEMISON und FOX 1992). Um die Sammeleffizienz zu erhöhen, müssen entweder die Auffangflächen (RADULOVICH und SOLLINS 1987) oder die Wandhöhen (GEE et al. 2002) vergrößert werden.

Für den Einbau der Plattenlysimeter muss eine Grube gegraben werden, um von dort aus die Lysimeter als Ganzes einzusetzen. Hierfür muss zuerst ein horizontales Loch mit der Breite und Tiefe der Lysimeter gegraben werden. Aufgrund der Instabilität des darüber liegenden Bodenmaterials ist die Größe der Lysimeter limitiert. Daher ist es bis heute ein nicht gelöstes Problem großflächige Lysimeter in ungestörten Böden einzusetzen. ROBISON et al. (2004) lösten dieses Problem in dem sie ihre ca. 6 m² großen Platten mit einem Bulldozer von der Grube aus in den Boden schoben. Diese Methode ist allerdings kostenintensiv und aufgrund der großen Kräfte die bei der Installation ausgeübt werden bleibt es fraglich ob der darüber liegende Boden ungestört bleibt.

In diesem Beitrag präsentieren wir einen neuen freidrainenden wandlosen Lysimetertyp der manuell unter einen ungestörten Boden eingebaut werden kann. In einer numerischen Studie wurde die Abhängigkeit der Sammeleffizienz von folgenden Faktoren untersucht: (i) den bodenhydraulischen Eigenschaften, (ii) der Infiltrationsintensität, (iii) der Lysimetergröße, (iv) lokalen Heterogenitäten die zu präferenziellen Fließfeldern führen. Weiterhin wurde verglichen, wie ein Durchbruch eines konservativ verlagerten Stoffes mit einem Lysimeter erfasst würde im Vergleich zum tatsächlich stattfindenden Stoffdurchbruch im Boden. In einer Felduntersuchung wurde das Auffangverhalten der Lysimeter in einem realen Boden getestet.

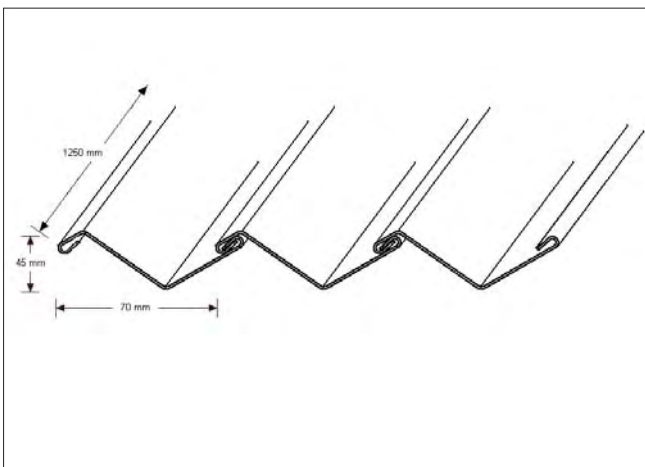


Abbildung 1: Links: Skizze der Auffangbleche für die Rillenlysimeter. Von diesen Auffangblechen wurden 18 Stück pro Lysimeter verwendet, so dass sich eine Auffangfläche von ca. 1,25 x 1,25 m ergab. Durch das modulare System konnten diese Lysimeter großflächig eingebaut werden ohne den darüber liegenden Boden zu entfernen. Rechts: Fertig eingebautes Rillenlysimeter im ungestörten Boden.

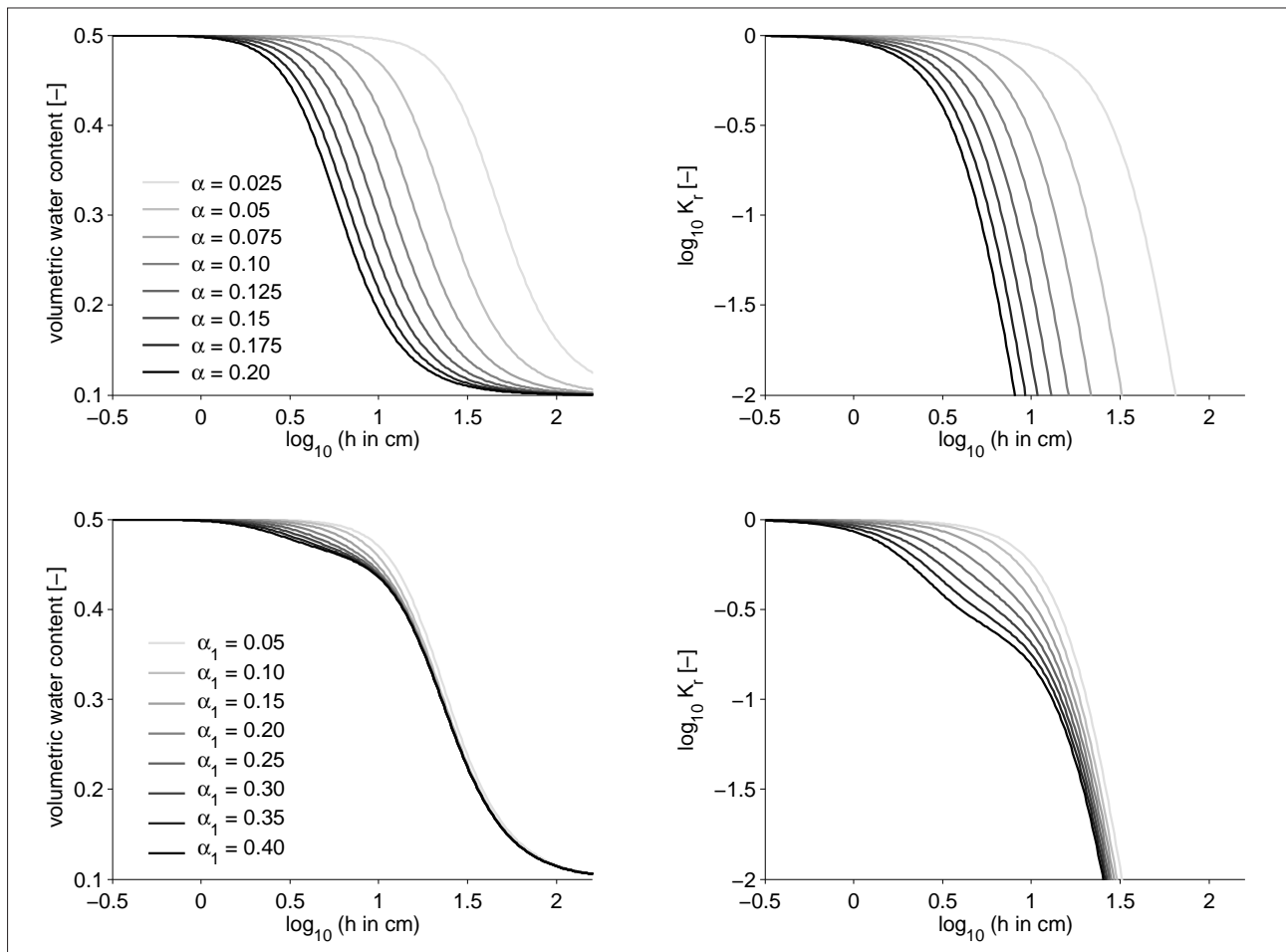


Abbildung 2: Hydraulische Eigenschaften die für die Simulationen verwendet wurden. Oben: Unimodale Funktionen; Unten: bimodale Funktionen. Größere Werte für α bzw. α_1 stehen für größere Materialien.

Material und Methoden

A) Lysimeterdesign

Die zur Sickerwassererfassung verwendeten Auffangbleche, die wir als „Rillenlysimeter“ bezeichnen, bestehen aus ineinandersteckbaren Einzelblechen (Rillen) aus V2a-Edelstahl, die sukzessive von einer Grube aus in den ungestörten Boden eingebaut werden (Abbildung 1). Für den Einbau der Bleche wurde mit einem vierkantigen Eisenrohr jeweils ein Loch für das erste Einzelblech in den Boden getrieben. Dann wurde mit einem Metallschaber, der an einem 2 m langen Eisenstab befestigt war, Platz für weitere Bleche geschaffen. Waren die ersten Einzelbleche eingebaut, wurden sie mit Quarzkies befüllt, so dass der darüber liegende Boden gestützt war. Der Quarzkies diente zusätzlich als Drainschicht. Durch dieses modulare System können relativ große Beprobungsflächen realisiert werden, welche in der Verlegerichtung beliebig ausgedehnt werden können. In dieser Studie wurden Lysimeter mit einer Fläche von 1,25 x 1,25 cm realisiert.

Von den Blechen gelangte das Sickerwasser in Auffangrinnen aus V2a-Edelstahl, und von dort in 30 Liter Edelstahlfässer. Vom Fassboden führte eine Steigleitung aus V2a-Edelstahl mit 4 mm Innendurchmesser zur Bodenoberfläche.

B) Numerische Studie

Die Sammeleffizienz wird definiert als die aufgefangene Wassermenge, bezogen auf die auf derselben Oberfläche netto infiltrierte Wassermenge. Die Sammeleffizienz der Lysimeter ist eine Funktion von der Lysimetergröße, der bodenhydraulischen Eigenschaften und der Infiltrationsintensität. Um diese Einflussgrößen systematisch zu untersuchen, wurde eine numerische Studie mit dem Finite-Elemente Modell HYDRUS-2D (SIMUNEK et al. 1999) durchgeführt, in welcher der Wasser- und Stofftransport berechnet wurde.

Für die numerische Studie wurde eine 2 m hohe und 3 m breite Domäne gewählt in deren Mitte ein 1,25 m breites Lysimeter implementiert wurde (Abbildung 3). Am oberen Rand wurde eine einfache Flussrandbedingung mit einer konstanten Infiltrationsintensität von 4 cm d^{-1} gewählt. Am unteren Rand wurde ein gravitationsbedingter Fluss aus dem Gebiet heraus mit einer Rate gleich der lokalen hydraulischen Leitfähigkeit angenommen.

Die Parametrisierung der hydraulischen Eigenschaften erfolgte nach dem uni- und bimodalen van Genuchten/Mualem-Modell (VAN GENUCHTEN 1980, DURNER 1994). Die verwendeten hydraulischen Funktionen sind in Abbildung 2 gezeigt.

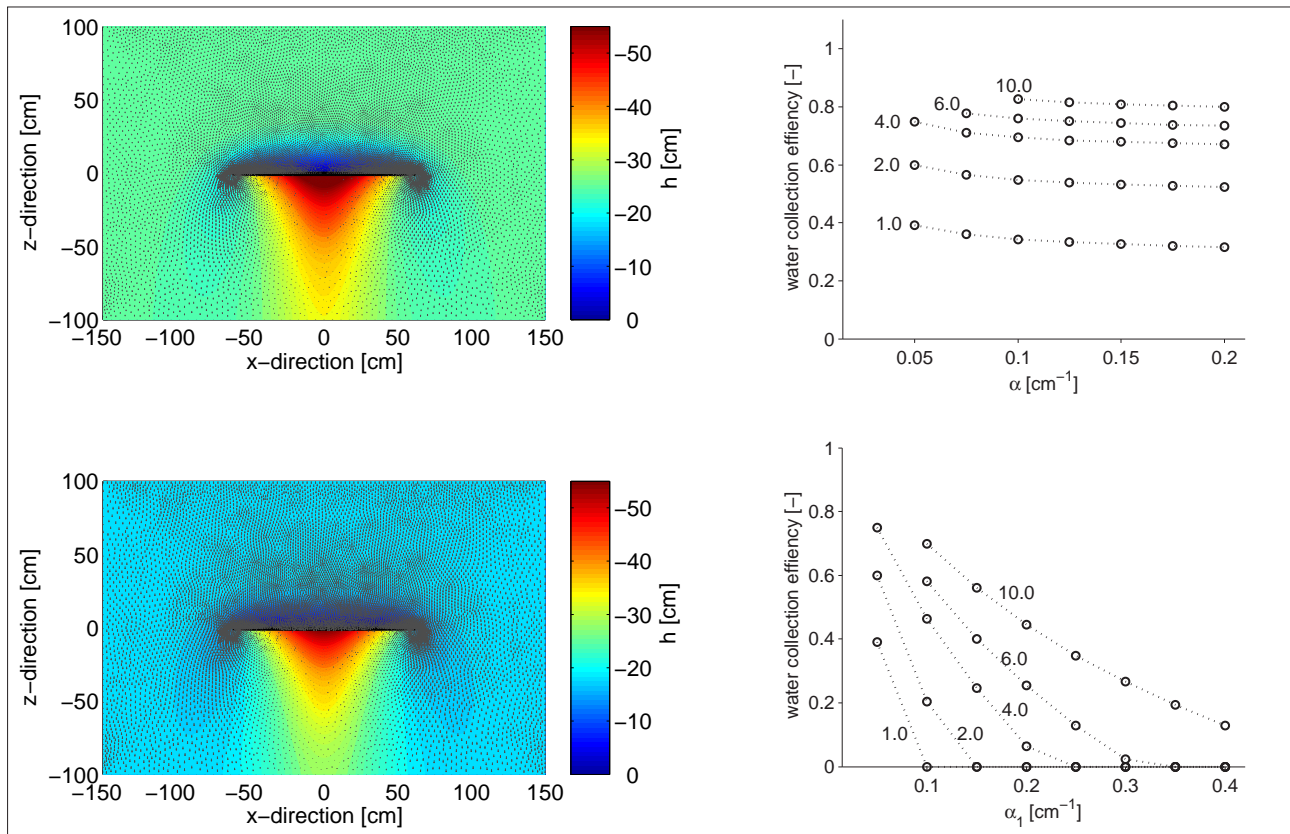


Abbildung 3: Links: Verteilung des Matrixpotenzials im 2D-Feld bei stationären Bedingungen. Pfeile geben Richtung und Größe des Wasserflusses an. Links oben: Potenzialverteilung für das unimodale Standardszenario ($\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$, $K_s = 100 \text{ cm d}^{-1}$); Links unten: Potenzialverteilung für den bimodalen Fall mit $\alpha_1 = 0.4 \text{ cm}^{-1}$ und $K_s = 100 \text{ cm d}^{-1}$. Infiltrationsintensität war in beiden Fällen 4 cm d^{-1} . Rechts: Sammeleffizienz als Funktion von hydraulischen Eigenschaften und Infiltrationsintensität (hier ist K_s mit α skaliert und hat den Wert 10 cm d^{-1} bei $\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ bzw. $\alpha_1 = 0.05 \text{ cm}^{-1}$). Rechts oben: Sammeleffizienzen für unimodale hydraulische Funktionen mit unterschiedlich großem Luftenritzungspunkt. Zahlen geben die Infiltrationsintensität an; Rechts unten: Dto., für bimodale hydraulische Funktionen mit unterschiedlich großem Luftenritzungspunkt. Zahlen geben die Infiltrationsintensität an.

Die numerische Studie wurde in 4 Teilen durchgeführt. Im ersten Teil wurde die Sammeleffizienz in Abhängigkeit von den bodenhydraulischen Eigenschaften bei homogenen Böden simuliert. Als Standardszenario wurde $\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ und $K_s = 10 \text{ cm d}^{-1}$ gesetzt. Der Parameter α wurde von 0.05 bis 0.2 cm^{-1} variiert und K_s entsprechend des Miller-Miller-Ähnlichkeitsansatzes (MILLER und MILLER 1956) quadratisch skaliert, so dass $K_s = 160 \text{ cm d}^{-1}$ bei $\alpha = 0.2 \text{ cm}^{-1}$. Die Skalierung der K_s -Werte mit α bildet ab, dass größere Materialien (größere Werte für α) höhere gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten besitzen. Im bimodalen Fall wurde der Parameter α_1 von 0.05 bis 0.4 cm^{-1} variiert, wobei K_s entsprechend von 10 cm d^{-1} bis 640 cm d^{-1} variierte. Die Dauer der Simulationen wurde so gewählt dass die Wasserbewegung stationär war.

Im zweiten Teil wurde die Sammeleffizienz in Abhängigkeit von der Lysimetergröße simuliert. Dabei wurde die Lysimeterbreite von 50 bis 250 cm variiert.

Im dritten Teil wurde der Einfluss von Heterogenitäten in den bodenhydraulischen Eigenschaften untersucht. Dazu wurden unterschiedlich stark ausgeprägte Heterogenitäten durch eine Miller-Miller-Ähnlichkeit realisiert (MILLER

und MILLER 1956). Die räumliche Verteilung der Eigenschaften wurde durch ein exponentielles Autokorrelationsmodell mit gleichen Korrelationslängen von $\Lambda_x = \Lambda_y = 10 \text{ cm}$ realisiert. Um repräsentative Ergebnisse zu erzielen wurden diese Simulationen jeweils in 400-facher Wiederholung mit zufälliger Verteilung der hydraulischen Eigenschaften durchgeführt.

Im vierten Teil wurde der Einfluss des Lysimeters auf den Transport eines inerten Tracers in einem heterogenen Boden untersucht. Dazu wurde ein Tracerpuls am oberen Rand appliziert und der Durchbruch der mit dem Lysimeter „gemessen“ wurde mit dem Durchbruch ohne Lysimeter verglichen.

C) Felduntersuchung

In einem Feldexperiment wurden drei Rillenlysimeter mit einer Seitenlänge von 125 cm unterhalb einer 120 cm mächtigen Aufschüttung von schwach mit PAK kontaminiertem schluffigen Sand installiert. Die 120 cm des original vorhandenen Bodens wurden vorher entfernt. Unterhalb der Schüttung lagen glaziale Lehme mit stark variierenden Texturen vor. Vier weitere Lysimeter wurden 50 bis 100

cm unterhalb der Schüttungen direkt in den ungestörten Boden eingebaut. Die Bodenoberfläche war horizontal und der Abstand der Lysimeter wurde so gewählt, dass die Fließfelder nicht von den jeweils benachbarten Lysimetern beeinflusst wurden.

Die Installation der Lysimeter erfolgte bis Februar 2003. Nach einer Langzeitmessung (Daten nicht gezeigt) wurde im Zeitraum von 11. bis 15. Oktober 2004 ein Beregnungsexperiment mit zwei applizierten Tracern durchgeführt. Ziel des Experiments war (i) Informationen über das Transportverhalten des Bodens besonders im Hinblick auf das Vorkommen von präferenziellen Fließwegen zu erhalten und (ii) die Sammeleffizienz durch erhöhte Infiltrationsraten zu verbessern. 0.5 cm einer Tracerlösung mit 8 g L^{-1} Br als idealen Tracer und 0.35 g L^{-1} Brilliant Blue (BB) als reaktiver Tracer wurden auf der Bodenoberfläche appliziert. Nach der Tracerapplikation wurde der Boden mit einer Intensität die leicht unterhalb der Infiltrationskapazität (ca. 2 cm d^{-1}) lag beregnet.

Ergebnisse

A) Studie unimodaler Boden

Abbildung 3 (links) zeigt die stationären Verteilungen von Matrixpotenzial und Fließfelder des Wassers für eine

Infiltrationsintensität von 4 cm d^{-1} . In beiden Fällen wirkt das Lysimeter als Barriere für den Wasserfluss, so dass das Matrixpotenzial direkt oberhalb des Lysimeters ansteigt und damit höher ist als auf gleicher Höhe in dem umgebenden Boden. Gleichzeitig ist das Potenzial direkt unterhalb des Bodens kleiner als in der Umgebung. Im bimodalen Szenario (Abbildung 3 (rechts, oben)) mit $\alpha_1 = 0.4 \text{ cm}^{-1}$ und $K_s = 640 \text{ cm d}^{-1}$ erreicht das Potenzial auf der Lysimeteroberfläche nicht den Wert Null, so dass das Lysimeter komplett umflossen wird. Im unimodalen Fall mit $\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ und $K_s = 10 \text{ cm d}^{-1}$ wird ein Potenzial von Null erreicht und Wasser tritt in das Lysimeter ein. Die Sammeleffizienz beträgt in diesem Fall ca. 75%.

Abbildung 3 (rechts) zeigt die Sammeleffizienzen aller Simulationen mit den homogenen Materialeigenschaften. Die oberen beiden Graphen zeigen die Abhängigkeit der Sammeleffizienz von den hydraulischen Eigenschaften und der Infiltrationsintensität für die unimodalen und bimodalen Fälle. Mit zunehmender Infiltrationsintensität steigt auch die Sammeleffizienz. In den unimodalen Szenarien ist die Sammeleffizienz annähernd identisch für die unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften. In den bimodalen Szenarien zeigt sich sehr deutlich, dass die Sammeleffizienz mit zunehmenden Werten für α bzw. α_1 und K_s abnimmt. Das kann damit erklärt werden, dass die gesättigte Wasserleitfähigkeit größer ist und somit der Wassertransport von

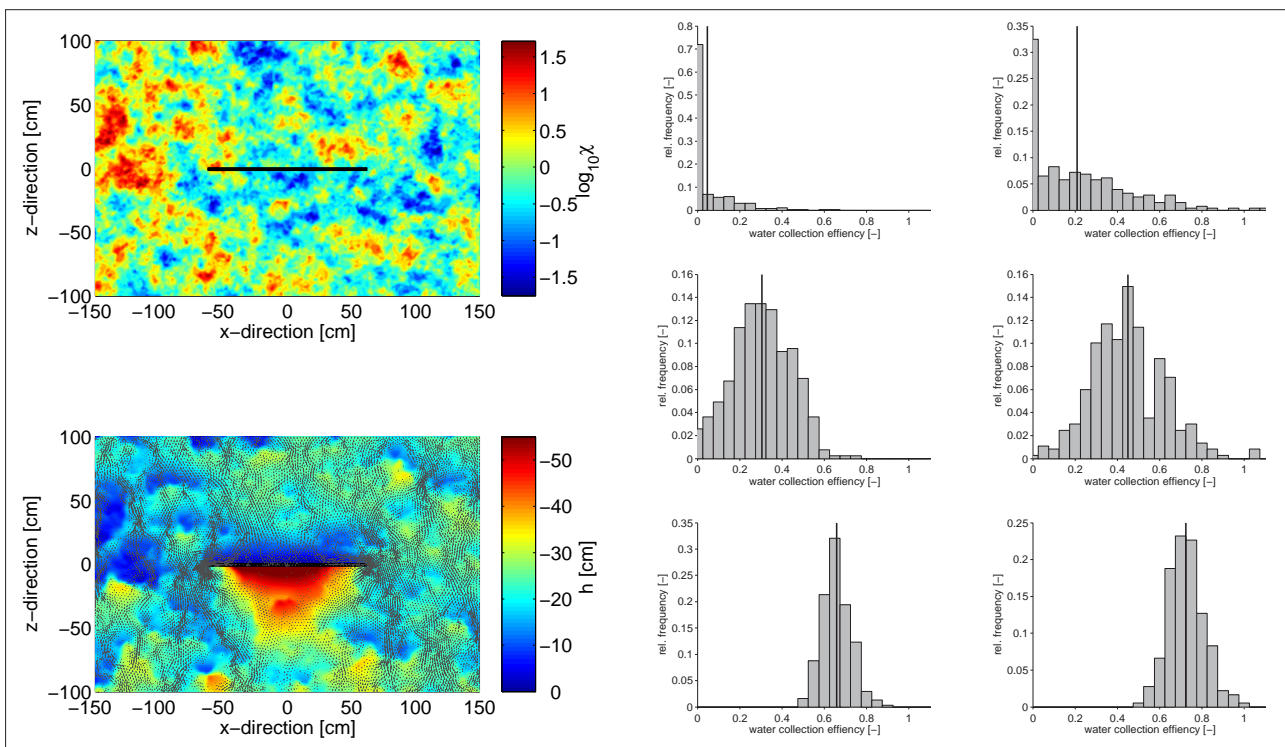


Abbildung 4: Links oben: räumliche Verteilung der bodenhydraulischen Eigenschaften dargestellt anhand des Skalierfaktors χ . Links unten: Dazugehörige stationäre Verteilung des Matrixpotenzials beim unimodalen Standardszenario ($\alpha = 0.05 \text{ cm d}^{-1}$, $K_s = 100 \text{ cm d}^{-1}$). Infiltrationsintensität war 4 cm d^{-1} . Rechts: Verteilung der Sammeleffizienzen als Ergebnis der Monte-Carlo-Simulationen für unterschiedliche Lysimetergrößen und unterschiedlichen Ausprägungen der Heterogenität. Erste Reihe: Lysimeterbreite ist 75 cm, zweite Reihe: Lysimeterbreite ist 125 cm, dritte Reihe: Lysimeterbreite ist 250 cm. Linke Spalte: Standardabweichung von $\log_{10}(\chi) = 0.5$. Rechte Spalte: Standardabweichung von $\log_{10}(\chi) = 0.75$. Schwarze Linien zeigen arithmetisches Mittel der Ergebnisse. Hydraulische Funktionen und Infiltrationsintensität wie links.

der Lysimeterfläche in den umgebenden Boden auch bei geringen Potenzialdifferenzen sehr ausgeprägt ist. Dieser Effekt wird überprägt durch eine rasche Abnahme der Leitfähigkeit nahe Sättigung bei größeren Materialien, also für größere Werte von α und α_1 (Abbildung 2), so dass der Fließquerschnitt oberhalb des Lysimeters bei den größeren Materialien kleiner wird. Diese Überprägung führt in den unimodalen Fällen dazu, dass die Sammeleffizienzen für die einzelnen Infiltrationsintensitäten nahezu gleich sind. In keinem dieser Fälle erreichte die Sammeleffizienz einen Wert von 1.

Auch die Vergrößerung der Lysimeterfläche und der Einsatz von Seitenwänden führen zu höheren Sammeleffizienzen (Daten nicht gezeigt). Allerdings können selbst Lysimeter mit einer Breite von 250 cm komplett umflossen werden.

B) Studie strukturierter Boden

Abbildung 4 (links oben) zeigt eine typische Realisierung der Verteilung des Miller-Skalierfaktors χ für einen heterogenen Boden. Die Standardabweichung σ von $\log_{10}(\chi)$ war 0,5 und die Korrelationslänge in beiden Raumrichtungen 10 cm. Für vertikale Wasserbewegungen führen heterogene Bodeneigenschaften zu einem Netzwerk von präferenziellen Fließwegen (ROTH 1995). Dies ist sehr gut an den Fließvektoren in Abbildung 4 (links unten) zu sehen. Die stationäre Potenzialverteilung ist weniger heterogen als die Verteilung von $\log_{10}(\chi)$ und ähnelt der Potenzialverteilung der homogenen Szenarien (Abbildung 3, links). Der Barriereneffekt des Lysimeters ist qualitativ ähnlich zum homogenen Fall. Im Gegensatz zum homogenen Standardszenario mit $K_s = 100 \text{ cm d}^{-1}$ (Daten nicht gezeigt) wird im heterogenen Fall Wasser aufgefangen, was durch das Fließfeld dargestellt ist. Die Sammeleffizienz betrug in diesem Fall ca. 42%.

Das Fließfeld in Abbildung 4 rechts ist eine einzelne zufällige Realisation. Um repräsentative Ergebnisse zu erzielen wurde die Generierung der χ -Verteilung und anschließender Simulation mit denselben Randbedingungen 400-fach

wiederholt. Diese Monte-Carlo-Simulationen wurden für 3 verschiedene Lysimetergrößen und 2 unterschiedliche Grade der Variabilität der hydraulischen Eigenschaften, ausgedrückt in der $\log_{10}(\chi)$, durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Monte-Carlo-Simulationen sind in Abbildung 4 (rechts) zusammengefasst. Wie erwartet ist die Sammeleffizienz größer für größere Lysimeterflächen. Da größere Lysimeter über größere Bodenvolumina mitteln, sinkt die Variabilität der „Messungen“ mit der Größe der Auffangflächen. Weiterhin steigt die Sammeleffizienz mit ansteigender Variabilität der Verteilung der bodenhydraulischen Eigenschaften. Dies ist bei den kleinen Lysimetern am meisten ausgeprägt, wo die Wahrscheinlichkeit, dass ein präferenzialer Fließweg das Lysimeter trifft am geringsten ist. Bei einer Lysimeterbreite von 75 cm und $\sigma(\log_{10}(\chi)) = 0,5$ wurde ca. 65% aller Lysimeter komplett umflossen. Mit den größeren Lysimetern wurde immer Wasser aufgefangen. Bei einer Lysimeterbreite von 250 cm hatte ein Anstieg von $\sigma(\log_{10}(\chi))$ auf 0,75 kaum noch einen Einfluss auf die Sammeleffizienz.

Abbildung 5 (links) zeigt die fließgemittelten Durchbruchkurven eines inerten Tracers, der als Puls auf die Bodenoberfläche bei der Simulation eines stationären Fließfeldes gegeben wurde. Die erste Simulation wurde mit dem Fließfeld durchgeführt, das in Abbildung 4 (links) dargestellt ist. Eine Referenzsimulation wurde mit der exakt gleichen Verteilung der hydraulischen Eigenschaften, aber ohne Lysimeter als Barriere durchgeführt. Der Durchbruch an den einzelnen Knoten in der Simulation ohne Lysimeter (gepunktete Linien) ist sehr unterschiedlich. Daraus folgt dass kleinskalige Messungen, z.B. mit Saugkerzen, in heterogenen Böden nicht zu repräsentativen Ergebnissen führen können. Dagegen unterscheidet sich der Durchbruch wie er im Lysimeter gemessen würde nur leicht vom „tatsächlichen“ Durchbruch im unbeeinflussten Boden. Die Lysimetermessung kann demnach für konservative gelöste Stoffe gute gemittelte Abschätzungen der realen mittleren Durchbrüche erbringen.

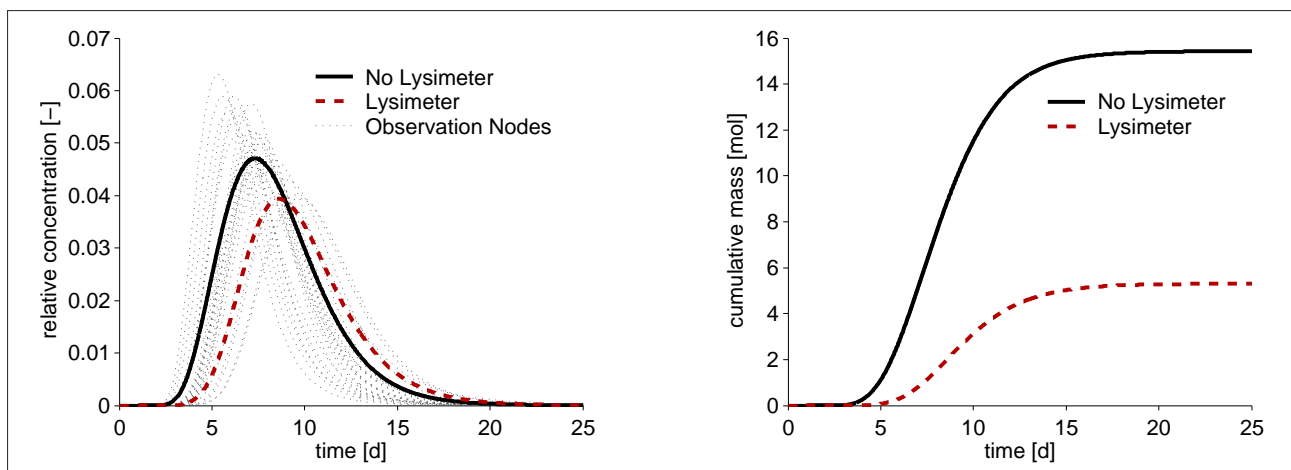


Abbildung 5: Links: Durchbruchkurve eines idealen Tracers, der als kurzer Puls auf die Oberfläche des Bodens gegeben wurde. Wassertransportsszenario ist wie in Abbildung 4 links. Lysimeter: Durchbruch in das Lysimeter; No Lysimeter: Durchbruchkurve im gleichen Boden und gleichem Ort ohne Lysimeter; Observation Nodes: Punktuelle Durchbruchkurven in der Simulation ohne Lysimeter. Rechts: Die entsprechenden kumulativen Massen, welche ins Lysimeter eintreten bzw. in ungestörten Böden die entsprechende Fläche passieren.

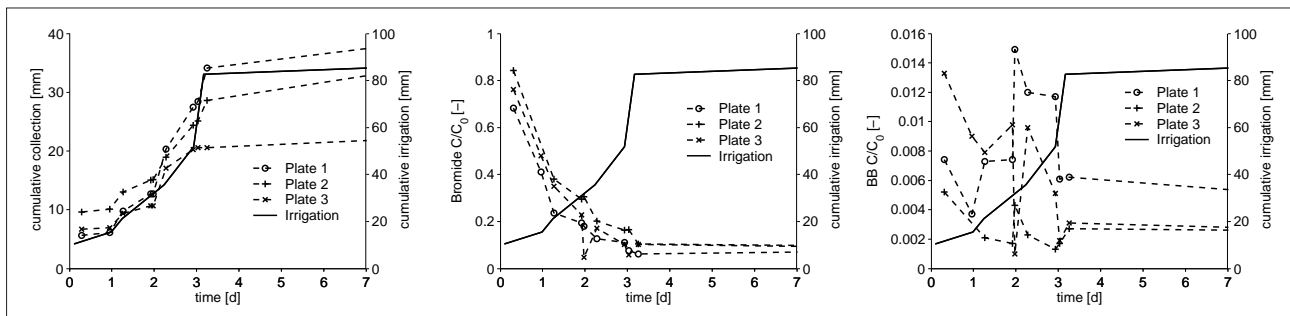


Abbildung 6: Ergebnisse der Feldmessung. Links: Kumulative Sickerwassergewinnung direkt unterhalb des aufgefüllten Bodenmaterials während des Beregnungsexperiments. Mitte: Zeitlicher Verlauf der Bromidkonzentration. Rechts: Zeitlicher Verlauf der BB-Konzentration.

Der leicht verzögerte Durchbruch mit Lysimeter kann durch den erhöhten Wassergehalt direkt oberhalb des Lysimeters erklärt werden. Dies führt bei der gleichen Flussrate, q , zu einer verringerten Porenwassergeschwindigkeit, $v = q/\theta$, im Vergleich mit dem Szenario ohne Lysimeter. Die stark unterschiedlichen kumulativen Massenflüsse (Abbildung 5, rechts) lassen sich durch die relativ geringe Sammeleffizienz des Lysimeters erklären. Das bedeutet, dass trotz der guten Wiedergabe der Konzentrationen anhand dieser Lysimetermessungen keine Aussagen über die auftretenden Massenflüsse gemacht werden können.

C) Feldmessung

Die Infiltrationskapazität des aufgefüllten Bodenmaterials im Feldexperiment war sehr gering, so dass in den fünf Tagen nur ca. 80 mm beregnet werden konnten. Die Variabilität der Beregnung wurde anhand kleiner Plastikfläschchen gemessen und war mit einem Variationskoeffizienten mit ca. 13% recht homogen. Die Lysimeter direkt unterhalb des aufgeschütteten Materials fingen regelmäßig Wasser auf und fingen ca. 45% des beregneten Wassers auf (Abbildung 6). Da die Verdunstung in dem Messzeitraum vernachlässigbar ist, kann das Verhältnis von aufgefangenem Wasser zum applizierten Wasser ungefähr mit der Sammeleffizienz gleichgesetzt werden. Der Variationskoeffizient zwischen den Lysimetern war 12%.

Der zeitliche Verlauf der relativen Bromid- und BB-Konzentrationen (Abbildung 6, Mitte und links), zeigt, dass diese Stoffe schon in der ersten Probe nach Beginn der Beregnung vorhanden waren. Darüber hinaus war die Bromidkonzentration zu Beginn mit ca. 80% der Ausgangskonzentration am höchsten und fiel danach kontinuierlich ab auf ca. 5% nach 80 mm Beregnung. Auch die BB-Konzentration war zu Beginn am höchsten. Allerdings war die maximale Konzentration weit unterhalb der Ausgangskonzentration (ca. 1% von C_0) und der Abfall des Konzentrationsverlaufes war irregulärer und langsamer als der der Bromidkonzentration.

Die frühe Ankunft beider Tracer und die sehr hohe Bromidkonzentration zu Beginn der Messung deuten darauf hin, dass praktisch das gesamte gewonnene Wasser aus präferenziellen Fließwegen stammt. Die starke Verdünnung eines reaktiven im Vergleich zu einem inerten Tracer bei vergleichbarer Transportzeit ist typisch für Stoffverlagerungen, die durch präferenzielles Fließen dominiert werden

(SCHWARZ und KAUPENJOHANN 2001). Die tiefer eingebauten Lysimeter fingen in dem Messzeitraum kein Wasser auf. Dieser Umstand zeigt, dass präferenzielles Fließen in diesem Unterboden keine bedeutende Rolle spielte.

Diskussion

Passive, wandlose Lysimeter fangen nur dann Wasser auf, wenn das Matrixpotenzial direkt oberhalb der Auffangfläche größer oder gleich Null ist. In allen anderen Fällen werden sie komplett umflossen. In homogenen Böden mit grober Textur, wo die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit sehr hoch ist, erreicht das Potenzial oberhalb des Lysimeters nur bei sehr hohen Infiltrationsraten Null.

Heterogenitäten in den bodenhydraulischen Eigenschaften führen zu präferenziellen Fließwegen und damit zu Sickerwassergewinnung, selbst wenn die mittleren hydraulischen Eigenschaften im homogenen Fall keinen Sickerwassergewinn erwarten lassen. Größere Heterogenitäten führen zu stärkerem präferenziellen Fluss und damit zu mehr aufgefangenem Wasser.

Größere Lysimeterflächen führen ebenfalls zu einem höheren Sickerwassergewinn. Zusätzlich wird die Variabilität zwischen den Einzelmessungen mit zunehmender Lysimetergröße kleiner. Das bedeutet, dass bei größerer Lysimeterfläche weniger Messwiederholungen nötig sind.

Der mit einem wandlosen Lysimeter gemessene Durchbruch eines inerten Tracers wird im Vergleich zum natürlichen mittleren Durchbruch nur leicht verzögert durch die Barrierenwirkung. Die Konzentrationen sind vergleichbar. Da die punktuellen Durchbrüche im heterogenen Fall recht unterschiedlich ausfallen, geben die Lysimeter eine gute Abschätzung des mittleren Stoffdurchbruchs in dem betreffenden Boden, vorausgesetzt der Stoff ist nichtreaktiv bzw. die chemische Reaktivität ist nicht abhängig von den hydrologischen Bedingungen wie z.B. dem Redoxpotenzial.

Obwohl die in der Feldstudie eingesetzten Lysimeter größer waren als die meisten in der Literatur beschriebenen Lysimeter, wurde nur relativ wenig Wasser aufgefangen. Dies mag dran liegen, dass die meisten der in der Literatur beschriebenen Lysimeter eine Art Seitenwand besaßen (RADULOVICH and SOLLINS (1987), JEMISON und FOX (1992), ZHU et al. (2002)).

Schlussfolgerungen

Wandlose flächige Lysimeter, die in den ungestörten Bodenkörper eingebracht werden können, sind hervorragend zum Auffangen von freidrainendem Sickerwasser aus präferenziellen Fließbahnen geeignet. Zum Erfassen von Sickerwasser, das in der ungesättigten Bodenmatrix transportiert wird, müssen dagegen Sauggeräte eingesetzt werden (vgl. PETERS et al. 2005).

Die numerische Studie zeigt, dass die Sammeleffizienz der Lysimeter stark von der Form der hydraulischen Eigenschaften abhängt. Besonders die Form dieser Eigenschaften nahe Sättigung spielt eine große Rolle. Dabei führen hohe gesättigte Wasserleitfähigkeiten zu geringeren Effizienzen und der starke Abfall der hydraulischen Leitfähigkeit nahe Sättigung zu höheren Effizienzen. Weiterhin führen größere Auffangflächen und höhere Infiltrationsintensitäten zu größeren Aufmengen.

Heterogenitäten in den bodenhydraulischen Eigenschaften führen zu einem Netz von präferenziellen Fließwegen, aus denen nur mit großflächigen Auffanggeräten repräsentative Proben genommen werden können. Größere Lysimeterflächen führen zu geringerer Variabilität in den Sammeleffizienzen. Das bedeutet, dass bei größeren Lysimeterflächen die Anzahl der Messwiederholungen geringer sein darf.

Stoffdurchbrüche werden durch den Einfluss des Lysimeters auf das natürliche Fließfeld leicht verzögert. Im Gegensatz zu punktuellen Messungen wie sie z.B. mit Saugkerzen gemacht werden, geben die hier beschriebenen Lysimeter repräsentativere Informationen über tatsächliche Transportvorgänge im natürlichen Boden.

In vielen natürlichen Böden spielen sowohl Matrix- als auch präferenzialer Wassertransport eine Rolle. Da es bis heute keine großflächigen Sauggeräte gibt, schlagen wir für diese Fälle eine Kombination von Lysimeter und Sauggeräte vor.

Literatur

- BERGSTROM, L., 1987: Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crop in tile drained plots and lysimeters. *J. Environ. Qual.*, 16, 11-18.
- BOLL, J., T.S. STEENHUIS and J.S. SELKER, 1992: Fiberglass wicks for sampling of water and solutes in the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 701-707.
- CAMERON, D., C. KOWALENKO and C. CAMPBELL, 1979: Factors affecting nitrate and chloride leaching variability in a field plot. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 455-460.
- DURNER, W., 1994: Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.*, 30, 211-223.
- FLURY, M., H. FLÜHLER, W. JURY and J. LEUENBERGER, 1994: Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resour. Res.*, 30 (7), 1945-1954.
- GEE, G., A. WARD, T. CALDWELL and J. RITTER, 2002: A vadose zone water fluxmeter with divergence control. *Water Resour. Res.*, 38 (8), doi:10.1029/2001WR000816, 2002.
- JEMISON, J. and R. FOX, 1992: Estimation of zero-tension pan lysimeter collection efficiency. *Soil Sci.*, 158, 85-94.
- HAGEDORN, F., J. MOHN, P. SCHLEPPI and H. FLÜHLER, 1999: The role of rapid flow paths for nitrogen transformation in a forest soil: A field study with micro suction cups. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1915-1923.
- KOSUGI, K. and M. KATSUYAMA, 2004: Controlled-suction period lysimeter for measuring vertical water flux and convective chemical fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 371-382.
- MILLER, E. and R. MILLER, 1956: Physical theory of capillary flow phenomena. *J. Appl. Phys.*, 27, 324-332.
- PETERS, A., K. GERMER and W. DURNER, 2005: Sickerwassererfassung – Ein Vergleich von Geräten unterschiedlicher Bauart. In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL), Bericht über die 11. Lysimetertagung am 5. und 6. April 2005, 61-66.
- RADULOVICH, R. and P. SOLLINS, 1987: Improved performance of zero-tension lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1386-1388.
- ROBISON, W., E. STONE and T. HAMILTON, 2004: Large plate lysimeter leachate collection efficiency for water being transported from soil to groundwater. *Soil Sci.*, 169 (11), doi:10.1097/01.ss0000148736.81207.1a.
- SCHWARZ, A. and M. KAUPENJOHANN, 2001: Vorhersagbarkeit des Stofftransportes in Böden unter Berücksichtigung des schnellen Flusses (preferential flow). KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48, 48-53.
- SIMUNEK, L., K. HUANG, M. SEJNA and M. T. VAN GENUCHTEN, 1999: The HYDRUS-2D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, version 1.0.
- VAN GENUCHTEN, M.T., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- WEIHERMÜLLER, L., J. SIEMENS, M. DEURER, S. KNOBLAUCH, H. RUPP, A. GÖTTLEIN and T. PÜTZ, 2007: In situ soil water extraction: A review. *J. Environ. Qual.*, 36, 1735-1748.
- ZHU, Y., R. FOX and J. TOTH, 2002: Leachate collection efficiency of zero-tension pan and passive capillary fiberglass wick lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 37-43.

Messsystem zur Beprobung und Überwachung des gesamten Bereiches der ungesättigten und gesättigten Zone einschließlich des Kapillarsaums

Marc Walther^{1*}, Johann Fank², Thomas Reimann¹ und Rudolf Liedl¹

Zusammenfassung

Das Monitoring und die Beprobung des Boden-, Kapillar- und Grundwassers stellt eine der primären Aufgaben im Bereich der Grundwasserwirtschaft dar. So liefern Messungen im Übergangsbereich der ungesättigten und gesättigten Zone (Saturated-unsaturated interface region – SUIR; RONEN et al. 2000) nicht nur grundlegende Daten zur Modellierung oder der Ableitung von aquiferspezifischen Parametern, sondern sind bei der Beobachtung, Erfassung und Quantifizierung von Einträgen in das Grundwasser, natürlichen oder anthropogenen Ursprungs, unentbehrlich. Eine neuartige Anlage zur Messung des gesamten Bereiches der SUIR wurde am Institut für WasserRessourcenManagement der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Graz, in Kooperation mit der Firma UMS GmbH, München, entwickelt und wird seit Herbst 2007 auf dem Messfeld Wagna in der Südsteiermark, Österreich, im Testbetrieb gefahren. Die Anlage, bestehend aus um ein Gestänge radialsymmetrisch angeordneten Saugkerzen, ermöglicht eine zeitlich kontinuierliche Messung und Beprobung der SUIR über eine Tiefe von 2 - 8 m unter Geländeoberkante mit einer tiefendifferenzierten Auflösung von ca. 11 cm, wodurch der gesamte Bereich von der Unterkante monolithischer Lysimeter bis unter den NGW-Wert überwacht wird. Auf Basis einer dreidimensionalen Modellierung mit dem Programm HYDRUS konnte die konzeptionelle Eignung der Anlage zur nahezu störungsfreien Beprobung der SUIR nachgewiesen werden sowie Modifikationen zur Optimierung der Messergebnisse identifiziert und weitere Anwendungsmöglichkeiten erarbeitet werden.

Schlagwörter: SUIR, Saugkerzenbaum, tiefendifferenzierte Probenahme im Übergangsbereich ungesättigte/gesättigte Zone, HYDRUS-3D, Monitoring, Modellierung

Summary

One of the primary tasks of groundwater management are the monitoring and sampling of soil, capillary and ground water. Measurements in the saturated-unsaturated interface region (SUIR; RONEN et al. 2000) yield basic data for modeling or specific aquifer parameters, which are crucial for the observation, acquisition and quantification of groundwater polluting sources of natural or anthropogenic origin. In cooperation between the Institute for Water Resources Management at the JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Graz, and the UMS GmbH, München, two instruments for depth specific sample drawing were installed in fall 2007 at the test field Wagna, Austria. The multi-layer-sampling devices (SKB "Saugkerzenbaum") are equipped each with several suction cups arranged one below the other for the purpose of achieving samples from the whole extend of the aquifer, i.e. the saturated zone, the SUIR and the unsaturated zone with a vertical resolution of about 11 cm. Using a 3D-model (HYDRUS), the SKB's conceptual applicability of a nearly undisturbed sampling within the SUIR could be shown. Modifications of the existing device for an optimized sampling were identified and possible enhanced applications presented.

Keywords: SUIR, multi-layer-sampling devices, depth specific sampling in the transition area unsaturated/saturated zone, HYDRUS-3D, monitoring, modeling

Einleitung

Das Monitoring des gesamten Bereiches der SUIR (saturated-unsaturated interface region (RONEN et al. 2000) im Feld, d.h. von der ungesättigten Bodenzone über den Kapillarsaum bis hinein in das Grundwasser, ist bis dato nur in unbefriedigendem Maße möglich. Einige Varianten zur Beprobung der SUIR sind dokumentiert (TWARDOWSKA 1995, EINARSON et al. 2002 oder BEHERA et al. 2003), liefern allerdings aufgrund des jeweiligen Einbaus oder der Konzeption der Messsysteme nur selten hinreichend repräsentative Werte und sind zum Teil mit erheblichem

Aufwand bei Einbau und Wartung verbunden. Schon frühzeitig zeigten Tank-Experimente (LIPPOK 1966) die Relevanz des Kapillarsaums für den Stofftransport in diesem Bereich. Aktuelle Forschungsbestrebungen (DUNN et al. 2003, RONEN et al. 2005, ABIT et al. 2008) verstärken die Bedeutung dieser chemisch und biologisch hochvariablen Zone und zeigen den noch ausstehenden Forschungsbedarf auf. Dabei ist eine vertikal hochaufgelöste Probenahme im Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Zone zu deren detaillierter Erkundung, dem intensiven Prozessstudium biologischer und chemischer Stoffumsatzvorgänge oder der Identifikation des hydraulischen

¹ TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft, Karcherallee 8, D-01277 DRESDEN

² Joanneum Research, Institut für WasserRessourcenManagement, Elisabethstraße 16, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: grundwasser@mailbox.tu-dresden.de

Fließverhaltens und des Stofftransports innerhalb der SUIR anzustreben. Gleichwohl ist das beprobte System durch die Eingriffe der Probenahme möglichst geringen Störungen zu unterwerfen und die Messung repräsentativ für das Gesamtsystem zu gestalten.

Mit dieser Zielvorgabe wurde in Zusammenarbeit von JO-ANNEUM RESEARCH, Graz und der Fa. UMS, München, ein innovatives Messinstrument entwickelt, um die Bereiche ungesättigte Zone, SUIR und gesättigte Zone in zeitlich und räumlich hoher Auflösung beproben zu können. Bis dato kann kein vergleichbares System zur tiefengestaffelten Probenahme in der bekannten Fachliteratur verzeichnet werden (WALTHER 2008).

Material und Methoden

Das Testfeld Wagna in der Steiermark, Österreich, befindet sich im Murtal etwa 50 km südlich von Graz auf 266 m über Adria, welches im Zuge des Rückgangs der eiszeitlichen Vergletscherung in den Alpen durch Ablagerungen verschiedener, fluviatil verlagertes glazialer Sedimente mit hoher räumlicher Variabilität geprägt ist. Der seichtliegende,

mehrere Meter mächtige Aquifer im Bereich des Testfeldes besteht hauptsächlich aus grobsandigem bis kiesigem Material mit geringen Feinsandanteilen (*Abbildung 1*) und wird im Untergrund durch Tertiärsedimente begrenzt (FANK 1999). Auf dem Testfeld Wagna wurden im Herbst 2007 zwei sogenannte Saugkerzenbäume (SKB, *Abbildung 2*), jeweils unterhalb einer nachhaltig-biologischen und einer konservativ bewirtschafteten Ackerfläche installiert. Mit den 24, in einem vertikalen Abstand von ca. 11 cm an einem Gestänge befestigten Saugkerzen werden mit einem konstanten Unterdruck von $p = -600$ hPa Wasserproben der unterschiedlichen Horizonte genommen und auf verschiedene chemische Parameter analysiert. Die Proben werden in einer nahezu temperaturkonstanten, dunklen Kelleranlage in direkter Nähe der Probenahmeverrichtungen bis zur wöchentlich durchgeführten Analyse aufbewahrt. Der weitere Aufbau der Anlage gestaltet sich folgendermaßen: Im äußeren Ring um die Anlage ($0.20 \text{ m} < d < 0.30 \text{ m}$) ist ein üblicher Industriefilterkies ($d_k \approx 2 \text{ mm}$) verfüllt. Im inneren Bereich ($d < 0.20 \text{ m}$) befindet sich der SKB und das ausgehobene, gesiebte Material; die Siebung war nötig, um die Anbindung der Saugkerzen an das Bodenmaterial

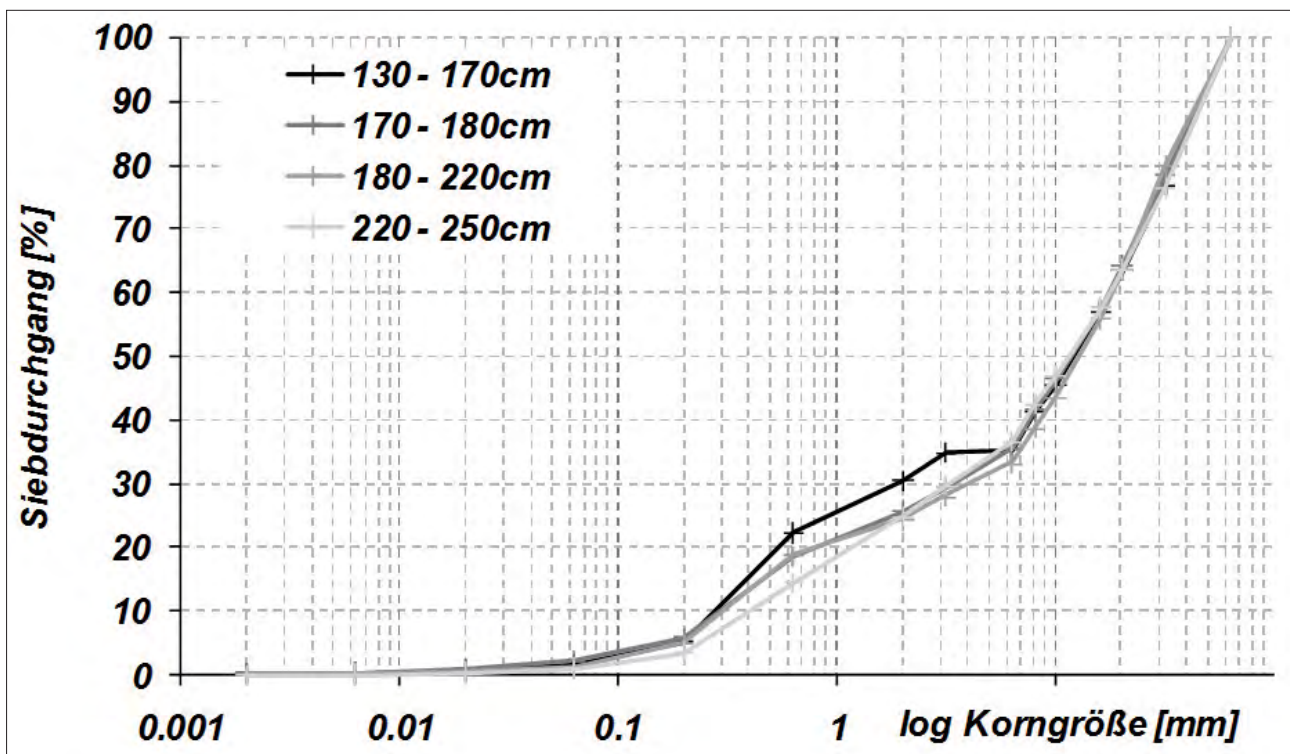


Abbildung 1: Kornsummenlinie aus unterschiedlichen Tiefen des seichtliegenden Aquifers im Testfeld Wagna; Ergebnisse der Profilaufnahmen des Standortes Wagna Ost (2005)



Abbildung 2: Spitze SKB, Länge des dargestellten Ausschnitts ca. 60 cm; Einbau erfolgt vertikal

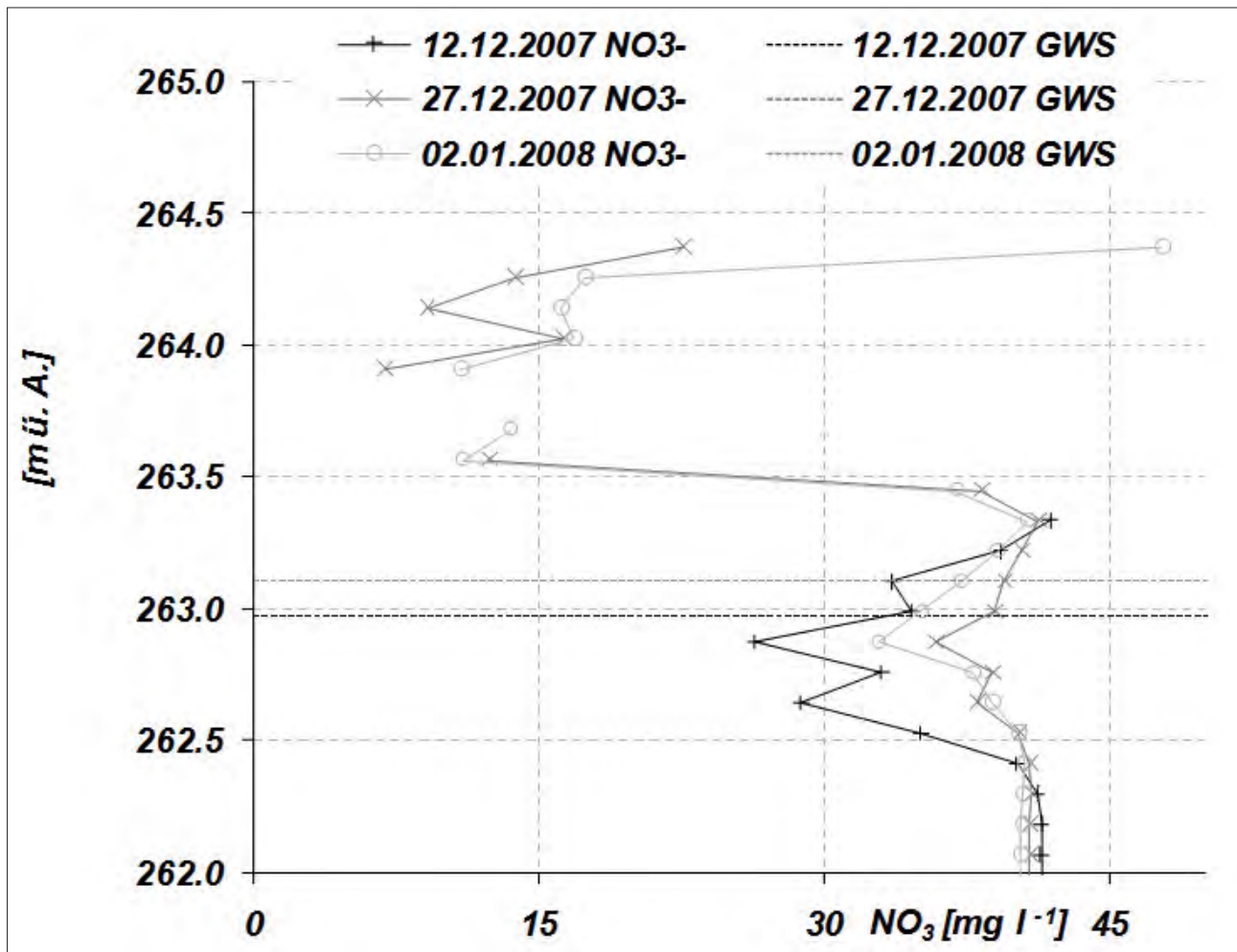


Abbildung 3: Grundwasserstand (GWS) und Nitratkonzentrationen (NO_3^-) in unterschiedlicher Beprobungstiefe

zu gewährleisten und Beschädigungen durch größere Skelettanteile zu vermeiden. Zusätzlich ist ein Filterrohr ($d = 0.20 \text{ m}$) zwischen Filterkies und wiederverfülltem Material eingebracht. Der Aufwand beim Einbau eines Saugkerzenbaums ist mit dem der Errichtung einer normalen Brunnenanlage vergleichbar.

Auswertungen früher Messergebnisse (Abbildung 3, dargestellt am Beispiel der Nitratkonzentration) zeigen deutlich die vertikale Heterogenität der gemessenen Parameter. Um die Funktionsweise der SKBs zu überprüfen und das Einzugsgebiet der Probenahme jener einzelnen, in den unterschiedlich gesättigten Bereichen befindlichen Saugkerzen abgrenzen zu können, wurde mit der Software HYDRUS 2D/3D (ŠIMŮNEK et al. 2007) ein dreidimensionales Modell der Feldsituation realisiert. Unter der Maßgabe, einen hohen Modelldetailgrad bei gleichzeitig überschaubarem Informationsgehalt zu erreichen, wurde ein etwa $4 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$ großer Ausschnitt des Grundwasserkörpers inklusive eines Saugkerzenbaums mit zwölf Saugkerzen adaptiert. Das generierte, numerische Modell besteht aus 69 Layern unterschiedlicher Höhe und einer Zellgröße im Bereich des Saugkerzenbaums von $d < 0.5 \text{ cm}$. Vier verschiedene Szenarien wurden entwickelt, um hohen und niedrigen Grundwasserstand abzubilden sowie

das aus darüberliegenden Schichten nachfließende Sickerwasser zu simulieren. Die Auswertung erfolgte visuell anhand verschiedener zweidimensionaler Querschnitte und ausgewählter dreidimensionaler Detaildarstellungen. Zur Abgrenzung des Einzugsgebiets einer Saugkerze (SK) wurde ausgehend von der an der jeweiligen SK gemessenen Eintrittsgeschwindigkeit in den Saugkörper die Geschwindigkeit bestimmt, die ein Partikel im nahen Umfeld der SK besitzen muss, um die SK innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls noch zu erreichen; alle anderen, langsameren Partikel wurden nicht zum Einzugsgebiet der SK gezählt.

Die Parametrisierung des Bodenwassermodells nach Mualem-van-Genuchten (MUALEM 1976, GENUCHTEN 1980) erfolgte durch Lysimeter- und Labormessdaten ungestörter Stechzylinderproben. Als oberstromige Randbedingung wurde eine Neumann-Randbedingung (constant flux) auf Basis des vorhandenen Grundwasserstroms angesetzt; als unterstromige Randbedingung diente die sogenannte „seepage-face“ Randbedingung, welche der Dirichlet-Randbedingung ähnelt (constant head). Der Einfluss beider Randbedingungen war im untersuchten Gebiet nahe des SKB nicht mehr erkennbar.

Ergebnisse

Dreidimensionale Darstellungen der Geschwindigkeitsvektoren im Anstrom an die Saugkerzen im ungesättigten Bereich innerhalb des wiederverfüllten Materials zeigen das abzuschätzende Einzugsgebiet der Saugkerzen auf den unterschiedlichen Niveaus:

- oberliegende SK werden von nachfließendem Sickerwasser versorgt,
- grundwassernahe SK von aufsteigendem Kapillar- oder Grundwasser gespeist;
- dazwischenliegende SK weisen ein nur sehr kleines Einzugsgebiet auf.

In diesem Bereich mittlerer Höhe bilden sich stark negative Matrixpotentiale und geringe Sättigungswerte bei der Probenahme aus. Im Bereich des Filterkieses treten dabei aufgrund äußerst niedriger Werte der hydraulischen Leitfähigkeit sehr geringe Fließgeschwindigkeiten auf, eine Wasserbewegung durch den Filterkies - um die stark negativen Werte des Matrixpotentials zu reduzieren - ist praktisch nicht vorhanden. Eine vergleichbare Wirkung wird von dem eingebauten Filterrohr erwartet. Weitere Simulationen zeigen, dass sich der Zustrom zur Anlage im ungesättigten Bereich sowie die geringen Potentiale im Boden erhöhen ließen, würde der Filterkies durch wiederverfülltes Material ersetzt; die dann auftretenden Matrixpotentiale lägen innerhalb von Wertebereichen, welche in nahegelegenen Lysimetern bei langjährigen Messreihen aufgezeichnet werden.

Die im ungesättigten Bereich begrenzende Wirkung des Filterkieses tritt in der gesättigten Zone nicht auf, eine Beeinflussung der Probenahme kann nicht beobachtet werden. *Abbildung 4* zeigt die aktiven Saugkerzen als

dreidimensionale Darstellung sowie im Querschnitt und lässt erkennen, dass sich die Einzugsgebiete der tiefendifferenzierten Saugkerzen sich ähnlich den Ausführungen von GRAHAM (2006) ausbilden: der Zustrom zu den einzelnen Saugkerzen ist im Bereich des Grundwasserleiters horizontal ausgebildet, weder Filterrohr noch Filterkies bewirken eine signifikante Ablenkung der Strömungsrichtung. Die Strömungsgeschwindigkeit und auch die Wassersättigung variiert naturgemäß in Abhängigkeit von den durchströmten Sedimentkomponenten.

Das Einzugsgebiet der Saugkerzen kann demnach im ungesättigten Bereich auf wenige Dezimeter bis einige Zentimeter (je nach Grundwasserabstand und Sickerwasserzustrom) geschätzt werden und ist als Sickerwasser der direkten Umgebung der Saugkerze innerhalb eines Probeintervalls von sieben Tagen zu charakterisieren; im gesättigten Bereich bildet sich das Einzugsgebiet abhängig von der Grundwasserfließgeschwindigkeit aus und entspricht den jeweiligen Probenahmetiefen der Saugkerzen.

Ferner wurden mit Hilfe des erstellten Modells die fiktiven Probenahmeholumina der einzelnen Saugkerzen nach einer Pumpzeit von 60 Tagen, einem Zeitraum, nach welchem sich annähernd stationäre Verhältnisse ausgebildet hatten, mit realen Messwerten verglichen. *Abbildung 5* zeigt den Vergleich der Entnahmeholumina mehrerer, repräsentativer Aufzeichnungen der Anlage in Wagna sowie einige Szenarios mit unterschiedlicher Grundwasserspiegelhöhe und Sickerwassermenge. Der Verlauf der simulierten Probevolumina über die Tiefe kann die auftretenden Heterogenitäten in der Realität zwar nicht abbilden, ist allerdings in der Ausprägung mit den Messwerten vergleichbar. Gründe für die auftretenden Schwankungen der Messwerte sind

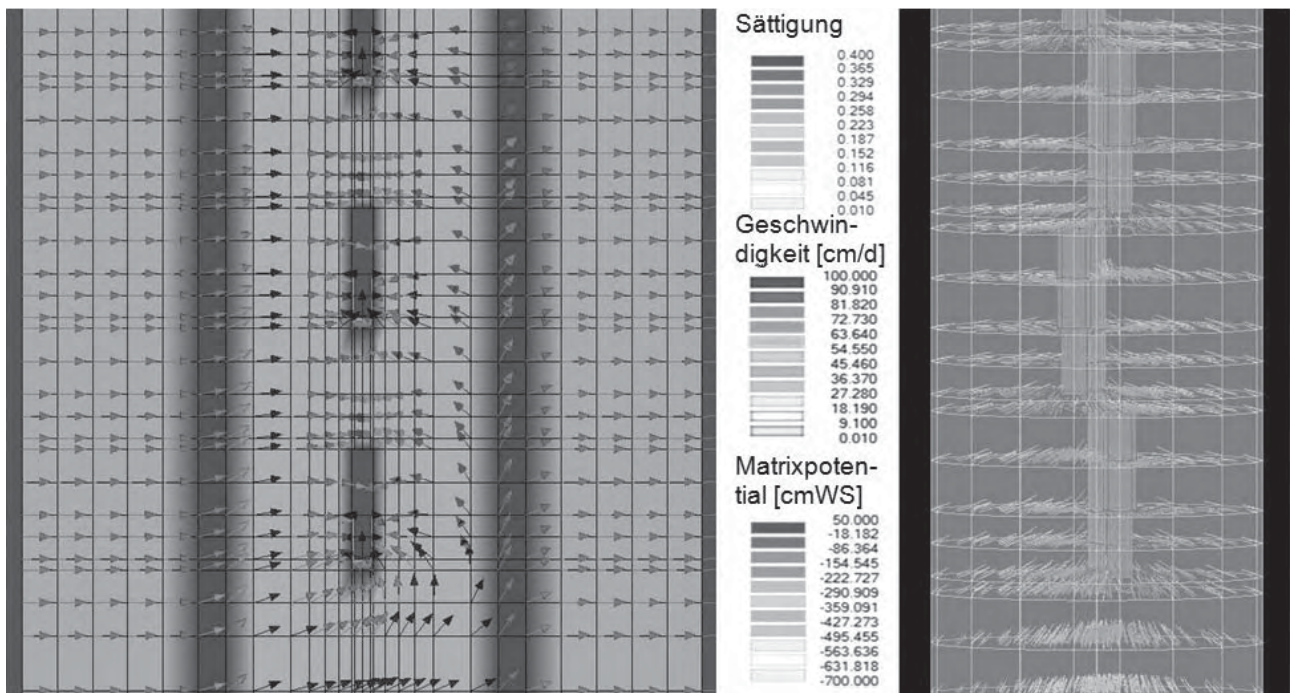


Abbildung 4: Fließfeld im Bereich Grundwasser; links: 2D vertikaler Schnitt in Grundwasserfließrichtung (Fließvektoren, Sättigung als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung), rechts: 3D Ansicht in Grundwasserfließrichtung (Fließvektoren, Matrixpotential als Zellbegrenzung)

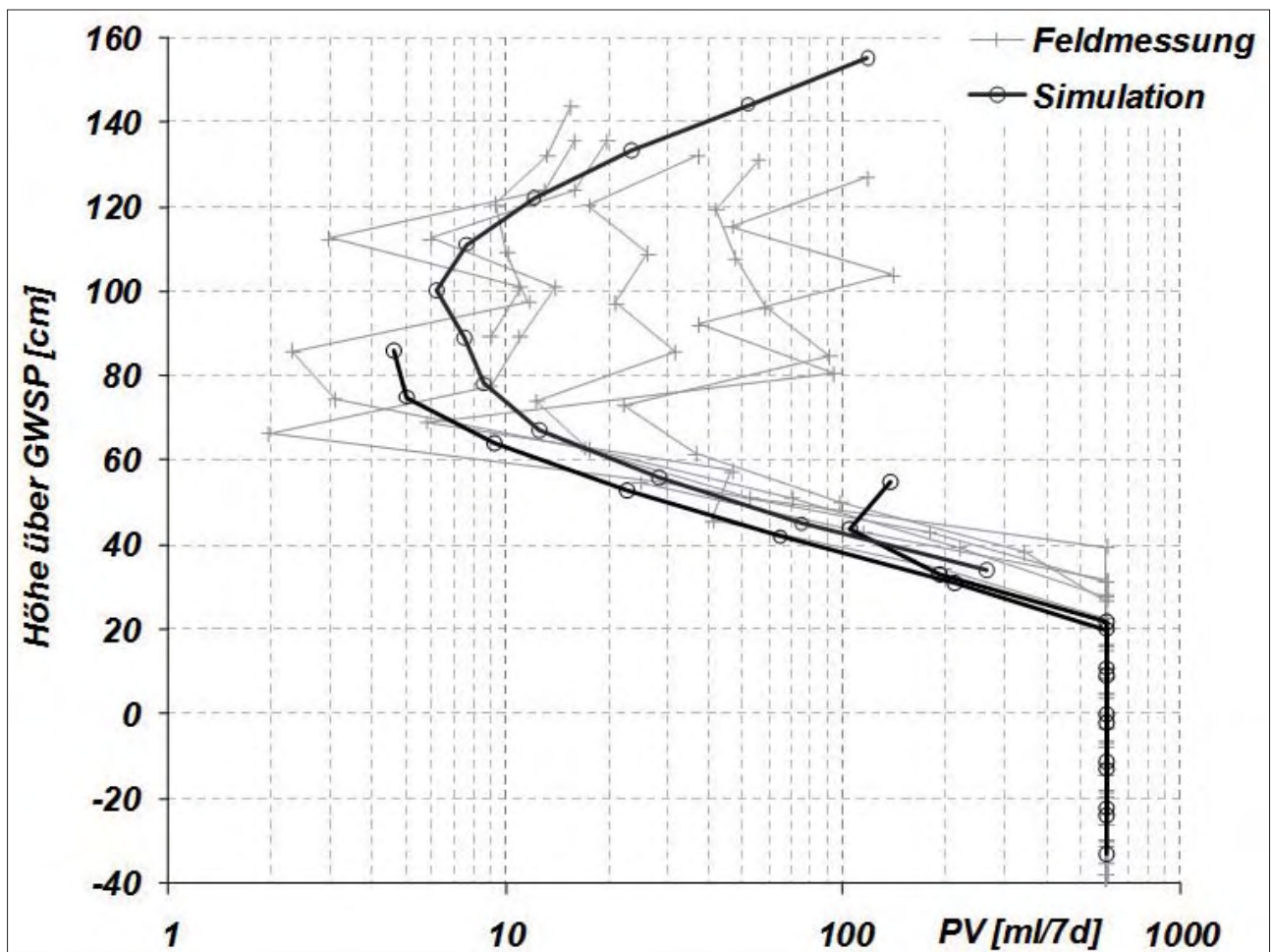


Abbildung 5: Tiefenspezifisches Probevolumen PV, Vergleich Simulationswerte und Feldmessungen über Grundwasserspiegel GWSP

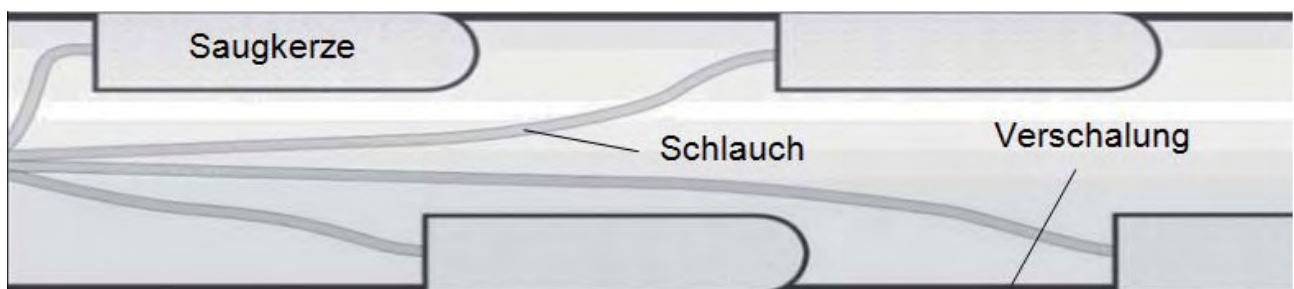


Abbildung 6: Querschnitt durch ein Modellkonzept für ein verschaltes, tiefendifferenziertes Probenahmesystem (Einbau vertikal)

u.a. die heterogene Verteilung der Bodenmatrix und der Sickerwasserbewegung (Menge und Lokalität) sowie eine möglicherweise nicht vollständig gegebene Anbindung einer Saugkerze an den Bodenkörper.

Die bisherigen Messungen der Stoffverteilung in Tiefenprofilen des Grundwassers am Versuchsfeld Wagna über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr belegen die Bedeutung der tiefengestaffelten Erfassung der Nährstoffkonzentrationen zur Beurteilung der Auswirkung ackerbaulicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die örtliche Grundwasserqualitätssituation. In *Abbildung 7* ist der Vergleich der Ganglinien der Nitratkonzentration an der Grundwasser-

oberfläche und in einer Tiefe die dem langjährigen niedrigsten Grundwasserspiegel (NGW) entspricht dargestellt. Der Verlauf des Grundwasserspiegels zeigt im Dezember 2007 einen raschen und deutlichen Anstieg, der auf Neubildungsereignisse aus infiltrierenden Niederschlägen zurückzuführen war. Dieses Sickerwasserereignis war am Versuchsfeld Wagna mit einem Austrag von Nitrat aus den Versuchsflächen verbunden, was durch die rasche Reaktion der Nitratwerte an der Grundwasseroberfläche erkennbar ist. In der tiefer liegenden Saugkerze (auf Höhe NGW) ist – gleich wie auch in den Ergebnissen der Standard-Grundwasserbeprobung durch Abpumpen – keine Veränderung

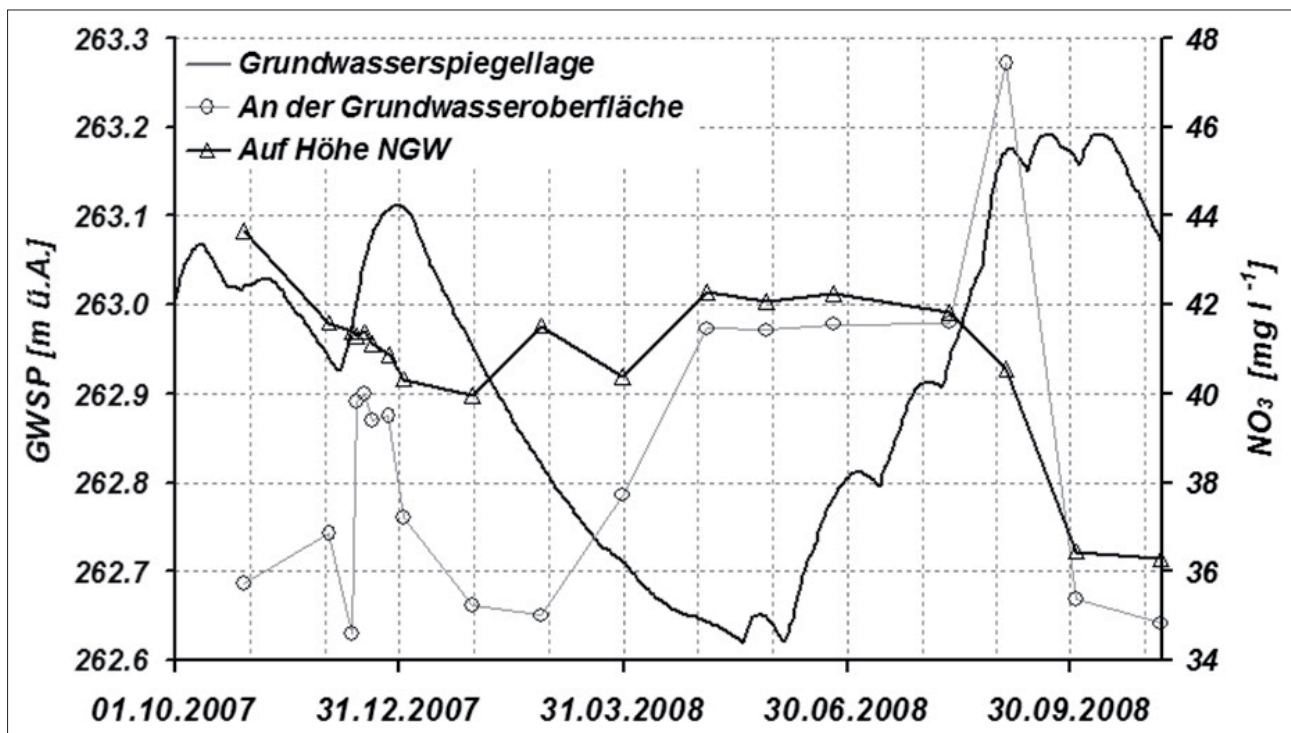


Abbildung 7: Vergleich der Ganglinien der Nitratkonzentration in zwei unterschiedlichen Tiefen des Grundwassers am Versuchsfeld Wagna in Abhängigkeit von der Grundwasserstandsentwicklung

der Nitratwerte im Grundwasser detektierbar. Der Anstieg des Grundwasserspiegels in den Sommermonaten des Jahres 2008 hingegen war auf Neubildungsvorgänge im dem Versuchsgelände vorgelagerten Stadtgebiet von Leibnitz sowie auf die Wechselwirkung mit Oberflächengewässern zurückzuführen – in den Nitratwerten ist praktisch keine Reaktion auf die Grundwasserspiegeländerung zu erkennen. Erst die Auffüllung des Bodenwasserkörpers aufgrund der Niederschläge im August bei Fehlen stark wasserzehrender Vegetation nach der Ernte des Getreides führte wieder zu lokaler Sickerwasserbildung, was sich in einer deutlichen Spitze der Nitratkonzentration an der Grundwasseroberfläche widerspiegelt. Dieser kurzfristigen Spitze folgt danach ein generelles Absinken der Nitratwerte des Grundwassers aufgrund der Zufuhr von gering belasteten Neubildungsereignissen unterschiedlicher Genese.

Diskussion

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass die bestehenden Anlagen der Saugkerzenbäume in der Lage sind, innerhalb der ungesättigten Zone, der SUIR und der gesättigten Zone tiefendifferenziert die Beprobung des Bodenwasserkörpers zu erlauben. Die horizontspezifische Probenahme im gesättigten Bereich ist ohne Einschränkung möglich und kann, bei entsprechender Verwendung von speziellen Saugkerzen, auch in größeren Tiefen durchgeführt werden.

Bei geringer Modifikation des bestehenden Designs kann außerdem die Probenahme innerhalb des ungesättigten Bereiches verbessert werden. Bei Verzicht auf Filterkies und -rohr ist ein signifikant höherer Zustrom zu den Saugkerzen gegeben; auch ist auf eine Siebung des aufgehobenen und wiederverfüllten Materials zu verzichten,

damit sich die Höhe des Kapillarsaums nach Einbau dem Originalzustand wieder angleichen kann und nur geringe Unterschiede zwischen umliegenden und wiederverfüllten Material auftreten.

Wenn der Einbau des SKB's durch entsprechende Einschläm- oder Vibrationstechniken unterstützt wird, kann die Anbindung der Saugkerzen an den Boden erhöht werden, was eine besser abgesicherte Probenahme gewährleistet. Unter Beachtung der genannten Modifikationen kann unter Umständen gar eine Reduktion des an den Saugkerzen angesetzten Potentials erwogen werden, wenn der Zustrom zur Anlage und damit die Probenahmemenge für die nachfolgende Analytik ausreichend groß wird.

Das Konzept der tiefengestaffelten Probenahme kann, je nach Anforderung, angepasst werden; Variationsmöglichkeiten bieten sich bei der Form und der Größe sowie dem porösen Material der Saugkerze, der erforderlichen Diskretisierung sowie der Ausrichtung am SKB; auch können Saugplatten oder Saugblöcke in tiefendifferenzierter Form in ähnlicher Form eingesetzt werden. Darüberhinaus ist ebenso eine Kombination des SKB's mit dem Direct-Push-Verfahren zu erwägen. Wenn die Konstruktion z.B. durch eine Verschalung (vgl. *Abbildung 6*) genügend Stabilität bietet, welche gleichzeitig einen Schutz für das poröse Material der Saugkörper darstellt, so ergibt sich damit eine flexible Einsatzmöglichkeit des SKB an unterschiedlichsten Orten für verschiedenste hydro(geo)logische, wasserwirtschaftliche und (bio-)chemische Fragestellungen. In Verbindung mit anderer Messtechnik, welche im SKB integriert werden könnte (TDR, Temperaturfühler etc.) erweitern sich zusätzlich die Anwendungsgebiete eines solchen Geräts. Neben der derzeitigen Verwendung der Anlage in Wagna

zur Überwachung des Eintrags von Düngemitteln offenbart sich ein großes Anwendungsfeld in Gebieten, bei denen das beprobte Grundwasser verschiedenen Ursprungs ist:

- Monitoring von künstlichen Grundwasseranreicherungsanlagen
- Überwachung von Süß-/Salzwassergrenzen
- Grundwasseruntersuchungen im Abstrom von Deponien
- Monitoring oder Sanierung von Schadensfällen
- Beobachtung und Systemverständnis der SUIR vor allem beim Stofftransport und der Einmischung von (Schad-) Stoffen
- Beobachtung verschiedener Abflusskomponenten nach Regenereignissen
- Untersuchungen der hyperheischen Zone und damit der Wechselwirkung von Oberflächengewässern mit dem Grundwasser
- Umsatzprozesse chemischer und biologischer Art.

Die Technologie der Saugkerzenbäume stellt damit eine kostengünstige, einfach und zeitnah zu installierende sowie gering zu wartende Alternative zu sonst für diesen Zweck speziell zu konzipierenden Lysimetern oder aufwendig anzulegenden Aufschlüssen dar. Wie am Beispiel Wagna dargelegt werden kann, stellen derartige tiefengestaffelte Messeinrichtungen unter ackerbaulich genutzten Flächen eine Möglichkeit dar, die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsweisen auf die aktuelle Grundwasserqualitätssituation in situ zu messen.

Literatur

- ABIT, S.M., A. AMOOZEGAR, M.J. VEPRASKAS and C.P. NIEWOEHNER, 2008: Solute Transport in the Capillary Fringe and Shallow Groundwater: Field Evaluation. *Vadose Zone Journal*, 7, 890-898.
- BEHERA, S., M.K. JHA and S. KAR, 2003: Dynamics of water flow and fertilizer solute leaching in lateritic soils of Kharagpur region, India. *Agricultural Water Management*, 63, 77-98.
- DUNN, A.M. and S.E. SILLIMAN, 2003: Air and water entrapment in the vicinity of the water table. *Ground Water*, Vol. 41, No. 6, 729-734.
- EINARSON, M.D. and J.A. CHERRY, 2002: A New Multilevel Ground Water Monitoring System Using Multichannel Tubing. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 22, No. 4, 52-65.
- FANK, J., 1999: Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefruchtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich). *Beiträge zur Hydrogeologie*, 49/50, 101-388.
- GENUCHTEN, M.T., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- GRAHAM, W.D., 2006: An inexpensive device for multiple depth sampling of groundwater quality in cohesionless aquifers. Institute of Food and Agricultural Sciences, Agricultural and Biological Engineering Department. Gainesville, Florida, USA: University of Florida.
- INSTITUT FÜR KULTURTECHNIK UND BODENWASSERHAUSHALT, PETZENKIRCHEN, 2005: Prüfbericht, Bodenproben Wagna. Bundesamt für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen.
- LIPPOK, W., 1966: Modellversuche über das Verhalten von Heizöl EL in porösen Medien. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, Jg. 10, H. 5.
- MUALEM, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- RONEN, D., H. SCHER and M. BLUNT, 2000: Field observations of a capillary fringe before and after a rainy season. *Journal of Contaminant Hydrology*, 44, 103-118.
- ŠIMŮNEK, J., M. ŠEJNA and M.T. van GENUCHTEN, 2007: The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Prague, Czech Republic: PC Progress.
- TWARDOWSKA, I., 1995: Areas of long-lasting anthropopression: assessment and monitoring of pollution potential to soil and ground water. *Proc. SPIE*, Vol. 2504, 253-264.
- WALTHER, M., 2008: Untersuchung von Wasserfluss und Stofftransport im Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Zone im Labor- und Feldmaßstab am Beispiel der SUIR-Beprobungsvorrichtung in Wagna, Österreich. Diplomarbeit, Bewertung ausstehend zum 15.12.2008, Technische Universität Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Grundwasserwirtschaft, Dresden.

Monolithischer oder händischer Aufbau von Lysimetern - Folgerungen für die Lagerungs- und hydraulischen Parameter

Dietmar Klotz¹

Abstract

Beim händischen Aufbau von Lysimeterböden werden die Horizontsedimente versuchstechnisch dicht („gestört“) eingebaut, um ein unkontrolliertes Nachsacken beim Durchströmen zu vermeiden. I. a. unterscheidet sich diese gestörte, dichte Lagerung der Sedimente von der natürlichen Ablagerung monolithischer Lysimeterböden. Verschiedene totale Porositätswerte bewirken aber Unterschiede in den Wassergehalten, in den hydraulischen Parametern und letztlich in den Sickerwassergeschwindigkeiten beider Lysimetertypen.

Einleitung

Böden für Lysimeter können nicht monolithisch unter Erhalt der natürlichen Lagerung genommen (ausgestochen) werden

- bei zu großer Körnung der Horizontsedimente (Grobsande und Kiese),
- bei zu geringer Feuchte der Bodenmatrix,
- in unzugänglichen Gebieten (Wald, Hanglagen) oder
- bei zu großen Dimensionen der Böden ($> 5 \text{ m}^3$);

sie müssen dann händisch in die Lysimetergefäße eingebaut werden. Dabei werden einige Texturmerkmale (Schichtungen und Inhomogenitäten) und das Strukturmerkmal Lagerung natürlicher Böden verändert. Auch ist zu beachten, dass aus Kostengründen beim Aufbau mehrerer Lysimeterböden der kostengünstigere, händische Lysimeteraufbau gewählt werden muss.

Im Folgenden wird über den Einfluss von Gefüge- und Lagerungsänderungen von oberflächlich entnommenen, bindigen und sandigen Sedimenten auf ihre hydraulischen Parameter (Durchlässigkeit, effektive Porosität, Dispersivität) berichtet.

Die Untersuchungen wurden nach der Entnahme/dem Aufbau von 7 GSF-Lysimeterböden (36 Gefäßlysimeter) im Zeitraum 1996 – 2002 an 19 Lockersedimenten unter natürlicher Ablagerung und unter gestörter, versuchstechnisch dichter Lagerung durchgeführt (KLOTZ 2002 und 2007 a).

Grundlagen

Die natürliche Lagerung eines Sediments wird beeinflusst durch die Ablagerungsart (z. B. äolisch, fluviatil, fluvioglazial) und durch die Auflast sowie durch einige Sedimenteigenschaften (Körnung für Sande und Kiese, Oberflächenladung für bindige Sedimente).

Die Kennzeichnung der Porenraumgröße („Lagerung“) erfolgt durch die **totale Porosität** n

$$n = V_p/V. \quad (1)$$

V_p = Gesamtporenraum des Sediments

V = Gesamtvolumen (Feststoff- und Porenvolumen).

Die totale Porosität eines Sediments bestimmt neben weiteren sedimentphysikalischen Parametern (Körnung, Kornform, Kornrauigkeit und –splittrigkeit, Gefüge), der Feuchte des Sediments sowie physikalischen Parametern des Wassers (Dichte, Zähigkeit) die hydraulischen Parameter der Lockersedimente (KLOTZ 1992); sie sind für wassergesättigtes Fließen definiert durch:

- Die **Durchlässigkeit** k ist ein Maß für den Widerstand, den das Korngerüst dem strömenden Wasser entgegensetzt (Darcysches Gesetz)

$$k = v_f/i. \quad (2)$$

v_f = Filtergeschwindigkeit

i = Gefälle.

- Die **effektive Porosität** n_e ist ein Maß für das Wasservolumen, das am Fließvorgang teilnimmt

$$n_e = v_f/v_a. \quad (3)$$

v_a = Abstandsgeschwindigkeit.

Sie ist um einen Prozentsatz der Tot- und Haftwasserbereiche kleiner als die totale Porosität.

- Die **longitudinale Dispersivität** α ist ein Maß für die mechanische Vermischung von Wasserinhaltsstoffen (KLOTZ 1992)

$$\alpha = D/v_a^{1,07}, \quad (4)$$

D = longitudinaler Dispersionskoeffizient,

mit den Benennungen α [cm], D [cm²/s] und v_a [cm/s].

Eingesetzte Sedimente und Messmethoden

Bei der monolithischen Gewinnung von drei GSF-Lysimeterböden und bei der Entnahme von Horizontsedimenten zum händischen Aufbau von vier GSF-Lysimeterböden wurden in unmittelbarer Nähe der Entnahmeorte von den feinkörnigen (bindigen und sandigen) Horizonten

- Sediment unter natürlicher Lagerung (I) durch Stechzylinder ausgestochen und
- Sediment lose (II) entnommen.

Die Stechzylinder bestehen aus Messing von 1 mm Wandstärke (an einem Ende konisch zugespitzt), 38 mm (bzw. 50 mm) Durchmesser und 100 mm (bzw. 250 mm) Länge. Sie

¹ Helmholtz-Zentrum München, Institut für Grundwasserökologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 NEUHERBERG, dietmar-klotz@t-online.de

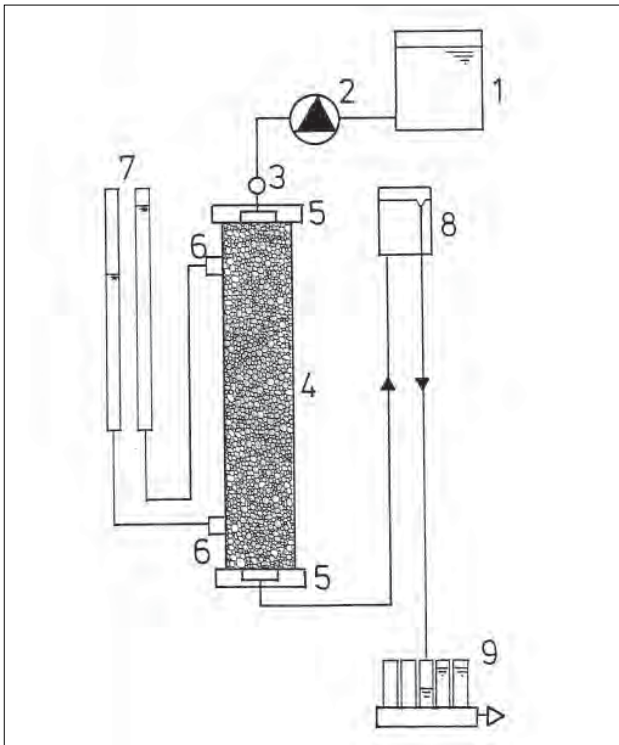


Abbildung 1: Schematische Darstellung der eingesetzten Säulenapparatur. 1 = Wasserreservoir, 2 = Schlauchpumpe, 3 = Infusionszwischenstück für Tracer, 4 = Säule vom Typ I oder II, 5 = Verteiler, 6 = Manometeranschlüsse, 7 = Standrohranordnung, 8 = Niveaugefäß, 9 = Probensammler.

wurden im Ein- und Auslauf mit frittenbestückten Verteilern gefasst: **Säulentyp I** zur Parameterbestimmung unter natürlicher Lagerung.

Das lose entnommene Sediment wurde unter Wasser verdichtet („versuchstechnisch dichte Lagerung“) in Acrylglassäulen (KLOTZ 1992) von 50 mm Durchmesser und 250 mm Länge eingebaut: **Säulentyp II** zur Parameterbestimmung unter gestörter Lagerung.

Die Säulen beider Typen wurden in GSF-Säulenapparaturen eingebaut (Abbildung 1). In diesen Anordnungen wurden zunächst durch Traceruntersuchungen und Gefällemessungen die hydraulischen Eigenschaften, durch Tensiometerversuche die Porengrößenverteilungen und beim Abbau der Säulen die totalen Porositäten bestimmt (KLOTZ 1992).

Als Sedimente wurden 4 Schluffe und 15 Sande der 7 bis 2002 entnommenen/aufgebauten GSF-Lysimeterböden eingesetzt.

Ergebnisse

Lagerungsparameter

Die versuchstechnisch dichte („gestörte“) Lagerung der eingesetzten Lockersedimente in den Acrylglassäulen wurde erreicht durch Einbau der Sedimente in dünnen Schichten (≤ 2 cm) unter Wasser (Schluffe mit aufgesetztem Unterdruck) und anschließendem Verdichten durch Stampfen mit einem Rundstab und Klopfen von außen mit einem

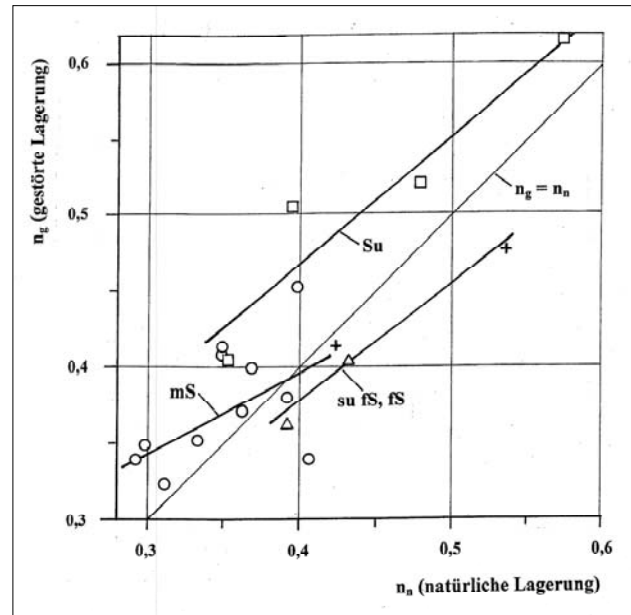


Abbildung 2: Totale Porositäten der untersuchten Lockersedimente bei gestörter Lagerung n_g in Abhängigkeit der totalen Porositäten unter natürlicher Lagerung n_n . Messpunkte \square : Schluffe (Su), +: schluffige Feinsande (Su - fS), Δ : Feinsande (fS), \circ : Mittelsande (mS).

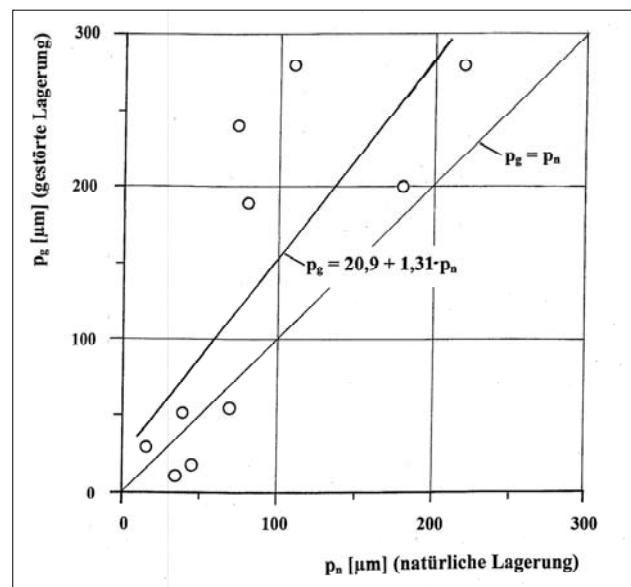


Abbildung 3: Mittlere Porengrößen der Mittelsande bei gestörter Lagerung p_g in Abhängigkeit der mittleren Porengrößen unter natürlicher Lagerung p_n (r = Korrelationskoeffizient).

Kunststoffhammer (KLOTZ 1992). Die Lagerungsdichten sind für homogenisierte Materialien sehr gut reproduzierbar ($\leq 5\%$), für dieselben, natürlich abgelagerten Materialien sind die totalen Porositäten mit einem größeren Fehler ($\leq 15\%$) behaftet (Ursache: Auftreten von Inhomogenitäten).

Die Ergebnisse, d. h. die totalen Porositäten n_g bei gestörter Lagerung in Abhängigkeit der Porositäten n_n unter natürlicher Lagerung streuen stark um die Gerade $n_g = n_n$ (Abbildung 2). Betrachtet man die untersuchten Sedimente

Tabelle 1: Regressions-Ergebnisse $x_g = a + b x_n$ der totalen Porositäten (n), der mittleren Porengrößen (p), der effektiven Porositäten (n_e) und der longitudinalen Dispersivitäten (α) sowie $\lg k_g = a^* + b^* \lg k_n$ der Durchlässigkeiten (k) bei gestörter (Index: g) und unter natürlicher Lagerung (Index: n).

	n	p	n_e	α [cm]	k [cm/s]
SCHLUFF (Anzahl: 4)					
a	0,132	0,204			
b	0,841	0,154			
r	0,941	0,991			
SCHLUFFIGE FEINSANDE und FEINSANDE (Anzahl: 4)					
a	0,074	23,2		0,543	
b	0,761	-0,179		1,52	
r	0,970	-0,648		0,673	
MITTELSANDE (Anzahl: 11)					
a	0,187	20,9	0,176	0,873	0,084*
b	0,523	1,31	0,484	0,731	1,016*
r	0,553	0,769	0,785	0,778	0,697*

der Korngrößenbereiche Schluffe (Anzahl: 4), Feinsande (4) und Mittelsande (11) so folgt (Abbildung 2, Tabelle 1):

1. Die natürlich gelagerten 4 Feinsande und 2 Mittelsande sind nicht dicht gelagert, sie reagieren durch „Klopfen“ mit Einsacken. Alle 4 Schluffe zeigen keine Reaktion.
2. Die totalen Porositäten der **Schluffe** bei gestörter Lagerung sind ca. 10 % größer als unter natürlicher Ablagerung. Möglicherweise hat sich nach dem gestörten Einbau wegen der großen Oberflächenladungen das Aggregatgefüge noch nicht vollständig eingestellt (KLOTZ 2003). Die lineare Regression zwischen n_g und n_n ist gut reproduzierbar (Tabelle 1, Korrelationskoeffizient $r = 0,941$).
3. Die totalen Porositäten der Feinsande bei gestörter Lagerung sind bis 10 % kleiner als unter natürlicher Lagerung (Ursache s. 1.). Die Korrelation zwischen n_g und n_n ist sehr gut (Tabelle 1, $r = 0,970$).
4. Die Porositätsergebnisse der **Mittelsande** liegen oberhalb (82 % der Mittelsande) und unterhalb (18 %) der Geraden $n_g = n_n$. Die Korrelation zwischen den Porositäten ist schlecht (Tabelle 1, $r = 0,553$), da die untersuchten Mittelsande unterschiedliche Ungleichförmigkeitsgrade und verschiedene Korngeometrien aufweisen.

Direkten Einfluss haben die unterschiedlichen Porositätsergebnisse auf die Porengrößen-Verteilungen. Für Mittelsande sind vielfach die mittleren Porengrößen bei gestörter Lagerung größer (bis Faktor 3, *Abbildung 3*) als unter natürlicher Lagerung (Korrelationskoeffizient der linearen Regression $r = 0,769$, *Tabelle 1*).

Hydraulische Parameter

Da die hydraulischen Parameter abhängig sind von der totalen Porosität, werden sie für unterschiedliche Lagerungsdichten verschiedene Werte annehmen:

1. Die mit Tracerversuchen bestimmten **effektiven Porositäten** (nach Gl. (3)) und **longitudinalen Dispersivitäten** (nach Gl. (4)) streuen stark um die Geraden $n_{e,g} = n_{e,n}$ bzw.

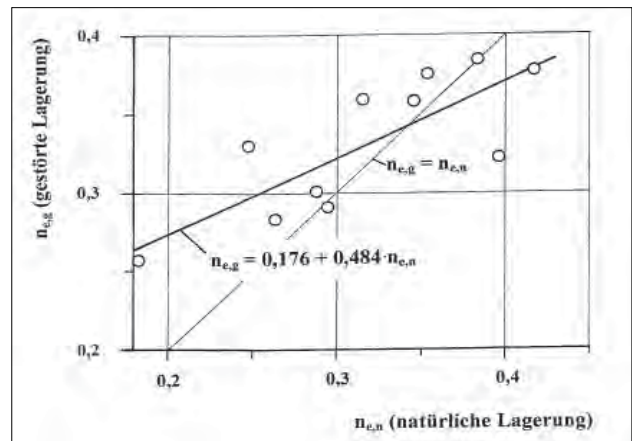


Abbildung 4: Effektive Porositäten der untersuchten Mittelsande bei gestörter Lagerung $n_{e,g}$ in Abhängigkeit der effektiven Porositäten unter natürlicher Lagerung $n_{e,n}$ (r = Korrelationskoeffizient).

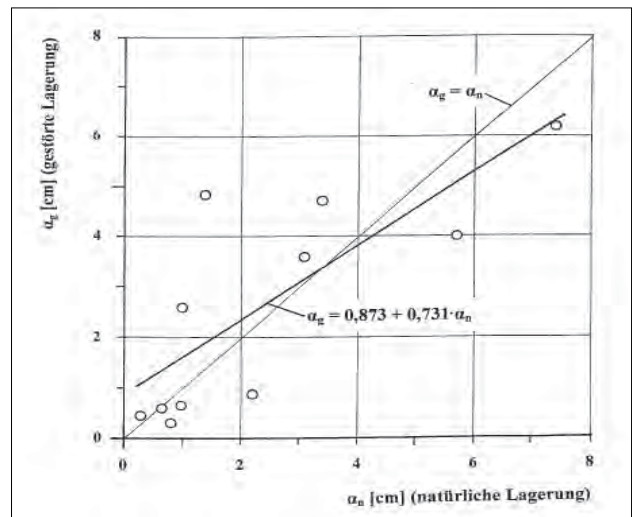


Abbildung 5: Longitudinale Dispersivitäten der untersuchten Mittelsande bei gestörter Lagerung α_g in Abhängigkeit der Dispersivitäten unter natürlicher Lagerung α_n (r = Korrelationskoeffizient).

$\alpha_g = \alpha_n$ (s. *Abbildung 4* bzw. *5* für Mittelsande), da beide hydraulische Parameter stark auf geringe Inhomogenitäten im Mikrobereich reagieren. Die Ergebnisse $n_{e,g}$ (bzw. α_g) in Abhängigkeit von $n_{e,n}$ (bzw. α_n) korrelieren (*Tabelle 1*) mit Koeffizienten $r \approx 0,8$.

2. Die mit Gefällemessungen bestimmten **Durchlässigkeiten** der 19 Sedimente bei gestörter und unter natürlicher Lagerung sind ebenfalls stark unterschiedlich (sie streuen bis Faktor 5 um die Gerade $\lg k_g = a^* + b^* \lg k_n$). Für Mittelsande korrelieren die $\lg k_g$ - und die $\lg k_n$ -Ergebnisse nur schwach (*Abbildung 6*, $r = 0,697$, s. *Tabelle 1*).

Schlussfolgerungen

Die an 19 GSF-Lysimeter-Sedimenten bei gestörter (versuchstechnisch dichter) Lagerung und unter natürlicher Lagerung durchgeführten Versuche zur Bestimmung der

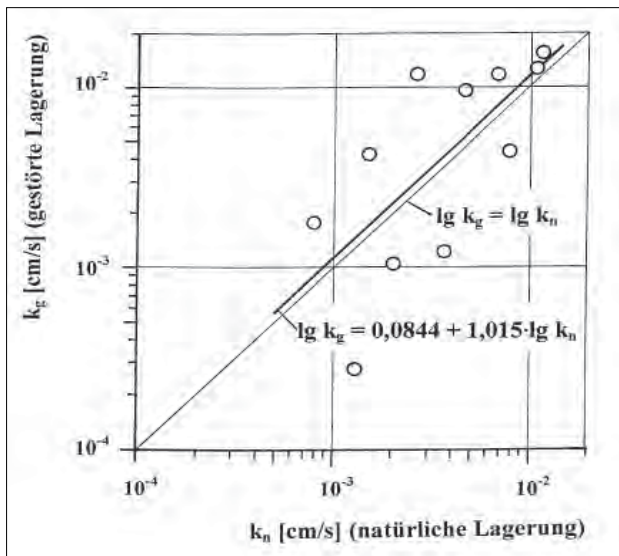


Abbildung 6: Durchlässigkeiten der untersuchten Mittelsande bei gestörter Lagerung k_g in Abhängigkeit der Durchlässigkeiten unter natürlicher Lagerung k_n (r = Korrelationskoeffizient).

totalen Porositäten und der hydraulischen Parameter unter wassergesättigten Bedingungen erbringen für den Aufbau von Lysimetern wichtige Ergebnisse:

1. Beim händischen, horizontweisen Aufbau von Lysimetern
 - sind sehr gut die Strukturmerkmale Körnungseigenschaften (Kornverteilung, Ungleichförmigkeitsgrad, Unter- und Oberkorn, Korngeometrie) und die Homogenität der Lockersedimente,
 - aber nicht die natürliche Lagerungsdichte (totale Porosität, Porengrößenverteilung), sondern nur eine versuchstechnisch dichte Sedimentlagerung und

- nicht die natürlichen Texturmerkmale im Mikro- und Mesobereich nachzubilden.

2. Insbesondere die Diskrepanz zwischen versuchstechnisch dichter („gestörter“) und natürlicher Lagerung haben für händisch aufgebaute Lysimeter andere Wassergehalte als für monolithisch entnommene Lysimeterböden zur Folge.

3. Da die hydraulischen Parameter (Durchlässigkeit, Dispersivität, effektiver Wassergehalt, Saugspannung) von der Feuchte der Böden abhängen (KLOTZ 2002 und 2007 a), sind letztlich die Sickerwassergeschwindigkeiten, die Grundwasserneubildungsraten und die Schadstoff-Retardationen in beiden Lysimetertypen verschieden.

4. Wegen der besseren Homogenität der Körnung und der Lagerung beim händischen Einbau der Horizontsedimente sind die händisch aufgebauten Lysimeter besser als monolithisch entnommene Lysimeter für Schadstoff-Migrationsversuche geeignet.

Literatur

- KLOTZ, D., 1992: Erfahrungen mit Säulenversuchen zur Bestimmung der Schadstoff-Migration. – GSF-Bericht 07/91, 118 S.
- KLOTZ, D., 2002: Grundparameter der Lysimetersedimente – Standorte Scheyern, Kelheim, Hohenwart und Feldkirchen. – GSF-Bericht 10/02, 114 S.
- KLOTZ, D., 2003: Änderung der Lagerungs-, Mikrostruktur- und hydraulischen Parameter eines Bodens während eines Jahres. – Proceedings der 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL-Bericht, 195-198.
- KLOTZ, D., 2007 a: Grundparameter der Lysimetersedimente – Standorte Hilpoltstein, Höglwald und Weichselstein. – GSF-Bericht 01/07, 102 S.
- KLOTZ, D., 2007 b: Einfluss des prognostizierten globalen Wandels auf die Sickerwasserparameter von Böden. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 51, 170-180.

Der Einsatz von Lysimetern in der forsthydrologischen Forschung im nordostdeutschen Tiefland

Jürgen Müller^{1*}

Zusammenfassung

Das nordostdeutsche Tiefland ist geprägt durch geringe Niederschläge und vorherrschend leichte Sandböden. Ziel der forsthydrologischen Forschung ist die Klärung des Einflusses unterschiedlich strukturierter Wälder auf den Landeswasserhaushalt und auf die Teilglieder der Wasserhaushaltsgleichung. Im Lockergesteinsbereich sind Lysimeter geeignete Messeinrichtungen zur Ermittlung von Sickerung und Verdunstung. Der Einsatz von Lysimetern unterschiedlicher Bauart hat im Raum Eberswalde eine über hundertjährige Tradition. 1972 wurden am Standort Britz bei Eberswalde neun Großlysimeter mit einer Tiefe von 5 m und einer Oberfläche von 100 m² (10x10 m) angelegt. 1974 erfolgte die Bepflanzung der Lysimeter mit den Baumarten Kiefer (3 Lysimeter), Buche (2), Lärche (2) und Douglasie (2) in praxisüblichen Verbänden. Das Versuchsziel ist die Klärung des Baumarten- und Alterseinflusses der Bestände auf Grundwasserneubildung und Verdunstung unter vergleichbaren Witterungs- und Bodenbedingungen.

Für die Grundwasserneubildung unter Wald ist die Baumart von herausragender Bedeutung. In den Kiefernökosystemen beeinflussen Art und Deckungswerte der Bodenvegetation innerhalb der Vegetationsperiode maßgeblich die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge mit Auswirkungen auf das Baumwachstum. Diese Ergebnisse konnten mit Hilfe speziell entwickelter wägbare Lysimeter erzielt werden.

Schlagwörter: Klimawandel, Lysimetertypen, Wasserhaushaltskennwerte, Baumarten

Summary

The North-East German lowland is characterized by low precipitations and sandy soils.

The aim of the forest hydrologic research is to investigate the influence of varying type of forest structures on the water balance of the landscape and on the partial parameters of the water balance equation. Lysimeters are suitable measuring instruments in the fields of granular soils and loose rocks to investigate evaporation and seepage water. The usage of lysimeter of different construction has a tradition of more than 100 years in this region. Aiming at the investigation of water consumption by different tree species, lysimeters were built up at Britz near Eberswalde at similar site conditions. At the beginning of the 1970s 9 lysimeters with a surface of 100 m² and a depth of 5 m were built. The stand development of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), common beech (*Fagus sylvatica* L.), larch (*Larix decidua* L.) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) was observed and recorded since planting with regard to growth course, net primary production, element and water fluxes.

The choice of tree species is of outstanding importance for the amount of groundwater production below forests. The structural properties of the ground vegetation concerning composition and coverage influence the soil water content available for plants considerably with effects on tree growth of Scots pine forests during the vegetation period. These results were obtained by usage of especially developed weighable lysimeters.

Keywords: climate change, lysimeter type, water budget, tree species

Einleitung

Der Nordosten Brandenburgs gehört zu den niederschlagsärmsten Regionen Deutschlands. Der langjährige Jahresniederschlag liegt bei 570 mm und ist somit weit unter dem gesamtdeutschen Durchschnitt von 780 mm. Klimaexperten prognostizieren für Brandenburg eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur, einen weiteren Rückgang der Jahresniederschläge und eine Verstärkung der Extremwettersituationen (SCHRÖTER et al. 2005).

Die Waldböden sind vorherrschend sandig mit geringer Wasserspeicherkapazität und hoher Durchlässigkeit.

Mit 36 Prozent Waldfläche ist Brandenburg das viertwaldreichste Bundesland. Der Wald hat infolge seiner Struktur und räumlichen Ausdehnung Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt. Deshalb sind Untersuchungen zu den Zusammenhängen von Standort, Waldstruktur und Wasserhaushalt von besonderem Interesse.

Neben den Forschungen zur Rolle des Waldes im Landschaftswasserhaushalt sind Untersuchungen zum Wasserverbrauch und Wachstum der Wälder bei weniger werden Wasserressourcen innerhalb der Vegetationsperiode ein weiterer Forschungsschwerpunkt. Durch die zu erwartende Verschärfung von Trockenheit in weiten Teilen Nord- und Mitteldeutschlands sind die vorgestellten forsthydrologi-

¹ Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, A.-Möller-Straße 1, D-16225 EBERSWALDE

* Ansprechpartner: juergen.mueller@vti.bund.de

Tabelle 1: Einsatz von Lysimetertypen in der Eberswalder forsthydrologischen Forschung.

Jahr	1907	1929	1966	1972	1994	2005
Standort	Eberswalde „Drachenkopf“	Eberswalde „Drachenkopf“	Liepe	Britz	Versuchsflächen	Britz „Postluch“
Lysimetertyp	Kleinstlysimeter	Kleinlysimeter	Unterflurlysimeter	Großlysimeter	Kleinlysimeter	Grundwasserlysimeter
Wägbarkeit	nicht wägbar	wägbar	nicht wägbar	nicht wägbar	wägbar	wägbar
Boden	gestört	gestört	ungestört	gestört	ungestört	ungestört
Oberfläche	500 cm ²	1 m ²	500 cm ² 1500 cm ²	100 m ²	1 m ²	1 m ²
Tiefe	1,0 m	1,5 m	5 m	5 m	1,8 m	2,0 m

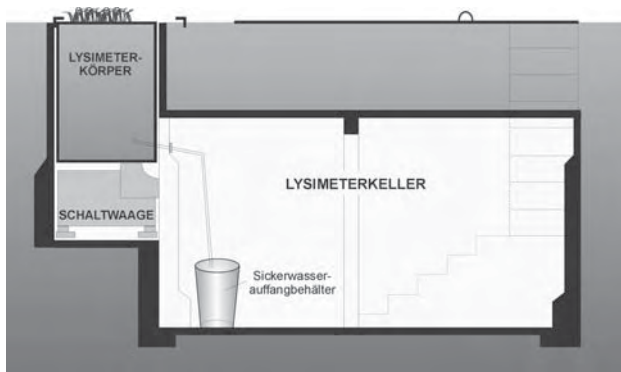


Abbildung 1: Prinzipskizze der Lysimeteranlage auf dem „Drachenkopf“.

schon Untersuchungen und erzielten Ergebnisse für viele andere Regionen Deutschlands richtungweisend.

Der Einsatz unterschiedlicher Lysimetertypen in der forsthydrologischen Forschung

Lysimeter sind geeignete Messeinrichtungen zur Erfassung des Wasserhaushaltes von Pflanzen. Auf Grund der gegebenen Standortbedingungen haben Untersuchungen mit Lysimetern unterschiedlichster Bauart im Eberswalder Raum eine lange Tradition (Tabelle 1).

Die „Drachenkopflysimeter“

Bereits 1907 wurden auf dem „Drachenkopf“ in Eberswalde erste Wasserhaushaltsuntersuchungen mit jungen Waldbäumen auf Kleinstlysimetern durchgeführt. Diese Kleinstlysimeter wurden 1929 durch eine größere wägbarere Anlage mit drei Lysimetern ersetzt, die 1954 um vier weitere ergänzt wurde. Die Versuchsstation „Drachenkopf“ ist nach unserem Kenntnisstand die älteste Lysimeterstation der Welt für forsthydrologische Zwecke (MÜLLER 2008). Die wägbareren Lysimeter haben eine Oberfläche von einem Quadratmeter und sind 1,5 m tief (Abbildung 1). Die quadratischen Lysimeterbehälter sind oberflächengleich in den natürlichen Boden eingebaut und wie ihre Umgebung mit der zu untersuchenden Pflanzendecke bewachsen. Die „Drachenkopflysimeter“ sind mit Erde befüllt und somit „gestörte Lysimeter“. Das Bodensubstrat ist Mittelsand, der Bodentyp entspricht in seiner Horizontabfolge einer für diese Region typischen Sandbraunerde.

Die Sickerwassererfassung und die Lysimeterwaagen befinden sich in einem Keller.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen besteht in der Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten Evaporation, Transpiration und Sickerung unter definierten Witterungs- und Bodenverhältnissen sowie wechselndem Bewuchs.

Unter den niederschlagsarmen Bedingungen der Region war die Ermittlung der Sickerwassermengen von besonderem Interesse, denn nur dieser Teil des Niederschlages, der dem Grundwasser zufließt, ist wasserwirtschaftlich nutzbar.

Neben der Quantifizierung der Sickerung sind Lysimeter in hervorragender Weise geeignet, die Verdunstung (V) von Pflanzen zu bestimmen. Die Verdunstung ergibt sich als Restglied aus der Wasserhaushaltsgleichung (1), als Differenz aus dem Niederschlag (N), der Sickerung (S) und der Bodenfeuchteänderung (dF).

$$V = N - S - dF \quad (1)$$

Der Niederschlag wird mit Niederschlagssammlern nach Hellman in einem Meter Höhe und am Erdboden gemessen. Die Sickerung wird am Sickerwasserauslauf der Lysimetergefäße erfasst. Die Messung der Feuchtigkeitsänderung des Bodens erfolgt über die Gewichtsänderung des Lysimeters mit Hilfe von Schalgewichtswaagen. Diese Waagen sind Kompensationswaagen, die von einem Kellergang aus bedient werden. Die ca. 2 t schweren Behälter werden auf 10 g genau gewogen.

Die „Britzer Großlysimeter“

Die forsthydrologische Fragestellung nach dem Einfluss unterschiedlich aufwachsender Baumarten auf Verdunstung und Grundwasserneubildung war 1972 der Anlass für den Bau von Großlysimetern auf der Versuchsstation Britz bei Eberswalde (MÜLLER 1993).

Andere Lysimetererfahrungen nutzend wurden die Großlysimeter mit einer für Waldlysimeter notwendigen Tiefe von 5 m und einer Oberfläche von 100 m² (10x10 m) angelegt (Abbildung 2). Es wurden neun Großlysimeter eingerichtet, die 1974 zusammen mit ihrer Umgebung als je 0,3 ha große Versuchsbestände mit den Baumarten Kiefer (3 Lysimeter), Buche (2), Lärche (2) und Douglasie (2) in praxisüblichen Verbänden bepflanzt wurden (Abbildung 3). Die „Britzer Großlysimeter“ sind daher im europäischen Maßstab einmalig, da andere mit Bäumen bewachsene Lysimeter zwar die nötige Oberfläche haben, aber mit einer Tiefe von 3 m bzw. 3,5 m zu flach sind.

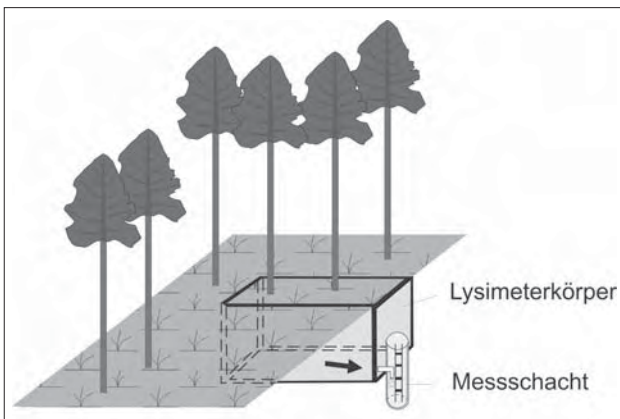


Abbildung 2: Prinzipskizze eines mit Bäumen bewachsenen Großlysimeters.

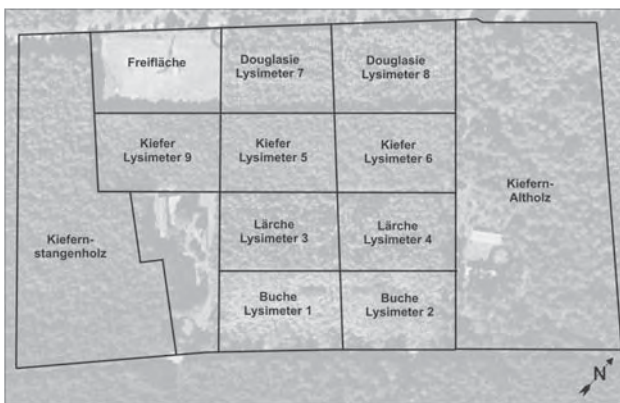


Abbildung 3: Luftbild der ökologischen Versuchsstation Britz mit Lage der einzelnen Großlysimeter (Stand 1998).

Das sich über der Lysimetergrundfläche ansammelnde Sickerwasser läuft zu einem Messschacht neben dem Lysimeter ab und wird mit einem Wasserzähler mechanisch gemessen und auch elektrisch registriert. Die Bodenfeuchte wird mit Sonden bis zu einer Tiefe von 5 m in insgesamt 10 Tiefenstufen gemessen. Die Erfassung des Niederschlages erfolgt mit Niederschlagssammlern nach Hellman im Freiland und Bestand.

Das zukünftige Waldbild im nordostdeutschen Tiefland soll durch möglichst vielfältig strukturierte Mischbestände geprägt sein. Dieses Ziel verfolgt auch der Waldumbau im Land Brandenburg (MLUR 2004). Das Waldumbau-programm bedarf der wissenschaftlichen Begleitung und Fundierung; insbesondere ist zu prüfen, wie sich die im hiesigen Raum für das Waldwachstum häufig als limitierend erweisenden hydroökologischen Bedingungen bei Unterbau von Kiefer und Lärche verändern und wie diese Bedingungen über bestandesstrukturell-waldbauliche Maßnahmen positiv beeinflusst werden können. Des weiteren kommt für das nordostdeutsche Tiefland aus standortklimatischen Gründen der Eiche eine höhere Bedeutung zu. Die hydrologischen Bedingungen von sich entwickelnden Eichenökosystemen sind noch weitgehend unbekannt. Vor diesem Hintergrund wurden einzelne Lysimeterbestände im Jahre 2000 wie folgt verändert:

- Lärche mit Buche unterbaut,

- Kiefer mit Buche unterbaut,
- Kiefer mit Eiche unterbaut,
- Eichenneuanpflanzung.

Mit der Erweiterung der Zielstellung für die Lysimeteranlage werden wichtige ökologische Grundlagen für einen erfolgreichen Waldumbau erarbeitet. Gleichzeitig wird es möglich, die langfristigen Konsequenzen des Umbaus für den Landschaftswasserhaushalt realistisch einzuschätzen.

Die wägbaren Lysimeter

In den Kiefernökosystemen des nordostdeutschen Tieflandes stellt die Vegetation am Waldboden einen maßgeblichen, bisher schwierig messbaren Wasserverbraucher dar. Um die Evapotranspiration der Bodenvegetation und damit deren spezifischen Wasserverbrauch getrennt von der Transpiration des Baumbestandes zu ermitteln, ist der Einsatz spezieller Messsysteme notwendig. Der Lysimetertradition folgend wurde der Einsatz wägbarer Lysimeter konzipiert, die folgende spezielle Anforderung erfüllen mussten:

- Kreisförmige Lysimeter mit einer Oberfläche von 1 m²
- Lysimetertiefe von 1,8 m, so dass ein sich eventuell ausbildender Stauwasserhorizont am Lysimeterboden, dem aber durch eine entsprechende Lysimeterkonstruktion entgegengewirkt wird, durch die Wurzeln der Bodenvegetation nicht erreicht wird
- ungestörter Bodenmonolith mit aufwachsender Bodenvegetation
- geringe Störung des gewachsenen Bodens und der Vegetationsdecke im Lysimeterumfeld und damit Erhaltung der Homogenität der Bodenverhältnisse und Vegetationsstrukturen
- kontinuierliche Messung von Bodenfeuchteänderungen und Sickerwassermenge mit hoher Präzision
- mobile Einsatzmöglichkeit der Lysimeter.

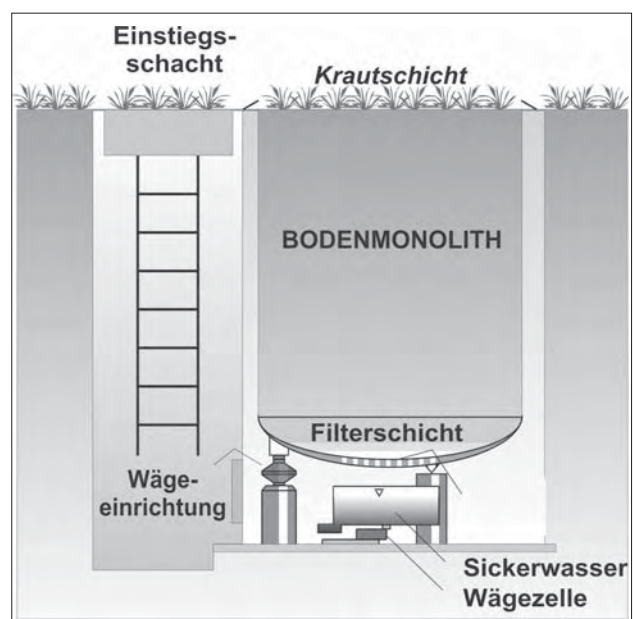


Abbildung 4: Prinzipskizze des wägbaren Lysimeters.

Diesen Forderungen entsprechend, wurden 1994 wägbare Lysimeter für den Einsatz in Waldbeständen entwickelt, hergestellt und installiert (*Abbildung 4*). Das erzielte Ergebnis, die Kombination von ungestörtem Bodenkörper ausreichender Dimension und Wägbarekeit bei Verzicht auf einen Lysimeterkeller war neu. Damit wurde die Bilanzierung des Wasserhaushaltes für unterschiedliche Anwendungsfälle unter Freilandbedingungen im Wald mit vergleichsweise geringen Kosten möglich.

Die Einzigartigkeit der Lösung lag in der Umsetzung der für die Aussagefähigkeit der Ergebnisse notwendigen Verknüpfung von Lysimetergröße, einer speziellen, die Ungestörtheit von Bodenmonolith und Lysimeterumfeld sichernden Einbautechnologie sowie in kontinuierlicher Parametererfassung und in mobiler Einsatzmöglichkeit. Der Wasserverbrauch der Vegetationsdecken kann durch den Einsatz spezieller Wägezellen für die Erfassung der Bodenfeuchteänderung im Monolith und der ausfließenden Sickerwassermengen mit einer Genauigkeit von 0,1 mm erfolgen. Zunächst wurden die Lysimeter zur Messung des Wasserverbrauchs der Bodenvegetation mit unterschiedlicher Artenzusammensetzung eingesetzt.

Im Jahre 2000 wurden einzelne Lysimeter ausgebaut, rekonstruiert und überholt und zur Ermittlung des Wasserverbrauchs von jungen Buchen und Eichen in Kiefern-Buchen bzw. Kiefern-Eichen-Mischbeständen eingebaut. Mit diesen Untersuchungen konnten die Verdunstungsverhältnisse von Kiefer zu Buche und zur Bodenvegetation geklärt werden.

Die derzeitigen Untersuchungen sollen unter dem Vorzeichen sich verändernder Klimabedingungen (Häufung von Extrem-Sommern) verstärkt der Fragestellung nach dem Einfluss von Trockenstress auf die Transpiration und das Wachstum junger Waldbäume nachgehen. Die Klärung des Einflusses veränderter Klimabedingungen auf die Entwicklung der Vegetation und umgekehrt der Vegetation auf die Klimabedingungen ist von höchster umweltpolitischer Bedeutung.

Die wägbaren Grundwasser-Lysimeter

Bisher wurden die Lysimeter nur auf terrestrischen grundwasserfernen Standorten eingesetzt. Im Jahr 2004 wurde der Einsatz auf Standorte im grundwassernahen Bereich erweitert.

Als riesige Wasserspeicher sind diese besonders naturnahen Waldökosysteme für den angespannten Landschaftswasserhaushalt der trockensten Region Deutschlands von herausragender Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund wird mit Hilfe wägbarer Lysimeter der Wasserverbrauch junger Schwarzerlen und Stieleichen in einem Erlenbruch untersucht. Die Zielstellung besteht in der Ermittlung von Transpiration und Wachstum von Stieleiche und Schwarzerle unter sich differenzierendem Grundwasserflurabstand.

Ergebnisse

Mit den „**Drachenkopflysimetern**“ wurden eine Vielzahl von Ergebnissen erzielt, die Grundlage für weiterführende

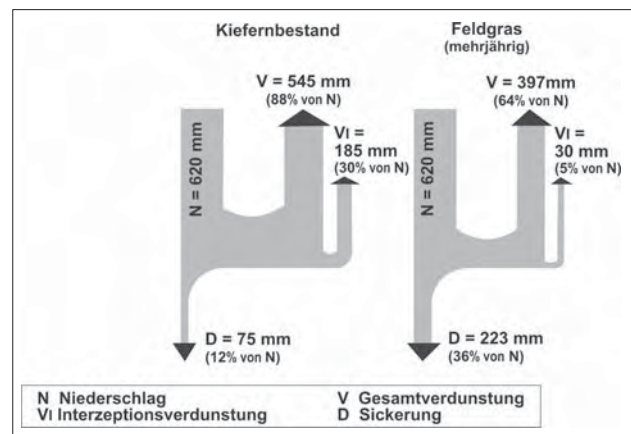


Abbildung 5: Vergleich von Tiefensickerung und Verdunstung eines Kiefernbaumholzes und eines Feldgrasbestandes auf Sandboden.

Untersuchungen zum Einfluss der Landnutzung auf den Landschaftswasserhaushalt waren (LÜTZKE 1958, 1961; MÜLLER 2008).

Ein wesentliches Ergebnis ist, dass unter vergleichbaren Witterungs- und Bodenbedingungen die Pflanzenart und der Deckungsgrad der Vegetation maßgeblich die Höhe und den zeitlichen Verlauf von Sickerung und Verdunstung beeinflussen. So sickert unter dem mehrjährigem Feldgras das Dreifache in die Tiefe als unter dem Kiefernbaumholzbestand (*Abbildung 5*). Die Ursachen der höheren Verdunstung des Waldes liegen in den Besonderheiten der verdunstenden Flächen des Ökosystems begründet, wie deren Höhe und Oberfläche, die ausgeprägte vertikale Bestandesstruktur mit Baum-, Strauch- und Krautschicht und die räumliche Ausdehnung des Waldes in der Landschaft.

Die Untersuchungen auf den „**Britzer Großlysimetern**“ zeigten, dass für die Tiefensickerung unter Wald die Baumart von herausragender Bedeutung ist.

Die Auswirkung vegetationsstruktureller Differenzierungen in unterschiedlichen Wuchsstadien eines Kiefernforstes, eines Buchenwaldes und eines aufwachsenden Kiefern-Buchen-Mischbestandes auf die Sickerungshöhe und Verdunstung zeigt die *Abbildung 6*.

Im Kiefernbestand steigt die Gesamtverdunstung mit dem Aufwachsen schnell an und die Sickerung geht zurück. Sie liegt im Stangenholzstadium bei 100 %. Die Kiefern haben in diesem Alter Zuwachskulmination, dementsprechend hohe Transpiration und infolge dichter Kronendächer hohe Interzeptionsverluste mit über 40 % der jährlichen Niederschlagsmenge (MÜLLER 2002, 2005). Die Sickerung geht in diesem Stadium gegen Null. Durch natürliche Baumzahlreduzierung und planmäßige Durchforstungen gehen Transpiration und Interzeption stetig zurück und der Sickerungsanteil steigt an. Durch die Auffichtung des Kronendaches nimmt der Anteil der Evapotranspiration der Bodenpflanzendecke verhältnismäßig stark zu (MÜLLER et al. 1998).

Im Buchenbestand steigt die Verdunstung mit dem Aufwachsen der Bestände ebenfalls schnell an und erreicht im Stangenholz Werte von knapp 80 % des Jahresniederschla-

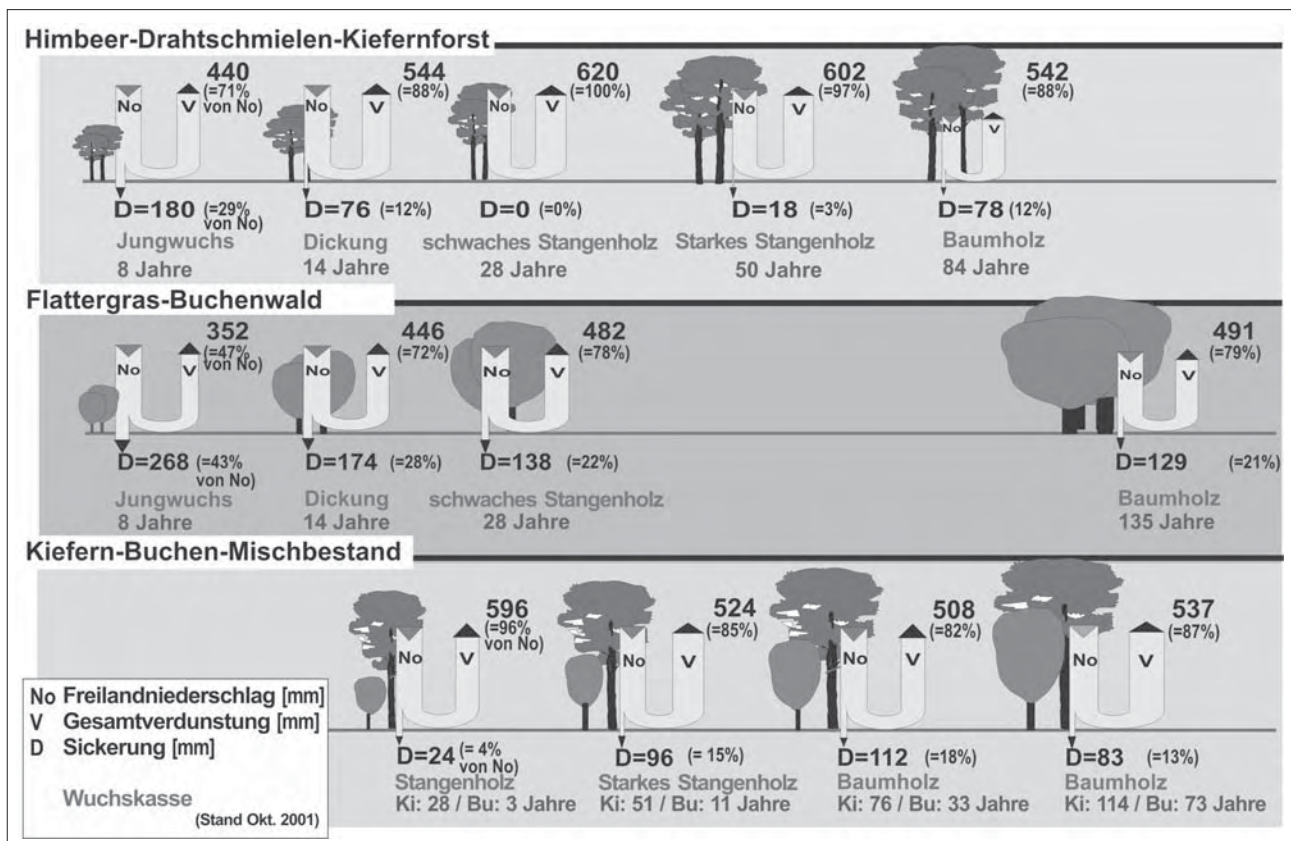


Abbildung 6: Einfluss der Vegetationsstrukturen von Vegetationsformen der Kiefer und Buche in unterschiedlichen Wuchsstadien auf Kennwerte des Wasserhaushaltes - Verdunstung und Tiefensickerung - (Finowtaler Sandbraunerde, 620 mm Jahresniederschlag).

ges. Diese Größe bleibt über einen langen Zeitraum bis ins Baumholzstadium in etwa gleich, so dass auch für die Tiefensickerung mit stabilen Mengen von über 20 % des Jahresniederschlags kalkuliert werden kann. Die Transpiration steigt mit Aufwachsen der Bestände leicht an und die Interzeption geht infolge zunehmender Stammabflüsse zurück (sie erreicht Werte von ca. 20 % des jährlichen Freilandniederschlags). Die Verdunstung vom Waldboden hat aufgrund der Ausdunkelung durch die Buche eine untergeordnete Bedeutung. Die Buche hat in allen Altersphasen höhere Tiefensickerung als die Kiefer. So sickern unter vergleichbaren Boden- und Witterungsbedingungen z.B. im Buchenbaumholz jährlich 50 mm mehr Niederschlag in die Tiefe als im Kiefernbaumholz (MÜLLER 2002, 2005).

Unter dem 1999 mit Eiche bepflanzten Lysimeter sickerten im Mittel des Zeitraums 1999 bis 2003 52 % der mittleren Niederschlagssumme (637 mm) in die Tiefe. Die Interzeptions- und Transpirationsverdunstung der kleinen Eichen sind noch gering, die Sickerung entsprechend hoch. Der Sickerungsanteil des Eichenjungwuchses im Alter von 7 Jahren ist in etwa vergleichbar mit dem gleichaltrigen Buchenjungwuchs (MÜLLER 2002, 2005, 2007).

Untersuchungen in unterschiedlich alten Kiefern-Buchen-Mischbeständen auf Sandboden zeigten, dass sich die Höhe der Tiefensickerung in Abhängigkeit von den forstlichen Eingriffen und der Stammzahlhaltung sowie der Entwicklung der Baumdimensionen der Buchen zwischen dem Kie-

fern- und Buchen-Reinbestand einordnet (MÜLLER 2006, 2007). Der 1999 mit Buchen und Eichen unterbaute Kiefern-Reinbestand (28-jährig) der Großlysimeteranlage Britz zeigt bezüglich der Tiefensickerung in 5 m Tiefe bereits eine auf die Durchforstung der Kiefer zurückzuführende positive Wirkung auf die Grundwasserneubildung.

Die Gesamtverdunstung gibt nur einen groben Überblick über den Wasserhaushalt der Waldbestände. Bedeutsamer für die Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen den Kompartimenten ist die Aufteilung der Gesamtverdunstung in die einzelnen Verdunstungskomponenten (Kronendachinterzeption, Evapotranspiration von Boden und Bodenpflanzendecke sowie Transpiration der Baumvegetation).

Die **wägbaren Lysimeter** wurden in Kiefernbeständen des nordostdeutschen Tieflands mit typischen Bodenvegetationsdecken zur Ermittlung des Wasserverbrauches dieser Decken eingebaut. Die typischen Bodenvegetationsarten waren *Calamagrostis epigejos*, *Deschampsia flexuosa*, *Deschampsia flexuosa* mit *Rubus idaeus* und *Vaccinium myrtillus*.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Evapotranspiration mit Zunahme des Grasanteils ansteigt. Die Zwergstrauchdecken haben geringeren Wasserverbrauch. So verbraucht die geschlossene Sandrohrdecke in der Jahressumme über ein Drittel, die Drahtschmielendecke knapp 30 % der jährlichen Niederschlagsmenge von 620 mm. Bei Decken mit Kleinstrauchanteilen verdunsteten Himbeer-Drahtschmielendecken

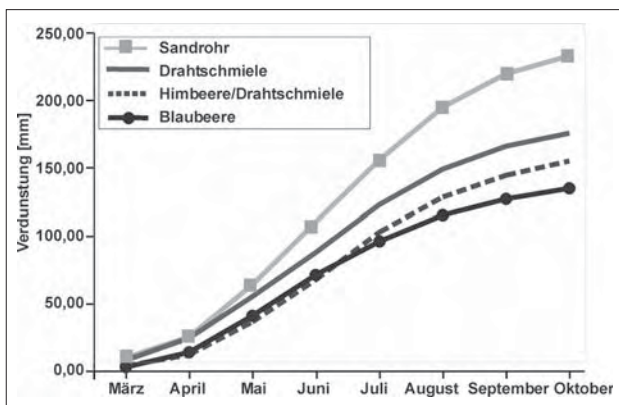


Abbildung 7: Kumulative Verdunstung unterschiedlicher Bodenvegetationsdecken in Kiefernbeständen im Zeitraum März bis Oktober im Mittel der Jahre 1996-98.

mit wenig mehr als 25 % und Blaubeer-Drahtschmielendecken mit knapp 20 % der Jahresniederschläge z. T. deutlich geringere Mengen als reine Grasdecken (Abbildung 7). Neben der in der Jahressumme unterschiedlichen Verdunstung der Bodenvegetationsdecken ist die saisonale Entwicklung der Evapotranspiration innerhalb der Vegetationsperiode ökologisch bedeutungsvoll.

In Wassermangelperioden führt der höhere Wasserverbrauch der Grasdecken zur Verminderung der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge, verschärft die Wassermangelsituation für die Baumvegetation und beeinträchtigt das Wachstum der Bäume.

Art und Deckungswerte der Bodenvegetation beeinflussen maßgeblich die Höhe des Wasserverbrauchs der Baumvegetation. Die Bodenvegetation wird zu einem führenden Faktor im Wasserhaushalt in den Kiefernforsten (MÜLLER et al. 1998; MÜLLER und SEYFARTH 1999; MÜLLER 2002).

Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Wälder besitzen eine wichtige Funktion im regionalen Wasserhaushalt; durch ihre Regulationswirkung beeinflussen sie maßgeblich den Landschaftswasserhaushalt.

Ein oft großes Problem von Wasserhaushaltsuntersuchungen in verschiedenartigen Ökosystemen sind ungleiche oder nicht genügend kontrollierbare Randbedingungen auf den einzelnen Versuchsflächen. Dadurch kann im Ergebnis die Wirkung der eigentlich interessierenden Einflussgröße verwischt und verfälscht werden. Wenn für Böden des Lockergesteinbereiches speziell der Bewuchseinfluss auf den Wasserhaushalt zu klären ist, sind zur Ausschaltung störender Randbedingungen Messungen mit Lysimetern eine geeignete Methode. Unter der Voraussetzung einer richtigen Konstruktion und ausreichenden Größe der Lysimeter gilt das auch für Waldökosysteme.

Erst durch die Berücksichtigung der Besonderheiten des strukturellen Aufbaus des Waldes wird eine treffende Beurteilung der hydro-ökologischen Wirkungen möglich.

So konnte mit Hilfe der Großlysimeter der Einfluss der Baumart auf Tiefenversickerung und Verdunstung aufwachsender Bestände quantifiziert werden. Es zeigte sich,

dass die Kronendachstrukturen maßgeblich die Höhe der Tiefensickerung und die Verteilung des Niederschlages im Bestand mit Wirkung auf die Bodenwasserverfügbarkeit beeinflussen.

Die Gesamtverdunstung gibt nur einen groben Überblick über den Wasserhaushalt der Waldbestände. Bedeutsamer für die Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen den Kompartimenten ist die Aufteilung der Gesamtverdunstung in die einzelnen Verdunstungskomponenten. In der Vegetationsperiode sind die Wasserverbräuche der einzelnen Vegetationsschichten für die Beurteilung von möglichem auftretendem Wasserstress von Bedeutung. Durch den Einsatz von wägbaren Lysimetern in Kiefernreinbeständen konnte nachgewiesen werden, dass die Höhe und die innerjährliche Entwicklung des Wasserverbrauches unterschiedlicher Bodenvegetationsdecken die Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenwassers mit Konsequenzen für den Wasserverbrauch der Baumschicht bestimmen.

Der große Vorteil der Lysimeter-technik besteht in der Möglichkeit der Bilanzierung von Energie- und Stoffflüssen in hoher zeitlicher Auflösung unter genau zu differenzierenden Bedingungen. Dies macht die Lysimeter für die verschiedensten Einsatzfelder in Wissenschaft und Praxis immer interessanter. Lysimeter sind aufgrund innovativer Messtechniken (Wägezellen zur Bestimmung von Feuchteänderungen und Sickerwasserflüssen, Bodenfeuchtesensoren und Tensiometer zur Beobachtung der Sickerwasserbewegung) für die Parameterisierung von Prozessmodellen zur Modellierung des Energie- und Stoffhaushaltes ein wichtiges Instrument. Dies gilt auch für die forsthydrologische Forschung. Vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung sind Lysimeter zur Untersuchung des Wasserverbrauches kleiner Waldbäume unterschiedlicher Herkunft bei knapper werdenden Wasserressourcen unverzichtbar.

Literatur

- LÜTZKE, R., 1958: Vergleichende Untersuchungen der Temperaturverhältnisse auf freiem Feld, in Waldbeständen und auf Waldlichtungen mit Hilfe von thermoelektrischen Messungen bis zur Höhe der Baumkronen. Dissertation, Eberswalde 1958, 217 S.
- LÜTZKE, R., 1961: Das Temperaturklima von Waldbeständen und Lichtungen im Vergleich zur offenen Flur. Archiv für Forstwirtschaft 10, 1961, 17-83.
- MLUR (Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung), 2004: Waldbaurichtlinie 2004 – „Grüner Ordner“ der Landesforstverwaltung Brandenburg. Potsdam : MLUR, 143 S.
- MÜLLER, J., 2008: Die Versuchsstation auf dem „Drachenkopf“ in Eberswalde. In: Eberswalder Jahrbuch für Heimat-, Kultur- und Naturgeschichte 2007/2008. 248-253.
- MÜLLER, J., 2007: Forestry and limited water budget in the Northeast German Lowlands – consequences for choice of tree species and forest management. In: Progress in Hydro Science and Engineering, The Role of Forests and Forest Management in the Water Cycle, Contributions to the Sino-German Symposium 27-30 November 2006, Dresden. Dresden Water Center, Volume 3/2007, 355-364.
- MÜLLER, J., 2007: Verdunstung und Wasserhaushalt unterschiedlich strukturierter Kiefern-Buchen-Mischbestände auf grundwasserfernen Sandstandorten. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Verdunstung – Beiträge zum Seminar Verdunstung am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam. Hrsg. Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg

- Hydrologische Wissenschaften Fachgemeinschaft in der DWA. Heft 21.07., 97-112.
- MÜLLER, J., 2006: Veränderung hydroökologischer Parameter im Prozess des Waldumbaus von Kiefernforsten über Kiefern-Buchen-Mischbestände zu Buchenwäldern im nordostdeutschen Tiefland. In: DWA, Wasser- und Bodentage. Feuchtwangen, 25.10.2006. Hennef: DWA 2006, 1-17.
- MÜLLER, J., 2005: 30 Jahre forsthydrologische Forschung auf der Großlysimeteranlage in Britz – Zielstellung und Ergebnisse. In: Bericht über die 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, „Lysimetrie im Netzwerk der Dynamik von Ökosystemen“ am 5. und 6. April 2005, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Irdning. Raumberg-Gumpenstein, 29-32.
- MÜLLER, J., 2002: Wirkungszusammenhänge zwischen Vegetationsstrukturen und hydrologischen Prozessen in Wäldern und Forsten. In: ANDERS, S. (ed.): Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Oberwinter: Verlag Dr. Kessel, 2002, 93 und 99-122.
- MÜLLER, J. und M. SEYFARTH, 1999: Methode zur Ermittlung des Wasserverbrauches unterschiedlicher Waldbodenvegetationsdecken mit Hilfe von wägbaren Lysimetern. In: 8. Lysimetertagung der Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft in Gumpenstein am 13. und 14.4.1999. BAL Bericht, 1999, 177-178.
- MÜLLER, J., A. BOLTE, W. BECK und S. ANDERS, 1998: Bodenvegetation und Wasserhaushalt von Kiefernforstökosystemen (*Pinus sylvestris* L.). Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Berlin 28 (1998), 407-414.
- MÜLLER J., 1993: Die Großlysimeteranlage Britz (bei Eberswalde). Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Göttingen 71:18-19.
- SCHRÖTER, D., M. ZEBISCH and T. GROTHMANN, 2005: Climate change in Germany - vulnerability and adaptation of climate-sensitive sectors. Klimastatusbericht (Report on the State of the Climate). Deutscher Wetterdienst (German Meteorological Service), Offenbach.

Langfristige Dynamik des Stickstoffaustrages ins Bodenwasser kalkalpiner Wälder

Thomas Dirnböck^{1*}, Georg Jost² und Michael Mirtl¹

Zusammenfassung

Am UN-ECE Integrated Monitoring Standort Zöbelboden in den Nördlichen Kalkalpen wird seit 1992 ein Waldökosystem auf die Wirkungen von Luftschadstoffeinträgen untersucht. Ein Schwerpunkt sind ökosystemare Änderungen aufgrund von langfristig überhöhten Stickstoffeinträgen aus Industrie, Verkehr und Landwirtschaft. Untersucht wurden zwei Waldstandorte, ein Fichtenforst auf Kalksteinbraunlehm/Pseudogley (IP1) und ein Buchen-Fichten-Ahorn Mischwald auf Rendzina (IP2). Hier soll der Zusammenhang von Einträgen und Austrägen in das Bodenwasser im Zeitraum 1993-2006 dargestellt und interpretiert werden. Die Wasserflüsse wurden mittels meteorologischer Daten und dem Modell Brook90 modelliert und in weiterer Folge mit den Stickstoffkonzentrationen von zweiwöchentlichen Lysimeterproben multipliziert. Der Stickstoffexport ins Bodenwasser zeigt einen starken saisonalen Trend. Die größten Flüsse erfolgen im Frühjahr während und nach der Schneeschmelze und bei Starkregenereignissen, im restlichen Jahr sind sie eher niedrig. Die beiden Standorte unterscheiden sich allerdings in Bezug auf das Stickstoffbudget erheblich. Während der IP2 die Hälfte des

deponierten Stickstoffs akkumuliert, findet am IP1 kaum eine Akkumulation statt. In vielen Jahren erfolgt dort ein Nettoaustrag über das Sickerwasser.

Schlagwörter: Bodenwasser, Wald, Stickstoffaustrag, UN-ECE

Summary

Long-term air pollution effects are monitored since 1992 at the UN-ECE Integrated Monitoring site Zöbelboden in the Northern Limestone Alps. Here we present results about nitrogen deposition and leaching between 1993 and 2006 in two contrasting forest stands: a spruce forest on Chromic Cambisols/Dystric Planosols and a mixed beech-spruce-maple forest on Lithic and Rendzic Leptosols. Water fluxes were modeled (Brook90) using meteorological data and multiplied with nitrogen concentrations from biweekly lysimeter samples. Major fluxes occur during and after snowmelt and during storm events, whereas average fluxes are low. The nitrogen budget is different between the two sites. Half of the deposited inorganic nitrogen is accumulated at IP2 and only minor accumulation occurs at IP1. There, net leaching with the soil water happens in many years.

Keywords: soil water, forest, nitrogen leaching, UN-ECE

Einleitung

In den österreichischen Wäldern werden die „Critical Loads“ (kritische, langfristige Stoffeinträge mit schädlicher Wirkung) in Bezug auf Nährstoffanreicherung durch Stickstoff vor allem in Regionen mit hohen Niederschlagsmengen überschritten (SMIDT und OBERSTEINER 2006). Der UNECE-ICP Integrated Monitoring Standort „Zöbelboden“ dient als Referenzsystem für Luftschadstoffwirkungen in montanen Karbonatwäldern. Im 90 ha umfassenden Untersuchungsgebiet werden die Änderungen von Stoffflüssen über lange Zeiträume gemessen. Die Auswertungen zeigen, dass Critical Loads für Stickstoffeinträge um bis zum Doppelten überschritten werden. Erhöhte Stickstoffeinträge führen langfristig zu einer Sättigung: es wird mehr Stickstoff aus dem System transportiert als eingetragen (ABER et al. 1998). Die vorliegende Studie zeigt anhand von langfristigen Datenreihen zu Einträgen und Austrägen von Stickstoff, dass die Effekte selbst in einem relativ kleinen Gebiet wie dem Zöbelboden je nach Waldbestand und Standortbedingungen sehr unterschiedlich sein können.

Material und Methoden

Der österreichische UNECE ICP Integrated Monitoring Standort hat eine Größe von 90 ha, eine Höherenstreckung von 550 m bis 956 m und liegt im Nationalpark Kalkalpen (N 47°50'30", E 14°26'30") (www.umweltbundesamt.at/im). Der Karststock ist vor allem aus Hauptdolomit, teils aus Plattenkalk aufgebaut. Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist 7.2° C. Im Schnitt fallen zwischen 1500 bis 1800 mm Niederschlag.

Das Untersuchungsgebiet ist in ein flaches Plateau und steile Hänge gegliedert. Entsprechend dieser Situation wurden zwei Intensivplots zur Messung von Stoffflüssen errichtet: der IP1 repräsentiert das Plateau (Mosaik aus Kalksteinbraunlehm und Pseudogley) und ist von einem fichtendominierten Forst bestockt. Der IP2 repräsentiert die Hänge (Rendzinen) wo ein Mischwald aus Buche, Fichte, Ahorn und Esche stockt (*Tabelle 1*).

Die meteorologischen Daten stammen von einem 45 m hohen Messturm und einer Freifläche. Datenlücken wurden mit benachbarten Stationsdaten gefüllt. Stoffeinträge werden auf

¹ Umweltbundesamt, Abteilung für Ökosystemforschung und -monitoring, Spittelauer Lände 5, A-1090 WIEN

² Department of Geography, University of British Columbia, 1984 West Mall, VANCOUVER, B.C., Canada

* Ansprechpartner: thomas.dirnboeck@umweltbundesamt.at

Tabelle 1: Charakteristika der beiden Intensivplots. Bodenkennwerte: Mittel aus je 16 Probestellen, Standardabweichung in Klammer.

Baumarten		IP1	IP2
Potentiell natürliche Vegetation		Fichte (wenig Buche)	Buche, Fichte, Ahorn, Esche
Böden		<i>Cardamino trifoliae-Fagetum</i> sensu Willner 2002	<i>Adenostylo glabrae-Fagetum</i> sensu Willner 2002
Mittlere Bodentiefe [cm]		Kalksteinbraunlehm, Pseudogley	Rendsina
		51	12
pH _{CaCl2}	Humus	5,3 (0,6)	5,7 (0,4)
	0-10 cm	6,3 (0,6)	6,7 (0,3)
	10-20 cm	6,6 (0,3)	6,9 (0,1)
C _{org} [%]	Humus	36 (9,2)	44 (6,1)
	0-10 cm	10,1 (3,5)	20,3 (6,6)
	10-20 cm	5,1 (1,6)	12,7 (1,7)
N _{ges} [%]	Humus	1,3 (0,2)	1,5 (0,2)
	0-10 cm	0,6 (0,2)	1,2 (0,2)
	10-20 cm	0,4 (0,1)	0,8 (0,2)

Tabelle 2: Mittlere jährliche Konzentrationen und Flüsse von Freiland- (P) und Bestandesdeposition (Thr), Sickerwasser (S) sowie Änderungen im Boden der beiden Intensivplots zwischen 1993 und 2006. *Mittel aus 1999 bis 2006.

	Nieder- schlag [mm]	Sicker- wasser [mm]		Konzentrationen [mg/l]			Flüsse [kg/ha/Jahr]			Speicher- änderungen [kg/ha/Jahr] Boden
				P	Thr	S	P	Thr	S	
IP1	1688	893	NO ₃ -N	0,47	1,15	2,01	7,1	11,1	-18,7	-7,6
			NH ₄ -N	0,68	1,07	0,04	9,6	9,9	-0,3	9,6
			N _{ges}	1,38	2,83	2,82	19	26,1	-26,1	0
IP2	1688	1165	NO ₃ -N	0,47	0,96	0,84*	7,1	11,2	-9,7*	1,4*
			NH ₄ -N	0,68	0,75	0,04*	9,6	8,4	-0,4*	7,6*
			N _{ges}	1,38	2,16	1,41*	19,0	24,5	-16,0*	7,8*

einer Freifläche (5-10 Sammler), im Bestand („Throughfall“, 15-17 Sammler) und als Stammabfluss (5 Sammler an Buchen) gemessen. Bodenfeuchte wurde mittels Time Domain Reflectometry (TDR, zwischen 6 und 12) in einem stündlichen Intervall erfasst. Diese Daten wurden verwendet um ein hydrologisches Modell (Brook90) zu eichen, das halbstündliche Werte zu den Wasserflüssen der beiden Waldbestände zwischen 1993 und 2006 wiedergibt. Das Bodenwasser wurde in zweiwöchentlichen Mischproben aus Plattenlysimetern (Kerzenlysimeter bis 1999) gesammelt. In allen wässrigen Proben wurde der Gesamtstickstoff (N_{ges}), Nitrat (NO₃-N) und Ammonium (NH₄-N) bestimmt. Die Konzentrationen wurden mit den Flüssen multipliziert um Frachten zu erhalten.

Ergebnisse

Mit einem durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 1688 mm und einer Evapotranspiration von 795 mm am IP1 und 523 mm am IP2 gelangen im Mittel 893 und 1165 mm ins Bodenwasser (Tabelle 2). Jährlich werden 19,0 kg/ha/Jahr N_{ges} über den Niederschlag in die Wälder des Zöbelboden eingetragen (7,1 kg/ha/Jahr NO₃-N; 9,6 kg/ha/Jahr NH₄-N). Die Stoffe werden mit der Baumkronenpassage angereichert (v.a. Abwaschen von Trockendeposition) sodass in der Bestandesdeposition (inkl. Stammabfluss) 26,1 kg/ha/Jahr N_{ges} am IP1 und 24,5 kg/ha/Jahr am IP2 gefunden werden. NO₃-N wird relativ zu NH₄-N stärker angereichert.

Am IP1 gelangen 26,1 kg/ha/Jahr N_{ges} ins Bodenwasser, am IP2 sind es 16,0 kg/ha/Jahr. Jeweils zwei Drittel sind NO₃-N, NH₄-N ist kaum vorhanden. Am IP1 wird in manchen Jahren mehr anorganisches N ausgewaschen als durch die Deposition in das System gelangt, insgesamt kommt es zu einer geringen Anreicherung. Am IP2 erfolgt in allen Jahren eine Anreicherung von anorganischem N (mit Ausnahme des Jahres 1999). In beiden Plots kommt es zu einem geringen Nettoverlust von organischem N durch Auswaschung.

Die Austräge zeigen eine immense Variabilität innerhalb und zwischen Jahren. Die größten Austräge treten im Frühjahr während bzw. nach der Schneeschmelze auf, wenn im Winter große Schneemengen angefallen sind. Weiter führen Starkregenereignisse zu hohen Austrägen. Bei hohen Austrägen treten auch immer größere Konzentrationen auf.

Diskussion

Obwohl der Standort Zöbelboden keinen lokalen Emittenten ausgesetzt ist, werden sehr hohe Einträge von NO₃-N und NH₄-N in den beiden Waldbeständen gemessen. Dies ist eine Folge großer Niederschlagsmengen und Schadstofftransporte in die Staulagen der Nördlichen Kalkalpen (ROGORA et al. 2006). Durch eine größere jährliche Interzeptionsrate weist der Fichtenstandort (IP1) höhere Einträge als der Buchenstandort (IP2) auf (DE SCHRIJVER et al. 2007).

Insgesamt muss aufgrund von N-Aufnahme im Kronenraum (v.a. bei Nebelereignissen) mit noch höheren Einträgen

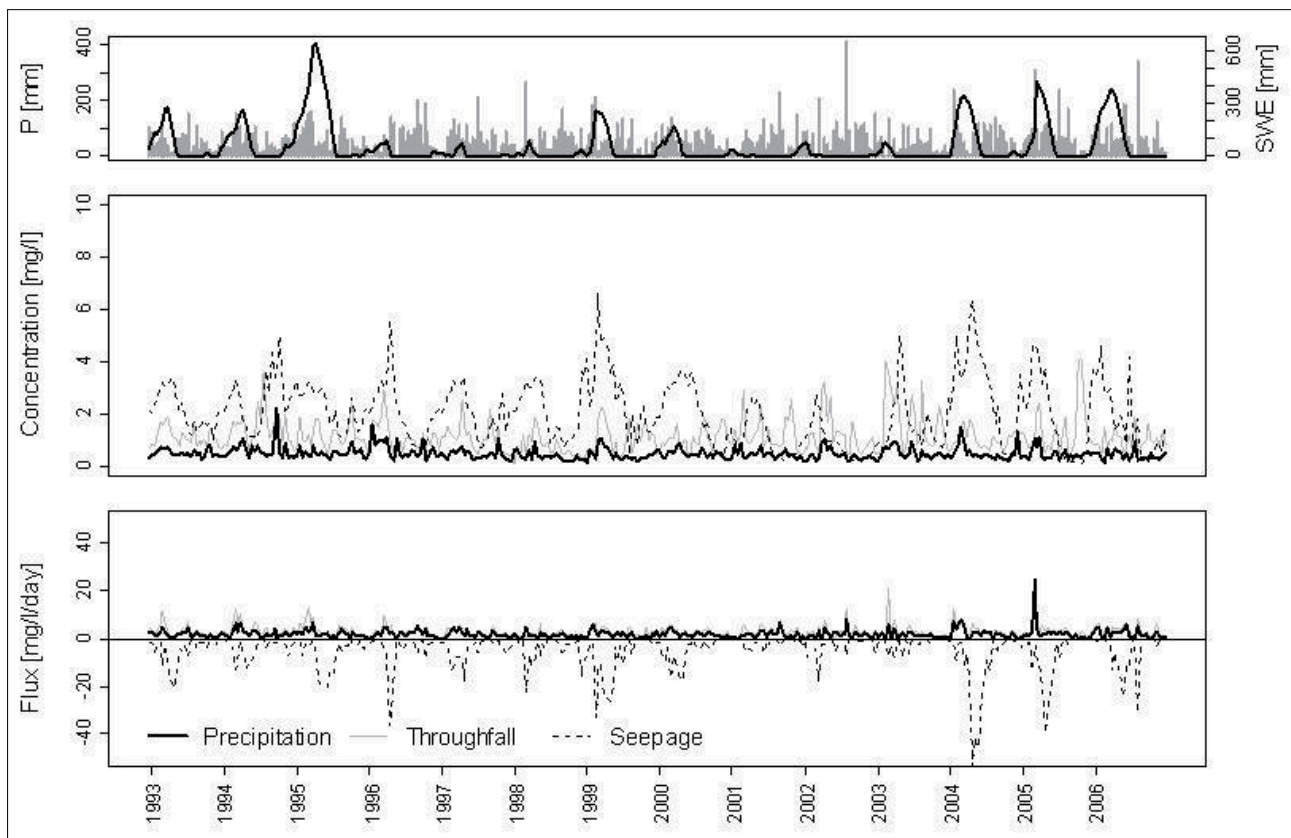


Abbildung 1: Zweiwöchentliche Zeitreihe von NO₃-N Konzentrationen und NO₃-N Flüssen in der Freiland- (Precipitation) und Bestandesdeposition (Throughfall) und im Bodenwasser (Seepage) zwischen Jänner 1993 und Dezember 2006. Die Linie der ersten Grafik zeigt das Schneewasseräquivalent (SWE).

gerechnet werden. Die gemessenen N-Austräge sind nicht vollständig, da je nach Standortbedingungen erhebliche Mengen von N aus dem Boden ausgasen (KITZLER et al. 2006, JANDL et al. 2008). Im Vergleich zu anderen europäischen Untersuchungen in Wälder sind die gefundenen Sickerwassermengen von 6.4 bis 38.6 kg/ha/Jahr hoch (MACDONALD et al. 2002, BRUMME und KHANNA 2008). Dies ist primär eine Folge hoher Niederschläge in Kombination mit großen Eintragsmengen (KANE et al. 2008). Die flachgründigen Böden mit engen C/N Verhältnissen im Humus sind weitere Eigenschaften, die zu großem N Transport mit dem Sickerwasser führen (MACDONALD et al. 2002, BORKEN und MATZNER 2004). Der Anteil von organischem N ist gering, was typisch ist für Standorte mit hohen anthropogenen Einträgen (PELLERIN et al. 2006). Die beiden Standorte verhalten sich sehr unterschiedlich bezüglich ihres N Budgets. Wohingegen der IP1 kaum N anreichert, sondern in vielen Jahren Nettoaustrag von anorganischem und organischem N aufweist, akkumuliert der IP2 ca. die Hälfte des eingetragenen anorganischen N. Allerdings sind dabei die direkte Kronenaufnahme und die gasförmigen Austräge nicht berücksichtigt. Fichtenbestände neigen allgemein zu höheren N-Austrägen als Buchenbestände (ROTHER et al. 2002, DE SCHRIJVER et al. 2007). Zusätzlich weist der IP1 höhere Einträge auf. Ein weiterer Faktor ist, dass in Mullrendsinen, wie sie am IP2 zu finden sind, hohe Immobilisierungs- und Nitrifizierungsraten auftreten (JANDL et al. 2008).

Die saisonalen Schwankungen in den Stoffflüssen beider Plots sind ähnlich: hohe Einträge im Frühjahr und von NH₄ im Herbst; der Großteil der Austräge findet während weniger Ereignisse statt; nach schneereichen Wintern erfolgen hohe Austräge. Die N-Stoffflüsse sind daher vor allem hydrologisch getrieben. Da die Konzentrationen mit den Flüssen ansteigen, ist aber zusätzlich eine Akkumulation von NO₃ in Perioden mit wenig Sickerwasser anzunehmen. Vorstellbar ist dies aufgrund von Nitrifizierungsprozessen unter der Schneedecke und Auswaschung von NO₃ während der Schneeschmelze (SCHMIDT et al. 2007). Auch während trockener Perioden kann es zu Anreicherung von NO₃ kommen (LISCHEID et al. 2004).

Literatur

- ABER, J., W. MCDOWELL, K. NADELHOFFER, A. MAGILL, G. BERNTSON, M. KAMAKEA, S. MCNULTY, W. CURRIE, L. RUSTAD and I. FERNANDEZ, 1998: Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Bioscience* 48, 921-933.
- BORKEN, W. and E. MATZNER, 2004: Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167, 277-283.
- DE SCHRIJVER, A., G. GEUDENS, L. AUGUSTO, J. STAELENS, J. MERTENS, K. WUYTS, L. GIELIS and K. VERHEYEN, 2007: The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia* 153, 663-674.
- JANDL, R., F. HERMAN, S. SMIDT, K. BUTTERBACH-BAHL, M. ENGLISCH, K. KATZENSTEINER, M. LEXER, F. STREBL and

- S. ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, 2008: Nitrogen dynamics of a mountain forest on dolomitic limestone – A scenario-based risk assessment. *Environmental Pollution* 155, 512-516.
- KANE, E.S., E.F. BETTS, A.J. BURGIN, H.M. CLILVERD, C.L. CRENSHAW, J.B. FELLMAN, I.H. MYERS-SMITH, J.A. O'DONNELL, D.J. SOBOTA, W.J. VAN VERSEVELD and J.B. JONES, 2008: Precipitation control over inorganic nitrogen import–export budgets across watersheds: a synthesis of long-term ecological research. *Ecohydrology* 1, 105-117.
- KITZLER, B., S. ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, C. HOLTERMANN, U. SKIBA and K. BUTTERBACH-BAHL, 2006: Controls over N_2O , NO_x and CO_2 fluxes in a calcareous mountain forest soil. *Biogeosciences* 3, 383–395.
- LISCHEID, G., H. LANGE, K. MORITZ and H. BÜTTCHER, 2004: Dynamics of runoff and runoff chemistry at the Lehstenbach and Steinkreuz catchment. *Ecological Studies* 172: 399-436.
- MACDONALD, J.A., N.B. DIESE, E. MATZNER, M. ARMBRUSTER, P. GUNDERSEN and M. FORSIUS, 2002: Nitrogen input together with ecosystem nitrogen enrichment predict nitrate leaching from European forests. *Global Change Biology* 8, 1028-1033.
- PELLERIN, B.A., S.S. KAUSHAL and W.H. MCDOWELL, 2006: Does anthropogenic nitrogen enrichment increase organic nitrogen concentration in runoff from forested and human-dominated watersheds? *Ecosystems* 9, 852-864.
- ROGORA, M., R. MOSELLO, S. ARISCI, M.C. BRIZZIO, A. BARBIERI, R. BALESTRINI, P. WALDNER, M. SCHMITT, M. STÄHLI, A. THIMONIER, M. KALINA, H. PUXBAUM, U. NICKUS, E. ULRICH and A. PROBST, 2006: An overview of atmospheric deposition chemistry over the Alps: present status and long-term trends. *Hydrobiologia* 562, 17-40.
- ROTHER, A., C. HUBER, K. KREUTZER and W. WEIS, 2002: Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European beech: Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies. *Plant and Soil* 240, 33-45.
- SCHMIDT, S.K., E.K. COSTELLO, D.R. NEMERGUT, C.C. CLEVELAND, S.C. REED, M.N. WEINTRAUB, A.F. MEYER and A.M. MARTIN, 2007: Biological consequences of rapid microbial turnover and seasonal succession in soil. *Ecology* 88, 1379-1385.
- SMIDT, S. und E. OBERSTEINER, 2007: 10 Jahre Depositionsmessung im Rahmen des europäischen Waldschadensmonitorings. *Austrian Journal of Forest Science* 124, 83-104.

Water use efficiency of sorghum and maize treated with PENTAKEEP-V

József Zsembeli^{1*}, Györgyi Kovács¹, Attila Murányi² and Tohru Tanaka³

Summary

In weighable lysimeters the effect of Pentakeep-V on the water balance of sorghum and maize is tested combined with an irrigation experiment. Pentakeep-V is a special foliar fertilizer containing the precursor of chlorophyll synthesis, namely 5-aminolevulinic acid (5-ALA). As the effect of PV on water balance of the soil is not known, therefore an experiment was set up in 2007 to determine the evapotranspiration of three sorghum hybrids and continued in 2008 with a comparison test of maize and sorghum. The considerable effect of both treatments could be quantified by means of the precision weighing lysimeter devices. We found differences in the amount of evapotranspiration and increase in yield and sugar content due to the treatments. By means of different indexes we calculated, water use efficiencies were compared. As we found a new probable effect of Pentakeep-V, we think it accelerates ripening, further studies are needed to get more detailed information in this respect.

Keywords: water balance, weighable lysimeters, foliar fertilisation

Introduction

Experiments in weighable lysimeters have been carried out for 16 years in the Karcag Research Institute of University of Debrecen, Centre for Agricultural Sciences and Engineering mainly focussing on the determination of the elements of the soil water balance influenced by various soil cultivation methods. In 2008 a complex experiment including irrigation and foliar fertilisation was set.

PENTAKEEP-V (PV) is a nitrogen liquid fertiliser that is blended with 5-aminolevulinic acid (or ALA), which promotes plant photosynthesis. ALA is an important amino acid in the bodies of plants and animals, a substance that is a precursor to chlorophyll in plants. PENTAKEEP-V has been confirmed that conventional fertiliser and ALA have synergy effects for plant growth. By using PENTAKEEP-V, photosynthesis is flourished, and water and fertiliser uptake are increased. Several results are published about the positive effect of this fertiliser, but mainly vegetables, fruits (BINDU ROY-VIVEKANANDAN 1998, YOSHIDA et al. 2003) or trees were tested so far (DRAZIC-MIHAILOVIC 1998).

Complex effect of several processes can be expected when a foliar fertiliser is applied, hence the resultant is not always

obvious from the point of view of the water uptake of the crop. Precise measurements are needed to determine the changes in the water balance due to liquid fertilisation. For that purpose weighable lysimeters are very good tools as our investigations proved so far (ZSEMBELI 2003, 2006).

Material and Methods

The experiment aiming the investigation of the water use of maize and sorghum was set on 8th May, 2008 at the lysimeter station of the Karcag Research Institute of University of Debrecen CASE in 6 weighable lysimeters of 2 m² surface area each. The treatments of the experiment are listed in *Table 1*.

Sweet sorghum (*Sucrosorgo*) and sweet corn (*Aranyamaz-sola*) in 3-3 lysimeters were sown as indicator crops on 8th May, 2008. The proper spacing among the plants was set after the germination. Parallel to the sowing, TTN-M type probes were inserted into the soil in order to measure the soil moisture content and temperature.

The first PV application was one week before blooming, as PV was expected to have positive effect on the development of the panicles. The sugar content was intended to be increased by applying further treatments during sugar accumulation of sorghum. Under field conditions the latter applications are highly limited, but under lysimeter circumstances the foliar spraying could be carried out. 0.1256 ml Pentakeep-V / lysimeter solved in 1.57 l water was sprayed, which is the equivalent of the standard dose of 400 ml PV/ha in 5 000 l/ha water. The first application was on 25th June 2008 and then three further treatments were applied biweekly. The PV treatment was managed by manual spraying in the early morning hours.

In an average year irrigation in droughty summer periods is necessary to fulfil the water demand of the crops. All the 4 irrigated lysimeter units got the same amount of input water (natural precipitation + irrigation water) during the

Table 1: The treatments of the experiment

Lysimeter unit	Indicator crop	Treatment
SL 1	Sweet sorghum	Control
SL 2	Sweet sorghum	Irrigated
SL 3	Sweet sorghum	Irrigated + PV application
SL 4	Maize	Control
SL 5	Maize	Irrigated
SL 6	Maize	Irrigated + PV application

¹ Karcag Research Institute of University of Debrecen CASE, Kisújszállási út 166, H-5300 KARCAG

² Research Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry of the Hungarian Academy of Sciences, Herman O. u. 15, H-1022 BUDAPEST

³ Cosmo Oil Co. Ltd., TOKYO

* Correspondence: zsembeli@dateki.hu

Table 2: The amount of input water in the lysimeters (mm)

Water source	SL 1	SL 2	SL 3	SL 4	SL 5	SL 6
Irrigation (mm/m ²):	30	75	75	30	75	75
Rainfall (mm)	280.9	280.9	280.9	280.9	280.9	280.9
Total input (mm)	310.9	355.9	355.9	310.9	355.9	355.9

investigated period (May-August). Even the control version was irrigated by the middle of June as the germination and the beginning phase of the development of the crops must have been helped by irrigation. Irrigation was started on 30th May, 2008 and implemented in smaller doses when no natural precipitation fell. The total amount of natural rainfall was 280.9 mm during the investigated period (May-August). *Table 2* summarises the water inputs for the lysimeter units.

According to the principle of weighing lysimetry the components of the water balance of each lysimeter unit are measured while the evapotranspiration (ET) is calculated. The water equation valid for the lysimeters is as follows:

$$ET = P + I - D - \Delta W$$

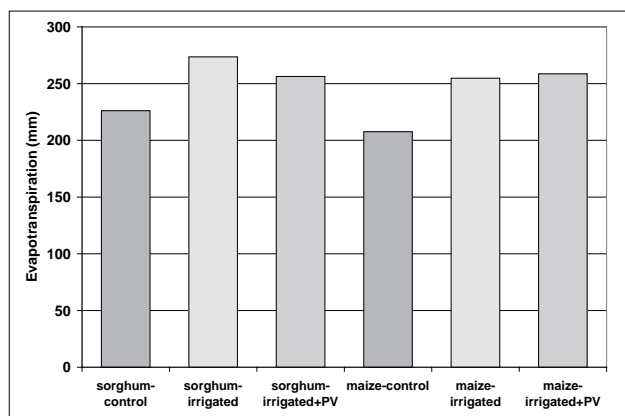
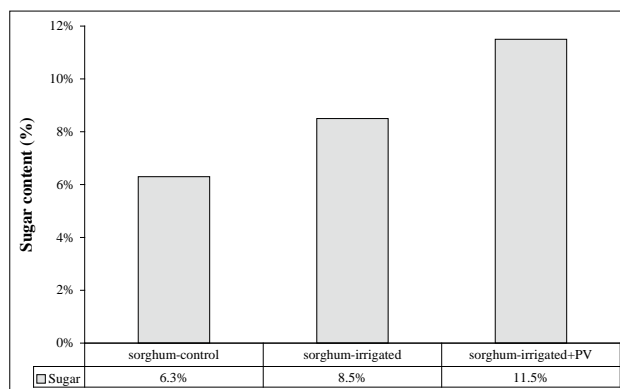
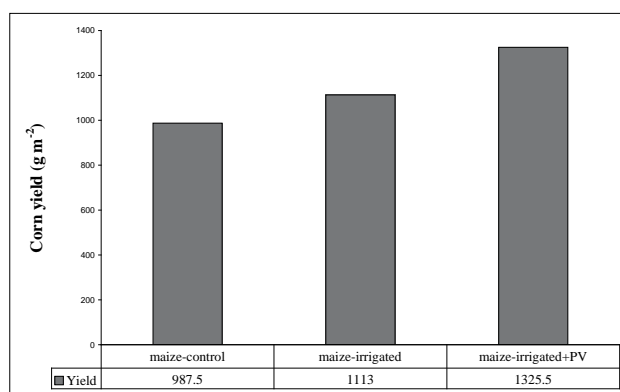
where ET: evapotranspiration (mm), P: natural precipitation (mm), I: irrigation water (mm), D: drainage water (mm), ΔW : change of mass = water balance (mm).

Results

In *Figure 1* the evapotranspiration values during the investigated period (from the first PV-treatment till harvest) are shown. The difference between the evapotranspiration of the irrigated and non-irrigated crops is obvious, while lower evapotranspiration was detected in the case of the PV-treated sorghum compared to the purely irrigated one. No significant difference was found between the two irrigated lysimeters with maize.

Two different yield parameters were also measured. In the case of the sweet sorghum hybrid, the sugar content was measured by refractometry, while in the case of maize, as the variety was a sweet corn variety, the corn+cob weight was the main yield parameter. The yield results of the experiment are shown in *Figure 2,3*.

In order to get information on the water use efficiency of the investigated crops different indexes were calculated from

**Figure 1: Evapotranspiration from the lysimeters after the PV-treatment (18th June-12th August)****Figure 2: Sugar content of sorghum in the lysimeter experiment****Figure 3: The yield of maize in the lysimeter experiment**

the yield data and the different components of the water balance. These indexes are summarised in *Table 3*.

Discussion

Although the absolute values of evapotranspiration were higher, the water use efficiency ($ET/water\ input$) of sorghum was found better when irrigation was applied (*Table 3*). These values also show the negativity of the water balance for each treatment. We could not figure out significant effect of Pentakeep-V on the water use efficiency, neither in the case of sorghum, nor of maize, probably due to the fact that the water inputs of the treatments were not so different due to the quite high amount of the natural rainfall. Nevertheless we have to add that a previous PV-treatment experiment with 3 sorghum hybrids under drier circumstances showed different results (ZSEMBELI et al. 2008).

On the base of the yield data (*Figure 2,3*), it can be concluded that both irrigation and PV-treatment resulted in higher sugar content of sorghum. The sugar content of the PV-treated crop was almost double of the non-treated one. Maize also repaid for irrigation (12.7% extra yield compared to the control) and even more for the PV-treatment: 34% higher yield than the control and 19% higher than the purely irrigated versions had.

The *evapotranspiration/sugar content* index shows us how much water was used by sorghum to generate sugar content of 1 per cent. According to the relevant values of this index (*Table 3*) much less water is needed to build up the same

Table 3: Water use efficiency indexes calculated for the lysimeter experiment

Index	Sorghum Control	Sorghum Irrigated + PV	Sorghum Irrigated	Maize Control	Maize Irrigated	Maize Irrigated + PV
ET/water input (%)	113	105	104	105	103	106
ET/ sugar content (mm/%)	55.5	43.9	32.1	-	-	-
ET/corn yield (mm kg ⁻¹)	-	-	-	329.7	329.6	283.4

amount sugar in the plant if PV is applied. Unfortunately we could not taken the total sugar content into account as no total dry biomass weight was measured. Nevertheless another, not measured experiences can be reported: earlier drying, hence earlier ripening of sorghum was found in the case of the PV-treated variant, which was very visible directly before the harvest on 12th August, 2008. The earlier drying of the crop was obviously detected in the green biomass weights: the weight of the biomass of the irrigated+PV-treated sorghum was only 70% of the irrigated plants.

The *evapotranspiration/corn yield* index (Table 3) determined for the maize gives an idea about the amount of water consumed by the maize plants to generate 1 kilogram of corn yield. Though irrigation resulted in extra yield, the water use efficiency in this respect was not better than of the control plants, while the PV-treated maize plants needed approximately 16% less water to build up 1 kg of corn compared to the other two treatments.

On the base of the results introduced above we can conclude that new information was gained concerning the effect of Pentakeep-V on the water balance and water use efficiency of sweet sorghum and sweet maize in irrigated and non-irrigated conditions. The quantified results show an increased sugar content in the case of sorghum and increased corn yield in the case of maize due to the application of Pentakeep-V. One of the lessons of the assessment of the results is that the moisture content of the plants should have been monitored regularly in order to have an idea about the supposed ripening effect of this foliar fertiliser. In the

framework of the researches based on the lysimeter station at Karcag further investigations are planned to reveal more details about the effects of Pentakeep-V.

Acknowledgement

This research was partly carried out in the framework of the project No. A-17/2006 supported by the National Office for Research and Technology

Literature

- BINDU, R.C. and V. VIVEKANANDAN, 1998: Role of aminolevulinic acid in improving biomass production in *Vigna catjang*, *V. mungo*, and *V. radiata*. *Physiol. Plant.* 41:211-215.
- DRAZIC, G. and N. MIHAILOVIC, 1998: Chlorophyll accumulation in black pine seedlings treated with 5-aminolevulinic acid. *Physiol. Plant.* 41:277-280.
- YOSHIDA, R., S. WATANABE, Y. FUKUTA, K. IWAI and T. TANAKA, 2003: Effect of 5-aminolevulinic acid on growth and nutrient uptake of leaf vegetables in alkaline soil. *Porc. Plant Growth Regulation Soc. Amer.* 30:142-143.
- ZSEMBELI, J., G. KOVÁCS and A. MURÁNYI, 2008: Effect of PENTAKEEP-V on the evapotranspiration and yield of Sorghum hybrids, monitored in precision weighing lysimeters. *Cereal Research Communications*. Vol. 36. 795-798.
- ZSEMBELI, J., 2003: Methodological assessment of a weighing lysimeter experiment. 10. *Gumpensteiner Lysimeterstagung*, Austria, 239-240.
- ZSEMBELI, J., 2006: Lysimeters – tools for the development of soil cultivation researches. *Natural Resources and Sustainable Development, International Symposium, Oradea, Romania*, 427-434.

Tracerhydrologie in der Lysimetrie

Johann Fank^{1*}

Zusammenfassung

Die hydrologische Markierungstechnik setzt Markierungsmittel ein, um fließendes Wasser verfolgen zu können. Die Verfolgung des Wasserpfades im Untergrund durch die Messung der Tracer erlaubt eine direkte Einsicht in die räumliche und zeitliche Verbreitung des eingesetzten Stoffes unter bekannten Rahmenbedingungen.

Wesentliche Ziele des Einsatzes von Tracern in der ungesättigten Zone sind:

- Vergleich von Sickergeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Horizonten des Bodens und der ungesättigten Zone unter ungestörten und gestörten Bedingungen,
- Vergleich des Transportes von Wasser und von gelösten Stoffen durch den Einsatz mehrerer Markierungsmittel,
- Vergleich des Verhaltens der eingesetzten Tracer mit dem Transportverhalten von Schadstoffen,
- Überprüfung bzw. Verifizierung von Modellkonzepten über Stofftransportprozesse in der ungesättigten Zone.

Anhand von Beispielen des Einsatzes tracerhydrologischer Methoden in der Lysimetrie wird deren Bedeutung für die Ergebnisinterpretation vorgestellt und diskutiert. Zentrale Punkte sind dabei:

- Überprüfung von Lysimetern hinsichtlich des Transportverhaltens
- Erfassung präferentieller Flüsse
- Bestimmung von Transportparametern in Lysimetern

- Erarbeitung von Massenflussbilanzen.

Schlagwörter: Lysimeter, Hydrologie, Tracer, Stofftransport

Summary

Tracer-hydrological methods are used to trace flowing water in subsurface regions. Measurement of tracer concentration gives direct insight on spatial and time dependent distribution at well-known boundary conditions.

Investigation aims with the use of tracers in the unsaturated zone are:

- Comparison of seepage water velocity in different horizons of soil and unsaturated zone under disturbed and undisturbed conditions
- Comparison of water transport and solute transport using different tracers
- Comparison of tracer properties with transport properties of contaminants
- Validation of conceptual models on transport processes in the unsaturated zone.

Examples on the use of tracer methods at lysimeter test sites will show their relevance for the interpretation of investigation results. Main topics are:

- Validation of lysimeters in term of water movement and solute transport
- Differentiation between water movement and (contaminant) transport
- Detection and quantification of preferential flow
- Determination of mass balances in lysimeters.

Keywords: lysimeter, hydrology, tracer, mass transport

Einleitung

Wasserbewegung und Stofftransport in den wasserungesättigten Deckschichten fluvioglazialer Grundwasserleiter werden aufgrund ihrer Bedeutung für den diffusen Eintrag von Stickstoff seit mehreren Jahrzehnten unter Berücksichtigung regionaler meteorologischer und hydrogeologischer Faktoren untersucht. Ein wesentliches Werkzeug zur Gewinnung von prozessorientierten Datensätzen ist dabei der Einsatz von Lysimetern.

Die Fließbewegung und damit die Verweilzeit des Sickerwassers wird vom schichtspezifischen Wassergehalt und den herrschenden hydraulischen Potentialen gesteuert, welche neben meteorologischen Größen und unterschiedlichen

Landnutzungsformen auch von bodenphysikalischen Parametern abhängen, deren in situ Erfassung in grobklastischen Sedimenten auch heute noch auf erhebliche messtechnische Probleme stößt, sodass die Ergebnisse von Modellberechnungen der Wasserbewegung und des Stofftransportes in der ungesättigten Zone einer intensiven Überprüfung anhand von Plausibilitätskontrollen bedürfen.

Die hydrologische Markierungstechnik setzt Markierungsmittel ein, um fließendes Wasser verfolgen zu können. Die Verfolgung des Wasserpfades im Untergrund durch die Messung der Tracer erlaubt eine direkte Einsicht in die räumliche und zeitliche Verbreitung des eingesetzten Stoffes unter bekannten Rahmenbedingungen.

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

* Ansprechpartner: johann.fank@joanneum.at

Tracerhydrologische Untersuchungen in der ungesättigten Zone

Der Wasserfluss und der Stofftransport in der Ungesättigten Zone war Ziel vieler Untersuchungen. In einer großen Zahl von Beiträgen wurde die Bedeutung des präferentiellen Flusses hervorgehoben (SCHOEN et al. 1999; VAN DER HOVEN et al. 2002). In den Bodenwissenschaften wurden Farbstoffe als Tracer zur Veranschaulichung von Fließpfaden intensiv eingesetzt (KUNG et al. 2000; YASUDA et al. 2001; ÖHRSTRÖM et al. 2004). Einen Überblick über die Verwendung von Farbstoffen in der ungesättigten Zone geben FLUY und WAI (2003). JABRO et al. (1994) und auch FANK & BERG (2001) zeigen in unterschiedlichen Versuchen, dass Bromid einen guten Tracer zur Untersuchung von Wasserbewegung und Stofftransportprozessen und zur Erfassung präferentieller Flüsse darstellt. Auch natürliche Isotope wie Deuterium, Tritium und ^{18}O wurden in Studien zum Wasserfluss eingesetzt (MACIEJEWSKI et al. 2006; MALOSZEWSKI et al. 2006; MALI et al. 2006). Neueste Technologien erlauben die Quantifizierung von Stoffflüssen in Lysimetern mittels 3D - Electrical resistivity tomography (KOESTEL et al. 2008).

Beispiele für Tracerexperimente

Zur Veranschaulichung der Bedeutung von Stofftransport-Experimenten unter definierten Rahmenbedingungen für das Verständnis der in der ungesättigten Zone ablaufenden Prozesse werden in Folge einige Beispiele von in den letzten Jahren durchgeführten Markierungsversuchen unterschiedlicher Zielsetzung vorgestellt.

Erfassung präferentieller Flüsse

Besondere Bedeutung gewinnt die Tracerhydrologie in der ungesättigten Zone zur Visualisierung von Makroporenflüssen in der ungesättigten Zone. Markierungsversuche zur Visualisierung und Bewertung von präferenziellen Wasserwegigkeiten bzw. Stoffflüssen wurden einerseits in einem Kleinzugsgebiet im oststeirischen Hügelland

(*Abbildung 1*) unter forstlicher Nutzung bzw. am Versuchsfeld Wagna (*Abbildung 2*) unter ackerbaulicher Nutzung durchgeführt.

In beiden Fällen wurde eine etwa 3 m^2 große Oberfläche mit Brillantblau – ein Lebensmittelfarbstoff – beregnet (Intensität etwa 40 mm in zwei Stunden) und der darunter liegende Bodenkörper im Ausmaß von $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ nach dem Schema in *Abbildung 1* herauspräpariert. Durch den Färberversuch wurden bevorzugte Fließmuster in der ungesättigten Zone klar dokumentiert. Während an den fünf untersuchten Standorten im Einzugsgebiet Pöllau (THEURETZBACHER 1997) durch diese Untersuchungen die Bedeutung der Geschichte der Landnutzung für Transportprozesse klar herausgearbeitet werden konnte, unternahmen BERG et al. (1999) und BERG et al. (2001) den Versuch den Makroporenfluss über die Farbtintensität auch zu quantifizieren. Bei letzteren insgesamt 8 Versuchsstandorten konnte die wesentlich stärkere Bedeutung von Bio-Makroporen im Feinbodenhorizont gegenüber den Inhomogenitäten im unterlagernden Kies für den präferentiellen Fluss herausgearbeitet werden.

Bestimmung von Verweilzeiten des Wassers in der Ungesättigten Zone

Grundlage jeder Prognose von Wasserbewegung und Stofftransport in der ungesättigten Zone ist die Kenntnis von Transportparametern. In *Abbildung 3* ist die Ermittlung der mittleren Verlagerungsgeschwindigkeit des Wassers in der ungesättigten Zone aus der Schwerpunktkonzentration der Tracerdurchbruchkurven an Messstellen in unterschiedlichen Tiefen der Forschungsstation Wagna dargestellt. Dabei wurden nach flächenhafter Beregnung mit $\sim 40\text{ mm}$ Wasser und darin gelöstem Tracer (NaBr) die Tracerdurchbruchkurven in Lysimetern und Sickerwassersammlern in unterschiedlichen Tiefen aufgenommen und daraus die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit aus der Schwerpunktkonzentration ermittelt.

Dargestellt ist der Vergleich der Ergebnisse zweier Bromid-Tracerexperimente unter unterschiedlichen hydrologischen

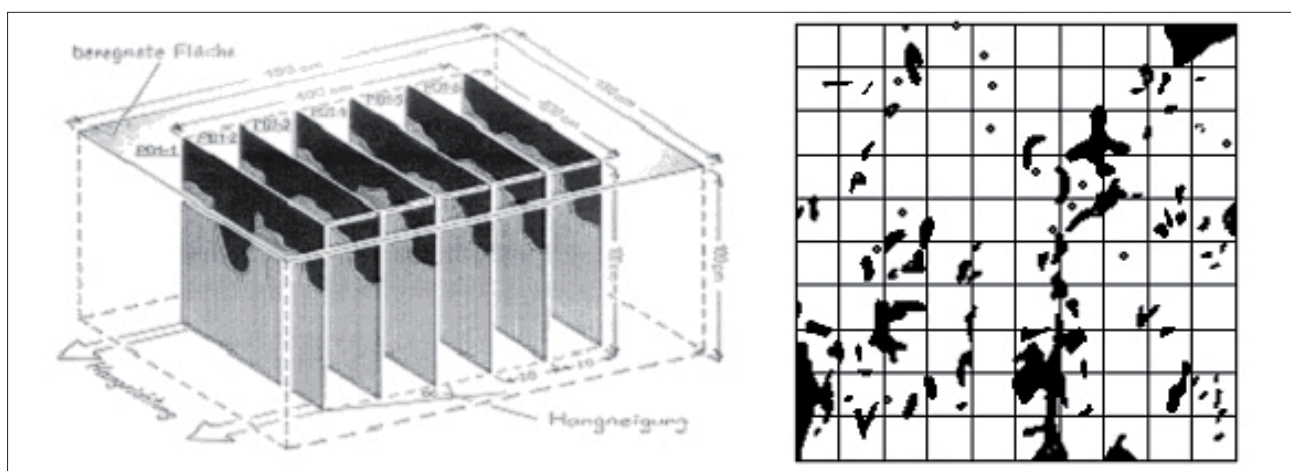


Abbildung 1: Tracerversuche zur Visualisierung bevorzugter Fließwege im Oststeirischen Hügelland (THEURETZBACHER 1997): schematische Darstellung der Aufarbeitung des markierten Bereiches (linkes Bild) und Dokumentation bevorzugter Fließwege bis 1 m Tiefe an einem Waldstandort, 24 Stunden nach Traceraufbringung (rechtes Bild).

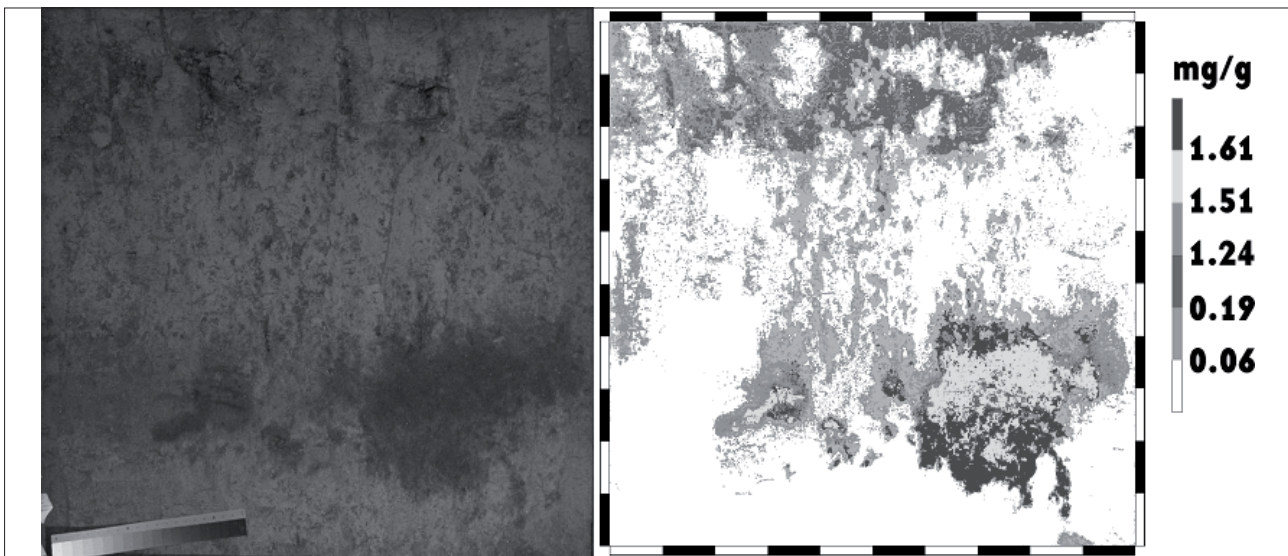


Abbildung 2: Quantifizierung des Stofftransportes in bevorzugten Fließwegen mit Hilfe von Auswerteverfahren der digitalen Bildverarbeitung an einem Ackerstandort bis in eine Tiefe von 1 m, 24 Stunden nach Traceraufbringung (BERG et al. 1999 und BERG et al. 2001).

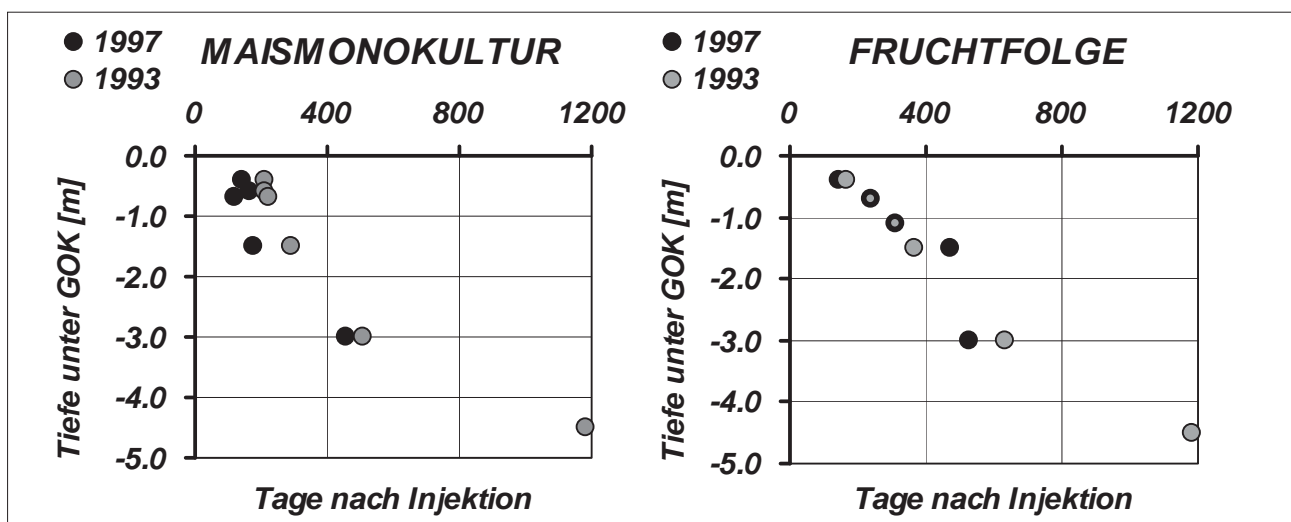


Abbildung 3: Ermittlung der mittleren Verlagerungsgeschwindigkeit des Wassers in der ungesättigten Zone aus der Schwerpunktkonzentration der Tracerdurchbruchskurven an Messstellen in unterschiedlichen Tiefen: Vergleich der Ergebnisse zweier Bromid-Tracerversuche unter unterschiedlichen hydrologischen Rahmenbedingungen.

Rahmenbedingungen: Während der Versuch 1993 im April bei beginnender Vegetationsperiode durchgeführt wurde, erfolgte die Tracerapplikation des Versuches 1997 im Dezember, um in erster Linie Evapotranspirationsverluste der Tracerlösung vermeiden zu helfen. Trotz dieser unterschiedlichen Bedingungen zeigt die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit in beiden Fällen nahezu identes Verhalten – ein Indiz dafür, dass aufgrund der langen Dauer der Prozesse die im Detail großen Unterschiede im Transportverhalten in Abhängigkeit von den hydrometeorologischen Rahmenbedingungen bei Betrachtung mittlerer Verhältnisse in vielen Fällen wieder verloren gehen.

Als wesentliches Ergebnis der Versuche konnte auch klar dokumentiert werden, dass die mittlere Verweildauer eines konservativen Stoffes von der Geländeoberfläche bis in das

Grundwasser (Flurabstand im Mittel 4,5 m) bei etwa 3,2 Jahren liegt. Diese Verweilzeit ist in Summe unabhängig von den kurzfristigen unterschiedlichen hydrometeorologischen Verhältnissen unter den Klimabedingungen der südöstlichen Steiermark. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass jegliche Maßnahmen, die zur Verringerung des diffusen Stoffaustuges in das Grundwasser gesetzt werden, eine Verzögerung bis zu deren Auswirkung von zumindest 3 Jahren haben.

Naturgemäß ist in den oberflächennahen Schichten des Bodens und der ungesättigten Zone die Verweilzeit von Stoffen relativ stark von den aktuell herrschenden meteorologischen Verhältnissen, den unterschiedlichen Böden und den differenzierten Bewirtschaftungsbedingungen abhängig. In diesem Fall ist die Auswertung von Tracerversuchen in Form von Konzentrations-Zeitdiagrammen nur

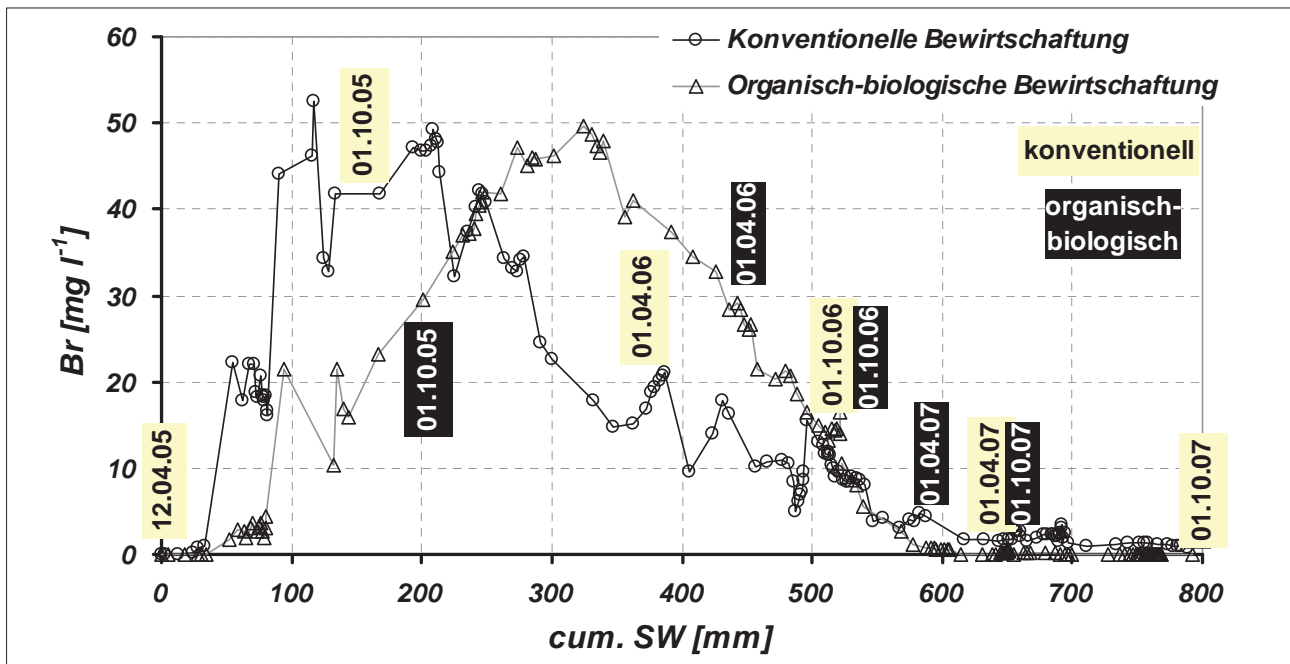


Abbildung 4: Tracerkonzentration in Relation zur kumulierten Sickerwassermenge mit Halbjahres-Zeitpunkten der Probenahme an zwei Präzisionslysimetern in Wagna.

wenig aussagekräftig, weil diese - bei zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführten Experimenten - ein unterschiedliches Ergebnis zeigen. Eine andere mögliche Art der Auswertung ist die Ermittlung des Verweilzeitvolumens von Lysimetern, wie dies in *Abbildung 4* dargestellt ist. Für zwei Präzisionslysimeter am Versuchsfeld Wagna wurde dabei die Bromidkonzentration aus einer Traceraufbringung am 12.04.2005 gegen die kumulierte Sickerwassermenge aufgetragen. Das Lysimeter unter konventioneller Bewirtschaftung weist eine Feinbodenmächtigkeit von 70 cm, das unter organisch biologischer Bewirtschaftung eine solche von 110 cm auf. Die beiden Lysimeter zeigen aufgrund der unterschiedlichen Bodenverhältnisse und der unterschiedlichen Bewirtschaftung deutliche Unterschiede, als gemeinsames Ergebnis ist aber abzuleiten, dass in beiden Lysimetern nach einer Sickerwassermenge von etwa 600 mm zu einem bestimmten Zeitpunkt eingetragene konservative Stoffe, die Lysimeter mit einer Tiefe von 190 cm wieder verlassen haben. Auf der Seite mit konventioneller Bewirtschaftung hat die Hauptmasse des Stoffes bereits nach etwa 100 bis 200 mm, auf der organisch-biologisch bewirtschafteten Seite nach etwa 300 mm Sickerwasser das Lysimeter wieder verlassen. Diese Ergebnisse werden dazu verwendet, gemessene Stoffkonzentrationspeaks (z.B. Nitrat) entsprechenden Inputereignissen (z.B. Düngung) zuzuordnen. Der Zeitraum zwischen Input und Output ist variabel und stark von den Witterungsverhältnissen abhängig. Die an den Durchbruchkurven markierten Halbjahres - Zeitpunkte zeigen die Auswirkung unterschiedlicher Bewirtschaftung und damit unterschiedlichen Wasserrückhalt der beiden Lysimeter an: die starke Verzögerung des Traceroutputs auf der organisch-biologischen Seite im Bereich ab einer Sickerwassermenge von 500 mm resultiert aus dem höheren Wasserbedarf des Futtergrünlandes im Vergleich zum Mais auf der konventionell bewirtschafteten Seite. Diese höhere

Verdunstungsleistung über die Vegetationsperiode führt naturgemäß zu einer Verringerung des Sickerwasserflusses.

Überprüfung von Randflusseffekten durch die Monolithextraktion

Eine wesentliche Frage bei der Errichtung von monolithisch gestochenen Lysimetern ist üblicherweise die Ausbildung von präferentiellen Wasserwegigkeiten entlang des Lysimeterandes durch das jeweils gewählte Extraktionsverfahren. Um diese Frage an den im Jahre 2004 neu errichteten wägbaren monolithischen Präzisions-Unterdrucklysimetern am Versuchsfeld Wagna beantworten zu können, wurde am 12.04.2005 auf den beiden Lysimetern ein Doppel-Tracerversuch durchgeführt. Die Oberfläche des kreisförmigen Lysimeters wurde in zwei Kreisringsegmente zu je 50 % der Lysimeterfläche aufgeteilt. Im äußeren Kreissegment wurde Deuterium, im inneren Kreissegment Natriumbromid aufgebracht und die Verlagerung der beiden Tracer unter natürlichen Niederschlags- und Witterungsbedingungen am Lysimeterabfluss untersucht. Der Vergleich der Tracerdurchgangskurven zu den Probenahmeterminen für Deuterium für die beiden Lysimeter ist in *Abbildung 5* dargestellt.

Die Ergebnisse der Tracerversuchsauswertung zeigen, dass die beiden unterschiedlichen Tracer in beiden Fällen ein praktisch identes Verhalten zeigen: Mehr als einen Monat nach Aufbringen der Tracer ist bei beiden Tracern auf beiden Lysimetern ein Anstieg der Durchbruchkurven zu sehen. Da das aufgebraute Deuterium im Vergleich zum Bromid keinesfalls schneller das untere Ende des Lysimeters erreicht, kann das Vorliegen von signifikanten präferentiellen Wegigkeiten an der Lysimeterwandung praktisch ausgeschlossen werden. Das v.a. am organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeter zu erkennende frühere Auftreten von Bromid im Vergleich zu Deuterium ist nicht auf eine raschere Trans-

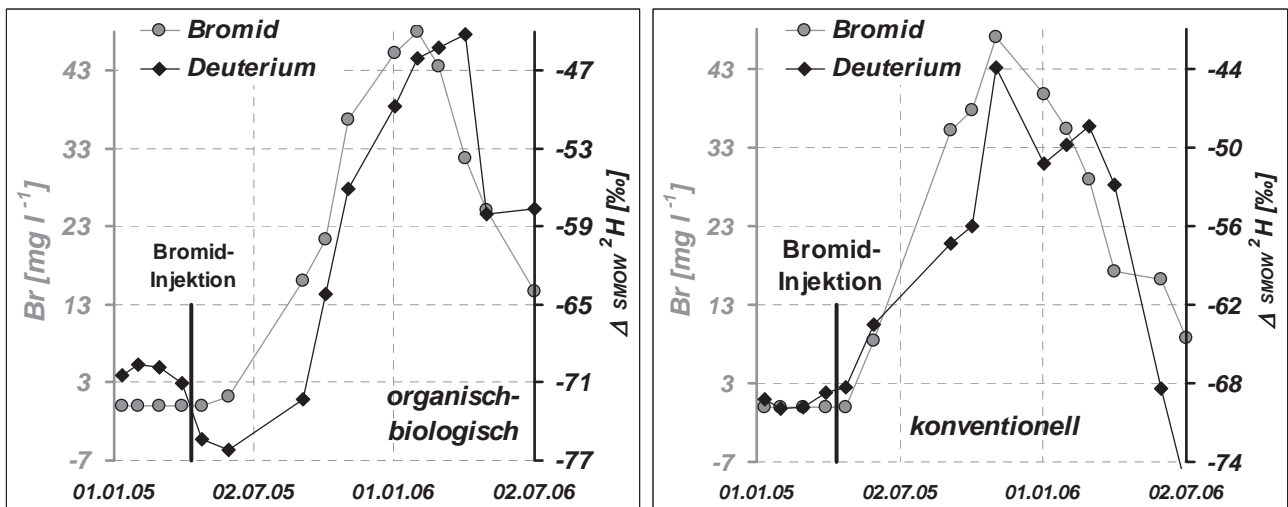


Abbildung 5: Vergleich der Tracer-Konzentrationskurven aus einem Doppel-Tracorexperiment an zwei unterschiedlich bewirtschafteten Präzisionslysimetern in Wagna.

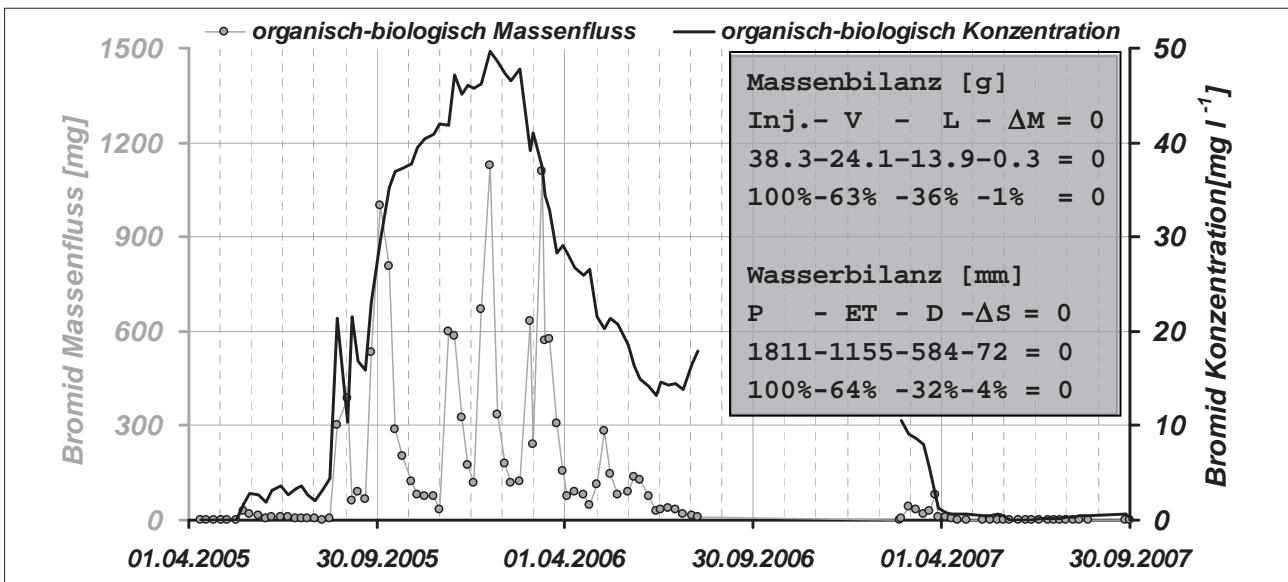


Abbildung 6: Wasser- und Bromid-Massenbilanz des organisch-biologisch bewirtschafteten Präzisionslysimeters in Wagna.

portgeschwindigkeit (Anionenausschluss) zurückzuführen, sondern resultiert aus der schwankenden, im Detail aber nicht bekannten Hintergrundkonzentration von Deuterium im Sickerwasser. Daraus ist auch deutlich der Vorteil von künstlichen Tracern im Vergleich zu natürlich im System vorhandenen Stoffen mit einer variablen aber im Detail unbekanntem Hintergrundkonzentration zu sehen.

Erarbeitung von Massenflussbilanzen

Da ein Lysimeter ein geschlossenes System darstellt, eignen sich diese bei entsprechender Ausstattung und Beobachtung auch, um neben der Wasserbilanz die Massenflüsse im Lysimeter als Grundlage für die Validierung von Stofftransportmodellen zu berechnen.

In *Abbildung 6* ist die Wasser- und Bromid-Massenbilanz des organisch-biologisch bewirtschafteten Präzisionslysimeters am Versuchsfeld Wagna aus dem Tracerversuch vom 12.04.2005 dargestellt. Deutlich ersichtlich ist, dass trotz

der relativ homogenen Konzentrationskurve der Bromid-Massenfluss sehr stark von Sickerwasserereignissen und damit von Niederschlags-Inputereignissen gesteuert wird. Um eine geschlossene Massenbilanz erstellen zu können, wurde neben der Analyse des Sickerwassers auch die auf dem Lysimeter aufwachsende Pflanzendecke auf ihren Gehalt an Bromid analysiert. Entgegen den verfügbaren Literaturangaben war dabei festzustellen, dass signifikante Bromidmengen durch die Pflanzen aufgenommen worden waren. Das Ergebnis der Auswertungen nach Abschluss der Bromiddurchgänge im Lysimeterabfluss zeigte:

- Dass unter Berücksichtigung der Pflanzenaufnahme die Tracer-Wiederfindungsrate bei mehr als 97 % zu liegen kam;
- Dass die Pflanzenaufnahme von Bromid praktisch ident war der Evapotranspiration;
- Dass nur etwas mehr als 30 % der ausgebrachten Stoffmasse in Richtung Grundwasser abtransportiert wurde

und die nach Ende des Untersuchungszeitraumes im Lysimeter verbleibende Stoffmasse insgesamt weniger als 1 % der applizierten Menge ausmacht.

- Der Vergleich der Wasserbilanz mit der Bromid-Stoffbilanz zeigt eine praktisch idente Verteilung auf die einzelnen Bilanzglieder.

Die Wasserfluss- und Stoffverlagerungsdaten, deren Verhalten auch innerhalb des Lysimeters einerseits in Form von Aufzeichnungen des Wassergehaltes über TDR-Sonden, andererseits in Form von Saugkerzenproben in unterschiedlichen Messtiefen untersucht wird, bildet einen geschlossenen Datensatz zur Validierung von Wasser- und Stofftransportmodellen für die ungesättigte Zone. Aufgrund der klar definierten Randbedingungen muss ein Modell, das den Anspruch erhebt, auf der Punkt- bis Feldskala die Wasser- und Stoffflüsse abbilden zu können, in der Lage sein, derartige Messdaten einwandfrei abzubilden. Erste Modellrechnungen mit HYDRUS 1D zeigten dabei Defizite in der Definition der Wurzelverteilung einerseits und in der Behandlung von Zeiten mit Bodenfrost andererseits auf.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Tracerexperimente auch in der ungesättigten Zone von enormer Bedeutung sind und vor allem – wie an einigen Beispielen gezeigt werden konnte – für folgende Fragestellungen eingesetzt werden sollten:

- Zur Erfassung präferentieller Flüsse und zur Beurteilung ihrer Relevanz für eine modellhafte Bewertung von Wasser- und Stofffluss.
- Zur Bestimmung von Verweilzeiten und von Verweilzeitvolumina als Grundlage zur Transport – Parametergewinnung für die Modellkalibration.
- Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit von eingesetzten Messsystemen, dargestellt am Beispiel der Bewertung von Randflusseffekten.
- Zur Erarbeitung von geschlossenen Wasser- und Massenflussbilanzen unter Berücksichtigung der Pflanzenaufnahme. Auch diese Daten dienen als Grundlage für die Validierung von Modellen der Wasser- und Stoffbewegung in der ungesättigten Zone. Modelle sollten jedenfalls in der Lage sein den Transport konservativer Tracer unter genau bekannten Randbedingungen abzubilden.

Tracerversuche stellen somit eine wichtige Ergänzung zu Lysimetermessungen und zur Modellierung dar und sollten v.a. im Feldversuch wesentlich intensiver eingesetzt werden.

Literatur

- BERG, W., B. CENCUR-CURK, J. FANK, F. FEICHTINGER, G. NÜTZMANN, W. PAPESCH, V. RAJNER, D. RANK, S. SCHNEIDER, K.-P. SEILER, K.-H. STEINER, E. STENITZER, W. STICHLER, B. TRCEK, Z. VARGAY, M. VESELIC and H. ZOJER, 2001: Tracers in the Unsaturated Zone. *Beiträge zur Hydrogeologie*, 52, 7-102, Graz.
- BERG, W., A. LEIS and J. FANK, 1999: Digitale Bildverarbeitung als Hilfsmittel zur Quantifizierung von bevorzugten Fließwegen in der ungesättigten Zone. - Bericht der BAL über die 8. Lysimetertagung "Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft" vom 13. bis 14. April 1999, 139-141, Gumpenstein.
- FANK, J. and W. BERG, 2001: Tracers in the unsaturated zone-results from experimental sites-test site Leibnitz, Styria, Austria. In: ATH (ed) *Tracer studies in the unsaturated zone and groundwater (investigations 1996-2001)*. *Beiträge zur Hydrogeologie* 52:25-38.
- FLURY, M. and N.N. WAI, 2003: Dyes as Tracers for Vadose Zone Hydrology. *Rev. Geophys.*, 41(1), 1002, 2:1-37.
- JABRO, J.D., E.G. LOTSE, D.D. FRITTON and D.E. BAKER, 1994: Estimation of preferential movement of bromide tracer under field conditions. *J Hydrol* 156:61-71.
- KOESTEL, J., A. KEMNA, M. JAVAUX, A. BINLEY and H. VEREECKEN, 2008: Quantitative imaging of solute transport in an unsaturated and undisturbed soil monolith with 3-D ERT and TDR, *Water Resour. Res.*, 44, W12411, doi:10.1029/2007WR006755.
- KUNG, K.J.S., T.S. STEENHUIS, E.J. KLADIVKO, T.J. GISH, G. BUBENZER and C.S. HELING, 2000: Impact of preferential flow on the transport of adsorbing and non-adsorbing tracers. *Soil Sci Soc Am J* 64:1290-1296.
- MACIEJEWSKI, S., P. MALOSZEWSKI, C. STUMPP and D. KLOTZ, 2006: Modelling of water flow through typical Bavarian soils (Germany) based on lysimeter experiments: 1. Estimation of hydraulic characteristics of the unsaturated zone. *Hydrol Sci J* 51(2):285-297.
- MAIL, N., J. URBANC and A. LEIS, 2006: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environ. Geol.* 41 (8), 1401-1412.
- MALOSZEWSKI, P., S. MACIEJEWSKI, C. STUMPP, W. STICHLER, P. TRIMBORN and D. Klotz, 2006: Modelling of water flow through typical Bavarian soils (Germany) based on lysimeter experiments: 2. Environmental deuterium transport. *Hydrol Sci J* 51(2):298-313.
- ÖHRSTRÖM, P., Y. HAMED, M. PERSSON and R. BERNDTSSON, 2004: Characterizing unsaturated solute transport by simultaneous use of dye and bromide. *J Hydrol* 289:23-35.
- SCHOEN, R., J.P. GAUDET and T. BARIAC, 1999: Preferential flow and solute transport in a large lysimeter, under controlled boundary conditions. *J Hydrol* 215:70-81.
- THEURETZBACHER, H., 1997: Die Inhomogenität natürlicher Böden - dargestellt am Kleineinzugsgebiet Höhenhansl / Pöllau. In: Bericht der BAL über die 7. Gumpensteiner Lysimetertagung "Lysimeter und nachhaltige Landnutzung", 51-54, Gumpenstein.
- VAN DER HOVEN, S.J., D.K. SOLOMON and G.R. MOLINE, 2002: Numerical simulation of unsaturated flow along preferential pathways: implications for the use of mass balance calculations for isotope storm hydrograph separation. *J Hydrol* 268:214-233.
- YASUDA, H., R. BERNDTSSON, H. PERSSON, A. BAHRI and K. TAKUMA, 2001: Characterizing preferential transport during flood irrigation of a heavy clay soil using the dye Vitasyn Blau. *Geoderma* 100:49-66.

Lysimeteruntersuchungen zur Bestimmung von Bodenwasserhaushaltsparametern eines Auenstandorts im Bereich der Mittelelbe, Deutschland

Holger Rupp^{1*}, Ralph Meißner¹, Juliane Seeger¹ und Dörthe Bethge-Steffens²

Zusammenfassung

Auen werden unter den klimatischen Bedingungen Nordostdeutschlands bei einem langjährigen Mittelwert des Niederschlags von 560 mm oftmals als hydrologische Zehrgebiete ohne nennenswerte Grundwasserneubildung angesehen. Zur Messung der Bodenwasserhaushaltsbilanz von Auenstandorten, die gleichzeitig als Hotspot biogeochemischer Stoffumsetzungsprozesse anzusehen sind, wurde ein wägbares Grundwasserlysimeter entwickelt. Die an ungestört gewonnenen Bodenmonolithen durchgeführten Untersuchungen belegen die Eignung der Grundwasserlysimeter für die direkte Messung der Bodenwasserhaushaltsparameter von Feuchtgebietsstandorten. Im Ergebnis der Lysimetermessungen konnte eine mittlere jährliche Grundwasserneubildungsrate von 34 mm belegt werden. Des Weiteren wurde auf der Grundlage der vorliegenden Lysimeterergebnisse der Bodenwasserhaushalt mit dem Modell HYDRUS 1D invers modelliert.

Schlagwörter: Bodenwasserhaushalt, wägbares Grundwasserlysimeter, Flussau, inverse Modellierung, Grundwasserneubildung, HYDRUS 1D

Summary

Under the climatic conditions of North-East Germany with an average annual precipitation of 560 mm floodplain sites were often considered as hydrological depletion area without groundwater recharge. A weighable groundwater lysimeter filled with floodplain soil monoliths was developed to measure the soil water balance of these sites being simultaneously hotspots of biogeochemical cycling in landscapes. The weighable groundwater lysimeter turned out for being an appropriate experimental set up for the direct measurement of water balance parameter. The lysimeter investigations resulted in an average annual groundwater recharge of 34 mm. The water flux was modeled with HYDRUS 1D which was inversely parameterized based on the results of the weighable groundwater lysimeter.

Keywords: water balance, weighable groundwater lysimeter, floodplain, inverse modeling, groundwater recharge, HYDRUS 1D

Einleitung

Flussauen werden unter den klimatischen Bedingungen Nordostdeutschlands mit einem langjährigen Mittelwert des Niederschlags von 560 mm oftmals als hydrologische Zehrgebiete mit negativer klimatischer Wasserbilanz (d.h. ohne wesentliche Grundwasserneubildung) angesehen. Gleichzeitig gelten diese Standorte als Hotspots für biogeochemische Stoffumsetzungsprozesse. *In situ* gemessene Grundwasserflurabstände machen mit Amplituden von 2 m über der Geländeoberkante (Überflutung) und 3 m unter der Geländeoberkante (Niedrigwassersituationen) auf die hohe Wasserstandsdynamik von Auen aufmerksam. Vor allem diese hohe Variabilität der hydrologischen Bedingungen als spezifische Eigenschaft von Flussauen ist für die ablaufenden Stofftransport- und -transformationsprozesse von herausragender Bedeutung. So dominieren in Trockenperioden oxidative, in Überflutungsphasen dagegen reduktive Prozesse. Diese extremen Randbedingungen haben daneben auch erhebliche Auswirkungen auf die Boden genesis (RINKLEBE 2004). Als Hauptparameter für die Charakterisierung der zu erwartenden Stoffflüsse in Böden sind die Grundwasserneubildung, der kapillare Aufstieg und die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser anzusehen

(MEISSNER et al. 2000a, SCHWARTZ 2001). Während Informationen zur Konzentration relevanter Inhaltsstoffe beispielsweise mit Hilfe von Saugkerzen vergleichsweise einfach bestimmt werden können, ist die Diagnose der dazugehörigen Wasserflüsse problematisch. Konventionell werden diese Parameter mit Hilfe von bodenhydrologischen Messplätzen bzw. mit Bodenwasserbilanzmodellen bestimmt (DISSE 1995). Die gegenwärtig verwendeten Bilanzierungsansätze basieren auf Verfahren zur Berechnung der Evapotranspiration, die jedoch für Flussauenstandorte nicht verifiziert sind. Auch die *in situ* Messung bodenhydrologischer Parameter in Auenböden ist diffizil, da sich hier besonders in Perioden mit hohem Verdunstungsanspruch bei gleichzeitig hohen Grundwasserständen stationäre Bedingungen einstellen können. Wasserflüsse durch das Bodenprofil können in diesem Fall mit konventioneller Messtechnik (Tensiometer und FDR- Sonden) nicht mehr exakt bestimmt werden.

Zur Ableitung von belastbaren hydrologischen Standortparametern für Auenstandorte wurde im Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ ein wägbares Grundwasserlysimeter mit automatischer Grundwasserstandsregelung entwickelt (MEISSNER et al. 2000b, c). Der Grundwas-

¹ Helmholtz Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Bodenphysik, Lysimeterstation Falkenberg, Dorfstr. 55, D-39615 FALKENBERG

² Ingenieurbüro Bethge, Dorfstr. 55, D-39629 BISMARCK (ALTMARK)/PORITZ

* Ansprechpartner: holger.rupp@ufz.de

serstand im Lysimeter wird dabei kontinuierlich dem *in situ* am Entnahmestandort gemessenen Grundwasserstand angepasst. Im Ergebnis umfangreicher Tests konnte die Eignung dieses Speziallysimeters für Bodenwasserhaushaltsuntersuchungen von Auenböden belegt werden (BETHGE-STEFFENS 2008). Dementsprechend bestehen die Ziele dieser Arbeit darin,

- die Parameter des Bodenwasserhaushalts der untersuchten Bodenmonolithe mit Hilfe des wägbaren Grundwasserlysimeters exakt zu bestimmen und
- basierend auf den Lysimeterergebnissen (invers) den Bodenwasserhaushalt von Auenstandorten als Grundlage für die Übertragung der Lysimeterergebnisse auf höhere Skalenebenen (zum Beispiel Mesoskala) zu modellieren.

Material und Methoden

Die *in situ* Untersuchungen wurden an einem Auenstandort der Elbe unweit von Schönberg Deich (BR Deutschland, nördliches Sachsen-Anhalt) durchgeführt. Der am linken Flussufer zwischen Flusskilometer 435 und 440 gelegene Standort ist repräsentativ für den Bereich der Mittel-Elbe. Die Elbauen verfügen hier über ein Relief, das aus einzelnen Flut-Kanälen und Plateaus besteht. Ein bodenhydrologischer Messplatz wurde auf einem Plateau installiert, das sich etwa in 250 m Entfernung vom Flussbett der Elbe befindet. Die Höhe dieses Standorts beträgt ca. 24,3 m ü. NN. Statistisch gesehen wird dieser Standort mit einem 10-jährigen Wiederkehrintervall bei Wasserstand von 25,2 m ü. NN überflutet (FRIESE et al. 2000). Der Standort ist klimatisch der gemäßigten Zone Zentraleuropas im Übergangsbereich vom maritimen zum kontinentalen Klima zuzuordnen. Als langjährige Mittelwerte des Niederschlags und der Temperatur wurden auf der Grundlage eigener Messreihen in der 5 km entfernten Lysimeterstation Falkenberg des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung – UFZ (im weiteren UFZ-Lysimeterstation Falkenberg genannt) 560 mm bzw. 8,2 °C ermittelt. Die dominierenden Bodenarten sind "Vegen", bestehend aus Auenlehmen über Auensanden. Der Boden wurde im Ergebnis einer bodenkundlichen Standortkartierung als Eutric Fluvisol (FAO / IS-RIC / ISSS, 1998) angesprochen.

Der bodenhydrologische Messplatz wurde mit TDR-Sonden zur Messung der Bodenfeuchte in den Messtiefen 0,3 m, 0,6 m, 0,9 m und 1,2 m ausgestattet. Darüber hinaus sind Tensiometer und Temperaturfühler in dreifacher Wiederholung in den Bodentiefen 0,3 m, 0,6 m und 0,9 m installiert worden. Der Messplatz verfügt ferner über ein Grundwasserbeobachtungsrohr, in das ein Drucksensor zur automatischen Messung der Grundwasserstände eingesetzt wurde. Des Weiteren werden hier die Klimaparameter Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit erfasst. Alle Messwerte werden in einem Datalogger automatisch registriert, zwischengespeichert und über ein GSM-Modem in die UFZ-Lysimeterstation Falkenberg übertragen.

Von diesem Standort wurden im September 2000 zwei Lysimetermonolithe mit einer Tiefe von 2 m und einer Oberfläche von 1 m² entnommen, in die UFZ-Lysimeterstation

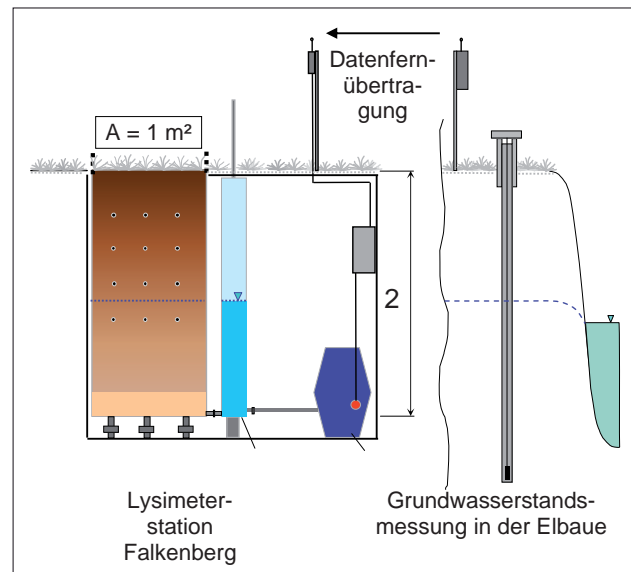


Abbildung 1: Prinzipskizze des wägbaren Grundwasserlysimeters und der dazugehörigen Erfassung und Übertragung von *in situ* Grundwasserständen

Falkenberg transportiert und in eine Container-Lysimeterstation (MEISSNER et al. 2000c) eingebaut. Dort werden die gewonnenen Bodenmonolithe als wägbare Grundwasserlysimeter betrieben. Adäquat zur Instrumentierung des bodenhydrologischen Messplatzes in der Elbaue wurden sie mit Bodenfeuchtesensoren (TDR-Sonden und Tensiometer) und Bodenthermometern ausgestattet.

Ein besonderes Kennzeichen dieser Grundwasserlysimeter ist die Grundwasserstandsregelung im Lysimeter entsprechend den *in situ* gemessenen Grundwasserständen (Abbildung 1). Der Betrieb des Lysimeters wurde im Rahmen dieser Untersuchungen vor allem auf die Bestimmung von Wasserhaushaltsparametern ausgerichtet. Bodenlösung, wie in traditionellen Lysimeterversuchen üblich, wurde daher nicht gewonnen.

Weiterführende Informationen zur Monolithentnahme, zur technischen Ausstattung, zum Betrieb des Lysimeters und zu dessen Erprobung können der Literatur entnommen werden (BETHGE-STEFFENS et al. 2004 und BETHGE-STEFFENS 2008).

Die Bodenwasserhaushaltsgleichung wurde wie folgt an die Bedingungen von Flussauenstandorten mit zeitweiligen Überflutungen angepasst:

$$P + \text{Pond} = \text{ETP} + (R_{\text{out}} - R_{\text{in}}) \pm \Delta S \quad (1)$$

(P – Niederschlag (mm), Pond = Überstauung (mm), ETP – Evapotranspiration (mm), R_{out} – Grundwasserabfluss (mm), R_{in} – Grundwasserzufluss (mm), ΔS – Änderung des Bodenwasserspeicherinhalts (mm))

Insbesondere für die zeitlich hoch aufgelöste Erfassung des zu- bzw. abfließenden Grundwassers müssen Masseänderungen im Lysimeter ohne zeitliche Verzögerung erfasst werden. Die Masse des Lysimetermonoliths wird daher in einem Intervall von 1 Minute gemessen und zu einem 15-minütigen Mittelwert verdichtet. Jedes Lysimeter ist mit einem Ausgleichsbehälter über das Prinzip kommuni-

zierender Röhren verbunden. Weicht der Wasserstand im Ausgleichsbehälter um mehr als 1 cm vom Zielwasserstand ab, wird das Ventil zwischen dem Ausgleichsgefäß und dem Lysimeter geschlossen und der Wasserstand mit Hilfe einer Pumpe an den Zielwasserstand durch Zu- oder Abpumpen angepasst. Anschließend wird das Ventil erneut zum Ausgleich der Wasserstände zwischen Lysimeter und Ausgleichsgefäß geöffnet. Dieser Vorgang wird so lange fortgesetzt, bis der Zielwasserstand im Lysimeter erreicht ist. Das zu- bzw. abfließende Wasser wird in der Wasserbilanz mit Hilfe der folgenden Gleichung berücksichtigt:

$$V_{\text{eff } t=m} = A_{\text{AG}} * [(B_{t=m} - B_{t=0}) - (W_{t=m} - W_{t=0})] \quad (2)$$

wobei $V_{\text{eff } t=m}$ das Wasservolumen repräsentiert, das zum Zeitpunkt $t = m$ ein- bzw. ausfließt (m^3), A_{AG} ist der Flächeninhalt der Grundfläche des Ausgleichsgefäßes (m^2), $B_{t=0}$ ist der Wert der Bilanzierung zu Beginn des Regelungsprozesses (m), $B_{t=m}$ ist der Wert der Bilanzierung am Ende des Regelungsprozesses (m), $W_{t=0}$ ist der Wasserstand im Ausgleichsgefäß zu Beginn des Regelungsprozesses (m) und $W_{t=m}$ ist der Wasserstand im Ausgleichsgefäß am Ende des Regelungsprozesses (m).

Wie bereits dargestellt, wird der Wasserstand im Ausgleichsgefäß ständig mit dem Zielwasserstand verglichen. Bei einer Wasserstandsdifferenz von mehr als 1 cm ist eine Nachregelung erforderlich. Dieser Fall wird als Regelung zur Aufrechterhaltung eines internen Wasserstandes bezeichnet und als Grundwasserneubildung bzw. kapillarer Aufstieg angesehen. Im anderen Fall verursachen äußere Veränderungen Wasserstandsdifferenzen. Diese Fälle werden als Regelungen zur Nachverfolgung externer Wasserstandsänderungen bezeichnet und als In- bzw. Exfiltration gewertet.

Mit dieser Versuchsanordnung ist es möglich, Wasserflüsse nach ihrer Entstehung und Fließrichtung zu differenzieren.

Im Ergebnis eines detaillierten Reviews der verfügbaren Literatur und einer Testphase verschiedener Modellsysteme wurde das Modell HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al. 2005) als eindimensionales Modell für die Simulation des Bodenwasserhaushalts des Lysimeters und des *in situ* Standorts ausgewählt. Das Modell ist in der Lage, eine große Bandbreite bodenhydrologischer Prozesse sowie verschiedene untere und obere Randbedingungen zu berücksichtigen. Des Weiteren ist es mit diesem Werkzeug möglich, Wasserflüsse invers auf der Grundlage der vorliegenden Lysimeterergebnisse zu modellieren.

Ergebnisse und Diskussion

Die in der Aue und in den wägbaren Grundwasserlysimetern (Lysimeter 205 und 206) gemessenen Grundwasserstände sind in *Abbildung 2* dargestellt. Die Grundwasserstände in der Aue werden vor allem durch die Pegelstände der Elbe beeinflusst. Mit Hilfe des statistischen Verfahrens der Kreuzkorrelation konnte ein sehr enger statistischer Zusam-

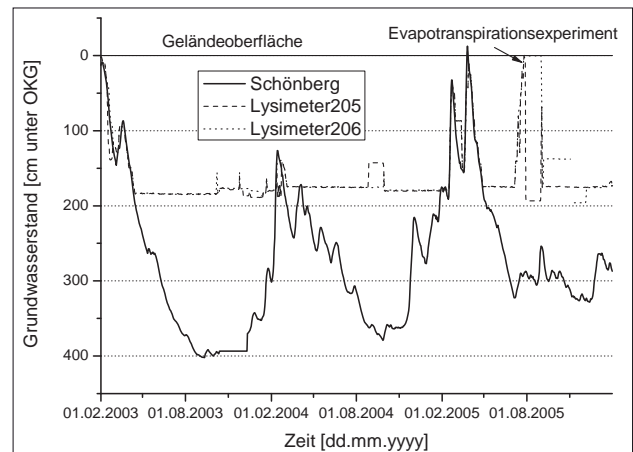


Abbildung 2: Vergleich in situ gemessener und in den Lysimetern eingestellter Grundwasserstände (01.02.2003 – 31.12.2005)

menhang zwischen beiden Messreihen (Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,92$ bei einer zeitlichen Verschiebung von 3 Tagen) festgestellt werden. Die *in situ* gemessenen Grundwasserstände variierten dabei zwischen 4,02 m unter Geländeniveau und 0,13 m über Geländeniveau. Da die bodenhydrologische Messstation bei Wasserständen von mehr als 5,50 m am Elbepegel Wittenberge (Stromkilometer 454, Pegelnullpunkt 16,72 m ü. NN) demontiert werden muss, konnten höhere Wasserstände nicht mit der installierten Messtechnik erfasst werden. Zusätzlich vorhandene Drucksensoren (Diver, Van Essen Instruments Ltd.) belegten jedoch *in situ* Wasserstände von mehr als 1,00 m über Geländeniveau bei einzelnen Hochwasserereignissen. In Niedrigwasserperioden zu verzeichnende Grundwasserflurabstände $> 2,00$ m unter Geländeniveau konnten im Grundwasserlysimeter aufgrund der Gefäßtiefe von 2,00 m und der 25 cm mächtigen mineralischen Filterschicht nicht nachgebildet werden. Insgesamt konnte der natürliche Verlauf der Grundwasserstände in der Aue im Lysimeterexperiment mit hoher Genauigkeit reproduziert werden.

Auch die *in situ* gemessene Bodenfeuchtdynamik der Oberbodenhorizonte konnte im Lysimeterexperiment gut wiedergegeben werden. Probleme traten jedoch in den Messtiefen 0,90 und 1,20 m auf, die mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine Variation von Bodenhorizontmächtigkeiten und -tiefen zurückgeführt werden müssen.

In *Abbildung 3* wird basierend auf den zwischen dem 01.02.2003 und dem 31.12.2005 durchgeführten Lysimeterexperimenten der zeitliche Verlauf der Bodenwasserhaushaltsparameter in Form von Summenkurven dargestellt. Dabei wurden Mittelwerte aus den Ergebnissen von Lys. 205 und 206 gebildet und graphisch wiedergegeben. Die angepasste Form der Bodenwasserhaushaltsgleichung (siehe Gleichung 1) konnte damit für den Untersuchungszeitraum wie folgt parametrisiert werden (Jahresmittelwerte aus den Ergebnissen von 2 Lysimetern, Zeitraum 01.02.2003 – 31.12.2005):

$$539 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 548 \text{ mm} + ((34 \text{ mm} + 290 \text{ mm}) - (6 \text{ mm} + 268 \text{ mm})) - 59 \text{ mm} \quad (3)$$

(P)
(Pond)
(ETP)
(R_{out})
(R_{in})
(ΔS)

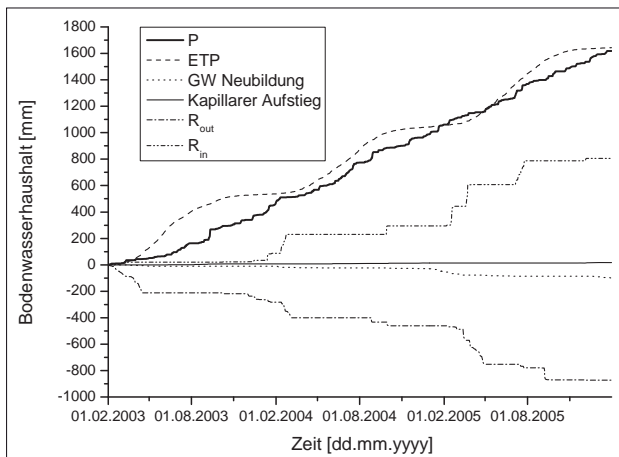


Abbildung 3: Summenlinien der Bodenwasserhaushaltsparameter P-Niederschlag, ETP-Evapotranspiration; Grundwasserneubildung, kapillarer Aufstieg, R_{out} – Grundwasserabfluss und R_{in} – Grundwasserzufluss

Einem Niederschlag in Höhe von 539 mm stand eine Evapotranspiration von 548 mm gegenüber. Der Term R_{out} wurde mit 324 mm quantifiziert, wobei 290 mm als Exfiltration in das Oberflächengewässer und 34 mm als Grundwasserneubildung klassifiziert wurden. Gleichzeitig infiltrierten 268 mm aus dem Gewässer in Aue. Der kapillare Aufstieg betrug 6 mm. Damit verbunden war ein Rückgang des Bodenwasserspeicherinhalts im Lauf der betrachteten 35 Monate um 59 mm, der durch Niederschläge, Infiltrationen und Überflutungen nicht kompensiert werden konnte.

Ergänzend zu den Lysimeterversuchen wurden zur Plausibilitätsprüfung der gemessenen Grundwasserneubildungsraten vergleichende Bewertungen mit modernen Berechnungsverfahren durchgeführt. Die Anwendung des TU Berlin – BGR Verfahrens (WESSOLEK et al. 2004) zur Abschätzung der Grundwasserneubildung (u.a. für Grünlandnutzung) ergab für den *in situ* Standort (im gleichen Zeitraum) eine Neubildungsrate von 23 mm. BUREK (2003) berechnet mit einem neu entwickelten Grundwassermodell für die Untersuchungsgebiete im Bereich der Mittleren Elbe (Bereiche Rogätz und Sandau) eine mittlere Grundwasserneubildung von 50 mm/a. Damit resultiert aus den Untersuchungen an den wägbaren Grundwasserlysimetern im Vergleich zu den Berechnungen mit dem TU Berlin – BGR Ansatz sowie den Computersimulationen eine vergleichbare Größenordnung der Grundwasserneubildung.

Die Ergebnisse der Lysimeteruntersuchungen dienen gleichzeitig als Ausgangsparameter für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts mit dem eindimensionalen Modell HYDRUS 1D. Dabei wurde das Modell anhand der vorliegenden Messreihen invers parametrisiert. Die Modellparameter wurden bei diesem Verfahren solange variiert, bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen gemessenen und den simulierten Fließraten (Transpiration, Evaporation, Flüsse am unteren Rand der Bodensegmente) erreicht werden konnte.

Die Pedotransferfunktionen wurden gemäß dem Ansatz von VAN GENUCHTEN und MULAEM (in ŠIMŮNEK et al. 2005) für die Abschätzung der Wasserretentions-

kurve und der hydraulischen Leitfähigkeit genutzt. Diese Pedotransferfunktionen wurden durch die Variation der Ton-, Schluff- und Sandgehalte ($\pm 5\%$) optimiert, um die Modellierungsergebnisse adäquat an die Messergebnisse anzupassen. Als obere Randbedingung wurde eine zeitlich veränderliche der Atmosphäre ausgesetzte Oberfläche ohne Oberflächenabfluss gewählt. Tageswerte von Niederschlag, potentieller Evaporation und Transpiration sowie Grundwasserstandsdaten wurden für die Modellierung genutzt. Dabei mussten die variierenden unteren Randbedingungen während der Untersuchungsperiode in Abhängigkeit vom Grundwasserstand berücksichtigt werden. In den Zeiten, in denen der Grundwasserflurabstand veränderlich ist, gilt die untere Randbedingung „variable pressure head“. In den Perioden, in denen sich der Grundwasserflurabstand unterhalb des Lysimeterbodens befindet (Grundwasserflurabstände $> 2,00$ m), gilt die typische Lysimeter-Randbedingung „seepage face“. Die einzelnen Perioden wurden mit ihren tagesveränderlichen Daten gerechnet und anschließend wieder zusammengeführt.

Als Startbedingung wurde der volumetrische Wassergehalt gewählt. Da zum Beginn der Modellierungsperiode ein Grundwasserflurabstand nahe Geländeoberkante gemessen wurde und die Böden wassergesättigt waren, konnten die Anfangswassergehalte (entsprochen jeweils dem Sättigungswassergehalt) relativ sicher bestimmt werden. Auf vorhandene TDR-Messwerte konnte dabei ebenfalls zurückgegriffen werden.

Die Wurzelwasseraufnahme wurde mit dem Modell nach FEDDES (ŠIMŮNEK et al. (2005)) berechnet. Als Durchwurzelungstiefe wurde einheitlich 1 m angenommen, wobei die Wurzelverteilung linear mit der Tiefe abnimmt.

Die Ergebnisse der Modellierung werden in *Abbildung 4* exemplarisch für den Zeitraum 01.02.2003 – 31.12.2004 dargestellt. Während dieser Periode waren nur an 98 Tagen Grundwasserflurabstände < 2 m zu verzeichnen. Die Evapotranspiration wurde insgesamt gut vom Modell wi-

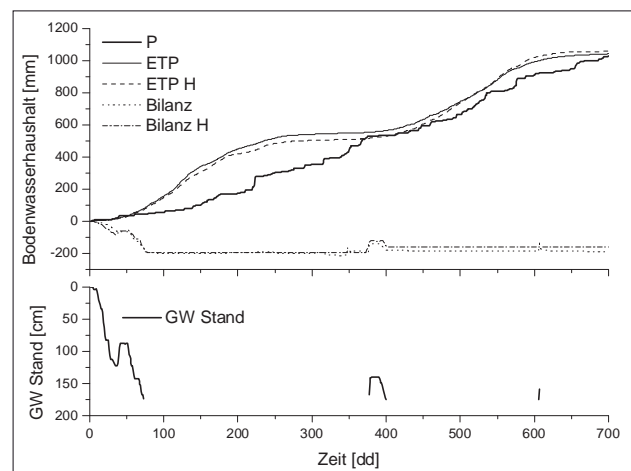


Abbildung 4: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Bodenwasserhaushaltsgrößen (P Niederschlag, ETP Evapotranspiration, ETP H mit HYDRUS 1D modellierte ETP sowie die gemessene und mit HYDRUS 1D modellierte Bodenwasserbilanz)

dergespiegelt. Jedoch wurde sie 2003 aufgrund des heißen und trockenen Wetters unter- und 2004 bei insgesamt etwas feuchterer Witterung durch das Modell leicht überschätzt.

Die Simulation der lateralen Flüsse (Infiltration und Exfiltration) führte dagegen zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Dies ist vor allem auf einige wenige technische Probleme im Zusammenhang mit der Grundwasserstandsregelung zurück zu führen.

Schlussfolgerungen

- Innovative Messsysteme wie das neu entwickelte wägbare Grundwasserlysimeter ermöglichen die direkte Messung der Bodenwasserhaushaltsparameter von Auenstandorten. Nur so ist es möglich, ein den Standortverhältnissen vergleichbares bodenhydrologisches Regime zu schaffen. Die mit dem wägbaren Grundwasserlysimeter ermittelten Parameter können direkt auf den Entnahmestandort übertragen werden. Das wägbare Grundwasserlysimeter ermöglicht erstmals eine exakte Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate von Flussauenstandorten, die für die Abschätzung der Stoffverlagerung dieser oftmals schadstoffbelasteten Standorte von herausragender Bedeutung ist.
- Auenstandorte der Mittelelbe sind durch lang anhaltende Perioden mit negativer Wasserbilanz gekennzeichnet. In Zeitabschnitten mit positiver klimatischer Wasserbilanz besteht das Risiko einer sickerwassergebundenen Schadstoffverlagerung in tiefere Bodenhorizonte bzw. ins Grundwasser.
- Untersuchungen an wägbaren Grundwasserlysimetern ermöglichen es, qualifizierte Datenreihen bzw. belastbare Pedotransferfunktionen für die Modellierung von Wasser- und Stoffflüssen in Auenböden bereit zu stellen. Bodenwasserhaushaltsuntersuchungen an wägbaren Grundwasserlysimetern erlauben in Kombination mit geographischen Informationssystemen die Ableitung von zuverlässigen Aussagen zur Bodenwasserbilanz von bodengenetisch vergleichbaren Auenstandorten. Damit wird ein wesentlicher Beitrag für die Übertragung von Punktdaten auf die nächst höhere Skalenebene geleistet.

Literatur

- BETHGE-STEFFENS, D., R. MEISSNER and H. RUPP, 2004: Development and practical test of a weighable groundwater lysimeter for floodplain sites. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2004, 167, 516-524.
- BETHGE-STEFFENS, D., 2008: Der Bodenwasserhaushalt von zwei repräsentativen Flussauenstandorten der Mittelelbe. Thesis. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Dissertation 01/2008, 114 p.
- BUREK, P.-A., 2003: Langfristige, hydrologische Betrachtung der Grundwasserdynamik am Beispiel der Mittleren Elbe. Dissertation; Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Heft 220.
- DISSE, M., 1995: Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten. Dissertation. Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH); veröffentlicht in: Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft an der Universität Karlsruhe, Heft 53.
- FAO/ISRIC/ISSS, 1998: World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report, vol. 84. FAO, Rome.
- FRIESE, K., B. WITTER, W. BRACK, O. BUETTNER, F. KRÜGER, M. KUNERT, H. RUPP, G. MIEHLICH, A. GROENGROEFT, R. SCHWARTZ, A. van der VEEN and W.D. ZACHMANN, 2000: Distribution and fate of organic and inorganic contaminants in a river floodplain - results of a case study on the river Elbe, Germany. In: Remediation engineering of contaminated soils (Eds. Wise, D. L., Trantolo, D. J., Cichon, E. J., Inyang, H. I. and Stottmeister, U.). Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, pp. 373-426.
- MEISSNER, R., H. RUPP and M. SCHUBERT, 2000a: Novel lysimeter techniques - A basis for the improved investigation of water, gas and solute transport in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163 (6), 603-608.
- MEISSNER, R., H. RUPP, M. SEYFARTH und J. PUNZEL, 2000b: Verfahren zum automatischen Betrieb eines wägbaren Grundwasserlysimeters. Patent-Nr. 199 02 462; IPC: GO 1 N 33/18, Erteilung am 21.06.2000.
- MEISSNER, R., H. RUPP, M. SEYFARTH und R. BRÄUTIGAM, 2000c: Lysimeterstation. Patent-Nr. 199 07 463 (Klasse G01N), Erteilung am 28.12. 2000.
- MEISSNER, R., M. SEYFARTH, H. FRIEDRICH, H. RUPP, M. BEUTER und K. KESSLER, 2005: Verfahren und Vorrichtung zur monolithischen Entnahme von Bodensäulen. German Patent DE 100,48,089,6, 8 July 2005.
- RINKLEBE, J., 2004: Differenzierung von Auenböden der mittleren Elbe und Quantifizierung des Einflusses von deren Bodenkennwerten auf die mikrobielle Biomasse und die Bodenenzymaktivitäten von b-Glucosidase, Protease und alkalischer Phosphatase. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- SCHWARTZ, R., 2001: Die Böden der Elbaue bei Lenzen und ihre möglichen Veränderungen nach Rückdeichung. Dissertation, Universität Hamburg.
- ŠIMŮNEK, J., M.T. van GENUCHTEN and M. SEJNA, 2005: The Hydrus-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably Saturated Media. April 2005, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside; Riverside, California.
- WESSOLEK, G., W. DUIJNISVELD und S. TRINKS, 2004: Ein neues Verfahren zur Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden: das TUB-BGR-Verfahren. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, ATV-DVWK, Heft 05.04, Bd. 1: Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten, 135-145.

Quantification of dewfall based on lysimeter studies

Huijie Xiao^{1*}, Ralph Meissner¹, Juliane Seeger¹, Holger Rupp¹ and Heinz Borg²

Zusammenfassung

Lysimeter sind wichtige Messgeräte zur Erstellung von Wasserbilanzen und finden Anwendung in der Landwirtschaft, der Forstwirtschaft und anderen Umweltdisziplinen. Dabei stellt bei wägbaren Lysimetern die Wägegenauigkeit einen Schlüsselparameter dar. Neuere Lysimeter mit hoher Genauigkeit ermöglichen eine detaillierte Messung des Taus. Es werden aktuelle Ergebnisse zur Quantifizierung der Taumenge für kurz- und längerfristige Zeitperioden sowie für unterschiedliche Pflanzenbestände (Gras und Ackerfrüchte) vorgestellt und diskutiert. Die Untersuchungen werden ergänzt durch Modellrechnungen zur Taubildung mit der Penman-Monteith-Gleichung. Dabei zeigten sich qualitativ gute Übereinstimmungen. Die Gleichung unterscheidet jedoch nicht, ob das Tauwasser aus der Atmosphäre oder dem Boden bzw. dem Pflanzenbestand kommt. Nur das Ersterer wird von einem Lysimeter erfasst, so dass weitere Forschungsarbeiten zur Aufteilung der Tauberechnungen nach Quellen des Tauwassers notwendig sind.

Schlagwörter: Taubildung, Lysimeter, Penman-Monteith-Gleichung

Summary

Lysimeters are an important tool for water balance studies in agriculture, forestry and other environmental settings. A key parameter of a lysimeter is its weighing precision: the higher it is, the better the resolution of the weight measurements. Nowadays some advanced weigh-

able lysimeters are available, which make it possible to measure dewfall accurately.

With the help of high precision weighing lysimeters some studies on dewfall were carried out at the Falkenberg lysimeter station of the Department of Soil Physics of the Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. They demonstrated that such lysimeters can be used successfully to quantify the amount of dew precipitated during a night or longer periods (e.g. a year). The results of the studies further showed that the type of vegetation and its growth stage have an influence on dewfall. More dew was deposited in spring and autumn, since in April, September and October the typical weather conditions favored dew formation. On crops the rate of dewfall increased with their growth. In the maturation period dew occurred more frequently and the amount of dew reached a peak.

In addition, the Penman-Monteith (PM) equation was used in our studies to calculate dew formation on grass, using lysimeter data on dewfall as reference. Most of the meteorological data required in the PM-equation were obtained at the UFZ lysimeter station. The time course of the calculated dew amounts agreed well with measured values, but deviations in the daily amounts were sometimes fairly large. This is because the equation does not differentiate whether the dew originates from the atmosphere, the soil, or the plant canopy. Only the former is registered by a lysimeter. Hence, further studies are required to separate the sources of dew in the calculations.

Keywords: dew formation, lysimeter, Penman-Monteith equation

Introduction

Lysimeters are often used for the hydrological studies. They can quantify actual evaporation from a bare soil or actual evapotranspiration from a soil covered by vegetation. Moreover, seepage from lysimeters can be collected, which allows an assessment of the water loss from a soil profile and, thus, groundwater recharge. The seepage water can be analyzed in the laboratory for its various constituents. Hence, lysimeters can be employed to monitor the fate of solutes in a soil, too.

In our studies high precision weighing lysimeters were used to measure dewfall. They monitor mass changes continuously and with high resolution so that the course of dewfall during a day (or more to the point a night) can be followed. Lysimeters have several advantages over dew

gauges. First, they measure only dewfall, while dew gauges often record dewrise and dewfall. However, only the latter represents a real gain of water to a plant, because the former originates in the soil it grows in (MONTEITH 1957). Second, the influence of the type of vegetation on dewfall can be investigated accurately, because the vegetation of interest can be planted on the lysimeter.

Studying dewfall is of importance, since dew is part of the precipitation at a site. In humid regions it normally contributes only a small percentage to the total precipitation over a longer term (week or month). However, in semi-arid and arid regions dew plays an important role in the water balance. Also, dew can significantly lower the evaporative loss of soil water during some periods of the day (MONTEITH 1957). Dew formation releases heat, which can be

¹ Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Department of Soil Physics, Lysimeter Station, Dorfstraße 55, D-39615 FALKENBERG

² Faculty of Natural Sciences III, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Julius-Kühn-Straße 23, D-06112 HALLE (Saale)

* Correspondence: huijie.xiao@ufz.de

an important component in the night-time heat budget of the local atmosphere (WHITEMAN et al. 2007). On the other hand, dew plays a significant part in the development of plant foliar diseases (e.g. PEDRO and GILLESPIE 1982a, b, JACOBS et al. 1990, WILSON et al. 1999).

Lysimeters are a very promising tool for measuring dewfall (MEISSNER et al. 2007). However, they are not readily available at every study site because of their high cost. Hence, there is a large body of literature on ways to compute dew formation from meteorological factors. They range from simple correlations of dew formation with weather data, to neural network models and complex numerical simulations of atmosphere - canopy systems in which the amount of dew is an output parameter (RICHARDS 2004).

Some of the better models to estimate dew formation, i.e. water vapor condensation (and evaporation), were developed on the basis of the surface energy balance, e.g. the Penman-Monteith (PM) equation or the vegetation models SiB (SELLERS et al. 1986, 1989) and Cupid (NORMAN 1979, NORMAN and CAMPBELL 1982, WILSON et al. 1999). The latter two consider the soil and different layers in a crop and are thus rather complex. We therefore chose the PM-equation (MONTEITH 1973), to calculate dew formation in our studies and compared the results with dewfall measured by weighing lysimeters.

In summary, the objectives of this article are 1) to examine the ability of high precision weighing lysimeters to quantify the amount of dew precipitated during a night and during the course of a year, and 2) to assess how well dew formation calculated with the PM-equation compares with dewfall measured by weighing lysimeters.

Material and methods

The studies were carried out at the Falkenberg lysimeter station of the Department of Soil Physics of the Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, which is located in northern Germany, some 120 km northwest of Berlin.

The site is 21 m above sea level, its mean annual precipitation is 588 mm with a maximum in July (69 mm) and a minimum in February (29 mm; RUPP et al. 2007). Its potential annual evapotranspiration is 565 mm, also with a maximum in July (106 mm) and a minimum in February (8 mm). The surrounding area is plain and mainly under grass.

Four identical weighable lysimeters were employed in these studies. Each has a surface area of 1 m², a depth of 2 m, and is filled with a sandy soil. A detailed description of the lysimeters is given by MEISSNER et al. (2007). They can discern mass changes as small as 30 g, which for their 1 m² surface area corresponds to a depth of 0.03 mm of water. Their mass is recorded every 10 minutes.

To compare dewfall on different vegetation two lysimeters were planted with maize from April through September 2004 (they were bare prior to that), and with barley thereafter until July 2005. For the remainder of the year they were kept fallow. The other two were under continuous grass in both years.

Dewfall results in a mass increase of a lysimeter. Hence, to identify dewfall the lysimeter records were surveyed for

periods with mass increases. Since a mass increase may also result from rain or snow, the periods with a mass increase were compared to the precipitation data collected at the site by a continuously recording tipping-bucket rain gauge. Mass increases not concurrent with rain or snow were finally classified as dew.

The variant of the PM-equation used here to calculate dew formation has the form

$$E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p \delta_e / r_a}{\lambda(\Delta + \gamma)}$$

where E = dew formation (if E < 0) or evaporation (if E > 0) (g/m²/s), Δ = rate of increase of the saturation vapor pressure with temperature (mb/K), R_n = net radiation (W/m²), G = soil heat flux (W/m²), ρ = density of air (1.204 kg/m³), c_p = specific heat of air (1003.5 J/kg), δ_e = vapor pressure deficit of the air (mb), r_a = aerodynamic resistance to vapor transport (s/m), λ = latent heat of vaporization of water (2442 kJ/kg), and γ = psychrometer constant (0.66 mb/K). (All values are for 293 K and 101.3 kPa atmospheric pressure.)

There is a weather station at the lysimeter station, which records rainfall, solar radiation, soil and air temperature (at various depths and heights, respectively), relative humidity, and wind velocity. Some other meteorological variables needed in the equation, in particular incoming and outgoing long wave radiation, can be derived with empirical equations.

Results

Amount of dew measured with lysimeters

Figure 1 illustrates the amount of dewfall per dew-night in 2004 and 2005. In each month of the two years dewfall per dew-night on grass didn't vary as much as on crops. From July to September and in December 2004 as well as in April and May 2005 it was higher on crops than on grass. At all other times it was higher on grass.

Figure 2 shows the amount of dewfall in each month in 2004 and 2005. For the grass lysimeters there was a peak in spring and autumn in both years, when the weather conditions at the site favor dew deposition. For the cropped lysimeters this was only the case in 2005; the peaks in September and December 2004 were a result of crop development (see below).

For the crop lysimeters dewfall rose steeply from a minimum in May until September 2004, concurrent with the growth of the maize crop, and then fell sharply after its harvest. After a second rise from November to December it dropped again to an annual minimum in February 2005 from where it increased once more until May, concurrent with barley growth, followed by another decline after harvest.

In 2004 the total amount of dewfall was notably higher on the grass lysimeters than on the cropped ones (31.8 mm compared to 27.2 mm), while in 2005 the figures

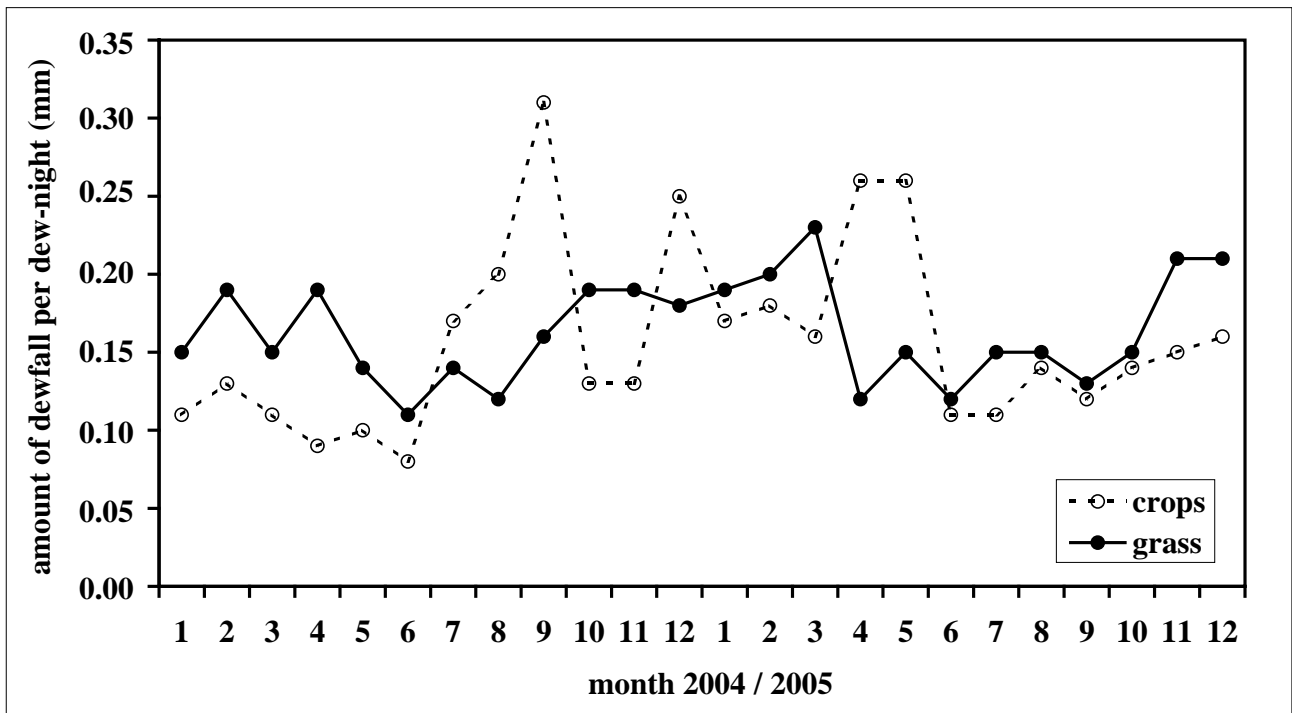


Figure 1: Amount of dewfall per dew-night on the lysimeters with grass and with crops in 2004 and 2005.

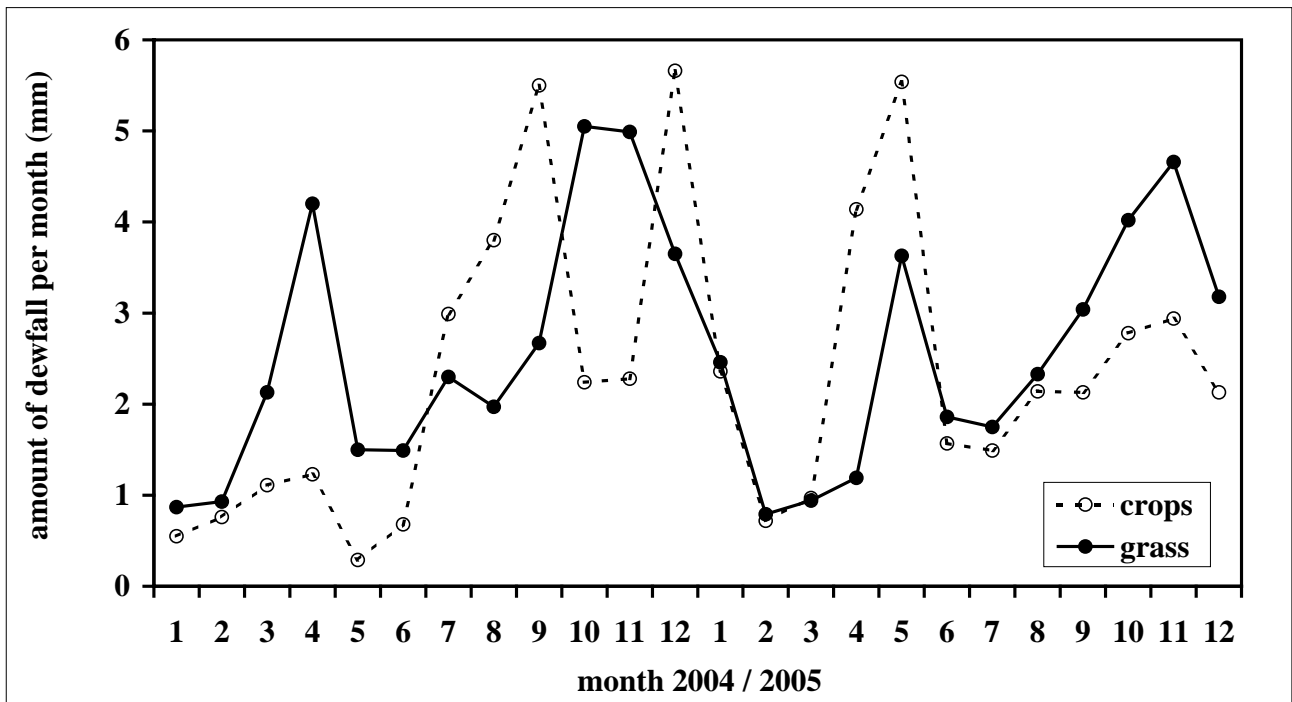


Figure 2: Amount of dewfall per month on the lysimeters with grass and with crops in 2004 and 2005.

were similar (29.9 and 28.8 mm, respectively). However, in the period when the maize was growing (May through September 2004) there was more dewfall on the cropped (13.26 mm) than on the grass lysimeters (9.93 mm). In the period when the cropped lysimeters were under winter barley (October 2004 to mid-July 2005) the amount of dewfall was similar, namely 26.22 mm on barley and 25.43 mm on grass.

Comparison of calculated and measured dew amounts

For this comparison only the grass lysimeters were looked at, to avoid the intricacies of having to account for a rapidly and markedly changing vegetation cover. The period from April 1st to October 31st, 2004 was chosen, which coincides with the growing period of grass at the site.

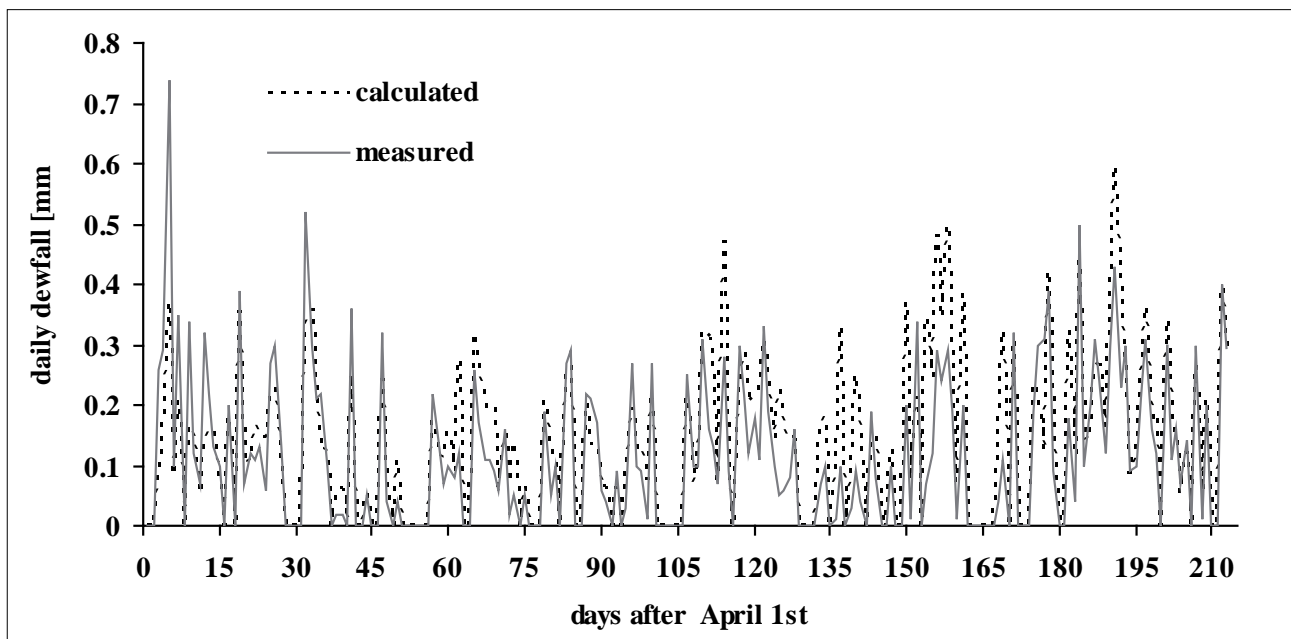


Figure 3: Dewfall on grass measured by lysimeters and calculated with the Penman-Monteith equation from April 1st to October 31st, 2004.

The dewfall over the whole period is plotted in *Figure 3*. The values calculated with the PM-equation are generally in good qualitative agreement with the lysimeter measurements. Earlier in the growing season calculated and measured data agree better than in the later period. Especially from about 100 to 160 days after April 1st (i.e. mid-July to mid-September) the PM-equation yields much higher values than measured with the lysimeters. The deviations are most likely due to the fact that the PM-equation does not differentiate whether the dew originates from the atmosphere, the soil, or the plant canopy. Only the former is registered by a lysimeter (and of use to a plant, see above). The computational separation of the dew sources will be looked at in further studies.

Conclusions

The amount of dew measured in our investigation equals 5.2 to 6.9% of the annual and up to 47% of the monthly precipitation during the study period. This indicates that dew can play a notable role in the water balance of grass and crops in northern Germany.

The studies also illustrate the effect of vegetation on dewfall, which increased with the growth of the crops. In the maturation period the dewfall per month was greater on crops than on grass.

The PM-equation can be used to estimate daily dew formation. This method just needs standard meteorological data, which can be obtained at typical meteorological stations. Hence, it is more widely useable than lysimeters. However, at times there were large deviations between lysimeter measurements and computations, because in the way used here the PM-equation does not differentiate between atmosphere, soil, or plant canopy as the source of dew, while lysimeters only register dew originating from the atmosphere (dewfall). The separation of the dew sources in the calculations will be the subject of further work.

References

- JACOBS, A.F.G., W.A.J. van PUL and A. van DUKEN, 1990: Similarity moisture dew profiles within a corn canopy. *J. Appl. Meteorol.* 29, 1300-1306.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP, M. SEYFARTH and H. BORG, 2007: Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170, 335-344.
- MONTEITH, J.L., 1957: Dew. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 83, 322-341.
- MONTEITH, J.L., 1973: *Principles of environmental physics*. Arnold, London.
- NORMAN, J.M., 1979: Modeling the complete crop canopy. In: Barfield, B.J., Gerber, J.F. (Eds.): *Modification of the aerial environment of plants*. ASAE Monograph 2, 249-277, St. Joseph.
- NORMAN, J.M. and G.S. CAMPBELL, 1982: Application of a plant-environment model to problems in irrigation. In: Hillel, D. (Ed.): *Advances in irrigation*, vol. II., 155-188, Academic Press, New York.
- PEDRO, M.J. and T.J. GILLESPIE, 1982a: Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agric. Meteorol.* 25, 283-296.
- PEDRO, M.J. and T.J. GILLESPIE, 1982b: Estimating dew duration. II. Utilizing standard weather station data. *Agric. Meteorol.* 25, 297-310.
- RICHARDS, K., 2004: Observation and simulation of dew in rural and urban environments. *Prog. Phys. Geog.* 28, 76-94.
- 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.* 186, 323-335.
- SELLERS, P.J., Y. MINTZ, Y.C. SUD and A. DALCHER, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 43, 505-531.
- SELLERS, P.J., W.J. SHUTTLEWORTH, J.L. DORMAN, A. DALCHER and J.M. ROBERTS, 1989: Calibrating the simple biosphere model for amazonian tropical forest using field and remote sensing data. Part 1: Average calibration with field data. *J. Appl. Meteorol.*, 28, 727-759.
- WHITEMAN, C.D., S.F.J. DEWEKKER and T. HAIDEN, 2007: Effect of dewfall and frostfall on nighttime cooling in a small, closed basin. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 46, 3-13.
- WILSON, T.B., W.L. BLAND and J.M. NORMAN, 1999: Measurement and simulation of dew accumulation and drying in a potato canopy. *Agric. For. Meteorol.* 93, 111-119.

Einfluss des prognostizierten globalen Wandels auf Böden

Dietmar Klotz^{1*} und Piotr Maloszewski¹

Abstract

Der prognostizierte globale Klimawandel mit Temperaturerhöhungen von 3 °C bis 5 °C bewirkt einerseits Änderungen der hydraulischen Eigenschaften von Böden (Durchlässigkeit, effektives Fließvolumen, Saugspannung, Dispersivität) sowie der Evapotranspiration bewachsener Böden. Das kann zur Folge haben, dass die totalen Wassergehalte und die Grundwasserneubildungen in und unter Böden abnehmen und damit die Sickerwassergeschwindigkeiten zunehmen, wie Versuche in verschiedenen bayerischen Lysimeterböden zeigten. Andererseits bewirken erhöhte Temperaturen langfristig Änderungen der Stoffausträge aus Böden, der Schadstoff-Quellstärken kontaminierter Materialien sowie des Abbaus von organischen Abfallmaterialien, wie Untersuchungen in vier verschiedenen Lysimeterböden, in drei Altlastenlysimetern und in einem Kompostlysimeter zeigten.

Einleitung

Die Erdgeschichte belegt, dass das Klima sehr empfindlich auf Änderungen der äußeren Bedingungen reagiert. Langfristige Klimaschwankungen der Erde hängen mit Variationen der Erdbahn zusammen, die durch die Schwerkraft anderer Planeten verursacht wird. In den letzten Jahrhunderten ist das Erdklima bemerkenswert stabil (Ausnahmen: kleine Eiszeiten im 14. und 16. Jahrhundert). Doch seit ca. 150 Jahren steigt die Temperatur deutlich an, wofür hauptsächlich anthropogene Einflüsse, sog. „Forcings“ wie Treibhausgase und Aerosole (HANSEN 2005) verantwortlich sind, die die Energiebilanz ändern: diese Forcings adsorbieren die vom Erdboden ausgehende Infrarotstrahlung in der Atmosphäre. An dieser Art „Glasglocke“ wird die Wärme zur Erdoberfläche zurückgestrahlt, anstatt sie in den Weltraum entweichen zu lassen. Folge der unausgeglichene Energiebilanz ist die Erderwärmung.

Der globale Klimawandel bewirkt (KOHL & KÜHR 2004):

1. Die mittlere globale Temperatur der Atmosphäre steigt.
2. Die globalen Niederschlagsmengen und das Niederschlagsmuster haben sich im 20-sten Jahrhundert verändert: Niederschlagszunahme in Teilen Australiens, Nordamerikas und -europas, Niederschlagsabnahme in der Sahelzone.
3. Folgen der globalen Erderwärmung sind die Zunahmen extremer Wettersituationen (z. B. Zunahme der Starkniederschläge, Trockenheit und Dürren, minimale Nachttemperaturen) und Anstieg der Meeresspiegel (durch thermische Expansion sowie Abtauen des arktischen Eisschildes, der Schneedecken und der Gletscher).

Im Folgenden wird über den Einfluss einer Temperaturänderung auf die physikalisch/hydraulischen Parameter des Systems Boden/Sickerwasser und auf den Stoffaustausch mit dem Sickerwasser (bzw. auf die chemisch-physikalischen Parameter des Sickerwassers) unter Böden und aus Altlasten berichtet.

Eingesetzte Messanordnungen und verwendete Böden/Materialien

Als Messanordnungen wurden Laborsäulen und Freiland-lysimeter eingesetzt (*Abbildung 1*):

• Messanordnung I: Laborsäulen des Institutes für Hydrologie,

bestehend aus Acrylglassäulen der Nennweite 50 mm und der Länge 500 mm (KLOTZ 1992). Bestimmt wurden die hydraulischen Eigenschaften unter Variation der Temperatur, der Sickerwassergeschwindigkeit, des Wassergehaltes und der Saugspannung, als Lockersediment wurde ein gleichförmiger natürlicher Feinsand unter versuchstechnisch dichter Lagerung verwendet.

• Messanordnung II: Grosslysimeter der Anlage Neuherberg,

bestehend aus Edelstahlsäulen von 1,00 m² Querschnitt und 2,00 m effektiver Länge (KLOTZ & SEILER 1998), in die 4 x 4 Böden aus Bayern („Standorte“ und Bodenan-sprache s. *Tabelle 1*) eingebaut sind. Untersucht wurden die Änderungen des Wassergehaltes in den Böden und der Grundwasserneubildung unter Böden sowie der Stoffausträge (Hauptionen, DOC und Al) unter Böden mit dem Sickerwasser.

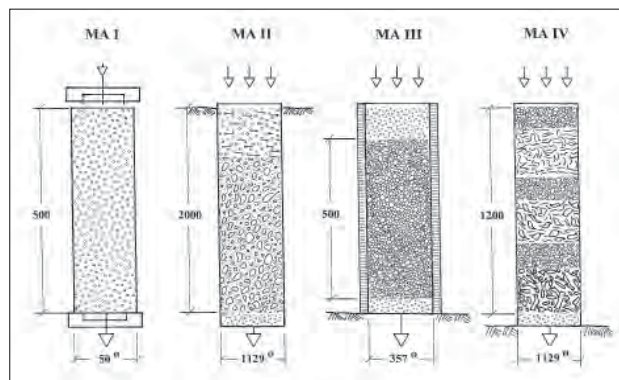


Abbildung 1: Schematische Darstellung der eingesetzten Messanordnungen; von links: Laborsäule (MA I), Großlysimeter (MA II), Kleinlysimeter (MA III), Kompostlysimeter (MA IV); Maße in [mm].

¹ Helmholtz-Zentrum München, Institut für Grundwasserökologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 NEUHERBERG

* Ansprechpartner: dietmar-klotz@t-online.de

Tabelle 1: Beschreibende Größen für die in die Gefäßlysimeter der Messanordnungen II bis IV eingebauten Materialien.

Boden, Material	Standort Bezeichnung	Boden-/Materialansprache	Horizont-Anzahl	Einbaumethode
Messanordnung II: Großlysimeter der Anlage Neuherberg Position: 48° 13,37 N, 11° 35,83 E, 491 m				
SCH	SCHEYERN	pseudovergleyte Braunerde	3	monolithisch
KEH	KELHEIM	Braunerde	3	monolithisch
HW	HOHENWART	Kolluvium ü. Braunerde	4	monolithisch
FK	FELDKIRCHEN	Rendzina	2	händisch
Messanordnung III: Kleinlysimeter des Instituts für Hydrologie Position: 48° 13,43 N, 11° 35,78 E, 494 m				
BO	Kontam. Boden	Mittelsand-Bereich	1	händisch
MV	Hausmüllv.-Asche	Mittel-/Grobsand-Bereich	1	händisch
BS	Bauschutt	Mittelsand-Bereich	1	händisch
Messanordnung IV: Kompostlysimeter München-Freimann Position: 48° 11,41 N, 11° 37,26 E, 497 m				
KP	Kompost	Äste, Laub, Gras, Boden	3	händisch

• **Messanordnung III: Kleinlysimeter des Instituts für Hydrologie,**

bestehend aus drei Edelstahlsäulen von 0,10 m² Querschnitt und 0,65 m effektiver Länge (KLOTZ 2006), in die drei verschiedene Altlasten (Materialansprache s. *Tabelle 1*) von 0,50 m Mächtigkeit eingebaut waren (Betriebszeit: Februar 2002 bis November 2004). Untersucht wurde der Einfluss des Extremsommers 2003 auf die Schadstoff-Quellstärken der Altlasten.

• **Messanordnung IV: Kompostlysimeter München-Freimann,**

bestehend aus übereinander angeordneten Kunststoff-Rohrabschnitten von 1,00 m² Querschnitt und 1,20 m effektiver Länge (KLOTZ 2007 a), in das zu Versuchsbeginn zerkleinerte Äste, Laub, Grasschnitt und bereits kompostierte Erde (s. *Tabelle 1*) versuchstechnisch dicht eingefüllt waren. Es wurde der Einfluss der zu warmen Winter 2006/07 und 2007/08 (gegenüber dem mehrjährigen Mittel) auf die Leitfähigkeit des Sickerwassers untersucht (Untersuchungszeitraum: Juni 2004 bis Februar 2008).

Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung von beschreibenden Größen für die in die Lysimeter der Gelände-Messanordnungen (II bis IV) eingebauten Böden, Altlasten-Materialien und des zu kompostierenden Materials.

Temperaturerhöhungen an den eingesetzten Messanordnungen

Erhöhte Temperaturen an den Messanordnungen MA können entweder durch künstliche kontinuierliche Wärmezufuhr (MA I und teilweise II) oder durch Ausnutzung extremer natürlicher Temperaturen über bestimmte Zeiträume (meteorologische Jahreszeiten) (MA II, IV und teilweise II) eingestellt werden:

1. Temperaturen im Bereich 3 °C bis 35 °C wurden in den Laborsäulen (MA I) durch ihren Einbau in eine Klimakammer erzeugt.

2. In der Betriebszeit 2001 bis 2008 der Lysimeter (MA II, III und IV) traten große Variationen in den klimatischen Parametern auf. Für die Temperaturen im Münchner Norden erhält man für die mittleren Temperaturen der meteorologischen Jahreszeiten dasselbe Muster (*Abbildung 2*): die Werte liegen i. a. im entsprechenden Bereich des 20-jährigen Mittels. Ausnahmen bilden der zu warme meteorologische Sommer 2003 sowie die zu warmen Winter 2006/07 und 2007/08, die als Modelle für den globalen Wandel in den Messanordnungen II (teilweise), III bzw. IV dienen können.

3. Zwei der vier Großlysimeter jeden Standortes (MA II) waren ab Juni 2001 mit oberflächlich aufgelegten Heizspiralen der Fa. Umweltanalytische Messsysteme GmbH, München (UNOLD 2005) ausgestattet, um den natürlichen Temperaturverlauf (*Abbildung 2*) um 3 °C zu erhöhen.

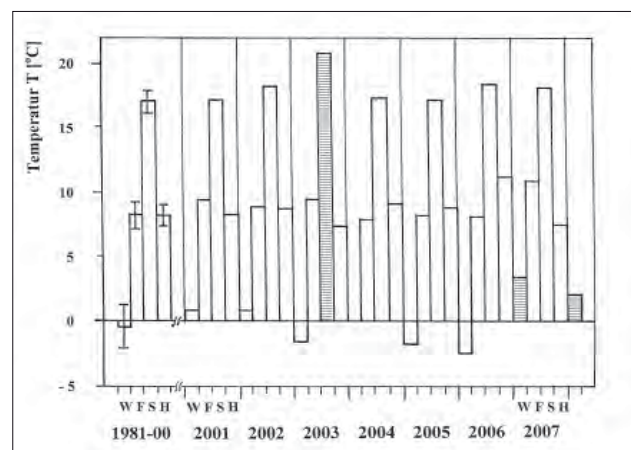


Abbildung 2: Mittlere Lufttemperaturen T im Münchner Norden der meteorologischen Jahreszeiten Winter 2000/01 bis Winter 2007/08 sowie Werte des 20-jährigen Mittels (1981 – 2000); Werte nach DWD, Oberschleißheim und Flughafen München.

Ergebnisse der physikalisch-hydraulischen Untersuchungen

Hydraulischen Parameter in Messanordnung I

In die Säulen der MA I, in die ein Feinsand gut reproduzierbar dicht eingebaut war, wurde die Abhängigkeit eines speziellen hydraulischen Parameters (z. B. Durchlässigkeit) von der Temperatur bei Konstanzhaltung anderer Größen (z. B. Wassergehalt, Saugspannung) bestimmt. Die durch den globalen Wandel prognostizierte Temperaturerhöhung von 3 bis 5 °C hat zusammengefasst folgende Einflüsse auf die hydraulischen Parameter des Systems Boden/Sickerwasser (KLOTZ 2007 b):

1. Zunahme der Durchlässigkeit von ca. 9 bis 15 %, da sie umgekehrt proportional der kinematischen Zähigkeit des Sickerwassers ist.
2. Geringe Abnahme
 - des totalen und effektiven Wassergehaltes (für Feinsand von maximal 0,8 bzw. 0,5 %) sowie
 - der Saugspannung (für Feinsand von maximal 5 %).
3. Zunahme der Dispersivität (für Feinsand um ca. 3 bis 5 %).

D. h. bei einer Temperaturerhöhung werden die Sickerwassergeschwindigkeiten in Böden anwachsen (wegen 1. und 2.) und Schadstoffe werden beim Transport breiter in Strömungsrichtung verschmiert (wegen 3.).

Sickerwassermengen aus den Lysimeterböden der Messanordnung II – Einfluss einer kontinuierlichen Temperaturerhöhung um 3 °C

Die Untersuchungen fanden über neun Jahre (1997 – 2005) in je vier verschiedenen Böden (Tabelle 2) statt:

- Versuchsabschnitt A (01/1997 – 05/2001): alle (16) Lysimeter nicht beheizt.
- Versuchsabschnitt B (06/2001 – 12/2004): je zwei Lysimeter pro Boden durch aufgelegte Heizspiralen beheizt

Tabelle 2: Sickerwassermengen [mm] von 2 x 2 Lysimetern von vier verschiedenen bayerischen Böden ohne (-) und mit (+) aufgelegten Heizspiralen ($\Delta T = + 3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Standort ↓/ Zeitraum →	01/1997 – 05/2001		06/2001 – 12/2005	
Heizung →	-	-	-	+
Niederschlagsmenge N [mm]	3954		4305	
SCHEYERN (Schluffboden)	1578 0,40 · N	1548 0,39 · N	1192 0,28 · N	1250 0,29 · N
KELHEIM (Sandboden)	1526 0,39 · N	1690 0,43 · N	1957 0,45 · N	1502 0,35 · N
HOHENWART (kiesiger Sandboden)	1756 0,44 · N	1725 0,44 · N	1835 0,43 · N	1249 0,29 · N
FELDKIRCHEN (sandiger Kiesboden)	1751 0,44 · N	1740 0,44 · N	1863 0,43 · N	1793 0,42 · N

Tabelle 3: Niederschlagsmengen [mm] und Sickerwassermengen [mm] unter vier Böden für die Jahre 2003 und 2004 im Vergleich zum mehrjährigen Mittel 1996 – 2002.

Standort ↓/ Zeitraum →	1996 - 2002	2003	2004
Niederschlag N	957	617	852
SCHEYERN (Schluffboden)	367 0,38 · N	97 0,16 · N	112 0,13 · N
KELHEIM (Sandboden)	448 0,47 · N	178 0,29 · N	400 0,47 · N
HOHENWART (kiesiger Sandboden)	404 0,42 · N	189 0,91 · N	319 0,37 · N
FELDKIRCHEN (sandiger Kiesboden)	427 0,45 · N	234 0,38 · N	332 0,39 · N

($\Delta T = + 3 \text{ }^\circ\text{C}$), die restlichen („Normal“-)Lysimeter laufen unter natürlichen Temperaturen (mit aufgelegten Heizspiralen-Attrappen).

Zusammengefasst folgt (KLOTZ 2007 b):

1. Im Normalbetrieb (Versuchsabschnitt A) über ca. 4 ½ Jahre sind die Sickerwassermengen der vier Lysimeter jeden Standortes im Rahmen der Messgenauigkeit gleich (Tabelle 2).
2. Die Sickerwassermengen für den Versuchsabschnitt B über ca. 4 ½ Jahre zeigen (Tabelle 2), dass bei einer Temperaturerhöhung von 3 °C nur messbar die Sickerwassermengen in den Böden mit durchlässigen (sandigen) Oberböden (Standorte KELHEIM und HOHENWART) abnehmen.

Sickerwassermengen aus den Lysimeterböden der Messanordnung II – Einfluss des Extremjahres 2003

Für das Jahr 2003 mit einem Niederschlagsdefizit von ca. – 340 mm und einem um ca. + 3,7 °C wärmeren Sommer als das zehnjährige Mittel haben starken Einfluss auf die Sickerwassermengen („Grundwasserneubildung“ GWN) unter Böden (KLOTZ 2007 c):

1. Sie betragen 2003 nur ca. ¼ (Standort SCHEYERN) bis ca. ½ (Standort FELDKIRCHEN) des langjährigen Mittels (Tabelle 3).
2. Die GWN kam im meteorologischen Sommer 2003 fast zum Erliegen, der Wassergehalt der Böden nahm ab.
3. Ab Oktober 2003 (Starkniederschläge) wurden die Böden wieder aufgefüllt, der Schluffboden SCHEYERN war erst 2005 (GWN = 0,41 · N), die drei anderen Böden schon 2004 wieder aufgefüllt (Tabelle 3).

Wassergehaltsänderungen der Lysimeterböden der Messanordnung II – Einfluss des Extremjahres 2003

Die Wassergehalte der Lysimeterböden wurden aus den stündlich registrierten Gesamtgewichten der Lysimeter berechnet (KLOTZ 2008). Als Folge der klimatischen Extrembedingungen des Jahres 2003 wird auch der Wassergehalt der Böden stark reduziert (Tabelle 4). Diese

Tabelle 4: Berechnete mittlere totale Wassergehalte der untersuchten vier Lysimeterböden.

Jahr/Standort→	SCHEYERN	KELHEIM	HOHENWART	FELDKIRCHEN
2002	0,354	0,390	0,216	0,082
2003	0,273	0,345	0,189	0,066
2004	0,314	0,354	0,213	0,056
2005	0,313	0,355	0,213	0,062

Änderung wird nicht verursacht durch Entwässerung der Grobporen, sondern

- durch gesteigerte Verdunstung von den oberen Bodenhorizonten aus,
- durch zunehmenden Wasserbedarf der Pflanzendecke und
- durch Ausgleich der Wassergehalte der Bodenhorizonte durch Saugspannungsänderungen.

Ergebnisse der chemischen Untersuchungen des Sickerwassers

Stoffausträge aus Lysimeterböden der Messanordnung II – Einfluss einer Temperaturerhöhung um 3 °C

Beim Vergleich der Stoffkonzentrationen der zwei beheizten Lysimeter und der Konzentrationen der Normallysimeter der vier untersuchten Böden ist zu beachten,

- dass i. a. bei herrschenden Matrixflüssen in den Lysimetern mit Sickerwassergeschwindigkeiten im „Meter/Jahr-Bereich“ Änderungen der Stoffkonzentrationen verzögert und durch Vermischungsprozesse stark vermindert im Lysimeterauslauf registriert werden,
- dass aber bei einem gewissen Mindest-Wassergehalt der Böden (im Untersuchungszeitraum erfüllt für die Jahre 2001 und 2002) und stattfindenden Starkregenereignissen Bypassflüsse mit Sickerwassergeschwindigkeiten im

„Meter/Tag-Bereich“ auftreten, d. h. Änderungen der Stoffkonzentrationen im Lysimeterauslauf stark und fast sofort registriert werden.

In *Tabelle 5* sind die mittleren Stoffkonzentrationen c_B der beheizten und die Konzentrationen c_N der Normallysimeter (unter natürlichen Temperaturen) im Zeitraum 06/2001 bis 12/2004 gegenübergestellt. Für ca. 60 % der registrierten Stoffe ist dabei $c_B > c_N$.

Quelltermänderungen der in Messanordnung III eingebauten Altlasten – Einfluss des Extremjahres 2003

Die in die Kleinlysimeter anfangs dicht eingebauten Materialien kontaminierter Boden BO, Hausmüllverbrennungssasche MV und Bauschutt BS erfahren während der Versuchszeit 02/2001 - 11/2004 durch Lösungsprozesse Massenverluste ΔM

BO ($\Delta M = 6\%$) < MV ($\Delta M = 16\%$) < BS ($\Delta M = 38\%$) und ändern die sedimentphysikalischen Parameter Porosität, Korngröße und spezifische Oberfläche sowie auch die Mineralisation und den DOC-Gehalt des Sickerwassers.

Die **Hausmüllverbrennungssasche** ist mit Schwermetallen kontaminiert. **Cu** (*Abbildung 3*, links) wird für das klimatische Normaljahr 2002 in Näherung exponentiell ausgelaugt. Die ansteigenden Cu-Quellstärken für die Sommer- und Herbstmonate des Extremjahres 2003 und auch (abgeschwächt) für 2004 im Vergleich zu den Minimalwerten des Winters 2002/03 und 2003/04 sind bedingt (MERKEL & SPERLING 1998)

- durch die Zunahme der Cu-Löslichkeit und der -Mobilität mit steigender Temperatur,
- durch zunehmende Cu-Mobilisierung für pH > 6 durch lösliche Komplexbildner und
- durch huminstoffgetragenen Cu-Transport.

Der **Bauschutt** ist hauptsächlich mit **PAK's** kontaminiert (KLOTZ & SCHRAMM 2006). In der Betriebszeit des BS-Kleinlysimeters zeichnen sich vier PAK-Quellstärkebereiche ab (*Abbildung 3*, Mitte):

Tabelle 5: Im Untersuchungszeitraum 06/2001 – 12/2004 bestimmte Stoffkonzentrationen in [mg/l] (für Al in [µg/l]) der Sickerwässer für beheizte ($\Delta T = +3\text{ °C}$) Lysimeter (c_B) und für Lysimeter unter natürlichen Temperaturen (c_N).

Konz.	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	DOC	Al
Standort SCHEYERN (Schluffboden)									
c_B	0,562	4,95	56,3	22,9	11,3	33,6	21,2	3,08	53,2
c_N	0,506	5,23	51,8	22,2	7,52	38,3	21,0	2,94	71,2
Standort KELHEIM (Sandboden)									
c_B	0,456	5,93	42,5	9,92	12,3	22,3	14,9	1,28	23,9
c_N	0,405	8,08	47,6	11,0	7,34	31,8	20,8	1,51	16,7
Standort HOHENWART (kiesiger Sandboden)									
c_B	0,418	6,99	41,0	7,14	16,0	104	21,0	1,47	13,2
c_N	0,427	9,49	24,1	3,63	12,6	31,9	13,0	1,15	7,60
Standort FELDKIRCHEN (sandiger Kiesboden)									
c_B	0,478	1,67	59,2	13,1	1,51	93,4	12,1	2,17	8,06
c_N	0,636	1,85	52,7	11,8	1,49	63,7	9,88	2,08	10,2

1. Anlaufphase (Frühjahr 2002), bedingt durch starke Masenauslaugung der BS-Matrix und starke Mineralisation des Sickerwassers. Folge: geringe PAK-Quellstärken (ca. 2,4 µg/l).
2. Ca. „konstante“ PAK-Auslaugung (Sommer 2002 bis Winter 2002/03): gewichtete PAK-Quellstärke 19 µg/l.
3. Reduzierung der PAK-Auslaugung für das Extremjahr 2003: gewichtete PAK-Quellstärke ca. 9 µg/l.
4. Näherungsweise exponentieller Abfall der Quellstärke für das Normaljahr 2004, gewichtete PAK-Quellstärke ca. 24 µg/l.

Der **kont. Boden** ist mit **MKW's** kontaminiert (KLOTZ & SCHRAMM 2006). In der Betriebszeit des BO-Kleins lysimeters sind drei MKW-Quellstärkebereiche erkennbar (*Abbildung 3*, rechts):

1. Ca. „konstante“ MKW-Auslaugung 2002 mit gewichteter MKW-Quellstärke 615 ng/l.

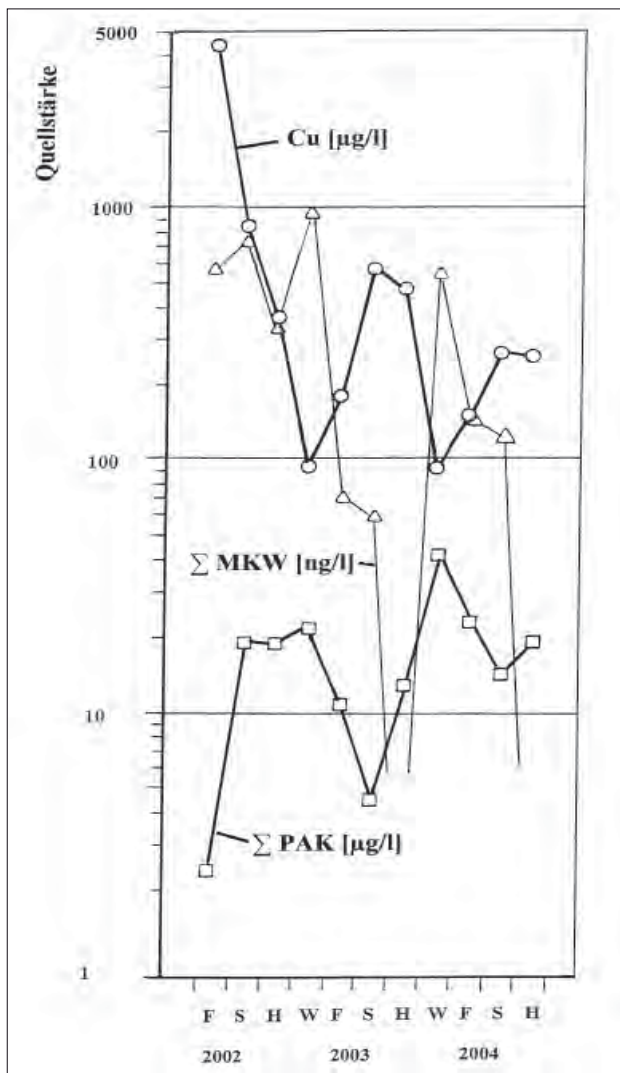


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Cu- (Messpunkte: ○), der PAK- (□) und der MKW-Quellstärke (Δ) aus den Altlastenlysimetern MV, BS bzw. BO während der Betriebszeit 02/2002 bis 11/2004.

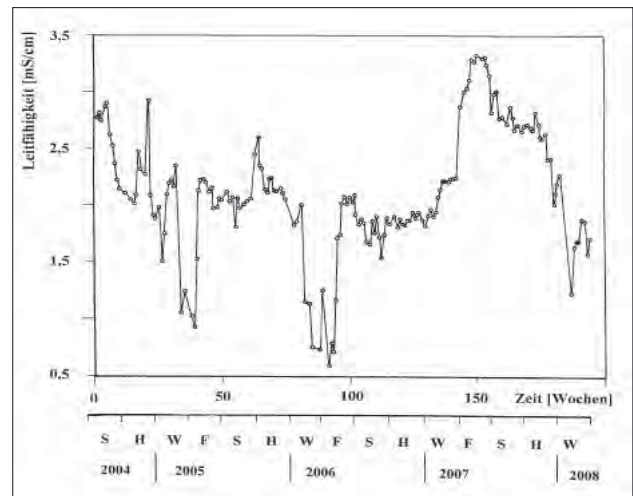


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Leitfähigkeit des Sickerwassers des Kompostlysimeters Freimann.

2. Minimale bzw. nicht nachweisbare Auslaugung für das Extremjahr 2003: gewichtete MKW-Quellstärke 37 ng/l.
3. Exponentieller Abfall der MKW-Quellstärke für das Normaljahr 2004 (gewichtete MKW-Quellstärke 200 ng/l).

Leitfähigkeitsänderungen des Sickerwassers des Kompostlysimeters (Messanordnung IV) – Einfluss der warmen Winter 2006/07 und 2007/08

Der Abbau der zu kompostierenden, organischen Abfallmaterialien fand hauptsächlich in den Sommerhalbjahren statt und war verbunden mit einem starken Einsacken der Lysimeterbefüllung. Für die Winter 2004/05 und 2005/06 mit etwas tieferen Temperaturen als das langjährige Mittel (*Abbildung 2*) werden Minimas der Mineralisation des Sickerwassers registriert (*Abbildung 4*). Für die Winter 2006/07 und 2007/08, die ca. 4 °C bzw. ca. 2,5 °C wärmer als das mehrjährige Mittel waren, sind diese Leitfähigkeitseinbrüche nicht vorhanden, d. h. die zu kompostierenden Materialien werden stärker als in Normal-Wintern abgebaut.

Literatur

- HANSEN, J.E., 2005: Lässt sich die Klimazeitbombe entschärfen? – Spektrum der Wissenschaft, 50-58.
- KLOTZ, D., 1992: Erfahrungen mit Säulenversuchen zur Bestimmung der Schadstoff-Migration. – GSF-Bericht 07/91, 118 S.
- KLOTZ, D., 2006: Eingesetzte Messanordnungen zur Sickerwasserprognose – Säulen und Lysimeter. – In: Untersuchungen in Laboranordnungen und Freilandlysimetern zur Sickerwasserprognose (Hrsg.: D. Klotz), GSF-Bericht 01/06, 6-17.
- KLOTZ, D., 2007 a: Untersuchungen an einem einfachen Kompost-Lysimeter. – In: Lysimeter im Konnex zu nationalen und internationalen Regelwerken, Berichte der Höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Gumpenstein/Österreich, 155-157.
- KLOTZ, D., 2007 b: Einfluss des prognostizierten globalen Wandels auf die Sickerwasserparameter von Böden. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 51, 170-180.
- KLOTZ, D., 2007 c: Einfluss des Trockenjahres 2003 auf die Grundwasserneubildung unter Böden. – Wasserwirtschaft, 12/07, 25-29.

- KLOTZ, D., 2008: Auswirkungen des Extremjahres 2003 auf den Wassergehalt von Böden. – WasserWirtschaft, 05/08, 16-20.
- KLOTZ, D. und K.P. SEILER, 1998: Die GSF-Lysimeteranlage Neuherberg. – GSF-Bericht 23/98, 56 S.
- KLOTZ, D. und K.W. SCHRAMM, 2006: Sickerwasserergebnisse der GSF-Kleinlysimeter. – In: Untersuchungen in Laboranordnungen und Freilandlysimetern zur Sickerwasserprognose (Hrsg.: D. Klotz), GSF-Bericht 01/06, 92-130.
- KOHL, H. und H. KÜHR, 2004: Klimawandel auf der Erde – die planetare Krankheit. – Spektrum der Wissenschaft, 32-39.
- MERKEL, B. und B. SPERLING, 1996: Hydrogeochemische Stoffsysteme – Teil 1. – Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Heft 110, 288 S.
- UNOLD, G., 2005: UMS-measure to know: Boden, Wasser, Pflanze, Klima. – UMS GmbH, München, 63 S.

Einsatz des Modells CANDY auf der Lysimeteerebene - Simulation des Wassertransportes von wägbaren Präzisionslysimetern

Enrico Thiel^{1*}, Johann Fank² und Uwe Franko¹

Zusammenfassung

Auf der landwirtschaftlichen Versuchsfläche Wagna (Österreich) wurden 2004 zwei wägbare monolithische Präzisions – Unterdrucklysimeter mit einem bodenhydrologischen Messprofil errichtet, um die Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Grundwasserhältnisse zu untersuchen. Ein Gras-Referenzlysimeter ergänzt die Instrumentierung des Untersuchungsfeldes seit 2006.

Basierend auf den Lysimeterdaten wurde das Prozessmodell CANDY regionalspezifisch kalibriert. CANDY ermöglicht die Simulation der Dynamik von Kohlenstoff und Stickstoff in der ungesättigten Zone agrarisch genutzter Böden als eindimensionale Prozesse auf Tagesschrittweite. Das Modell verarbeitet dazu für ein definiertes Bodenprofil, Bewirtschaftungsdaten und den Wetterverlauf. Grundlage für die Simulation von Stoffumsetzung und -transport bildet dabei eine korrekte Abbildung des Wasserhaushaltes.

Im Beitrag wird die Anwendbarkeit des Wasserbilanzteils des Modellsystems CANDY für das ackerbaulich bewirtschaftete Lysimeter und das Gras-Referenzlysimeter vorgestellt. Dabei werden die Schwierigkeiten des Modelleinsatzes außerhalb seines ursprünglichen Kalibrierungsraumes diskutiert.

Schlagwörter: Wagna, Modellierung, ungesättigte Zone, Wasserfluss, Kapazitätskonzept

Summary

Two weighable monolithic equilibrium suction field lysimeters were installed at the field research site Wagna (Austria) in 2004. Using data from high precision lysimeters and accompanying soil hydrologic measuring profiles the influence of different management systems on groundwater quality are investigated, water movement and nutrient transport in the unsaturated zone are being determined. An additional grass reference lysimeter has been installed in 2006.

Lysimeter data has been used to calibrate the simulation system CANDY for site specific conditions. CANDY describes relevant soil processes concerning the dynamics of C and N as one-dimensional processes on a daily time step. Key driving variables are soil physical properties, meteorological data and management information. Simulation of mass specific transfer is based on a well known soil water balance.

In this paper the adaptability of soil water balance part of the CANDY model at the conventional cultivated lysimeter, and the grass reference lysimeter at Wagna test site will be presented. The problem of using a model outside of its primary calibration area is discussed.

Keywords: Wagna, modelling, vadose zone, water movement, capacity-type model

Einleitung

Seit dem Inkrafttreten der europäischen Wasserrahmenrichtlinie am 22.12.2000 existiert eine europaweite Vereinheitlichung des Gewässerschutzes. Im Rahmen der hier geforderten Erstellung der Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme werden signifikante anthropogene Belastungen für die Oberflächenwasserkörper und anthropogene Belastungen für das Grundwasser bestimmt (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2000). Hierzu zählen u. a. die Belastungen aus diffusen Quellen (z. B. landwirtschaftlich genutzte Bereiche). Modelle bilden dabei geeignete Werkzeuge, um langfristige Prognosen und Szenarienvergleiche zu erstellen. Hierzu müssen die entsprechenden Modelle aber geeignet und für die jeweiligen Untersuchungsräume kalibriert sein. Eine adäquate Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes bildet

dabei die Grundlage für eine anschließende Simulation der wassergebundenen Stoffdynamik. Im Beitrag werden deshalb die Anwendbarkeit des Modellsystems CANDY und die Simulationsergebnisse hinsichtlich der Nachbildung der Wasserbilanz eines Grünland- und eines Ackerlysimeters an einem stark vom Kalibrierungsraum des Modells CANDY abweichenden Standort diskutiert. Auf die Anforderungen an die Messdatengewinnung aus Sicht der Modellanwendung wird eingegangen.

Material und Methoden

Die Lysimeterstation Wagna

In der Gemeinde Wagna (Steiermark, Österreich) wurde 1987 ein Großparzellenversuch angelegt, um unter ortsüb-

¹ Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ), Department of Soil Physics, Theodor-Lieser-Straße 4, D-06120 HALLE/SAALE

² Joanneum Research, Institute of Water Resources Management - Hydrogeology and Geophysics, Elisabethstraße 16/II, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: enrico.thiel@ufz.de

lichen Bewirtschaftungsbedingungen die Auswirkungen unterschiedlicher Kulturführungen und Düngenniveaus auf die Ertragssituation untersuchen zu können (FASTL und ROBIER 2008). Der Standort Wagna liegt 266 m ü. A., ca. 45 km südlich von Graz im Leibnitzer Feld, einer quartären Schotterterrasse mit geringmächtiger, gut durchlässiger Bodenauflage. Die Mächtigkeit des Feinbodens variiert kleinräumig zwischen 25 - 150 cm. Der Skelettanteil ist relativ hoch und variiert zwischen 0 - 78 M.%. Im Zentrum der Versuchsfläche befinden sich seit dem Herbst 2004 in zwei Feldern je ein monolithisch gestochenes wägbares Unterdrucklysimeter (FANK und VON UNOLD 2007) mit einem bodenhydrologischen Messprofil. Ein Gras-Referenzlysimeter wurde im Frühjahr 2006 am Rande der Versuchsflächen errichtet (VON UNOLD und FANK 2008). Die Lysimeter besitzen eine Oberfläche von 1 m². Die Unterkante der beiden Ackerlysimeter liegt mit 2 m Tiefe deutlich unter der hydraulischen Wasserscheide. Das Gras-Referenzlysimeter weist eine Tiefe von 1 m auf und ermöglicht damit auch die Messung von vertikal nach oben gerichteten Flüssen (FANK und VON UNOLD 2007). Der mittlere Jahresniederschlag (1982-2007) beträgt 892 mm a⁻¹ bei einer mittleren Jahrestemperatur von 10,1° C. Für die hier vorgestellten Modellierungen wurden die anhand der Lysimeterganglinie korrigierten Niederschläge verwendet (FANK 2006). Aus der Auswertung der Lysimeter-Gewichtsganglinie waren auch Werte der aktuellen Evapotranspiration für die Modellierung verfügbar. Für Bodenbearbeitungsmaßnahmen können die Wiegezellen der Ackerlysimeter abgesenkt werden. Somit kann die Lysimeterfläche konsistent zur umgebenden Parzellenfläche bewirtschaftet werden (FANK 2008 a). Die Fruchtfolgeglieder des konventionell bewirtschafteten Lysimeters seit Herbst 2004 waren: abfrierende Zwischenfrucht – Ölkürbis – winterharte Gründücke – Körnermais – winterharte Gründücke – Körnermais – Wintergerste. Der Grasbestand des nicht gedüngten Grünlandlysimeters wird auf konstant 12 cm (FANK 2007) gehalten, der Schnitt verbleibt als Mulchmaterial auf der Fläche. Das Ackerlysimeter ist in Abstimmung mit den verschiedenen Bodenhorizonten mit Sensoren zur Erfassung der Bodentemperatur, des Bodenwassergehaltes und des Matrixpotenzials ausgestattet (ROCK und FANK 2008, FANK und VON UNOLD 2007). Das Sickerwasser wird mittels eines Saugkerzenrechen in 190 cm Tiefe entnommen. Dabei entspricht der an die Saugkerzen angelegte Unterdruck dem Matrixpotential, das nahe dem Lysimeter im durch den Lysimeterbau unbeeinflussten Versuchsfeld in gleicher Tiefe gemessen wird. Das Wiegesystem lässt eine Messgenauigkeit von 50 g zu, das entspricht einer Wassergehaltsänderung von 0,05 mm. Das Gras-Referenzlysimeter ist ein einfach ausgestattetes Präzisionslysimeter zur Erfassung der Parameter für die Wasserbilanzgleichung (FANK und VON UNOLD 2007).

Das Simulationsmodell CANDY

Bei dem Modell CANDY (CARbon and Nitrogen DYNAMics) handelt es sich um ein etabliertes C/N-Simulationsmodell, welches in zahlreichen Studien zur Quantifizierung von Stoffumsätzen und Stoffausträgen in der ungesättigten Bodenzone, sowie zur Ableitung von Indikatoren für

eine umweltgerechte Landnutzung eingesetzt wurde (u. a. FRANKO und SCHENK 2001, FRANKO et al. 2006, VOLK et al. 2000). Arbeitsfelder bildeten bisher schwerpunktmäßig die Querfurter Platte, das Partheinzugsgebiet, der Torgauer Raum und das Einzugsgebiet der Saale. Eine regionale Anwendung des Modells fand u. a. im Bundesland Sachsen-Anhalt (FRANKO et al. 2006) statt. Das Modell CANDY wurde anhand der Daten des Untersuchungsstandortes Bad Lauchstädt erstellt, kalibriert und validiert (FRANKO 1989, FRANKO 1997). Dabei handelt es sich um einen ebenen tiefgründigen Lößstandort, 113 m ü. NN, mit einem Schwarzerdeprofil (Bodenart Lehm, Bodenwertzahl 94-98) im Mitteldeutschen Trockengebiet mit einer mittleren Jahrestemperatur (1902-1992) von 8,8 °C und einer mittleren Jahresniederschlagssumme (1902-1992) von 480 mm (KÖRSCHENS et al. 1994).

CANDY wurde entwickelt, um die Dynamik des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes im Boden sowie der Bodentemperatur und des Bodenwassergehaltes als eindimensionale Prozesse für ein Bodenprofil zu beschreiben (FRANKO 1989). Dieses Profil wird in homogene Bodenschichten von 1 dm Mächtigkeit aufgeteilt. Das Standardsystem besteht aus einem in eine Bedieneroberfläche eingebetteten Simulationsmodell und umgebenden Datenbanken, die Informationen zu den erforderlichen Parametern, zum Modellantrieb sowie zu Anfangswerten und eventuell vorhandenen ergänzenden Messreihen enthalten. Die Bodenprozessdynamik wird in Tagesschritten abgebildet.

An Eingangsdaten benötigt das Simulationsmodell CANDY folgende Parameter:

- *Boden (für 1 dm – Schichten)*: organischer Kohlenstoffgehalt, Ton- und Schluffgehalt, Feldkapazität, permanenter Welkepunkt, Trockenrohdichte, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit.
- *Wetter (als Tageswerte)*: Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer.
- *Management (als Terminwerte)*: Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngemanagement, Ernteergebnisse.

Das Wassermodul von CANDY basiert auf einem Kapazitätskonzept nach KOITZSCH (1990). Bei Überschreitung des schichtspezifischen Wertes der Feldkapazität ist aufgrund der Wasserfüllung der Grobporen eine abwärtsgerichtete Wasserbewegung möglich. Durch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird die Geschwindigkeit dieser Abwärtsbewegung über den Versickerungsparameter Lambda nach GLUGLA (1969) gesteuert. Ein Wasseranstieg erfolgt nur bei einer Bodenwasserfüllung über dem schichtspezifischen permanenten Welkepunkt durch die Prozesse von Evaporation und Transpiration. Der gesamte Prozess der Evapotranspiration wird nach einem modifizierten TURC-Ansatz nach KOITZSCH (1990) und KOITZSCH und GÜNTHER (1990) berechnet.

Das Pflanzenwachstum und der N-Entzug wird im Modell CANDY - wie in FRANKO et al. (1995) dargestellt - beschrieben.

Für die zu modellierende Kulturart Ölkürbis in der Fruchtfolge des Ackerlysimeters lagen bisher noch keine CANDY-Pflanzenparameter vor. Um die Pflanzenent-

wicklung beschreiben zu können, wurden die Parameter Vegetationsdauer und N-Gehalt des Erntegutes aus den in Wagna ermittelten Messwerten abgeleitet. Die Parameter maximale Durchwurzelungstiefe, maximale Bestandeshöhe und ertragsunabhängige konstante N-Menge in den Ernte- und Wurzelrückständen wurden aus JOVANOVIĆ und ANNANDALE (2000) und WÖNNEBERGER und KELLER (2004) übernommen. In den Datensätzen für die Koppelprodukte sind das C/N-Verhältnis in der organischen Substanz, der Trockensubstanzgehalt und der C-Gehalt in der Trockenmasse aus den Messwerten von Wagna abgeleitet worden.

Die hier vorgestellten Modellierungen wurden mit der Modellversion CANDY 2.7.2.2 durchgeführt.

Ergebnisse

Gras-Referenzlysimeter

Die Kalibrierung des Modells CANDY am Grünlandlysimeter erfolgte durch den Vergleich der gemessenen mit den simulierten Daten. Dabei wurde versucht, das Modellverhalten hinsichtlich der gemessenen Zielgrößen, aktuelle Evapotranspiration (ET_a) und Sickerwassermenge zu optimieren. Das Grünlandlysimeter wird am Standort Wagna so geführt, dass in Zeiten mit ausreichender Wasserverfügbarkeit die gemessene Verdunstung (ET_a) der berechneten FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_{pot}) entspricht (FANK 2008 b). Aus dem Vergleich der zwei unterschiedlichen Berechnungsverfahren der potenziellen Verdunstung wurde erkennbar, dass die mit CANDY modellierten Summenwerte, die nach FAO-Penman-Monteith berechneten Werte nach einem Simulations-Auswertzeitraum von 17 Monaten (01.01.2007 bis 31.05.2008 mit einer Modell-Vorlaufzeit von 8 Monaten) um 99 mm übersteigen. Aufgrund dieser Modellabweichung wurde das Modell erweitert, sodass Werte der potenziellen Verdunstung (hier berechnete FAO-

Gras-Referenzverdunstung) von externen Quellen gelesen werden können.

In *Abbildung 1* sind die Summenkurven der Simulationsergebnisse und der Messung der ET_a für den Auswertzeitraum dargestellt. Die FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_{pot}) wurde hierbei für den Modellierungsvorgang extern vorgegeben. Der kumulative Verlauf der ET_a wird gut nachgebildet; über einen Zeitraum von 17 Monaten liegen die berechneten Werte 12 mm über den Gemessenen (927 mm). Diese Anpassungsgüte konnte durch eine Verringerung des Bedeckungsgrades auf 70 % erreicht werden, welche aus Lücken im Bestand begründet wird.

Auch für den Vergleich der Sickerwassermengen (*Abbildung 1*) wurden verschiedene Kalibrierungsvarianten geprüft. Eine Anpassung der Summe der Versickerung wurde durch die Änderung der Feldkapazität (FK) und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (K_s) in allen 3 Bodenhorizonten angestrebt. Dabei wurden die FK und K_s in vorher definierten Grenzen variiert. Die Grenzen für die Optimierung der Bodenparameter ergaben sich hierbei aus der Spannweite der Messwiederholungen zur FK und K_s im Labor. In *Abbildung 1* sind die gemessenen und modellierten kumulativen Sickerwassermengen bei Anpassung der FK für das Grünlandlysimeter dargestellt. Es wird deutlich, dass die gemessene und modellierte kumulative Sickerwassermenge bei Anpassung der FK gemäß der definierten Grenzen - die FK erreicht in allen 3 Horizonten die Obergrenze der Spannweite - die gleiche Größenordnung haben. Am Ende des Auswertzeitraums 01.01.2007 bis 31.05.2008 ist die modellierte Sickerwasserbildung 1 mm höher als die gemessene kumulative Sickerwassermenge (262 mm). Die größten Abweichungen treten in den Perioden 01/2007 bis 03/2007 und 09/2007 bis 03/2008 auf. Dies könnte auf eine unzureichende Abbildung von Frost- und Auftauprozessen im Modell zurückzuführen sein. Aufgrund der guten Übereinstimmung der kumulativen Sickerwassermengen

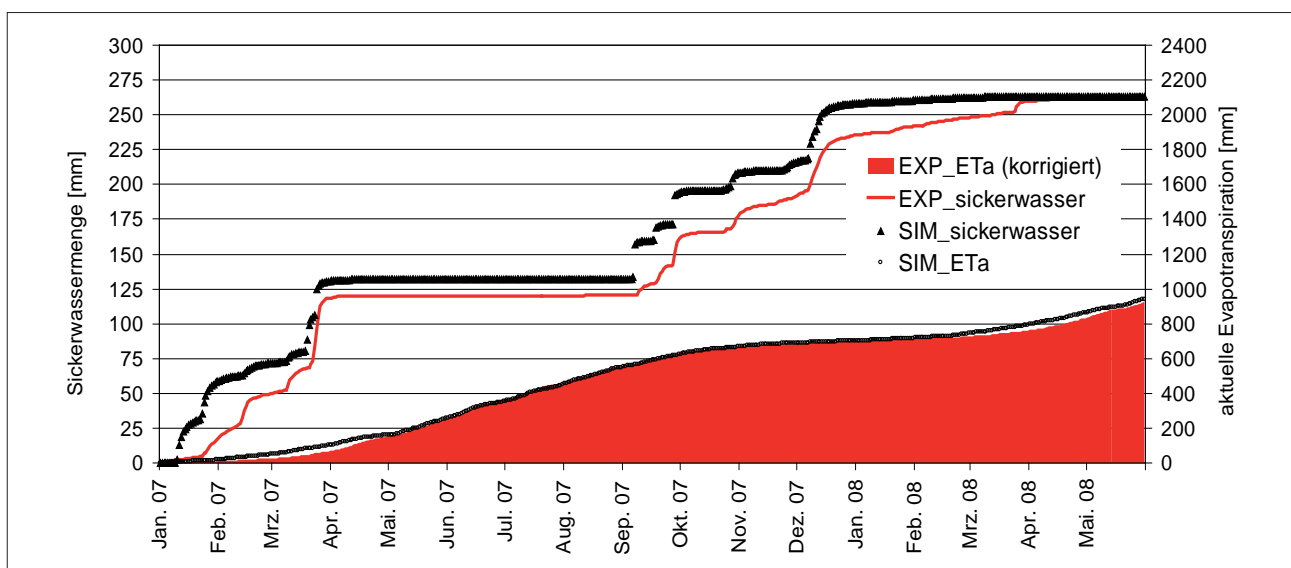


Abbildung 1: Vergleich der gemessenen (EXP_ETa) und mit CANDY modellierten aktuellen Evapotranspiration (SIM_ETa) sowie gemessenen (EXP_sickerwasser) und modellierten Sickerwassersummen (SIM_sickerwasser) bei Anpassung der Feldkapazität für das Gras-Referenzlysimeter.

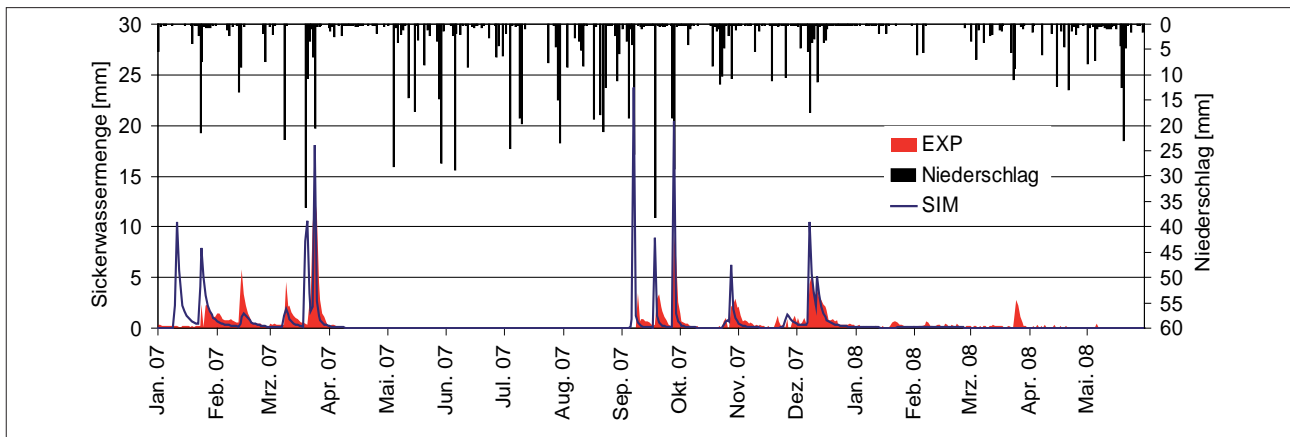


Abbildung 2: Dynamik der gemessenen (EXP) und modellierten Sickerwassermenge (SIM) des Gras-Referenzlysimeters in 100 cm Tiefe.

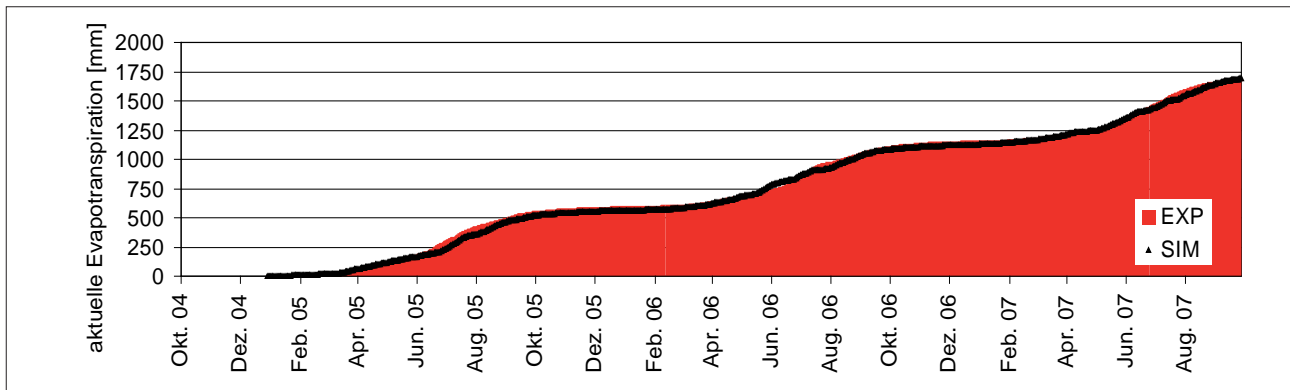


Abbildung 3: Vergleich der gemessenen (EXP) und modellierten aktuellen Evapotranspiration (SIM) des Ackerlysimeters.

wurde anschließend die zeitliche Dynamik betrachtet (Abbildung 2).

Aus dem Vergleich der Sickerwassermengen wird deutlich, dass zwar die Summen am Ende des Auswertezitraumes sehr gut übereinstimmen (Abbildung 1), die zeitliche Dynamik sich jedoch noch stark unterscheidet (Abbildung 1, 2). Insgesamt sind die modellierten Sickerwasserspitzen zu hoch und die Abflüsse aus dem Bodenprofil erfolgen zu schnell. Eine Änderung der Dynamik der Versickerungskurve wurde durch eine Anpassung der K_s -Werte in den vorher definierten Grenzen angestrebt. Da die Abflussspitzen verringert werden sollten, wurden die K_s -Werte in allen 3 Horizonten auf 3000 mm d^{-1} verringert. Da die K_s -Werte schon vorher die untere Grenze der Spannbreite erreichten und damit keine befriedigende Modellierung der zeitlichen Dynamik möglich war, wurde damit die vordefinierte Spannbreite überschritten. Der K_s -Wert hat im Modellkonzept von CANDY nicht direkt die Bedeutung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, da er in den Versickerungsparameter Lambda nach GLUGLA (1969) modellintern übersetzt wird. Da dies einen empirischen Parameter darstellt, kann diese Überschreitung gerechtfertigt werden. Durch die Optimierung des K_s -Wertes konnte eine bessere Abbildung der Sickerwasserdynamik erreicht werden. Dennoch verbleiben die Sickerwasserspitzen vereinzelt zu hoch. Dies verdeutlicht auch das geringe Bestimmtheitsmaß von 0,25 für die Korrelation zwischen Mess- und Simulationswerten. Besser stimmen Mess- und

Simulationswert in dem Bereich geringer Sickerwassermengen ($< 5 \text{ mm d}^{-1}$) überein. Im Bereich der Messwerte > 0 bis $< 5 \text{ mm d}^{-1}$ erhöht sich das Bestimmtheitsmaß auf 0,32. Bei Messwerten von mehr als 5 mm d^{-1} Sickerwasserbildung liegt das Bestimmtheitsmaß bei 0,22. Durch eine weitere Verringerung der K_s -Werte über die definierte Spannbreite auf 1000 mm d^{-1} je Horizont, werden zwar einzelne Sickerwasserspitzen gekappt und das Bestimmtheitsmaß verbessert (0,4), dafür werden aber einige geringere Abflussspitzen (02/2007, 03/2008) nicht mehr getroffen. Die Optimierung kann hier also nicht allein durch eine weitere Anpassung des K_s -Wertes erfolgen. Eine Optimierung der Startwassergehalte am 01.05.2006 hatte keinen Einfluss auf die ersten Sickerwassermessungen in 01/2007. Es wurde ein Startwassergehalt von 25 Vol.% im Gesamtprofil (0-1 m) angenommen.

Bei einer Betrachtung der modellierten Wassergehalte im Gras-Referenzlysimeter wurde eine ausgeprägte Dynamik der Wassergehalte (Veränderungen $\pm 15 \text{ Vol.}\%$) im Profil nur bis 40 cm modelliert. Die tieferen Schichten wiesen nahezu durchgängig einen Wassergehalt von ca. 20 Vol.% auf, was in diesen Bodentiefen der FK entspricht. In diesen Tiefen wurde eine geringe Dynamik der Wassergehalte modelliert ($\pm 3 \text{ Vol.}\%$). Vergleichsmessungen zur Wasser-Verteilung im Profil des Grünlandlysimeters sind nicht verfügbar, jedoch weisen Wassergehaltsmessungen vergleichbarer Tiefen in den Kiesen der Ackerlysimeter immer deutlich niedrigere Werte als die FK auf.

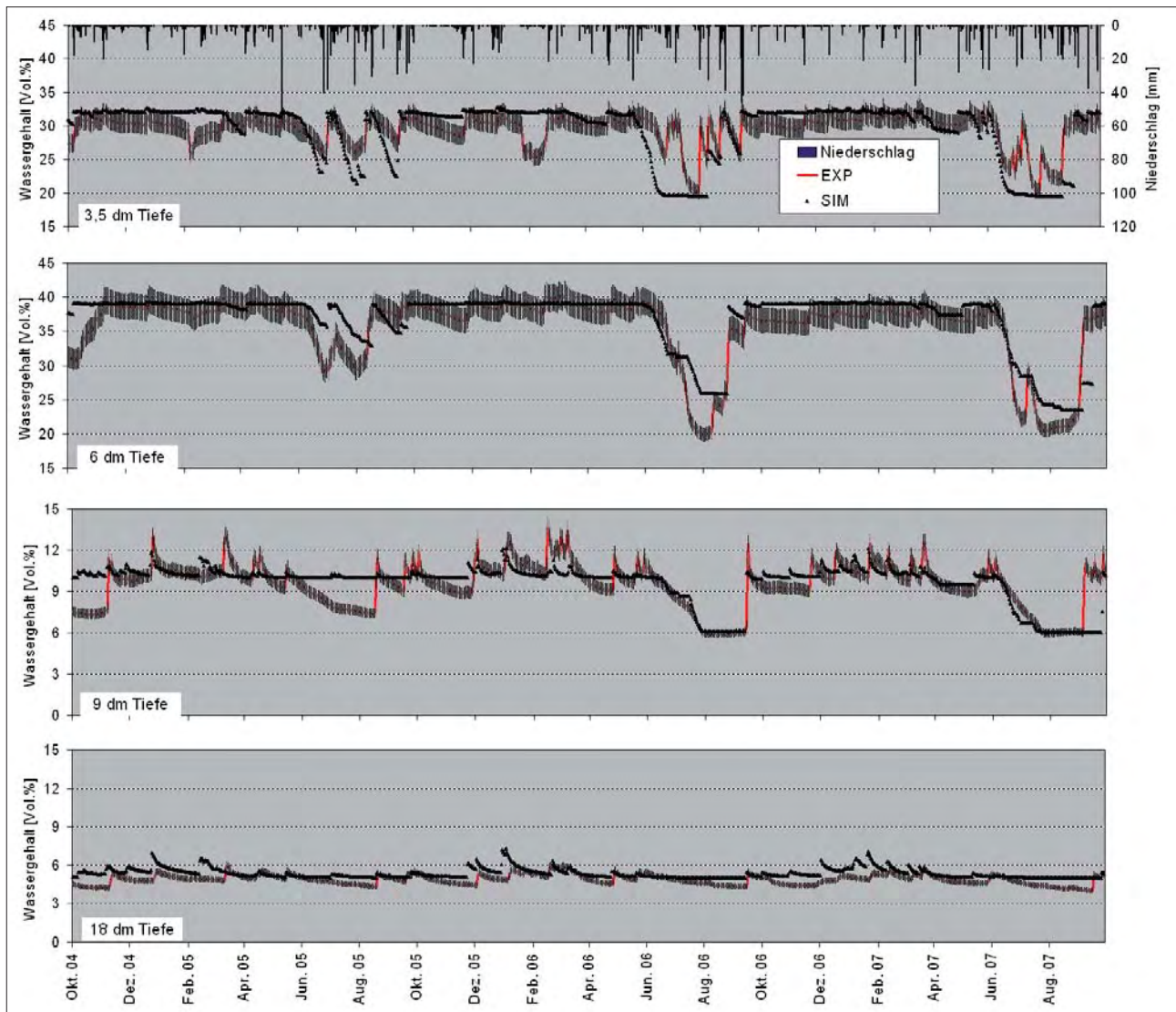


Abbildung 4: Vergleich der gemessenen (EXP) und modellierten Bodenfeuchte (SIM) der Tiefen 35 cm, 60 cm, 90 cm und 180 cm mit 5 % Fehlerband für das Ackerlysimeter.

Ackerlysimeter

Aufgrund des starken Einflusses des Startwassergehaltes auf die Modellierung der Bodenfeuchte wurde für das Bodenprofil des Ackerlysimeters je 10 cm Schicht ein Startwassergehalt bis 2 m Tiefe festgesetzt (30 Vol.% für die Tiefe 0-40 cm, 40 Vol.% für die Tiefe 40-170 cm und 4 Vol.% für die Tiefe 170-200 cm). Die Simulationsauswertung erfolgte für den Zeitraum 04.10.2004 - 01.10.2007, mit einer Modellvorlaufzeit von 2 Monaten.

In *Abbildung 3* ist die gemessene sowie die modellierte ET_a für das konventionell bewirtschaftete Ackerlysimeter dargestellt. Es wird deutlich, dass die gemessene kumulative ET_a (1701 mm) und die mit CANDY modellierte kumulative ET_a (1695 mm) für den Zeitraum 04.10.2004 - 01.10.2007 mit einer Abweichung von 6 mm sehr gut übereinstimmen, wenn die ET_{pot} extern für das Modell CANDY vorgegeben wird.

In der *Abbildung 4* sind die im konventionell bewirtschafteten Ackerlysimeter gemessenen und die modellierten

Bodenfeuchten für die Messtiefen 3,5 dm, 6 dm, 9 dm und 18 dm dargestellt. Wie für das Grünlandlysimeter beschrieben, wurde hier ebenfalls der Bodenparameter FK in vorher berechneten Spannweiten optimiert. Aus der *Abbildung 4* ist erkennbar, dass die gemessenen Bodenfeuchten der Tiefen 3,5 dm, 6 dm, 9 dm und 18 dm gut mit dem Modell CANDY bei entsprechender Kalibrierung der FK nachgebildet werden können.

Mit den auf die *Abbildung 4* der gemessenen Wassergehalte optimierten FK wird jedoch nur eine kumulative Sickerwassermenge von 818 mm, und damit ein Defizit von 202 mm gegenüber den Messdaten, für den Zeitraum 04.10.2004 - 01.10.2007 bei unzureichender Nachbildung der Sickerwasserdynamik (*Abbildung 5*) erreicht.

Hinsichtlich der Sickerwasserdynamik in 190 cm Tiefe wurden nur einzelne Sickerwasserspitzen gut nachgebildet. Deshalb wurden die Bodenparameter FK und K_s anschließend auf die Sickerwassermenge optimiert, wobei die Parametrisierung in den obersten 40 cm identisch blieb. Damit

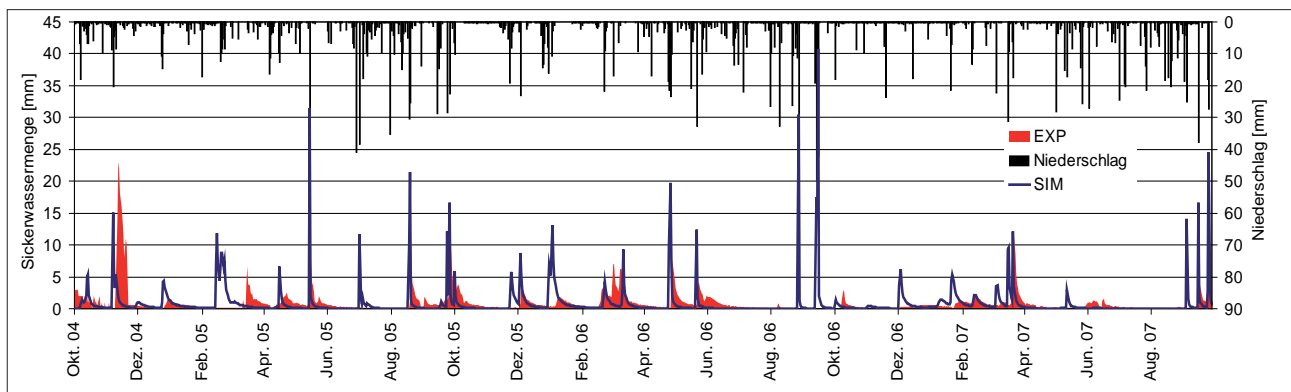


Abbildung 5: Dynamik der gemessenen (EXP) und modellierten (SIM) Sickerwassermenge mit auf den Wassergehalt optimierter FK für das Ackerlysimeter in 190 cm Tiefe.

konnte eine kumulative Sickerwassermenge von 995 mm modelliert werden (Zielwert 1020 mm). Wird die maximale Durchwurzelungstiefe für alle Kulturpflanzen auf 70 cm begrenzt - was der Grenze der Feinbodenmächtigkeit beim konventionellen Lysimeter entspricht - wird die Abbildung der Sickerwasserspitzen nur geringfügig verändert. Für eine weitere Anpassung der Pflanzenparameter (Wurzelentwicklungen, Bedeckungsgrad) im Modell lagen keine Messwerte vor Ort vor. Besonders schwierig gestaltet sich dabei auch die Parametrisierung von Gründecken, welche in der Fruchtfolge als Mischungen verschiedener Kulturen angebaut wurden.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Mit dem Prozessmodell CANDY wurde die Nachbildung der Wasserflüsse des Grünlandlysimeters und des konventionell bewirtschafteten Ackerlysimeters der landwirtschaftlichen Versuchsfläche Wagna (Österreich) angestrebt. Das auf der Untersuchungsfläche geführte Gras-Referenzlysimeter zeigte, dass der Prozess der Evapotranspiration mit dem im Modell CANDY bisher implementierten modifizierten TURC-Ansatz für den Standort Wagna nicht ausreichend abgebildet wurde. Da sich der fehlende Wasseranteil in allen nachfolgenden Modelleinheiten fortpflanzt, wurde das Modell erweitert, so dass jetzt extern Werte der potenziellen Evapotranspiration vorgegeben werden können. Für den Standort Wagna wurden durch die Verwendung der Gras-Referenzverdunstung auf Basis von 10 min. Wetterdaten nach Penman-Monteith (ALLEN et al. 2006) gute Ergebnisse hinsichtlich der Modellierung der aktuellen Evapotranspiration für das Grünlandlysimeter und das konventionell bewirtschaftete Ackerlysimeter erreicht.

Für eine Nachbildung der Bodenfeuchte- und Sickerwasserdynamik sowie der Sickerwassermengen im konventionell bewirtschafteten Ackerlysimeter wurden Optimierungen der Bodenparameter Feldkapazität und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in vorher definierten Grenzen durchgeführt. Die Grenzen wurden dabei aus den Spannweiten der Messwiederholungen vorgegeben. Die Optimierung der Bodenparameter ergab je einen optimalen Datensatz zur Nachbildung der Wassergehalte in den Tiefen 3,5 dm, 6 dm, 9 dm und 18 dm sowie einen Datensatz zur Nachbildung der Sickerwassermenge in 19 dm Tiefe. Ein vergleichbarer Da-

tensatz zur Abbildung der kumulativen Sickerwassermenge des konventionell bewirtschafteten Ackerlysimeters des Standort Wagna findet sich in BÖTTCHER et al. (2008).

Bei den auf die Sickerwassermenge im Ackerlysimeter kalibrierten Modelleinstellungen wichen die Bodenparameter Feldkapazität und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in den Tiefen unter 40 cm deutlich von den optimierten Bodenparametern zur Abbildung der Wassergehalte ab. Mit den so optimierten Bodenparametern kann zwar die kumulative Sickerwassermenge annähernd nachgebildet werden, die zeitliche Sickerwasserdynamik wird aber noch nicht zufrieden stellend nachgebildet.

Es wurde deutlich, dass für die vorliegenden skelettreichen Böden ein deutlicher Unterschied zwischen den Labormessungen zur Feldkapazität sowie zur gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und den Messungen der SONDENSYSTEME im Freiland besteht. Es werden dabei verschiedene Bereiche der Bodenmatrix betrachtet. Deshalb wurde für die Modellierung vorerst der Weg einer „doppelten Parametrisierung“ der Böden erprobt. Eine Korrelation der beiden Parametrisierungen - je eine zur Nachbildung der Bodenfeuchte bzw. Sickerwassermenge - über den Grobanteil des Bodens war für das Ackerlysimeter nicht erfolgreich. Für das Modell CANDY und die damit angestrebte Abbildung der Stoffumsätze ist jedoch zusätzlich zur Nachbildung der Sickerwasserdynamik auch eine Abbildung der Bodenfeuchte entsprechend der Messwerte Bedingung. Bei erprobten „Zwischenlösungen“ sind die Parametrisierungen in den obersten 40 cm identisch. Da das Modell CANDY den Stoffumsatz im Bereich 0-30 cm modelliert, ist dies ein erster Ansatz zur angestrebten Nachbildung des C- und N-Umsatzes in den Lysimetern der Station Wagna.

Eine adäquate Nachbildung der Sickerwasserdynamik in dem konventionell bewirtschafteten Ackerlysimeter scheint nur durch entsprechende Parametrisierung der Pflanzenentwicklung möglich. Eine reine Optimierung von Bodenparametern für die Modellierung ist hier nicht mehr ausreichend. Für diese Modellierungen sind zusätzliche Pflanzenbeobachtungen (Wurzelentwicklungen, Bedeckungsgrad), wie z.B. von KRÜGER (2008) und TIETZ (2008) am Standort Bad Lauchstädt durchgeführt, notwendig.

Aufgrund der vorliegenden hoch aufgelösten Mess- und Beobachtungsdaten konnten die Wasserhaushaltsgrößen für

die untersuchten Lysimeterböden gut erfasst und bewertet werden. Erst eine zufrieden stellende Nachbildung des Wassertransportes in den Präzisionslysimetern bildet die Grundlage einer Modellierung des Stoffumsatzes von verschiedenen Bewirtschaftungsvarianten. In weiterführenden Arbeiten soll gezeigt werden, dass das Modell CANDY auch in der Lage ist, den Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz für den Standort Wagna nachzubilden.

Literatur

- ALLEN, R.G., W.O. PRUITT, J.L. WRIGHT, T.A. HOWELL, F. VENTURA, R. SYDER, 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 ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81, 1-22.
- BÖTTCHER, N., J. FANK und T. REIMANN, 2008: Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern / 4.5. Ansätze zur Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten und des Stickstoffumsatzes in Lysimetern mit dem Modellpaket CoupModel (v. 2.6). – In: FANK, J. & C. 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.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2000: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. 1-72.
- 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 zur 12. Gumpensteiner Lysimetertagung „Lysimetrie im Konnex zu nationalen und internationalen Regelwerken“, 19.-20. April 2007, 53-56, Irdning.
- FANK, J., 2008 a: 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 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-04959 EGU General Assembly 2008.
- FANK, J., 2008 b: Comparison of calculated ET_0 to measured Lysimeter grass ET. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-12046, 2008 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-12046 EGU General Assembly 2008.
- FANK, J. and G. v. UNOLD, 2007: High-precision weighable field Lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters. *International Water & Irrigation*, Vol. 27, No. 3, 28-32, Tel Aviv.
- FASTL, G. und J. ROBIER, 2008: Grundwasserverträgliche ackerbauliche Bewirtschaftungsformen über seichtliegenden gering mächtigen Grundwasserleitern/5.2. Der Großparzellenversuch Wagna und dessen Bewirtschaftung (1987 bis 2003). – 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.
- FRANKO, U., 1989: C- und N-Dynamik beim Umsatz organischer Substanz im Boden. Dissertation B (Habilitationsschrift), Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.
- FRANKO, U., 1997: Modellierung des Umsatzes der organischen Bodensubstanz. *Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde Archives of Agronomy and Soil Science*, 41, 527-547.
- FRANKO, U., B. OELSCHLAGEL und S. SCHENK, 1995: Modellierung von Prozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen. 3, 1-90, Leipzig, UFZ-Bericht.
- FRANKO, U., M. PUHLMANN, H. RINGE, L. PRUTZER, F. BÖHME, J. SEEGER, P. PETERSOHN, O. SPOTT und B. HERRMANN, 2006: Integrierte Methodik zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Entwicklung landwirtschaftlicher Bodennutzung im Bundesland Sachsen-Anhalt. FKZ 76213/01/03, 1-125, UFZ-Bericht.
- FRANKO, U. und S. SCHENK, 2001: Modellierung von Stoffflüssen - Wasser- und Stoffhaushalt in einem Ackerbaugbiet auf der Querfurter Platte. *Mühle*, H. 16, 154-166, Leipzig, UFZ-Bericht.
- GLUGLA, G., 1969: Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden. *Albrecht-Thaer-Archiv* 13, 371-376.
- JOVANOVIC, N.Z. and J.G. ANNANDALE, 2000: Crop growth model parameters of 19 summer vegetable cultivars for use in mechanistic irrigation scheduling models. *Water Sa* 26(1), 67-76.
- KOITZSCH, R., 1990: Bodenfeuchte- und Verdunstungsmodell BOWA. Unpubl. Bericht.
- KOITZSCH, R. und R. GÜNTHER, 1990: Modell zur ganzjährigen Simulation der Verdunstung und der Bodenfeuchte landwirtschaftlicher Nutzflächen mit und ohne Bewuchs. *Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde Archives of Agronomy and Soil Science*, 34, 803-810.
- KÖRSCHENS, M., K. STEGEMANN, A. PFEFFERKORN, V. WEI-SE und A. MÜLLER, 1994: Der Statische Düngungsversuch Bad Lauchstädt nach 90 Jahren. Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft.
- KRÜGER, J., 2008: Modelling of plant-relevant processes of organic farming using the model CANDY including the plant module SI-WAPFLAN at the example of Bad Lauchstädt. Diplomarbeit, Institut für Geographie, Universität Leipzig.
- 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. & C. 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.
- TIETZ, C., 2008: Quantifizierung der Rhizodeposition des Winterweizens. Diplomarbeit, Institut für Geographie, Universität Leipzig.
- VOLK, M., U. FRANKO, F. HERZOG, T. SCHMIDT und M. NEUBERT, 2000: Modellierung des Einflusses von Landnutzungsänderungen auf die Grundwasserquantität und -qualität am Beispiel des Torgauer Raumes. *UFZBericht*, 24, 36-38, Leipzig.
- VON UNOLD, G. and J. FANK, 2008: Modular Design of Field Lysimeters for Specific Application Needs. *Water Air Soil Pollut: Focus* (2008), 8, 233-242.
- WONNEBERGER, C. und F. KELLER, 2004: Gemüsebau. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.

Alternativlösung zur Quantifizierung der Tiefensickerung in situ

Uwe Schindler^{1*}, Johann Fank² und Lothar Müller¹

Zusammenfassung

Lysimeter sind sehr aufwendig in Installation, Betrieb und Unterhaltung. Bodenhydrologische Messungen bieten auf Sickerwasserstandorten eine flexible und kostengünstige Alternative zur Quantifizierung des Bodenwasser- und Stoffhaushaltes in situ. Die vorgeschlagene Methode ermöglicht die Abschätzung der Tiefensickerung auf Standorten wo der Bodenwasserfluss unterhalb der Wurzelzone als Matrixfluss und rückstaufrei auftritt. Grundlagen sind kontinuierliche Bodenwassergehaltmessungen unterhalb der hydraulischen Scheide und eine an der Wasserbilanz kalibrierte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion. Die Beurteilung der Eignung dieser Methode erfolgte im Vergleich mit Ergebnissen aus Lysimetermessungen der Anlagen in Dedelow und in dem Versuchsfeld Wagna. Für die Prüfung der Übereinstimmung der Ergebnisse wurde der Willmott Index of Agreement herangezogen. Die d-Werte variierten zwischen $d = 0,64$ und $d = 0,97$ und bestätigten die grundsätzliche Eignung dieser alternativen Feldmethode zur Abschätzung von Sickerwasserflüssen aus bodenhydrologischen Messungen.

Summary

Lysimeters are extensive in installation, operation and maintenance. Soil hydrological measurements provide a flexible and cost saving alternative for quantifying soil water and solute balance in situ. The proposed method enables the estimation of ground water recharge at sites with matrix flow conditions beneath the root zone and without perched water influence. Basics are continually soil water content measurements beneath the zero flux plane and a hydraulic conductivity function calibrated to the soil water balance. The evaluation of this method occurred in comparison with discharge measurements of lysimeters of Dedelow and Wagna lysimeter stations. The Willmott Index of Agreement was used for the comparison of measured with calculated data. The d-values varied between $d = 0.64$ and $d = 0.97$ and confirmed the principle applicability of this alternative field method for estimation seepage fluxes from soil hydrological measurements in situ.

Einleitung

In der Agrar- und Umweltforschung werden Lysimeter zur Erfassung und Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen Boden, Pflanze, Wasser und Atmosphäre unter Berücksichtigung des Bewirtschaftungsmanagements verwendet. In Abhängigkeit von der Konstruktion, der Bewirtschaftung und der Lage der Lysimeter im Gelände können die Ergebnisse mit so genannten „Lysimeterfehlern“ behaftet sein (KASTANEK 1995, FANK und UNOLD 2005, SCHINDLER et al. 2008). Monolithisch entnommene, wägbare, mit bodenhydrologischer Messtechnik ausgerüstete und im Schlag integrierte Lysimeter liefern die sichersten Ergebnisse im Vergleich zu den unter natürlichen Verhältnissen ablaufenden Prozessen (FANK und UNOLD 2005, KNOBLAUCH und SWATON 2007).

Bei der Entwicklung und Validierung von Modellen (Wachstumsmodelle, Modelle zum Bodenwasser- und Stoffhaushalt) und Messmethoden wird häufig auf Lysimeterergebnisse zurückgegriffen. Aufgrund der geringen Flexibilität und des hohen Preises von Lysimetern ist die Datenbasis bezüglich Landnutzung, Bewirtschaftung, Boden, Klima u.a. jedoch eingeschränkt.

Bodenhydrologische Feldmessungen (RICE 1975, KASTANEK 1995, SCHINDLER und MÜLLER 1998) können eine kostengünstige und flexible Alternative zur Quantifizierung von Wasser- und Stoffflüssen unter natürlichen Boden- und Landnutzungsbedingungen bieten. Ihre Eignung soll nachfolgend im Vergleich mit Lysimeterergebnissen geprüft werden

Material und Methode

Konzept zur Abschätzung der Sickerwasserdynamik aus bodenhydrologischen Feldmessungen

Die Bodenwasserdynamik in der durchwurzelten Bodenzone ist sehr variabel. In Abhängigkeit von den Niederschlags- und Verdunstungsbedingungen ist ein ständiger Wechsel von Infiltration, Sickerwasserfluss, kapillarem Wasseraufstieg und Pflanzenwasserentzug vorhanden. Mit zunehmender Bodentiefe laufen diese Prozesse langsamer und gedämpft ab (VOIGT 1980, KUTILEK und NIELSEN 1994).

Die Grundidee für die Abschätzung der Sickerwasserdynamik aus bodenhydrologischen Messungen bestand deshalb

¹ Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF), Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Str. 84, D-15374 MÜNCHENBERG

² Joanneum Research GmbH, Institut für Wasser Ressourcen Management, Elisabethstraße 16, A-8020 GRAZ

* Ansprechpartner: uschindler@zalf.de

darin, in Bodentiefen zu messen, wo keine Pflanzenwasserentnahme, direkt oder aus kapillarem Wasseraufstieg, mehr erfolgt und damit Messwertänderungen (Saugspannung und Wassergehalt) ausschließlich auf Veränderungen des Sickerwasserflusses zurückzuführen sind (SCHINDLER und MÜLLER 1998). Diese Bedingungen sind unterhalb der hydraulischen Scheide (RENGER et al. 1970) erfüllt. Auf den meisten Acker- und Grasstandorten befindet sich die hydraulische Scheide gewöhnlich dauerhaft oberhalb 3m,

auf Waldstandorten oberhalb 5 m Tiefe (SCHINDLER et al. 2008). Entsprechend wurden die Messtiefen gewählt.

Vorgehensweise (Abbildung 1 Position A bis H):

Wassergehalt (θ) und Druckhöhe (h) werden unterhalb der hydraulischen Scheide kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet (Abbildung 1, A). Auf Acker- und Grasstandorten wird gewöhnlich in 3m Tiefe und auf Waldstandorten in 5m Tiefe gemessen. Die Tensiometer sind frostsicher. Aufgrund

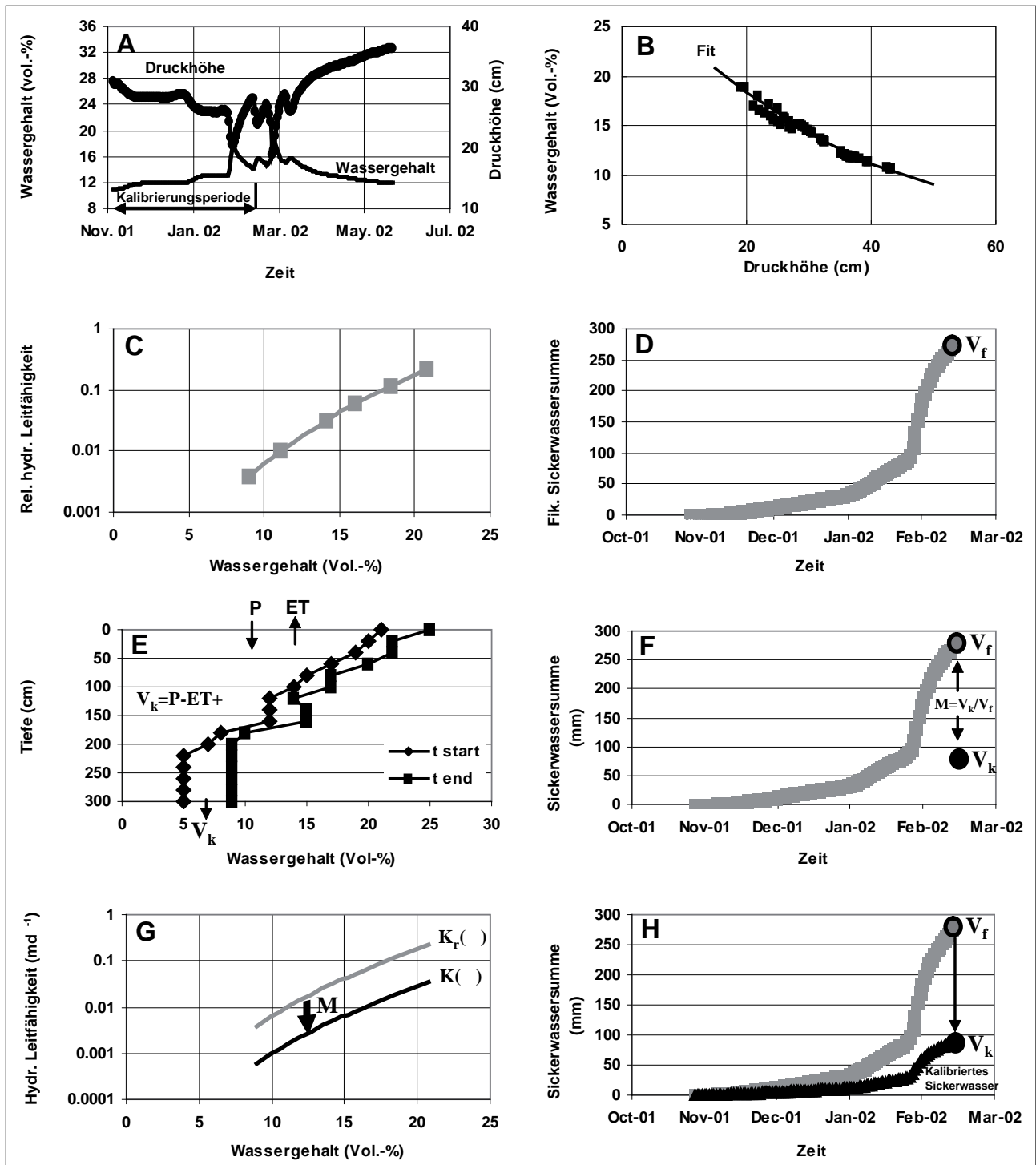


Abbildung 1: Prozedur zur Sickerwasserberechnung aus bodenhydrologischen Messungen.

der langsamen und kontinuierlichen Änderung der Messwerte sind Messintervalle in Tagesintervallen ausreichend (SCHINDLER et al. 2008). Die zusätzliche Messung der Druckhöhe in geringer Höhenentfernung von der Messtiefe (10 oder 20 cm) ermöglicht die Berechnung des hydraulischen Gradienten (i) und erlaubt den konkreten Nachweis, ob sich die Messtiefe zu dem jeweiligen Zeitpunkt unterhalb der hydraulischen Scheide befunden hat. Die hydraulische Scheide grenzt die Bodenzone mit Pflanzenwasserentnahme (oberhalb) von der Sickerwasserzone (unterhalb) ab. An der hydraulischen Scheide ist der hydraulische Gradient $i=0$, darunter ist $i < 0$, darüber $i > 0$. Gegebenenfalls können so Perioden mit aufwärts gerichteter Wasserbewegung und Pflanzenwasserentnahme ausgegrenzt werden.

Die Wasserretentionsfunktion - Beziehung zwischen Druckhöhe und Bodenwassergehalt - wird an Gl. 1 (VAN GENUCHTEN 1980) gefittet (Pos. B in *Abbildung 1*), und die relative hydraulische Leitfähigkeitsfunktion (Gl. 2) wird unter Verwendung des Mualem-Modells (MUALEM 1976) berechnet.

$$\Theta(h) = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (1)$$

Θ - Wassergehalt, Θ_r - Restwassergehalt, Θ_s - Sättigungswassergehalt, h - Druckhöhe, α , n , m ($m=1-1/n$)- Funktionsparameter

$$\frac{K(h)}{K_s} = K_r(h) = \frac{\left\{1 - (\alpha h)^{n-1} \left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{\frac{m}{2}}} \quad (2)$$

$K(h)$ - hydraulische Leitfähigkeit als Funktion der Saugspannung, K_s - gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, K_r - relative hydraulische Leitfähigkeit

Durch Substitution von h in Gl. 2 durch Gl. 3 erhält man die hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehaltes $K(\Theta)$ (Pos. C). Durch die Verwendung der $K(\Theta)$ -Funktion wird der Einfluss von Hysterese minimiert. Eine Extrapolation der $K(\Theta)$ -Funktion in Richtung Sättigung ist unzulässig.

$$h = f(\Theta) = \left\{ \left[\left(\frac{\Theta_s - \Theta_r}{\Theta - \Theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^{-\alpha} \quad (3)$$

Die Berechnung fiktiver Sickerwasserraten (v_r) erfolgt nach DARCY ($v_r = K_r(\Theta)$) zunächst mit einem fiktiven K_{s^*} -Wert $=1$ (LT^{-1}) aus den gemessenen Wassergehaltswerten und der $K_r(\Theta)$ Funktion unter Zugrundelegung eines Einheitsgradienten. Die Zulässigkeit dieser vereinfachten Verfahrensweise wird bestätigt durch KUTILEK und NIELSEN (1994) und wurde im Fall der Sickerwasserabschätzung aus bodenhydrologischen Messungen von SCHINDLER und MÜLLER (1998) geprüft. Durch Summation der täglichen

fiktiven Sickerwasserraten ergibt sich die fiktive Sickerwassersumme (V_f , Pos. D).

Durch Kalibrierung an der Wasserbilanz wird im folgenden die fiktive Sickerwassersumme (V_f) in ein reales Niveau transformiert. Dazu wird die Wasserbilanz (Sickerwasserabfluss (V_k) = Niederschlag (P) - Verdunstung (ET) + Bodenwasserspeicheränderung ($\Delta\Theta$)) in einer möglichst frostfreien Herbst/Winterperiode ermittelt (Pos. E). Eine Herbst/Winterperiode wird gewählt, um den Fehler bei der Verdunstungsberechnung (nach IVANOV in WENDLING et al. (1991)) möglichst gering zu halten. Der Niederschlag wird am Messplatz erfasst und der Bodenwasserspeicher durch Bodenwassergehaltsmessungen im Profil zum Beginn (t_{start}) und Ende (t_{end}) der Kalibrierungsperiode quantifiziert (Pos. E). Der Quotient aus V_k und V_f ergibt den Matchingfaktor Gl. 4 (Pos. F) zur Transformation der relativen hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion $K_r(\Theta)$ in ein reales Niveau $K(\Theta)$ (Pos. G). Die so kalibrierte K Funktion auf der Basis von Gl. 2, jedoch unter Substitution von $h = f(\Theta)$ entsprechend Gl. 3, wird dann schließlich verwendet für die Berechnung der gesuchten täglichen Sickerwasserraten (Gl. 5, Pos. H).

$$M = \frac{V_k}{V_f} \quad (4)$$

$$v = M \cdot K_r(\Theta) = \frac{V_k}{V_f} \frac{\left\{1 - (\alpha \cdot f(\Theta))^{n-1} \left[1 + (\alpha \cdot f(\Theta))^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha \cdot f(\Theta))^n\right]^{\frac{m}{2}}} \quad (5)$$

Standort und Lysimeter

Basis für die Beurteilung der Methode zur Sickerwasserberechnung aus bodenhydrologischen Messungen war der Vergleich mit gemessenen Lysimeterabflüssen. Dafür wurden Ergebnisse von Lysimetern der Anlage in Dedelow (SCHINDLER et al. 2001) und des Versuchsfeldes Wagna (FANK und UNOLD 2005) herangezogen. Als Basis für die Kalibrierung wurde der Lysimeterabfluss direkt und nicht der Umweg über die Wasserbilanz (*Abbildung 1*, E) gewählt. Das ist legitim, da es zunächst um die Prüfung der Verfahrensweise (*Abbildung 1*, A,B,C,D,F,G,H) geht und nicht um die Ermittlung einer Sickerwassersumme aus der Wasserbilanz (*Abbildung 1*, E). Der Bodenaufbau der Lysimeter und Bodenkennwerte sind in *Tabelle 1* zusammengestellt.

Lysimeter Dedelow (Uckermark, Deutschland)

Von den 32 Lysimetern (geschüttet, Gravitationsabfluss, Grundfläche 1×1 m, Tiefe 2 m) wurde ein Lysimeter (Sandbraunerde, *Tabelle 1*) für die Vergleichsuntersuchungen ausgewählt. Die Messung der Bodenfeuchte erfolgte mit einer TDR Sonde in 1,85 m Tiefe. Die Druckhöhe wurde mit Tensiometern in 1,6 und 1,85 m Tiefe erfasst. Der Abfluss wurde täglich gemessen. Bei geringen Abflüssen erfolgte die Messung 2 mal wöchentlich. Kalibrierungsperiode war der Zeitraum vom 1. November 2001 bis 15. Februar 2002. Die Validierung erfolgte vom 16. Februar 2001 bis 7. Mai 2008.

Tabelle 1: Schichtung und Bodeneigenschaften der Lysimeter

Standort	Horizont	Tiefe cm	OS %	DBD g cm ⁻³	Ton %	Schluff %	Sand %	Grus %
Dedelow	Ap	0 - 35	1,1	1,52	4	24	71	1
	Bv	35 - 115	0,1	1,63	9	28	62	1
	C	115 - 200	0,1	1,65	1	4	93	2
Wagna, KON	Ap	0 - 30	1,8	1,51	20	33	44	3
	B	30 - 70	0,9	1,53	18	28	54	0
	C	70 - 190	0,1		1	2	33	64
Wagna, BIO	A	0 - 30	2,2	1,53	19	34	45	2
	B	30 - 110	1,3	1,55	14	28	57	1
	C	110 - 190	0,1		0	1	30	69

Ton - < 0,002 mm, Schluff - 0,2 - 0,63 mm, Sand - 0,63 - 2 mm, Grus - 2 - 63 mm

Lysimeter Versuchsfeld Wagna (Steiermark, Österreich)

Von den beiden wägbaren Lysimetern (rund, monolithisch, Grundfläche 1 m², Tiefe 1,9 m, Abfluss unterdruckgesteuert mit Saugkerzen) wurde der gesamte Messzeitraum von Oktober 2004 bis März 2008 (Lysimeter BIO) und Januar 2005 bis März 2008 (Lysimeter KON) für den Vergleich herangezogen. Die Lysimeter unterschieden sich hinsichtlich der Bewirtschaftung (konventionell -KON und biologisch -BIO) und dem Bodenaufbau (Tabelle 1). Unter einer Lockersediment-Braunerde beginnt auf dem konventionell bewirtschafteten Lysimeter die Schotterunterlagerung bereits in 0,7 m Tiefe, während auf dem Lysimeter mit biologischer Bewirtschaftung die Feinbodenschicht bis 1.1 m reicht. Tensiometer und TDR Sonden befinden sich in 35, 60, 90 und 180 cm Tiefe. Für die Sickerwasserberechnung wurden ausschließlich die Messwerte in 180 cm Bodentiefe verwendet. Für die Kalibrierung wurde jeweils die Anfangsperiode gewählt. Bei Lysimeter BIO war das der Zeitraum vom Oktober 2004 bis März 2005 und bei Lysimeter KON vom 1. Januar bis 30. April 2005.

Für den Vergleich der gemessenen mit den aus Bodenwassergehaltswerten berechneten Sickerwasserraten wurde der Willmott Index of Agreement Gl. 6 (LEGATES and McCABE 1999) herangezogen. Der Index d variiert zwischen 0 (schlechte Übereinstimmung) und 1 (perfekte Übereinstimmung)

$$d = 1 - \frac{\sum(O_i - P_i)^2}{\sum(|P_i - O_m| + |O_i - O_m|)^2} \quad (6)$$

O_i - observed values, P_i - predicted values, O_m - mean observed value

Ergebnis

Vergleich von gemessenen und berechneten Sickerwasserraten

Die Ergebnisse (Abbildung 2) zeigen eine unterschiedlich gute Übereinstimmung der gemessenen mit den aus Wassergehaltswerten berechneten Sickerwasserraten. Während im Lysimeter Dedelow die gemessenen Sickerwasserraten, sowohl in seiner Dynamik als auch in der Höhe der Ein-

zelereignisse gut mit den aus den bodenhydrologischen Messungen berechneten übereinstimmen ($d = 0,97$), zeigte sich bei den Lysimetern des Versuchsfeldes Wagna ein differenziertes Bild. Bei Sickerwasserraten zwischen 1 bis etwa 4 mm d⁻¹ war die Übereinstimmung von gemessenen mit berechneten Werten auch hier gut. Bei höheren Sickerwasserabflüssen traten jedoch teilweise deutliche Unterschiede auf, die auch dann zu Abweichungen der Summenkurve führten. Das ist insbesondere im Lysimeter Wagna KON zu erkennen (Abbildung 2, links unten), wo in der Kalibrierungsperiode vom 1. Januar 2005 bis 30. April 2005 einige Sickerwasserflüsse aufgetreten sind, die nicht durch charakteristische Wassergehaltsänderungen abgebildet wurden. Insgesamt betrachtet wurden die Sickerwasserraten bei Werten des Willmott Index of Agreement von $d = 0,64$ (Lysimeter, KON) und $d = 0,91$ (Lysimeter, BIO) jedoch auch für die Lysimeter vom Versuchsfeld Wagna mit Schotterunterlagerung in befriedigender Güte abgebildet.

Die Messtiefe in den Lysimetern war gegenüber den bodenhydrologischen Messungen in situ geringer. Die Prüfung durch den hydraulischen Gradienten ergab jedoch, dass die Messtiefe in allen Lysimetern dauerhaft unterhalb der hydraulischen Scheide lag.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Vergleichsuntersuchungen zeigten, dass auch diese sehr einfache und kostengünstige Verfahrensweise durchaus Potential für die Anwendung zur Sickerwasserabschätzung in situ hat. Der Bodenwassergehalt ist dafür als Indikator geeignet, vorausgesetzt, der Sickerwasserabfluss erfolgt als Matrixfluss und rückstaufrei wie in dem Dedelower Lysimeter. Die Wagna Lysimeter sind schotterunterlagert. Trotzdem erfolgte der Abfluss im wesentlichen als Matrixfluss. Unter diesen Bedingungen war auch hier der Wassergehalt als Indikator für die Sickerwasserberechnung geeignet. Die bei hohen Abflüssen aufgetretenen Unterschiede zwischen gemessenen und aus Wassergehaltsänderungen berechneten Sickerwasserraten sind aber sehr wahrscheinlich in der Beteiligung präferenzialer Flüsse am Abflussgeschehen zu vermuten. Daraus resultiert, dass die Kalibrierung nicht zuverlässig ist. Die folgende Abflussberechnung kann dadurch fehlerbehaftet sein, wie die Ergebnisse der Lysimeter vom Versuchsfeld Wagna und hier besonders vom Lysimeter KON zeigten.

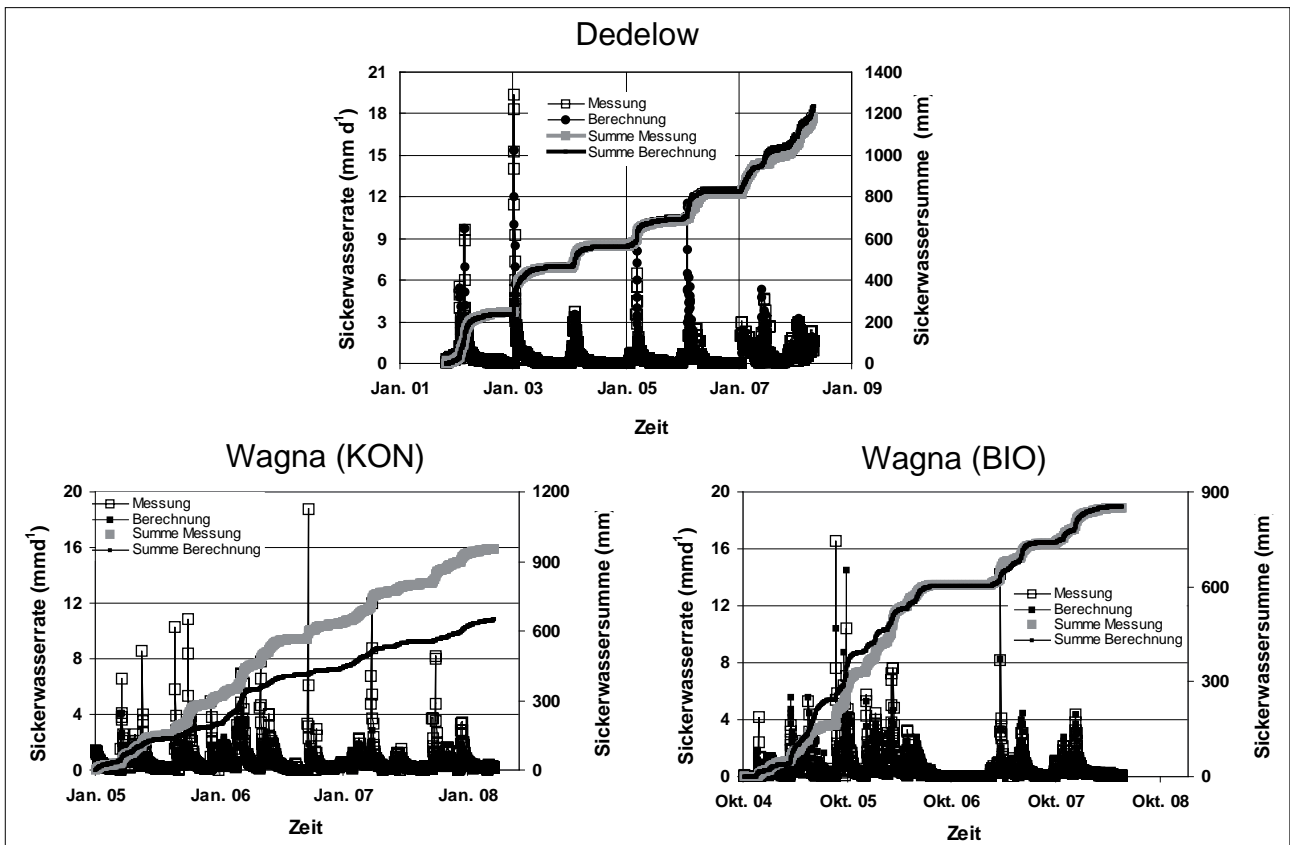


Abbildung 2: Sickerwasserverlauf gemessen und berechnet des Lysimeters Dedelow und der Lysimeter KON und BIO des Versuchsfeldes Wagna.

Der Boden ist ein sehr komplexes und variables System. Boden- oder Sickerwasserverhältnisse können kleinräumig heterogen sein (JURY et al. 1991). Das ist die Regel, nicht die Ausnahme. Für die Anwendbarkeit der vorgestellten Methodik ist diese Tatsache jedoch nicht entscheidend. Bedeutsam ist jedoch, dass die relative Sickerwasserdynamik in der Messtiefe durch die Bodenwassergehaltsänderungen auch unter Bedingungen kleinräumiger Heterogenität vergleichbar abgebildet wird, und sich die bodenhydrologischen Eigenschaften am Messpunkt im Zeitverlauf nicht ändern. Damit ist gemeint, dass nicht die absoluten Wassergehaltswerte und Wassergehaltsänderungen entscheidend sind, sondern dass die Dynamik der relativen Wassergehaltsänderungen vergleichbar sein muss. Der Beleg dafür wurde bei SCHINDLER et al., 2008 gegeben. Zeitreihenanalysen werden zukünftig weitere Klarheit bringen. Die Anpassung an für den Messpunkt „reale“ Sickerwasserraten erfolgt dann über die Kalibrierung an der Wasserbilanz.

Bodenhydrologische Messungen zur Sickerwasserabschätzung sollten als Langzeituntersuchungen betrieben werden. Die Kalibrierung ist ein zentraler Punkt der Methoden-anwendung. Zur Erhöhung der Ergebnissicherheit sollte sie in zeitlichen Abständen wiederholt erfolgen. Die relative Sickerwasserdynamik kann jedoch auch bei leicht fehlerhafter Kalibrierung wertvolle Informationen zu seiner zeitlichen Veränderung infolge Änderung der äußeren Randbedingungen (Klimaeinfluss, Landnutzungsänderung) liefern, vorausgesetzt die Messwerte sind fehlerfrei und nicht driftbehaftet.

Die Vorzüge des Verfahrens liegen:

- in seiner einfachen und kostengünstigen Anwendung.
- in der Flexibilität.
- es sind nur bodenhydraulische Kennwerte der Messtiefe erforderlich. Diese werden aus den Messwerten selbst abgeleitet.
- ist das Verfahren kalibriert sind keine Informationen mehr erforderlich zum Niederschlag, zur Verdunstung, zum Boden, zur Landnutzung und zur Bewirtschaftung.
- bei Kenntnis des Niederschlages und der Bodenspeicheränderung kann die Verdunstung errechnet werden. Das gilt allerdings nur für Betrachtung über längere Perioden (> 1 Monat).

Einschränkungen und Erschwernisse:

- die Anforderungen an die Güte der Wassergehaltswerte sind hoch. Heutige Messsysteme (TDR, FDR) bieten jedoch die Möglichkeit der Qualitätssicherung.
- das Verfahren ist sensitiv gegenüber fehlerhaften Wassergehaltswerten und vor allem Messwertdrift.
- werden Wassergehaltssensoren ausgetauscht ist eine erneute Kalibrierung erforderlich.
- die Qualität der Kalibrierung ist ein sensitiver Part für die Güte der Sickerwasserabschätzung.
- die Anwendbarkeit ist begrenzt auf Sickerwasserstandorte.
- präferenzielle Flüsse können nicht abgebildet werden.

Eine automatische Messwertprüfung auf Absolutwert und Drift und die Erarbeitung von Plausibilitäts- und Prüfalgorithmen in Abhängigkeit vom Niederschlag und einer abgeschätzten Verdunstung würde die Sicherheit und Stabilität des Verfahrens erhöhen und eine Anwendung im Rahmen von Dauermessstellen für Landes- und Umwelteinrichtungen ermöglichen.

Literatur

- FANK, J. und G. von UNOLD, 2005: Wägbare monolithische Lysimeter unter maschineller Feldbewirtschaftung (Wagna, Austria). Bericht 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL Gumpenstein, 5.-6.4.2005, 55-60.
- JURY, W.A., W.R. GARDNER and W.H. GARDNER, 1991: Soil Physics. Wiley and Sons, 5th Edition, pp. 352.
- KASTANEK, F., 1995: Kritische Bemerkungen zur Verwendung von Lysimetern. Bericht 5. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL Gumpenstein, 25.-26. April 1995, 93-102.
- KNOBLAUCH, S. und T. SWATON, 2007: Erweiterung der Lysimeteranlage Buttelstedt für die Bestimmung von standortabhängigen Schwellenwerten für N-Salden. Bericht 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL Gumpenstein, 17.-18. April 2007, 35-41.
- KUTILEK, M. and D.R. NIELSEN, 1994: Soil hydrology. GeoEcology textbook, Cremlingen-Destedt: Catena Verlag, pp 370.
- MUALEM, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12(3), 513-522.
- RENGER, M., W. GIESEL, O. STREBEL und S. LORCH, 1970: Erste Ergebnisse zur quantitativen Erfassung der Wasserhaushaltskomponenten in der ungesättigten Bodenzone. Z. f. Pflanzenern. und Bodenkd. 1.
- RICE, R.A., 1975: Diurnal and seasonal soil water uptake and flux within a bermudagrass root zone. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39, 394-398.
- SCHINDLER, U. and L. MÜLLER, 1998: Calculating deep seepage from water content and tension measurements in the vadose zone at sandy and loamy soils in north-east Germany. Archives of Agronomy and Soil Science 43, 233-243.
- SCHINDLER, U., G. VERCH, M. WOLFF und L. MÜLLER, 2008: Bedeutung der unteren Randbedingung in Lysimetern für die Sickerwassermessung. Kurzfassung der Vorträge zur Tagung: Wasserkreislaufparameter, 31.03.-01.04.2008, Schloss Seggau bei Leibnitz (Österreich), 31-34.
- SCHINDLER, U., L. MÜLLER, F. EULENSTEIN and R. DANNOWSKI, 2008: A long-term hydrological soil study on the effects of soil and land use on deep seepage dynamics in northeast Germany. Archives of Agronomy and Soil Science 54, 451-463.
- VAN GENUCHTEN, M.Th., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
- VOIGT, H.J., 1999: Hydrogeochemie. Springer Verlag, Berlin, pp. 310.
- WENDLING, U., H.G. SCHELLIN und M. THOMÄ, 1991: Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. Z. f. Meteorologie 41, H.6, 1-16.

Modellbasierte Berechnungsberatung unter Berücksichtigung klimatischer Veränderungen

Reinhard Günther¹

Zusammenfassung

Für die Landwirtschaft ist Wasser als elementarer Baustein der Biomassebildung eine unverzichtbare Naturressource. Da diese Ressource zunehmend als limitierender Faktor in Betracht gezogen werden muss, ist eine höhere Effizienz beim Einsatz dieses Produktionsfaktors unabdingbar. Infolge des rezenten Klimawandels, vor allem gekennzeichnet durch einen Anstieg der Lufttemperatur sowie den Rückgang der natürlichen Niederschläge in der Vegetationsperiode, steigen die Verdunstungswerte und somit auch die Defizite der Klimatischen Wasserbilanz weiter an, die Wasserverfügbarkeit für die Kulturpflanzen wird folglich geringer. Wegen dieses Prozesswandels gewinnt die Bewässerung zweifellos wieder mehr an Bedeutung, da nur sie die Kompensation der fehlenden Niederschläge und die bessere Ausnutzung der klimatisch bedingten Gunstfaktoren wie höhere Temperatur, längere Vegetationszeit und erhöhter CO₂-Gehalt der Atmosphäre ermöglicht.

Da Bewässerung ein arbeits- und energieintensives Verfahren darstellt, muss man sich wissenschaftlich begründeter Steuerungsmethoden bedienen, die einen exakten und effizienten Wassereinsatz gewährleisten. Mit BEREST, ein System zur operativen computergestützten Berechnungseinsatzsteuerung, steht ein Instrument zur Verfügung, dass diesen Anforderungen gerecht wird.

Schlagwörter: Trends klimatischer Größen, Lufttemperatur, Niederschlag, Klimatische Wasserbilanz, Bewässerungsmodell

Summary

For agriculture, water is an essential natural resource and a vital component of biomass production. Since this resource increasingly seen as a limiting factor must be taken into consideration, a higher efficiency in the use of this vital factor of production is required. Because of the recent climate change, characterized by an increase of air temperature and radiation as well as a decline in natural rainfall in the growing season, increase the evapotranspiration values and consequently the deficits of the climatic water balance also. The water availability for crops will be lower.

Because this process of change the irrigation becomes more important, since only they compensate the lack of rainfall and allows the better utilization of the beneficial climatically related factors such as higher temperature, longer growing season and increased CO₂ content of the atmosphere. Irrigation is a labour-intensive and energy-intensive process. Therefore a precise control and high efficiency of water use is necessary. In order to meet this requirement, one must use scientifically substantiated control methods.

With BEREST, a computerized system for an operational irrigation management, is a tool available that meets these requirements.

Keywords: climatic trends, air temperature, precipitation, climatic water balance, irrigation model

Einleitung

Für die Landwirtschaft ist Wasser als elementarer Baustein der Biomassebildung eine unverzichtbare Naturressource, deren Bedeutung in der Zukunft weiter wachsen wird. Weltweit ist ein stark wachsender Bedarf an Biomasse sowohl zur Ernährung als auch zur industriellen und energetischen Nutzung zu konstatieren und dies bei gleichzeitig abnehmenden Ackerflächen. Dies erfordert eine erheblich höhere Produktivität pro Flächeneinheit, aber auch eine höhere Effizienz der eingesetzten Produktionsfaktoren. Letzteres gilt in besonderem Maße für das Wasser, das zunehmend als limitierender Faktor in Betracht gezogen werden muss. So weist die Klimatische Wasserbilanz (KWB) als Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung in der Vegetationsperiode (April bis September) verbreitet negative Werte auf, die im Tiefland der neuen Bundesländer bei 120 mm liegen.

In niederschlagsarmen Vegetationsperioden kann dieses Defizit im Thüringer Becken auf über 350 mm ansteigen.

Infolge des rezenten Klimawandels, gekennzeichnet durch einen Anstieg der Lufttemperatur und der Strahlung sowie einen Rückgang der natürlichen Niederschläge in der Vegetationsperiode, steigen die Verdunstungswerte und somit die Defizite der KWB, weiter an.

Wegen dieses Prozesswandels gewinnt die Bewässerung zweifellos wieder mehr an Bedeutung, da nur sie die Kompensation der fehlenden Niederschläge und die bessere Ausnutzung der klimatisch bedingten Gunstfaktoren wie höhere Temperatur, längere Vegetationszeit und erhöhter CO₂-Gehalt der Atmosphäre ermöglicht.

Durch Bewässerung kann auch eine verbesserte Nährstoffnutzung und somit eine Verringerung der Nährstoffverlagerung und -auswaschung erzielt werden.

¹ Schöndorfer Hauptstraße 14a, D-99427 WEIMAR, reinhard.guenther@tllmail.de

Bewässerung kann des Weiteren Mehrerträge und wegen der höheren Produktqualität auch höhere Produktpreise und somit zunehmende Mehrerlöse, bei allerdings auch höheren Energiepreisen, bedingen.

Da die Bewässerung ein arbeits- und energieintensives Verfahren ist, ist einer exakten Steuerung des Wassereinsatzes ein hoher Stellenwert zuzumessen. Dieser Forderung kann nur entsprochen werden, wenn man sich wissenschaftlich begründeter Steuerungsmethoden bedient.

Eine solche, für den Praktiker überschaubar und nachvollziehbare Methode zur schlagbezogenen operativen Bewässerungseinsatzsteuerung im konventionellen und integrierten Landbau ist im ehemaligen Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg mit dem Berechnungsmodell „BEREST“ entwickelt worden. BEREST kam bereits in der ehemaligen DDR auf einer Einsatzfläche von 345 T ha und in der ehemaligen Sowjetunion von mehr als 3 Mill. ha zur Anwendung.

Material und Methoden

Alle derzeit verfügbaren rechnergestützten Entscheidungshilfen, Prognose- und Empfehlungsmodelle setzen die Verfügbarkeit von meteorologischen Daten voraus. Dies gilt sowohl für Pflanzenschutzprogramme, Programme zur Steuerung der Düngung und Beregnung, als auch für Programme zur Vorhersage von Erträgen. Der sich derzeit vollziehende Klimawandel wirft des Weiteren die Frage auf, welche Auswirkungen auf den Wasserverbrauch der Pflanzen und für die Zusatzwasserversorgung zu erwarten sind. Dazu wurden Untersuchungen in der Lysimeterstation Großobringen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft durchgeführt, in der darüber hinaus seit 1983 sowie seit 1992 mit dem in Thüringen installierten agrarmeteorologischen Messnetz kontinuierliche Messungen der wesentlichsten meteorologischen, insbesondere der ver-

dunstungsbestimmenden Größen erfolgen (ROTH et al. 2005). Die nunmehr von der Station Großobringen vorliegende 25-jährige Datenreihe berechtigt dazu, Aussagen zu Trends dieser Größen zu machen. Nachfolgend wird auf die Ergebnisse des Zeitraumes 1983 bis 2005 Bezug genommen

Wegen der Unverzichtbarkeit einer Zusatzbewässerung in klimatisch benachteiligten Gebieten oder zur Erzielung einer hohen Ertragsstabilität und Produktqualität erlangen verlässliche Bewässerungssteuerungssysteme immer mehr an Bedeutung. Das Berechnungssteuerungsprogramm BEREST stellt eine wissenschaftlich begründete Methode zur schlagbezogenen, operativen Bewässerungseinsatzsteuerung im konventionellen und integrierten Landbau dar (WENKEL et al. 1989) und wird im Beitrag vorgestellt.

Ergebnisse

Trends ausgewählter klimatischer Größen

Den folgenden Ergebnissen liegen Trendberechnungen (lineare Regression) aus Daten der Station Großobringen (23-jährige Reihe) zu Grunde.

Diese Ergebnisse werden auch weitgehend durch die Daten der Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes Thüringens gestützt (GÜNTHER 2006).

Lufttemperatur

Bei der Lufttemperatur ist an allen Standorten ein massiv ansteigender Trend zu erkennen. Aus der 23-jährigen Reihe (1983...2005) der Station Großobringen ergibt sich ein Temperaturanstieg von 8,07 °C im Jahr 1983 auf 9,82 °C im Jahr 2005 (Abbildung 1).

Statistisch ist somit die Temperatur im Verlaufe dieser 23 Jahre um 1,75 K, d.h. 0,076 °C pro Jahr, angestiegen. Legt

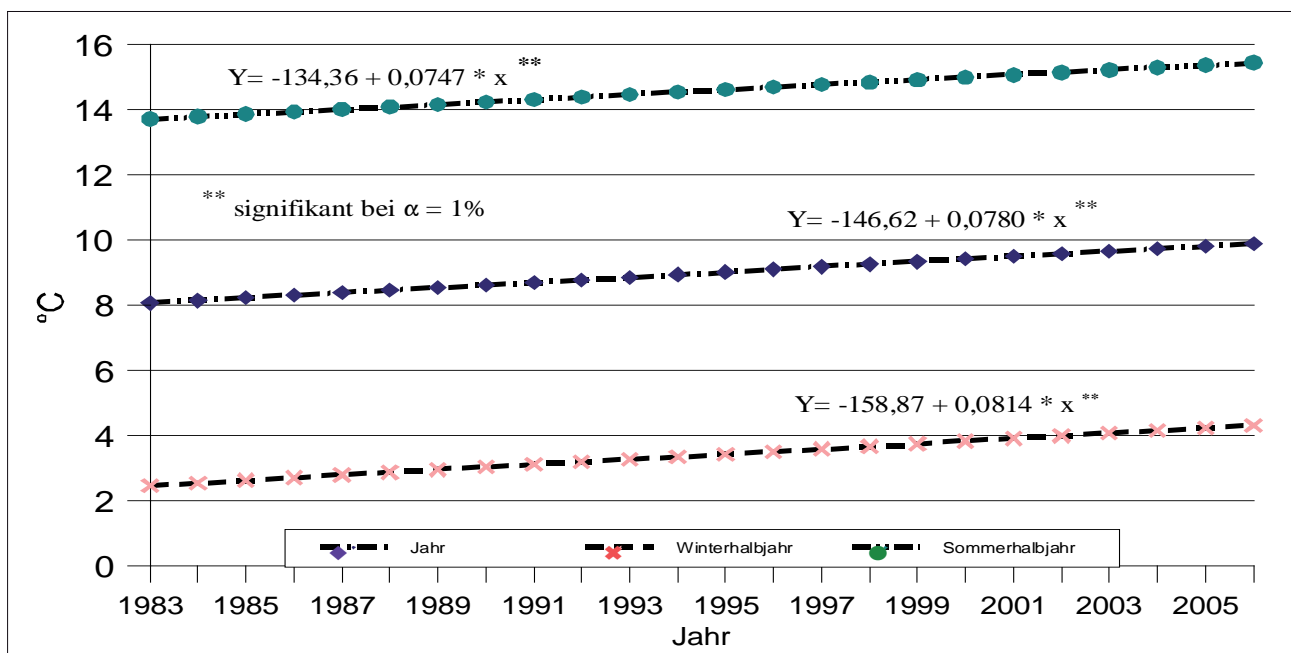


Abbildung 1: Trend der Lufttemperaturmittel bezüglich Jahr, Winterhalbjahr und Sommerhalbjahr (Analyse der Datenreihe 1983 bis 2005 der Station Großobringen)

Tabelle 1: Temperaturanstiege in unterschiedlichen Zeiträumen am Standort Großbringen, abgeleitet aus dem Trend 1983...2005 sowie aus den vieljährigen Mittelwerten von 1951 bis 1980 und von 1983 bis 2005

	Temperaturanstieg aus der Trendanalyse	Temperaturanstieg aus dem Vergleich der vieljährigen Mittelwerte		
	ΔT [°C]	1951...1980	1983...2005	ΔT [°C]
Gesamtjahr	1,75	8,2 °C	8,9 °C	0,7
Winterhalbjahr (Oktober bis März)	1,76	2,6 °C	3,4 °C	0,8
Sommerhalbjahr (April bis September)	1,65	13,7 °C	14,5 °C	0,8

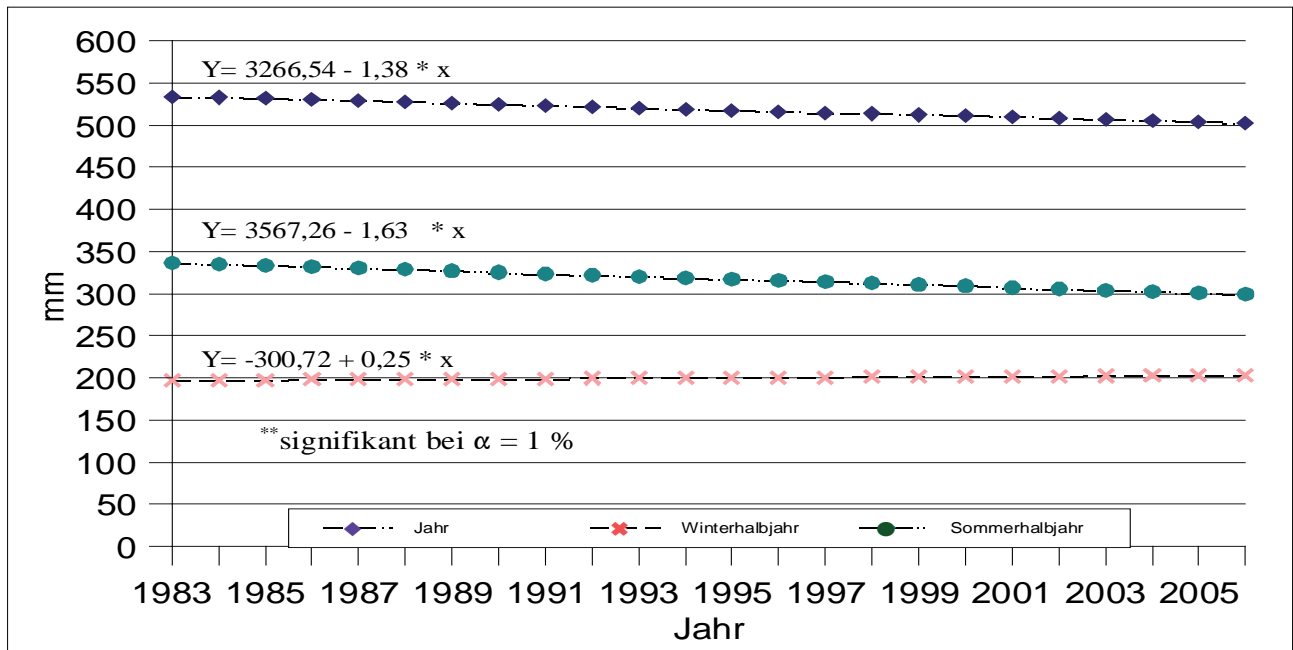


Abbildung 2: Trend des Niederschlagsaufkommens pro Jahr, Winterhalbjahr und Sommerhalbjahr (Analyse der Datenreihen 1983 bis 2005 der Station Großbringen)

Tabelle 2: Niederschlagsänderungen in unterschiedlichen Abschnitten des Jahres am Standort Großbringen, abgeleitet aus dem Trend 1983...2005 sowie aus den vieljährigen Mittelwerten 1951...1980 bzw. 1983...2005

	Niederschlagsänderung abgeleitet aus der Trendanalyse	Niederschlagsänderung aus dem Vergleich der vieljährigen Mittelwerte		
	ΔN (mm)	1951...1980	1983...2005	ΔN (mm)
Gesamtjahr	-30	552 mm	519 mm	-33 mm
Winterhalbjahr (Oktober bis März)	+6	201 mm	200 mm	-1 mm
Sommerhalbjahr (April bis September)	-36	351 mm	319 mm	-32 mm

man das 30-jährige Mittel der Lufttemperatur als Ausgangswert zu Grunde (8,2 °C), verbleibt immer noch an Anstieg um 1,62 °C.

Betrachtet man das Winter- und Sommerhalbjahr getrennt, so ergeben sich aus dem Trend für die beiden Halbjahre Anstiege um 1,76 °C bzw. 1,65 °C (Tabelle 1).

Niederschlag

Beim Niederschlag ist an fast allen Standorten eine Abnahme der Jahressummen zu konstatieren, die in der Regel aus einer leichten Zunahme im Winterhalbjahr und einer stärkeren Abnahme im Sommerhalbjahr resultiert (Abbildung 2).

Die sich aus den Trends ergebenden absoluten Abweichungen in den drei verschiedenen Zeiträumen gehen aus Tabelle 2 hervor.

Danach beträgt die Abnahme im Gesamtjahr 30 mm, die sich aus einer Zunahme von 6 mm im Winterhalbjahr und einer beträchtlichen Abnahme von 36 mm im Sommerhalbjahr ergibt. Diese Abnahme entspricht etwa dem thüringenweiten Durchschnittsniederschlag im März.

Potenzielle Verdunstung

Die Verdunstung wird in der Regel mit Hilfe von Modellansätzen vorwiegend aus meteorologischen Einflussgrößen

Tabelle 3: Auswirkungen des Temperatur- und Strahlungstrends auf die potenzielle Verdunstung (PET)

	Vieljähriger Durchschnitt			Abgeleitet aus Trendanalyse 1983...2005			Δ PET (mm)
	T(°C)	GS(MJ/m ²)	PET(mm)	T(°C)	GS(MJ/m ²)	PET(mm)	
April bis September	13,7	14,39	488,6	15,4	15,14	530,7	42,1
Gesamtjahr	8,2	9,37	576,7	9,8	9,85	627,8	51,1

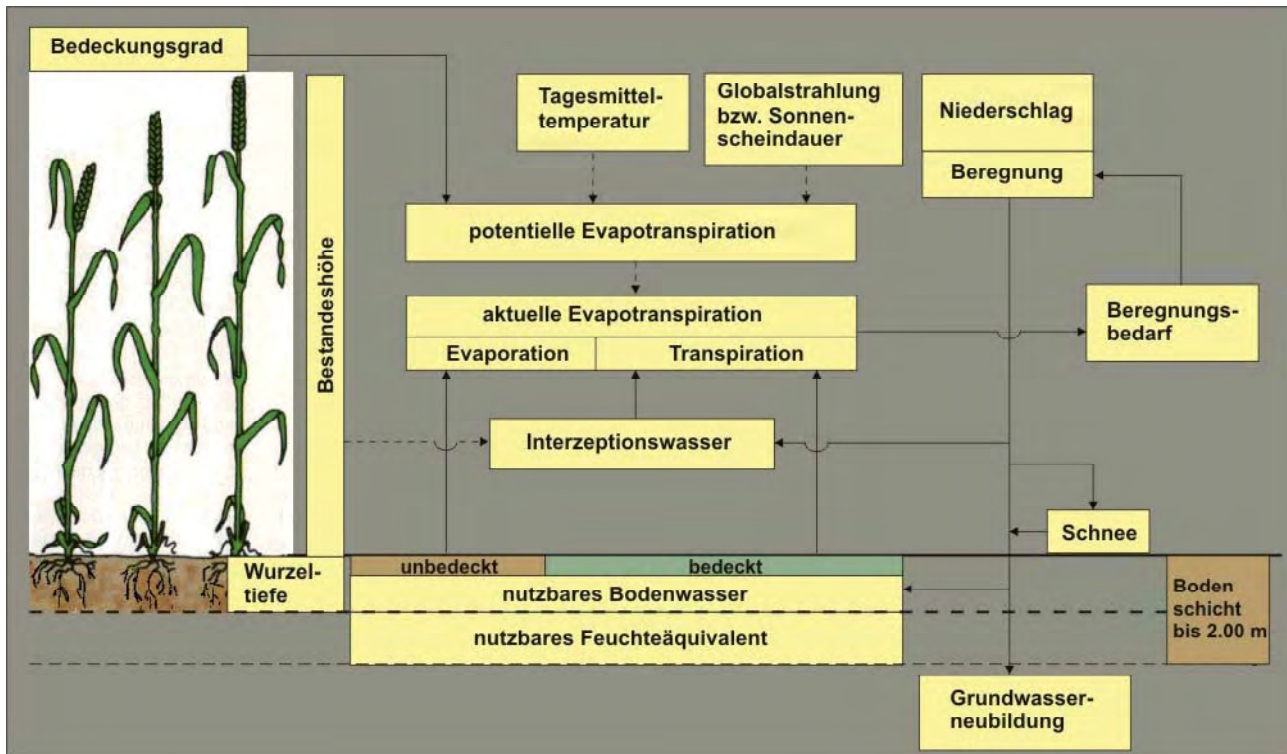


Abbildung 3: Modellschema des Mehrschichtenbodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodells von BEREST (WENKEL et al. 2006)

wie Strahlung, dem Sättigungsdefizit der Luft, der Lufttemperatur und zum Teil der Windgeschwindigkeit bestimmt. Als wesentlichste Einflussgröße auf die Verdunstung hat sich die Strahlung erwiesen. Für die Berechnung der hier verwendeten Verdunstung liegt die Formel von TURC, modifiziert nach WENDLING (1986), zu Grunde, die als Eingangsparameter die Globalstrahlung und die Lufttemperatur benötigt. Aus der Verrechnung der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur der Station Großbröningen resultiert für den Zeitraum von 1983 bis 2005 ein Temperaturanstieg von 1,75 °C. Allein ein solcher Temperaturanstieg führt zu einer Mehrverdunstung von ca. 22 mm im Jahr. Bezieht man die Strahlungserhöhung (ca. 73 MJ/m²) mit ein, dann nimmt die potenzielle Verdunstung sogar um 51 mm zu (Tabelle 3).

Stellt man diese Betrachtung für das Sommerhalbjahr ebenfalls unter Berücksichtigung der Strahlung an, dann ergibt sich durch die um 1,65 °C erhöhte Temperatur und eine zusätzliche Einstrahlung von 86 MJ/m² eine Verdunstungserhöhung um ca. 42 mm. Wenn darüber hinaus der Niederschlagstrend mit einer Abnahme von 36 mm einbezogen wird, erhöht sich das klimatische Wasserdefizit in der Vegetationsperiode um 78 mm.

Für einen Beregnungsbetrieb bedeutet dies, sich zukünftig auf ca. 3 zusätzliche Gaben pro Kultur einzustellen.

Bewässerungssteuerung

Der ressourcenschonende Umgang mit Wasser ist ein wesentlicher Bestandteil der nachhaltigen Landwirtschaft. Dies gilt insbesondere für den Anbau von Gemüse, der ohne Zusatzwasserversorgung in vielen Gebieten Deutschlands nicht möglich ist. Bei der Bewässerung, allein auf der Basis von Erfahrungen, müssen eine Vielzahl von Erfahrungen berücksichtigt werden. Diesem Sachverhalt wohnt inne, dass Fehler unvermeidlich sind.

Deshalb werden zur Bewässerungssteuerung zunehmend Hilfsmittel eingesetzt, um die Fehler weitgehend auszuschließen und die Effizienz des Wassereinsatzes zu erhöhen.

Als solche Hilfsmittel haben sich Beregnungssteuerungsprogramme erwiesen, die auf Bodenfeuchte- bzw. Verdunstungsmodellen basieren. Die Abschätzung des Wasserverbrauches der zu beregnenden Fruchtart sowie des Bodenfeuchteverlaufes sind notwendige Voraussetzungen für die Ableitung von mengen- und zeitpunktmäßigen Zusatzwasserempfehlungen.

Wasserverbrauch und Bodenfeuchtegehalt hängen bei der modellmäßigen Berechnung im entscheidenden Maße von der Modelleingangsgröße "potenzielle Verdunstung" ab.

Diese wird meist mit empirischen Formeln aus meteorologischen Größen berechnet und spiegelt die natürliche Verdunstung eines Pflanzenbestandes nur unzureichend wider. Der Korrektur dieser Eingangsgröße kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu und ist entscheidend für die Simulationsgüte eines Modells (PACHOLD 1997, GÜNTHER & ROTH 1994).

Um den heutigen Anforderungen an eine Zusatzwasserversorgung zu entsprechen, hat Bewässerung nach wissenschaftlich begründeten Methoden zu erfolgen.

Eine solche, für den Praktiker überschaubar und nachvollziehbare Methode zur schlagbezogenen, operativen Bewässerungseinsatzsteuerung im konventionellen und integrierten Landbau ist bereits in den 70-iger Jahren im ehemaligen Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg mit dem Berechnungssteuerungssystem „BEREST“ entwickelt worden (WENKEL et al. 1989). BEREST kam bereits in der ehemaligen DDR auf einer Fläche von 345 Tha und in der ehemaligen Sowjetunion auf einer solchen von über 3 Mill. ha zur Anwendung.

Kern des DOS-Systems ist ein dynamisches Mehrschichtenbodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodell sowohl für aktuelle als auch für prognostische Berechnungen (Abbildung 3). Darauf aufbauend erfolgt die schlagspezifische Berechnung des Wassereinsatzes auf der Grundlage des Quotienten aus aktueller und potenzieller Evapotranspiration (AET/PET) als Maßstab der Wassermangelstressbelastung der Bestände bei gleichzeitiger Berücksichtigung des Bodenfeuchtezustandes.

Das System bietet:

- eine fruchtart- und schlagspezifische Abschätzung und Prognose des Bodenfeuchtegehaltes sowie der Versickerung,
- die Ermittlung und Prognose der Verdunstung sowie der aktuell bestehenden und prognostisch zu erwartenden Wasserstressbelastung der Pflanzenbestände,
- die Berechnung des aktuellen und prognostisch zu erwartenden Zusatzwasserbedarfs,
- die Berechnung und Bereitstellung aktueller schlagspezifischer Bewässerungsempfehlungen (optimaler Bewässerungszeitpunkt, optimale Höhe der Zusatzregengabe, Fortsetzungs- oder Unterbrechungsempfehlung),
- die Ermittlung der maximal zulässigen Regengabenhöhe, die nicht überschritten werden sollte, um Versickerungs- und damit Nährstoffauswaschungsverluste sowie Oberflächenabfluss bei Hangneigung zu vermeiden und
- die Möglichkeit der Datenspeicherung und Datenauswertung zu Zwecken der Produktionsanalyse.

Die für das Mehrschichtenbodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodell erforderlichen Inputdaten, Modellparameter sowie die Modelloutputgrößen sind der *Abbildung 4* zu entnehmen.

Essenzieller Bestandteil des Modells sind neben der dynamischen Berechnung von Bodenfeuchte und Evapotranspiration fruchtartspezifische, fachlich fundierte Steuerkurven für die Ontogenese, den Bedeckungsgrad, die Wasserentnahme- bzw. Durchwurzelungstiefe, den Korrekturfaktor der potenziellen Evapotranspiration und den Grenzwert des



Abbildung 4: Input- und Outputparameter des Mehrschichtenbodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodells BEREST (WENKEL et al. 2006)

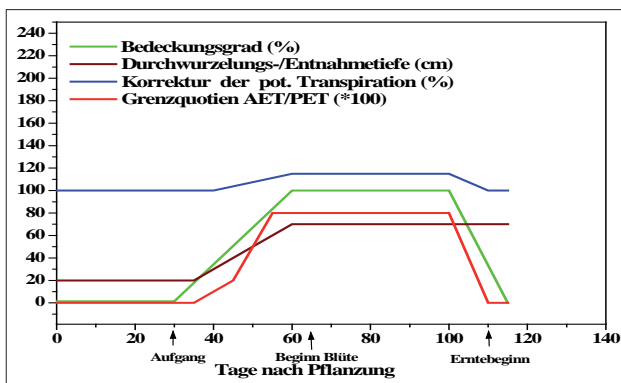


Abbildung 5: Steuerkurven für Frühkartoffeln (RG1) des Modells BEREST(WENKEL et al. 2006)

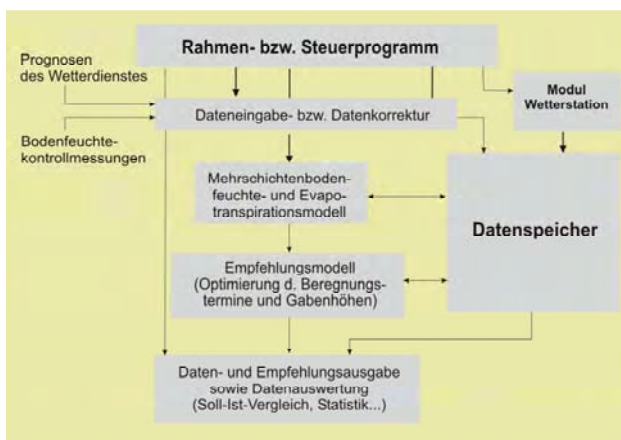


Abbildung 6: Vollständige Programmstruktur von BEREST

AET/PET-Quotienten. *Abbildung 5* zeigt beispielhaft einen Steuerkurvensatz für Frühkartoffeln der Reifegruppe 1.

Insgesamt liegen für 186 Fruchtarten und Anbauformen Steuerkurven-Sätze vor. Im Einzelnen bestehen diese aus 14 Sätzen für Getreide, 7 für Hülsenfrüchte, 3 für Ölfrüchte, 54 für Gemüse, 18 für Hackfrüchte, 69 für Futterpflanzen, 13 für Obst und 8 für Sonderkulturen.

Die gesamte Programmstruktur von BEREST geht aus *Abbildung 6* hervor.

Ein aktuelles Anwendungsbeispiel von BEREST sind die von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft seit 1990 jährlich im Zeitraum von April bis September im Wochenturnus herausgegebenen Beregnungsempfehlungen, um den auf die Beregnung angewiesenen Thüringer Produzenten eine Beratungs- und Entscheidungshilfe in die Hand zu geben (GÜNTHER 2006).

Seit 1995 bestehen die Empfehlungen aus fünf Informativanteilen.

Der erste Teil beinhaltet die Niederschlags- und Verdunstungssumme sowie die Klimatische Wasserbilanz der Vorwoche für repräsentative Beregnungsstandorte. Die zugrunde liegenden Daten stellen in der Mehrzahl Messwerte von Wetterstationen des agrarmeteorologischen Messnetzes dar, ergänzt durch einige DWD-Stationen.

Die zweite Tabelle weist die aktuelle Bodenfeuchte in 0 bis 60 cm Tiefe unter unberegneten und beregneten Bedingun-

gen an den unterschiedlichen Standorten aus. In der dritten Tabelle werden empfohlene Gabenhöhen und die kumulativ empfohlenen Zusatzwassermengen mitgeteilt. Im Teil 4 erfolgt ein Ausblick auf das Wetter der nächsten Tage. Der letzte Teil enthält verbale Hinweise zur Beregnung, wobei unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher Belange für die aktuell beregnungswürdigen und -bedürftigen Fruchtarten entsprechende Gabenhöhen empfohlen werden.

Ausblick

BEREST hat sich als computergestütztes Expertensystem zur operativen Steuerung eines umweltschonenden und wassersparenden Beregnungseinsatzes in der Landwirtschaft und im Gartenbau herausgestellt.

Gegenwärtig wird an der Weiterentwicklung von BEREST zu einem internetgestützten Experten- und Managementsystem (IRRIGAMA) gearbeitet, dass auch eine betriebswirtschaftliche Bewertung der durchgeführten Bewässerungsmaßnahmen beinhalten soll (WENKEL et al. 2006).

Im Ergebnis soll BEREST bzw. IRRIGAMA den gestiegenen Anforderungen der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Praxis an eine in jeder Hinsicht effiziente Zusatzbewässerung gerecht werden und bei der betrieblichen Anwendung die Nutzung neuer Medien wie das Internet durch landwirtschaftliche und gartenbauliche Unternehmen ermöglichen und unterstützen.

Literatur

- GÜNTHER, R. und D. ROTH, 1994: Korrekturfaktoren für Schätzverfahren der potentiellen Verdunstung (PET) abgeleitet aus Lysimeterwerten. Bericht über die 4. Gumpensteiner Lysimetertagung 19.-20. April 1994, BAL Gumpenstein, S. 79-86.
- GÜNTHER, R., 1997: Verbesserte Verdunstungs- und Bodenfeuchtemodelle als Basis für die Beregnungsempfehlung der TLL. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Forschungsbericht Themenblatt-Nr.: 15.09.630/97.
- GÜNTHER, R., 2006: Aufgaben und Leistungen des agrarmeteorologischen Messnetzes in Thüringen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Abschlussbericht Themenblatt-Nr.: 46.07.730/05, 30 S.
- PASCHOLD, P.-J., 1997: Bewässerungseinsatz nach der Geisenheimer Methode. Deutsche Gärtnerpost 27, 1997, 5, S. 12-13.
- ROTH, D., R. GÜNTHER und K. SCHWARZ, 1984: Die Lysimeterstation Butteltstedt zur Erfassung des Pflanzenwasserverbrauches. Z. f. Meteorol., 34 (1984), S. 256-265.
- ROTH, D., R. GÜNTHER, S. KNOBLAUCH und H. MICHEL, 2005: Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. Jena, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 1, 159 S.
- WENKEL, K.-O., M. NEUMEYER und F. SCHIRACH, 1989: Computergestützte schlagbezogene Einsatzsteuerung der Beregnung. Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin 275, S. 201-210.
- WENKEL, K.-O., W. MIRSCHER, B. SCHÖRLING, M. VOIGT, R. HARTUNG und B. GUTEZEIT, 2006: Die Entwicklung eines internetgestützten Informations- und Beratungssystems zur umweltschonenden und ökonomisch effektiven Steuerung des Bewässerungseinsatzes in der Landwirtschaft und im Gartenbau - IRRIGAMA.NET; Entwicklungskonzeption, ZALF Müncheberg/ Beregnungsmanagement und -beratungs GbR.

Spezifische Anwendungen in der Lysimeterforschung

Bernhard Wimmer^{1*}

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:

¹ 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, CO₂, 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 NH₄-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 m³ 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

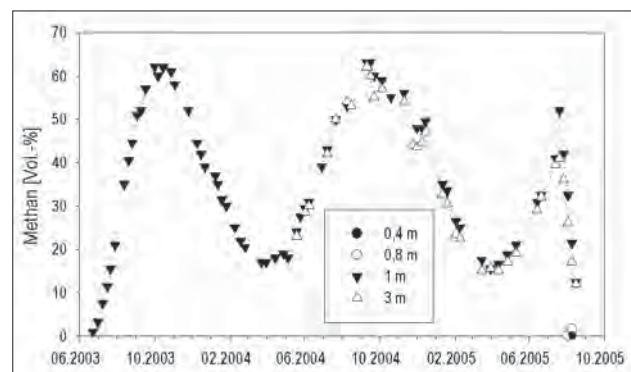


Abbildung 1: Methankonzentration im Müllkörper des Altlastenlysimeters Seibersdorf unter einer mineralischen Dichtschicht. Geringe Gehalte an Methan wurden zu Versuchsende auch in der mineralischen Dichtschicht (0,8 m) und in der Oberflächenabdeckung (0,4 m) registriert.

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 Bergbaufolgefleichen 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. WRRC 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
- PÜTZ, TH., H. RÜTZEL und H. VERECKEN, 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.

Gebirgs-Lysimeterstation am Stoderzinken - Erste Ergebnisse

Markus Herndl^{1*}, Andreas Bohner¹ und Matthias Kandolf¹

Zusammenfassung

Die Nördlichen Kalkalpen mit ihren meist karbonathaltigen und verkarstungsfähigen Gesteinen, sind durch die hohen jährlichen Niederschlags- und Schneemengen wesentlich an der Grundwasserneubildung und damit an der Trinkwasserversorgung in Österreich beteiligt. Klimaparameter wie Niederschlagsmenge und -verteilung, sowie Schneemenge, Wind und Lufttemperatur sind die wichtigsten Einflussfaktoren um Sickerwassermengen und jahreszeitliche Verteilung an Gebirgsstandorten abschätzen zu können. Um die Auswirkungen von Klima und Klimaveränderung auf Grundwasserneubildung und den Nährstoffaustrag in das Sickerwasser für einen Gebirgsstandort in den Nördlichen Kalkalpen quantifizieren zu können, wurde im Jahr 2005 an der Westseite des Stoderzinkens (1830 m Seehöhe) eine Lysimeterstation errichtet. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Schneemenge und der Verlauf der Schneeschmelze die maßgeblichsten Faktoren für die Grundwasserneubildung sind. Erhebungen hinsichtlich Nährstoffeintrag (nasse Deposition) und -austrag (Sickerwasser) zeigen trotz ungedüngtem Boden für einige Inhaltsstoffe vergleichsweise hohe Ein- und Austragsmengen. Die kurze Untersuchungszeit von 2 Jahren erlaubt nur die Darstellung erster Trends. Die Resultate weisen aber auf ein Zusammenspiel von Faktoren wie kurzer Vegetationsdauer, ertragsarmer Vegetation sowie der hohen Niederschlags- und Sickerwassermengen hin. Die Neuinstallation von zusätzlichen Messeinrichtungen und die Erweiterung der Datenbasis werden dahingehend in den nächsten Jahren konkretere Einschätzungen erlauben.

Schlagwörter: Lysimeter, Grundwasserneubildung, Sickerwasser, Hintergrundlast

Summary

The Northern Limestone Alps, mainly containing carbonate and karst capable parent rocks, contribute by their high annual precipitation and amount of snow considerably to groundwater recharge and thus to drinking water supply of Austria. Climate parameters such as amount and distribution of precipitation as well as amount of snow, wind and air temperature are the most important influencing factors to evaluate quantity and seasonal distribution of seepage water in a montane site. To quantify the impacts of climate, climate change and nutrient contamination to seepage water at a montane site in the Northern Limestone Alps, a lysimeter station was built at the west side of Stoderzinken (1830 m above sea level) in 2005. First results showed that the amount of snow and the course of snow melting are the most important factors for the groundwater recharge rate. Observations regarding nutrient contamination (wet deposition) and leaching (seepage water) showed a comparatively high amount of input and output for some substances in spite of the lacking fertilization. The short observation period of 2 years allows only an evaluation of first trends. However, the results indicate an interaction of factors such as short vegetation period, poor yield of vegetation as well as high amount of precipitation and seepage water. The new installation of additionally measuring devices and the enhancement of the data collection during the next years will permit more precise conclusions regarding these effects.

Keywords: lysimeter, groundwater recharge, seepage water, background load

Einleitung

Nach einer Studie von ARNELL (2000) leben im Jahre 2080 rund 60% der Weltbevölkerung in Gebieten wo die Wasserversorgung gefährdet und beinahe 50% in Gebieten in denen sie stark gefährdet sein wird. In Europa werden vor allem der mediterrane Raum sowie der mittlere Osten betroffen sein. Den Karstaquiferen, die weit verbreitet und ergiebig sind, wird für die Trinkwasserversorgung dabei in Zukunft eine immer größere Bedeutung zu kommen. Etwa ein Viertel der Menschheit bezieht derzeit ihr Trinkwasser aus Karstgrundwasserleitern während in Europa das Trinkwasser zu 35% aus Karstwasser stammt.

Die geologische Übersichtskarte Österreichs weist rund 22% des Bundesgebietes als Karbonatgestein aus, wobei ungefähr

2/3 davon als verkarstungsfähiges Gestein eingestuft wird (EBNER et al. 1997). Vorwiegend in den Nördlichen und Südlichen Kalkalpen gelegen, tragen die Karbonat(karst)-gebiete aufgrund der oft hohen jährlichen Niederschlagsmengen erheblich zur regionalen aber auch überregionalen Trinkwasserversorgung bei. In Österreich wird der Trinkwasserbedarf zu rund 50% durch Grundwasser abgedeckt, wobei beträchtliche 49% aus Karstgrundwasser stammen (COST 65, 1995).

Das Klima einer Region, im wesentlichen Niederschlagsmenge und -verteilung aber auch Schneemenge, Wind und Lufttemperatur, sind maßgeblich an der Grundwasserneubildung beteiligt. Klimawandel der sich gerade im inneralpinen Raum besonders stark ausprägt, wird sich auch auf

¹ Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ), Raumberg 38, A-8952 IRDNING

* Ansprechpartner: markus.herndl@raumberg-gumpenstein.at

die Grundwasserversorgung auswirken. Die ansteigenden Jahresdurchschnittstemperaturen, welche in tieferen Lagen die Schneemengen reduzieren sowie Starkregenereignisse können sowohl den mengenmäßigen als auch den zeitlichen Verlauf des Wassereintrages in den Karstwasseraquifer und daher die Versorgung mit Karstgrundwasser beeinflussen.

Eine weitere Gefährdung der Grundwasserversorgung kann die Grundwasserverschmutzung sein. Durch die geringe Filterwirkung von Karstgestein kann Karstwasser durch verschiedene Kontaminationsquellen (Atmosphäre, Abwässer aus der Landwirtschaft etc.) sowohl beim Eintritt als auch beim Austritt geschädigt werden. Die Kulturart Dauergrünland ist im Allgemeinen grundwasserschonend, wobei die zumeist extensive Bewirtschaftung auf Gebirgsstandorten meist kein besonderes Gefahrenpotential aufweist. Nichts desto trotz können vor allem Schwefel- und Stickstoffverbindungen, die über die nasse Deposition in das Ökosystem gelangen, zu Nährstoffungleichgewichten führen, die wiederum zu Veränderungen der Artenzusammensetzung der Grünlandvegetation und in weiterer Folge zu ökonomischen Schäden führen können. Durch die hohen Niederschlagsmengen und die dadurch verursachten hohen Schadstoff-Eintragsmengen können vor allem Gebirgsstandorte mit ihren empfindlichen Pflanzengesellschaften betroffen sein.

Nach einer umfassenden Literaturrecherche kann festgehalten werden, dass sowohl die Auswirkung von Klima auf Bewirtschaftung, Schneeschmelze und Grundwasserneubildung als auch der Nährstoffeintrag in das Grundwasser für einen Gebirgsstandort im Karstgebiet weitgehend unerforscht sind.

Material und Methoden

Lysimeterstandort Stoderzinken

Im Jahr 2005 wurde in einem repräsentativen Almgebiet in den Nördlichen Kalkalpen an der Westseite des Stoderzinkens (1830 m Seehöhe), Obersteiermark eine Gebirgslysimeterstation errichtet um aktuelle und zukünftige Probleme der Trinkwasserversorgung, des Boden- und Grundwasserschutzes bearbeiten zu können (BOHNER et al. 2007). Das Ziel der Station ist, mit Hilfe eines wägbaren monolithischen Lysimeters, sowie eines Bodenwassersammler und einer Wetterstation einen Einblick in Wasser- und Stoffbilanzen im System Atmosphäre-Boden-Sickerwasser zu bekommen. Der Standort der Lysimeterstation weist typisch für die Nördlichen Kalkalpen hohe Niederschlagsmengen und eher kühle Temperaturen auf (*Abbildung 1*). Die Vegetation im Bereich der Lysimeterstation besteht auf Grund

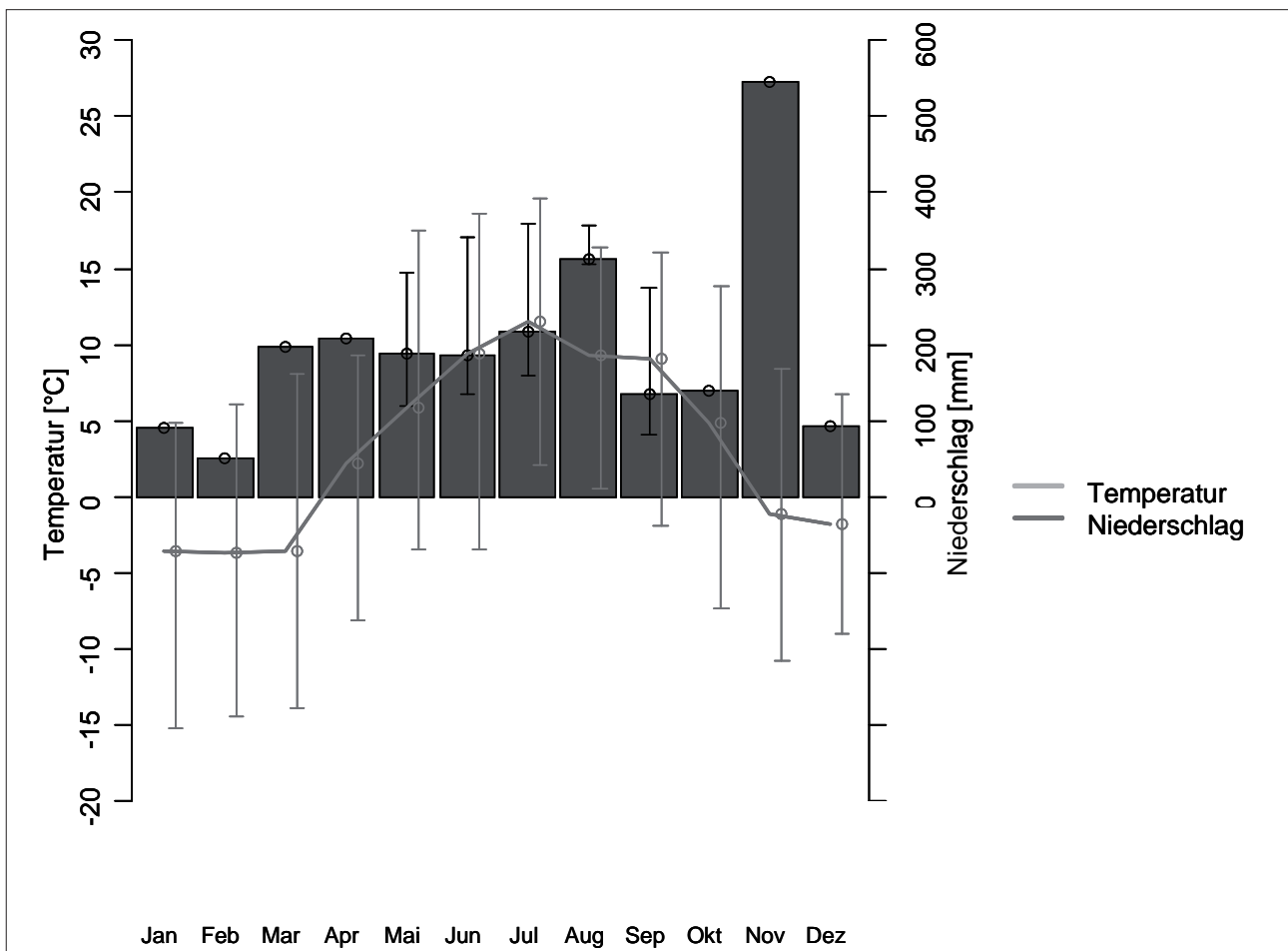


Abbildung 1: Mittlere, maximale und minimale monatliche Tagestemperatur und Niederschlagssumme am Standort Stoderzinken für die Jahre 2006 und 2007.

Tabelle 1: Jährliche Sickerwasser- und Austragsmengen der Inhaltsstoffe $N_{\text{anorg}} = (\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N})$ Ca, Mg, S, K, P, Cl, eines ungedüngten Bodens am Standort Stoderzinken.

Jahr	Sickerwasser	N_{anorg}	Ca	Mg	Inhaltsstoff			
	mm				S kg ha ⁻¹	K	P	Cl
2006	2903,9	7,7	1188,0	158,0	43,0	3,7	0,03	3,3
2007	2588,6	6,1	875,0	113,0	11,9	2,7	0,02	3,1

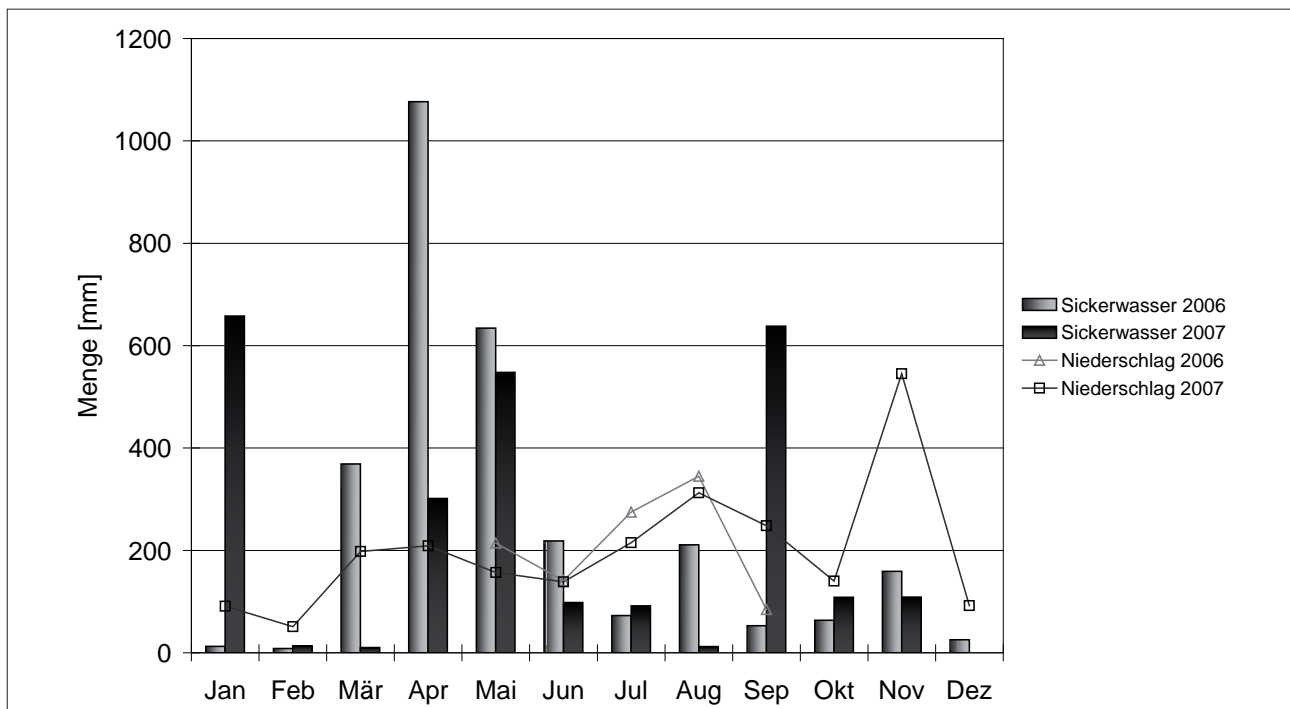


Abbildung 2: Monatliche Sickerwassermengen und Niederschlagssummen am Standort Stoderzinken für die Jahre 2006 und 2007.

der leichten Muldenlage und der nassen Bedingungen aus einer feuchten Ausprägung der Milchkrautweide (*Crepido aureae-Festucetum commutatae*). Das Umland ist eine Almfläche und wird normalerweise beweidet, der Bereich des Lysimeters ist umzäunt um Beeinträchtigungen durch Tiere zu vermeiden und wird daher ersatzweise einmal pro Jahr gemäht. Der Bodentyp im Lysimeter ist ein krumenpseudovergleyter Kalkbraunlehm. Die Böden im Umland sind ein Komplex aus flachgründigen Kalklehm-Rendzinen aus Dachsteinkalk (FLÜGEL und NEUBAUER 1984) und tiefgründigen Kalkbraunlehmen.

Messtechnik Lysimeterstation

Die Lysimeterstation besteht aus einem wägbaren monolithischen Lysimeter (Oberfläche = 1 m²; Tiefe = 1 m), einem monolithischen Bodenwassersammler (Oberfläche = 0,071 m²; Tiefe = 0,6 m) sowie einem Freilandmessprofil und einer Wetterstation (BOHNER et al. 2007). Das Lysimeter steht auf einem Wägesystem, mit einer Genauigkeit von 10 g das heißt, es kann Niederschlag bzw. Verdunstung mit einer Abweichung von ca. 0,01 mm ermittelt werden. Die Sickerwassermenge wird mittels eines Kippzählers in 1 m Bodentiefe kontinuierlich erfasst. Bei jeder Kippung wird eine Wasserprobe von 2,5 % für die chemischen Analysen

gesammelt. Zusätzlich sind im Lysimeter Bodentemperaturfühler, Tensiometer und FD-Sonden in vier Tiefenstufen (5 cm, 30 cm, 60 cm und 90 cm) installiert.

Im monolithischen Bodenwassersammler wird die Sickerwassermenge mit einem Kippzähler in 5 ml Auflösung erfasst und für die chemischen Analysen gesammelt.

Im Freilandmessprofil werden Bodentemperatur, Bodenwasserspannung und volumetrischer Bodenwassergehalt in vier Tiefenstufen (5 cm, 30 cm, 60 cm und 90 cm) gemessen.

Die Wetterstation beinhaltet 4 Niederschlagssammler mit einem Durchmesser von 20 cm und einer Auffangoberfläche von 314 cm². In einer Höhe von 2 m werden Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Globalstrahlung, relative Feuchte und Lufttemperatur gemessen. Die Lufttemperatur wird zusätzlich in 5 cm und 20 cm Höhe über der Bodenoberfläche registriert. Die Niederschlagsmengenmessung erfolgt mit dem System „Parsivel“ in einer Höhe von 3 m.

Die gewonnenen Niederschlags- und Sickerwasserproben werden im Labor der HBLFA Raumberg-Gumpenstein analysiert. Mittels Ionenchromatografie und Photometer werden die Inhaltsstoffe NO₂, NO₃, NH₄, P, K, Ca, Mg, Na, Cl und SO₄ ermittelt.

Ergebnisse und Diskussion

In einem humiden Klima wie es in den Nördlichen Kalkalpen vorherrscht, kommt der Niederschlagsmenge und -verteilung die wichtigste Rolle bei der Grundwasserneubildung zu. Die Schneeakkumulation im Winter und die Schneeschmelze im Frühling sind die bedeutendsten Zeitpunkte für die Grundwassererneuerung. Im Sommer aber auch im Herbst tragen vor allem Starkniederschläge zur Erneuerung bei (SELIGER 2002). Im Untersuchungsjahr 2006 wurde am Standort Stoderzinken eine Jahressickerwassermenge im Lysimeter von $2904 \text{ Liter m}^{-1}$ festgestellt, im Jahr 2007 betrug die Gesamtsickerwassermenge $2589 \text{ Liter m}^{-1}$ (Tabelle 1). Die große Bedeutung der Schneeakkumulation und der Schneeschmelze für die jährliche Grundwasserneubildung in Gebirgsökosystemen sieht man dadurch, dass zur Zeit der Schneeschmelze (März bis Mai) in beiden Jahren über 50% der Jahresgrundwasserneubildung erfolgt (Abbildung 2). Eine Besonderheit konnte im Januar 2007 festgestellt werden, wo die Sickerwassermenge für diesen Monat mit 657 Liter m^{-1} unüblich hoch war. Diese Tatsache kann mit einem überdurchschnittlichen Wärmeeinbruch über 2 Wochen hinweg und der damit eingeleiteten Schneeschmelze erklärt werden. Ein kurzzeitiger Kälteeinbruch im September 2007 und eine damit verbundene Schneeakkumulation kann die im Vergleich zu den Niederschlägen hohe Sickerwassermenge in diesem Monat erklären. Die bis jetzt vorliegenden Ergebnisse, welche große Schwankungen im zeitlichen Verlauf und in der anfallenden Sickerwassermenge zeigen, lassen den Schluss zu, dass keine gesicherten Prognosen über den zeitlichen Anfall und die Menge an Grundwasserneubildung gemacht werden können. Warme Winter, sowie

trockenere und schneearme Jahre könnten zu einer deutlichen Reduktion des verfügbaren Grundwassers führen, da für die Grundwasserneubildung auf diesem Standort vor allem die Schneemenge entscheidend ist.

Die Sensibilität des betrachteten Ökosystems bzw. die Menge des Stoffeintrages über die Atmosphäre sind die zwei wichtigsten Faktoren um die Höhe der durch den Eintrag von Stoffen verursachten Einwirkung auf die Umwelt quantifizieren zu können. Für Schwefel- und Stickstoffverbindungen ist der Eintrag über die nasse Deposition, welche durch die Messung der Stoffkonzentrationen im Regenwasser ermittelt und als Produkt der Ionenkonzentration im Niederschlagswasser und der Regenmenge berechnet wird, entscheidend. Untersuchungen des Umweltbundesamtes im Jahr 1994 zeigten für das Gebiet in dem sich der Lysimeterstandort befindet, eine nasse Deposition von Nitrat-N von $4\text{-}6 \text{ kg ha}^{-1}$ und für Schwefel $8\text{-}12 \text{ kg ha}^{-1}$ und Jahr (SCHNEIDER 1998). Die eigenen Untersuchungen des Niederschlagswassers in den 4 Niederschlagssammlern am Standort Stoderzinken ergaben im Jahr 2006 eine kumulative Nitratstickstoffmenge über die Vegetationszeit (Mai-Oktober) von 3 kg ha^{-1} und eine Schwefelmenge von rund 4 kg ha^{-1} (Abbildung 3, 4). Wenn man berücksichtigt, dass auf diesem Gebirgsstandort die Hauptmenge an Niederschlägen während der Herbst- und Wintermonate erfolgt, scheinen die Werte im Vergleich ziemlich hoch. Da in den Wintermonaten die Niederschlagsenerhebung nur mittels Parsivel erfolgt (d.h. keine Niederschlagsproben gezogen werden können), kann für diesen Zeitraum nur spekuliert werden. Ab dem Winter 2008 bzw. 2009 werden ein Schneekissen und eine Niederschlagswaage zusätzlich installiert, um diese Parameter genauer erheben zu können.

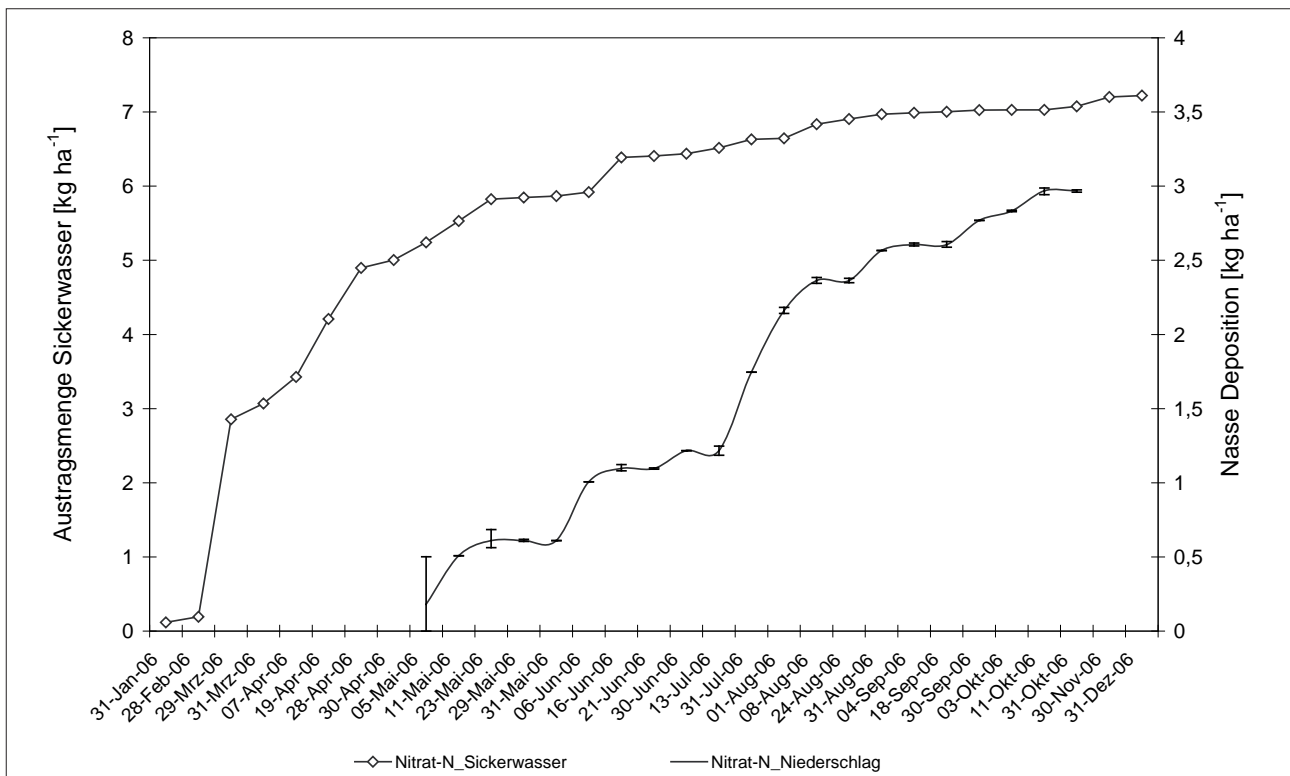


Abbildung 3: Kumulative Austragsmenge und nasse Deposition von Nitrat-N für das Jahr 2006.

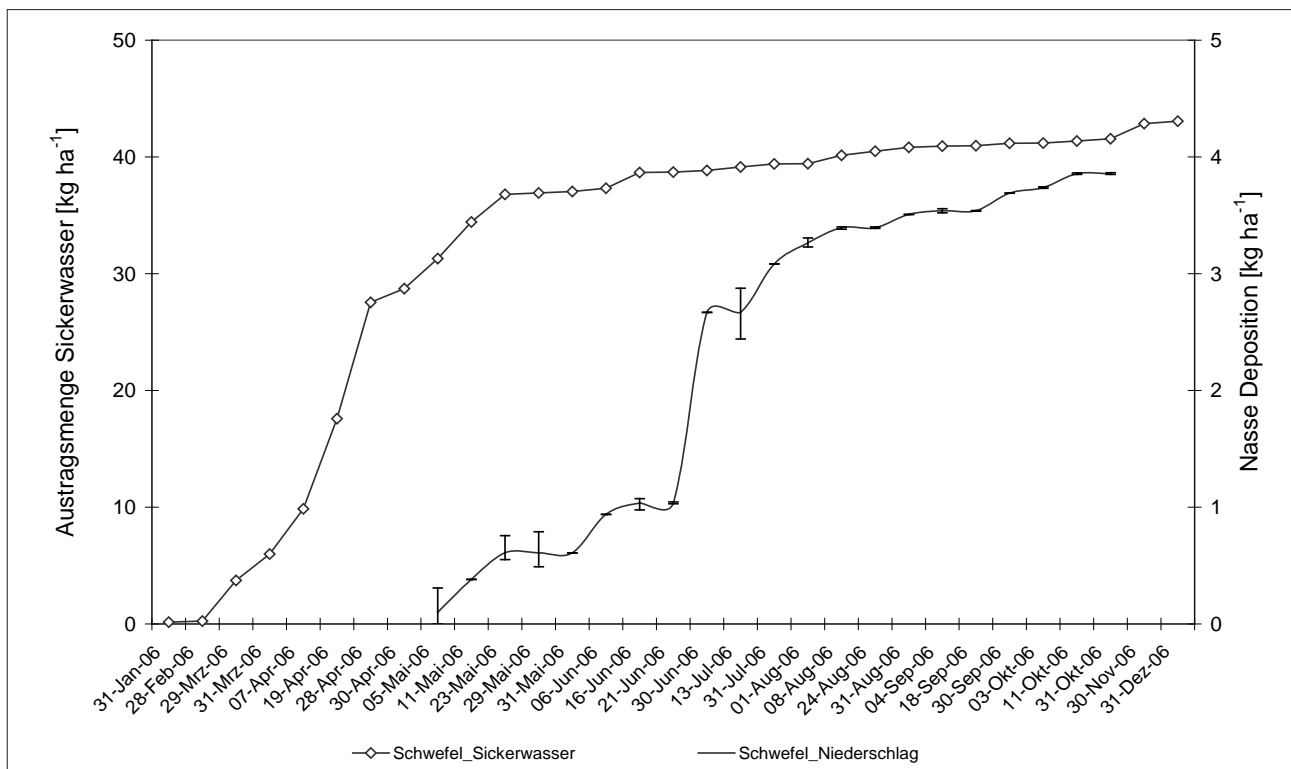


Abbildung 4: Kumulative Austragsmenge und nasse Deposition von Schwefel für das Jahr 2006.

Tabelle 2: Durchschnittsstoffkonzentrationen der Inhaltsstoffe NH_4 , NO_3 , NO_2 , Ca, Mg, SO_4 , K, PO_4 , Cl im Sickerwasser eines ungedüngten Bodens am Standort Stoderzinken.

Jahr	Inhaltsstoff								
	NH_4	NO_3	NO_2	Ca	Mg mg l ⁻¹	SO_4	K	PO_4	Cl
2006	0,01 (± 0,02)	1,12 (± 1,09)	0,06 (± 0,11)	43,54 (± 10,33)	7,13 (± 2,86)	3,30 (± 1,80)	0,14 (± 0,21)	0,01 (± 0,03)	0,13 (± 0,08)
2007	0,03 (± 0,03)	3,43 (± 6,28)	0,01 (± 0,01)	46,52 (± 24,94)	7,39 (± 4,42)	2,29 (± 1,22)	0,18 (± 0,18)	0,00 (± 0,00)	0,18 (± 0,12)

Bei den jährlichen Austragsmengen mit dem Sickerwasser fallen vor allem die absolut hohen Ca- und Mg-Mengen auf (Tabelle 1). Die durchschnittlichen jährlichen Austragsmengen sind mit 1031 und 136 kg ha⁻¹ fast 5-mal so hoch wie das in vergleichbaren Studien in Lysimetern in Gumpenstein der Fall ist (SEEBACHER 2008). Hauptursache dafür ist sicherlich das Ausgangsgestein (Dachsteinkalk). Die Austragsmengen der für die Grundwasserbelastung wichtigen Inhaltsstoffe Nitrat-N und Phosphor sind am ungedüngten Standort Stoderzinken durchschnittlich 6,5 kg und 0,03 kg ha⁻¹ und Jahr (Tabelle 1). Die durchschnittliche Stoffkonzentration im Sickerwasser liegt bei 2,3 mg für Nitrat und bei 2,8 mg l⁻¹ für Sulfat (Tabelle 2). Da die Höhe der Eintragsmengen an diesem Standort ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren ist wie z.B. der kurzen Vegetationsdauer, der ertragsarmen oberirdischen Biomasse und der damit verbundenen geringeren Nährstoffspeicherung in der Biomasse, der hohen Niederschlagsmengen und den damit erzielten hohen Nährstoffeintrag über die Atmosphäre, bedarf es weiterer Untersuchungsperioden um eine gesicherte Aussage diesbezüglich treffen zu können.

Zusammenfassend über 2 Untersuchungsjahre kann gesagt werden, dass es zu sehr hohen Schwankungen sowohl im zeitlichen als auch im mengenmäßigen Anfall von Sickerwasser und daher auch der Grundwasserneubildung kam. Auf Basis der Ergebnisse der extremen Winter 2006 und 2007 mit stark schwankenden Schneemengen und Temperaturverläufen, kann den Prognosen der Klimaforscher, die in den nächsten Jahren schneearme und warme Winter voraussagen, mit einer deutlichen Reduktion der Sickerwassermengen nur beigeplant werden. Das gilt vor allem hinsichtlich zeitlicher Begrenzung der verfügbaren Grundwassermenge sowohl für die Vegetation als auch für den Menschen.

Die Nährstoffkonzentrationen im Niederschlag und im Sickerwasser übersteigen zwar nicht die Grenzwerte der Grundwasserschwellenwertverordnung, hinsichtlich Hintergrundlast d.h. welche Nährstoffmengen werden ohne Beeinflussung durch den Menschen ein und ausgewaschen, sind die Ergebnisse jedoch sehr interessant. Es zeigt sich im Vergleich mit Untersuchungen des Umweltbundesamtes (SCHNEIDER 1998) und einer Studie in Gumpenstein

(SEEBACHER 2008), dass einige Inhaltsstoffe in beträchtlichen Mengen ein aber auch ausgewaschen werden. Wie sich das auf die Zusammensetzung bzw. den Ertrag des Pflanzenbestandes auswirkt wird sich über die nächsten Jahre hinweg zeigen. Durch die Neuinstallation von Niederschlagswaage und Schneekissen sowie durch eine längerfristige Beobachtung von Nährstoffdynamik im Niederschlag und Sickerwasser werden Daten produziert, die hinsichtlich unterschiedlichster Fragestellungen weiterhin bearbeitet werden können.

Danksagung

Die Forschungsstation am Stoderzinken wurde mit Mitteln der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 19A Wasserwirtschaftliche Planung und Siedlungswasserwirtschaft und des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft finanziert. Weiters danken wir der Firma UMS GmbH, München für die Planung, Errichtung und Wartung der Forschungsstation.

Literatur

ARNELL, N.W., 2000: Climate change and global water resources. *Global Environmental Change* 9: 31-49.

BOHNER, A., M. SCHINK und G. EDER, 2007: Eine Gebirgs-Lysimeterstation am Stoderzinken (Österreich, Steirisches Ennstal) in 1830 m Seehöhe - Messeinrichtung und Forschungsziele. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, 173-175.

COST 65, 1995: Hydrogeological aspects of Groundwater Protection in Karstic Areas. Final Report (COST Action 65). European Commission Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN, Brussels.

EBNER, F., W. FRANK, G. MANDL, G. PASCHER, G. PESTAL und W. SCHNABEL, 1997: Geologische Basiskarte von Österreich 1:500000. Geol. Bundesanst., Wien.

FLÜGEL, H.W. und F. NEUBAUER, 1984: Steiermark. Geologie der österreichischen Bundesländer in kurzgefassten Einzeldarstellungen. Geologische Bundesanstalt Wien, 127 S.

SCHNEIDER, J., 1998: Kartierung der nassen Deposition in Österreich, Wien, BE-104 Berichte, Band 104, 24 S.

SEEBACHER, M., 2008: Vergleich der Wasser- und Stoffflüsse eines Gebirgs- und eines Talstandortes anhand von Lysimeterversuchsergebnissen im Grünland. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur, 99 S.

SELIGER, A., 2002: Methoden zur Erfassung des regionalen Wasserhaushaltes im Niedersächsischen Küstengebiet am Beispiel der Insel Langeoog. Diplomarbeit Technische Universität Braunschweig, 106 S.

Vergleichende Lysimeteruntersuchungen zum Wasserhaushalt in Trocken- und Feuchtjahren

Axel Behrendt^{1*}, Gisbert Schalitz¹ und Gerhart Mundel¹

Zusammenfassung

Mit 344 mm Jahresniederschlag war 2003 in Paulinenaue das trockenste Jahr seit dem hier Wetterdaten erfasst werden. Im langjährigen Mittel (1971-2000) fielen hier 514 mm im Jahr. Fallen über 600 mm Jahresniederschlag spricht man in Nordostdeutschland von Feuchtjahren. Im Jahr 2007 gab es mit 947 mm einen Rekordniederschlag für diese Region davon fielen allein von Mai bis Ende Juli 534 mm und damit in drei Monaten mehr als ein ganzer Jahresniederschlag.

Die Auswirkungen solcher Witterungsextreme auf die Evapotranspiration, die Pflanzenbestände und die Versickerung werden dargestellt.

Die Höhe des Grundwasserverbrauchs unterschiedlicher Pflanzenbestände hängt einerseits von der transpirationswirksamen Biomasse je Flächeneinheit und den aktuellen Wasserständen und andererseits von meteorologischen Bedingungen wie dem Sättigungsdefizit der Luft ab.

Im Feuchtjahr 2007 wurde 4mal mehr Grundwasser neugebildet und nur ein Viertel der Wassermenge aus dem Grundwasser verbraucht als im Trockenjahr 2003.

Summary

The driest year in Paulinenaue since weather data were measured here was the year 2003 with only 344 mm precipitation for the entire year. The long-standing average (1971-2000) rainfall here was 514 mm per year.

Years with over 600 mm in annual precipitation were considered wet years in Northeastern Germany.

In the year 2007 an annual record precipitation of 947 mm fell in this region, with 534 mm produced just from May to July, which was greater than the average yearly precipitation.

The effects of this weather extreme on evapotranspiration, plant conditions and groundwater will be presented here.

The level of water consumed from the groundwater by different plants depends on the transpiration active biomass per area, groundwater levels and meteorological conditions such as saturation deficit.

In the wet year 2007 4 times more groundwater was accumulated with only a quarter of it used by plants as in the dry year 2003.

Einleitung

Der Vergleich von extremen Trocken- und Feuchtjahren bringt mitunter Phänomene zum Vorschein die in "Normaljahren" unentdeckt bleiben.

Auf den hydromorphen Böden der Niederungslandschaften steht den Pflanzenbeständen in der Regel ausreichend Wasser in Form von hoch anstehendem Grundwasser zur Verfügung. Die mittleren Grundwasserflurabstände liegen hier zwischen 50 und 70 cm. Einige dieser Standorte weisen jedoch ein eiszeitlich bzw. nacheiszeitlich geprägtes Relief auf, was sich auf die Grundwasserstandshöhen auswirkt. Das Trockenjahr 2003 mit nur 201 mm Niederschlag in der Vegetationsperiode (Apr.-Okt.) hatte in Brandenburg starke Auswirkungen auf den Pflanzenwuchs. Der Ertrag vieler landwirtschaftlicher Kulturen fiel deshalb erheblich geringer aus als in klimatisch normalen Jahren. In manchen Gegenden Brandenburgs wurden nicht einmal 50 % der sonst üblichen Getreideerträge erreicht. Besonders auf grundwasserfernen Standorten waren an den landwirtschaftlichen Kulturen vielerorts Wachstumsdepressionen zu erkennen. Die Ertragseinbußen im Grünland der Niedermoorgebiete

hielten sich dagegen in Grenzen. Schädlicher sind auf diesen tiefgelegenen Standorten zu hohe Niederschläge wie 2007 insbesondere im Sommer, weil dann die Flächen nicht abgeerntet werden können.

Mit Hilfe von Lysimeterergebnissen aus Versuchen mit unterschiedlichen Grundwasserständen und verschiedenen Fruchtarten soll anhand der Erträge und Wasserbilanzgrößen die Besonderheit von extremen Trocken- und Feuchtjahren dargestellt werden.

Material und Methoden

In Grundwasserlysimetern mit 1 m² Oberfläche und einer Tiefe von 1,5 m wurden hydromorphe Böden aus dem nordostdeutschen Tiefland unter gleichen klimatischen Bedingungen und über das Jahr konstanten Grundwasserständen untersucht. Es wurden vergleichende Betrachtungen zu den Wasserbilanzgrößen von extremen Trocken- und Feuchtjahren angestellt.

Weitere Hinweise zur Paulinenaue Grundwasserlysimeteranlage und zur allgemeinen Methodik sind früheren Arbeiten dieser Schriftenreihe zu entnehmen.

¹ Forschungsstation für Landwirtschaft Paulinenaue des Leibnitz Zentrums für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Gutshof 7, D-14641 PAULINENAUE

* Ansprechpartner: abehrendt@zalf.de

Ergebnisse

Wie aus *Abbildung 1* hervorgeht, war das Jahr 2007 mit 948 mm Niederschlag für nordostdeutsche Verhältnisse sehr nass und eignet sich somit gut zum Vergleich mit dem Trockenjahr 2003.

In der *Abbildung 2* sind Erträge, Sickerwasserabflussmengen (Abfluss) und der Wasserverbrauch (Zufluss) aus dem oberflächennahen Grundwasser hydromorpher Böden dargestellt. Es handelt sich hierbei um Mittelwerte von Jahressummen gleichbehandelter Lysimeter mit einer Wiesenschweidel dominierten Gräsermischung, wobei Niedermoorböden und Sandhumusgleye (einem Folgeboden nach Moormineralisation) mit vergleichbaren Beständen zusammengefasst wurden. Die eingestellten Grundwasserstände lagen einheitlich bei 60 cm unter Flur.

Im Vergleich der Extremjahre 2003 und 2007 lässt sich erkennen, dass im Feuchtjahr mit 426 mm mehr als 4mal soviel Grundwasser neugebildet wurde als im Trockenjahr 2003. Der Wasserverbrauch durch die Evapotranspiration aus dem Grundwasser war hingegen im Trockenjahr mit 359 mm annähernd 4mal so hoch als im Feuchtjahr.

Das Sättigungsdefizit der Luft hatte in allen Fällen einen signifikanten Einfluss auf die tägliche Evapotranspiration. Je höher der Grundwasserstand, desto größer war das Bestimmtheitsmaß. Dieses Ergebnis ist logisch, denn je höher der Kapillarsaum des Grundwassers reicht, desto stärker kann es zur Evapotranspiration beitragen. Der Zusammenhang zwischen Sättigungsdefizit der Luft und Evapotranspiration aus dem Grundwasser wird demzufolge mit steigendem Grundwasserstand immer enger.

Ein entscheidender Einflussfaktor der Verdunstungshöhe ist der Pflanzenertrag bzw. die transpirationswirksame Biomasse pro Flächeneinheit. Das zeigte sich deutlich in vielen Paulinenaauer Lysimeterversuchen des 40jährigen Bestehens der Anlage. Ein langjähriger Versuch mit verdunstungsstarken Schilfbeständen, wo gestaffelt in einigen Lysimetern die Halmzahlen reduziert wurden, zeigte eine signifikante lineare Abhängigkeit der Evapotranspiration vom Pflanzenbestand.

In den meisten Berechnungsformeln werden Verdunstungshöhen für Feuchtgebiete mit dichten Schilf- oder Seggenbeständen unterschätzt.

Aus den langjährigen Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich die Evapotranspiration in allen Fällen mit ansteigendem Ertrag erhöhte. Der Verdunstungsanstieg war aber unterschiedlich stark ausgeprägt, wie die unterschiedliche Neigung von berechneten Regressionsgeraden zeigte. Je größer das Sättigungsdefizit der Atmosphäre, desto steiler war im allgemeinen der Anstieg der Regressionsgeraden.

Bei 30 cm Grundwasserstand war der Zusammenhang zwischen Ertrag und Evapotranspiration noch unsicher. Man kann davon ausgehen, dass bei hohem Grundwasserstand der Kapillarsaum bis zur Oberfläche reichte, so dass der Anteil der Evaporation an der Evapotranspiration hoch war und die Pflanzenmasse bzw. die Transpiration entsprechend weniger Einfluss ausübte. Mit zunehmender Grundwassersertiefe wurde die Regression sicherer, weil der Einfluss des Ertrages bzw. der Transpiration größer wurde und die Evaporation mehr in den Hintergrund rückte.

Mit fallenden Grundwasserständen nahm die Verdunstungshöhe allgemein ab. Die Ursache dafür ist in der geringeren

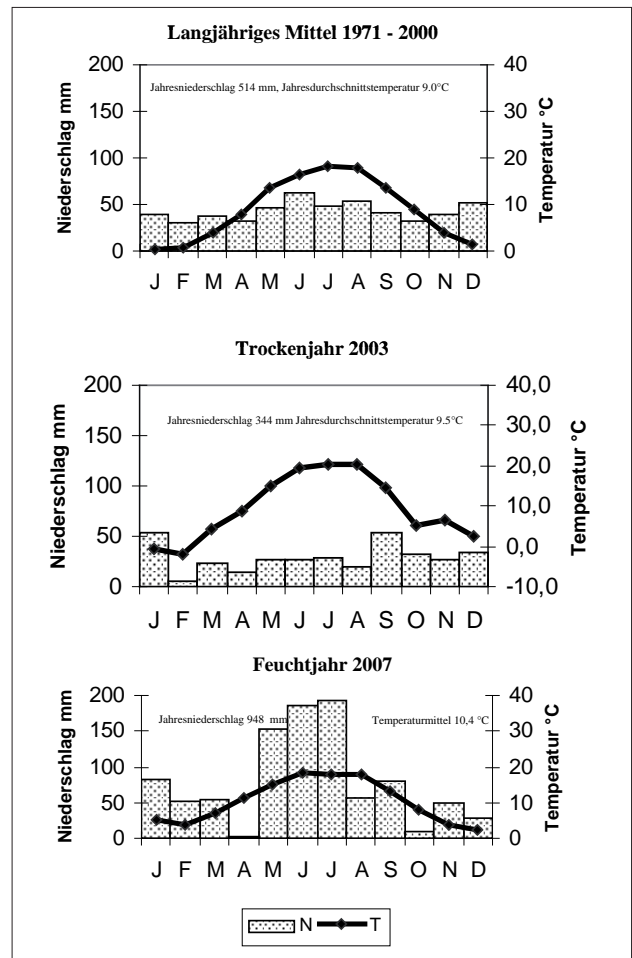


Abbildung 1: Klimadiagramme der Wetterstation Paulinenaue.

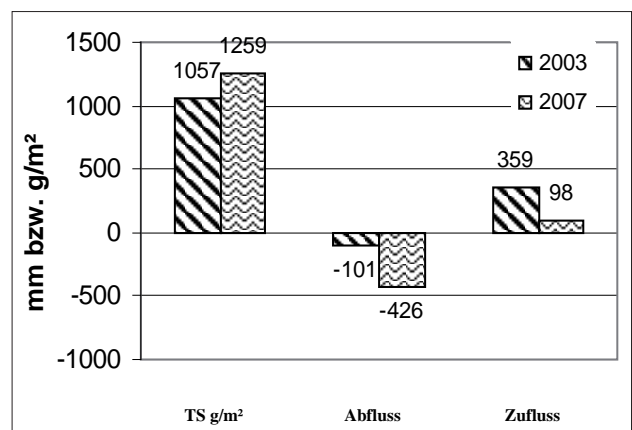


Abbildung 2: Graserträge, Sickerwasserabfluss und Wasserverbrauch (Zufluss) aus dem GW.

Wuchsleistung der Gräser bei reduziertem Wasserangebot zu suchen.

Die Versuchsergebnisse zeigen auch, dass der oft beschriebene Oaseneffekt in Versuchsanlagen insbesondere bei sehr hohen Grundwasserständen und extrem trockener Witterung signifikant von der Ertragshöhe, das heißt von der transpirationsaktiven Biomasse beeinflusst wird. Deshalb müssen Versuchsergebnisse immer kritisch betrachtet und eventuell mit Korrekturfaktoren verrechnet werden, bevor sie auf die Landschaftsebene übertragen werden.

Wasser- und Stoffbilanzen aus den Lysimetern in Wagna

Johann Fank^{1*}

Zusammenfassung

Die wägbaren, monolithischen Präzisions - Unterdrucklysimeter am Versuchsfeld Wagna erlauben die Ableitung der Wasserbilanzgrößen aus den Wiegedaten, sodass allein aufgrund der Lysimetermessungen die Erstellung geschlossener Wasserbilanzen möglich ist.

In Kombination mit der hydrochemischen Analyse der Sickerwässer auf die Hauptinhaltsstoffe ist es möglich, die Nährstofffrachten in Richtung Grundwasser für beliebige Zeiträume zu bilanzieren. Dabei sind aber jedenfalls die Wasser- und Stoffverweilzeit im Lysimeter zu berücksichtigen.

Schlagwörter: Lysimeter, Wasserbilanz, Stoffbilanz, Nährstoffaustrag

Summary

Using measured data from the weighable monolithic equilibrium suction field lysimeters at test site Wagna closed water balances are established. Evaluating changing mass of the lysimeter, precipitation, evapotranspiration, and stored water volume are determined directly, amount of seepage water is measured separately.

Analyzing the nutrient content of the seepage water the nutrient load may be calculated by multiplying flow rates with solute concentration. Water and solute residence time in the lysimeter has to be taken into account.

Keywords: lysimeter, water balance, mass balance, nutrient leaching

Einleitung

Im Sommer 2004 waren am Versuchsfeld in Wagna (Steiermark, Österreich) zwei wägbare, monolithische Präzisions - Unterdrucklysimeter (FANK und UNOLD 2007) in zwei unterschiedlich bewirtschaftete Versuchsflächen eingebaut worden, um die Auswirkung organisch-biologischer ackerbaulicher Bewirtschaftung und einer konventionellen Fruchtfolge mit standörtlich angepasstem Düngungsniveau auf die Grundwassersituation untersuchen zu können (KÖSTENBAUER 2008). In KÖSTENBAUER (2008) sind auch die Fruchtfolglieder der beiden Vergleichsvarianten dargestellt.

Erste Auswertungen der Wasser- und Stoffbilanzgrößen der Jahre 2005 bis 2008 werden in diesem Poster vorgestellt.

Wasserbilanz

Zur Berechnung der Wasserbilanzgrößen in *Tabelle 1* wurden der Bestandsniederschlag aus den ansteigenden Teilen

und die aktuelle Evapotranspiration aus den fallenden Teilen der Lysimeter-Gewichtsganglinie (FANK 2006) auf Basis von Minutenaufzeichnungen berechnet und zu Jahreswerten aufsummiert. Daraus resultieren auch unterschiedliche Niederschlagsjahressummen für die beiden Lysimeter (*Tabelle 1*). Die Sickerwassermenge wurde an den Lysimetern als 10-Minutensumme erfasst und zu Jahreswerten aufaddiert. Die potentielle Verdunstung wurde als FAO-PM-Gras-Referenzverdunstung nach ALLEN et al. (2006) aus 10-minütigen Wetterdaten der angeschlossenen Wetterstation berechnet und zu Jahressummen aufaddiert. Der Vergleich der berechneten Gras-Referenzverdunstung nach Penman-Monteith mit der gemessenen Gras-Verdunstung an einem Präzisionslysimeter zeigte, dass v.a. an Tagen mit inhomogenen Wetterdaten (Einfluss von Gewittern etc.) die Berechnung aus kurzintervalligen Wetterdaten eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messwerten ergab, als die Verwendung von Tageswerten (FANK 2008 a).

Tabelle 1: Jahressummen der Wasserbilanzglieder für die beiden Präzisionslysimeter am Standort Wagna für die Jahre 2005 bis 2008 im Vergleich. Die Gras-Referenzverdunstung wurde auf Basis von 10' – Wetterdaten nach ALLEN et al. (2006) berechnet.

	2005		2006		2007		2008	
ET ₀ [mm] (ALLEN et al., 2006)	682		681		741		695	
	konventionell	organisch-biologisch	konventionell	organisch-biologisch	konventionell	organisch-biologisch	konventionell	organisch-biologisch
Niederschlag [mm]	943	959	907	866	925	973	974	928
Evapotranspiration [mm]	628	586	606	686	586	651	710	751
Sickerwasser [mm]	318	374	320	235	296	217	192	151
Speicheränderung [mm]	-3	-1	-19	-55	43	104	71	25

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

* Ansprechpartner: johann.fank@joanneum.at

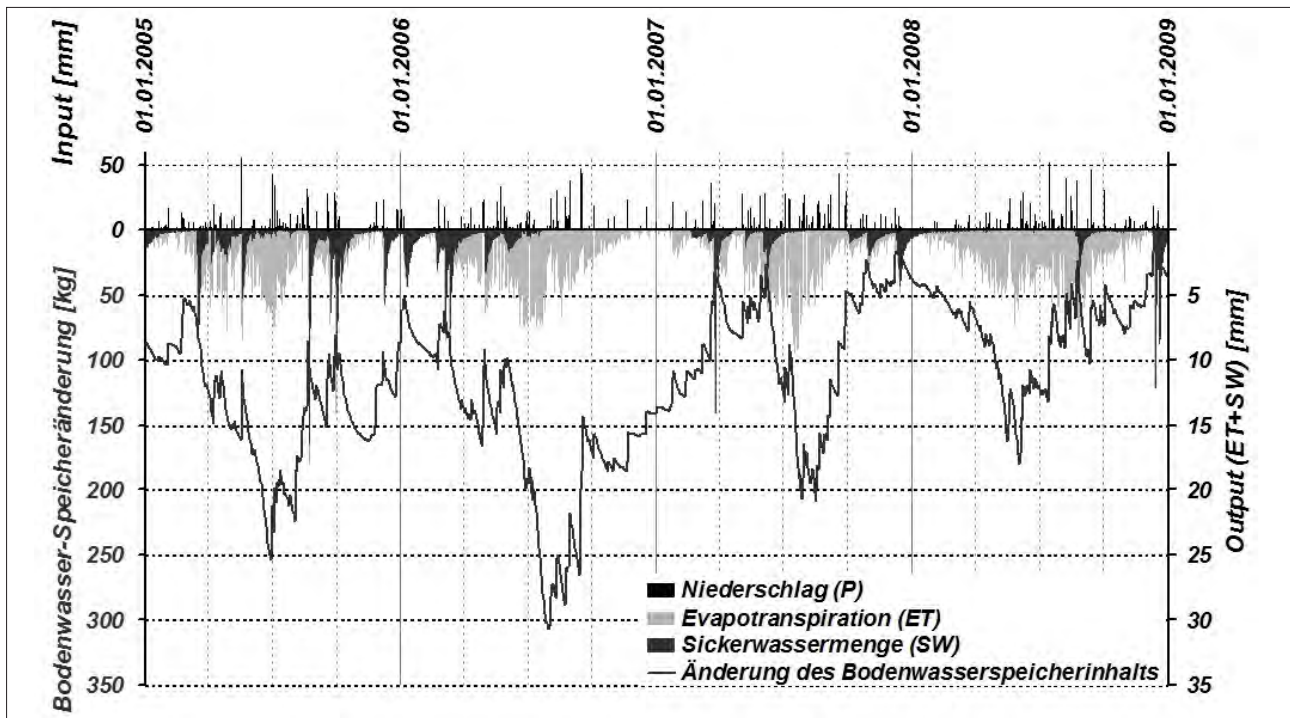


Abbildung 1: Tageswerte der Wasserbilanzglieder am organisch – biologisch bewirtschafteten Lysimeter des Versuchsfeldes Wagna.

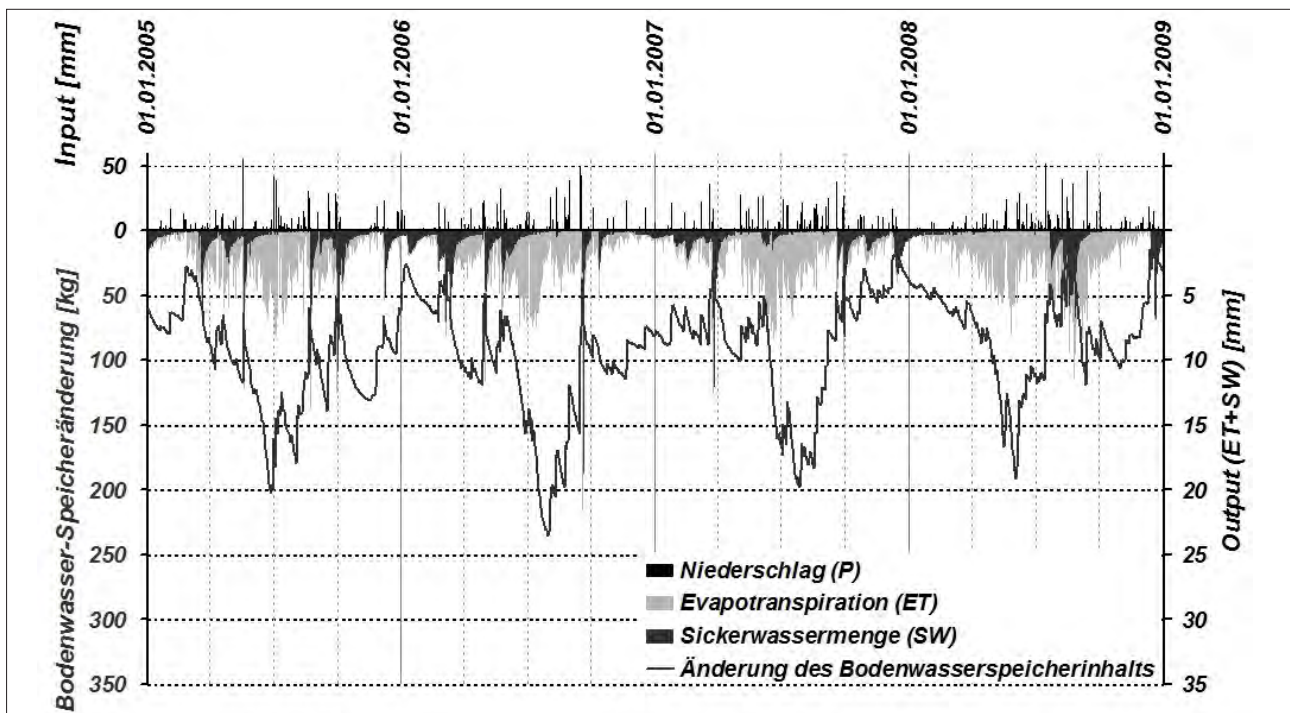


Abbildung 2: Tageswerte der Wasserbilanzglieder am konventionell bewirtschafteten Lysimeter des Versuchsfeldes Wagna.

Der Vergleich der Tageswerte der einzelnen Wasserbilanzglieder für das organisch-biologisch bewirtschaftete Lysimeter des Versuchsfeldes Wagna ist in *Abbildung 1*, für das konventionell bewirtschaftete in *Abbildung 2* dargestellt. Deutlich erkennbar ist aus den beiden Darstellungen, dass die Evapotranspiration in den Sommermonaten das we-

sentlichste Exportglied darstellt. Die Sickerwasserbildung ist naturgemäß an Niederschlagsereignisse gekoppelt, tritt aber nur dann auf, wenn der Bodenwassergehalt ausreichend hoch ist. Dabei ist auch die unterschiedliche Kulturführung auf den beiden Lysimetern zu berücksichtigen (KÖSTENBAUER 2008).

Tabelle 2: Nährstoffauswaschung und mittlere Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser der beiden Lysimeter am Versuchsfeld Wagna.

Parameter	Einheit	01.04.2006 - 05.11.2008	
		Konventionelle Bewirtschaftung	Organisch - biologische Bewirtschaftung
Sickerwassermenge	mm	631	357
Mittelwert el. Leitfähigkeit	$\mu\text{S cm}^{-1}$	302	366
Mittelwert pH-Wert	-	7.14	7.44
Auswaschung			
Natrium	kg ha^{-1}	46.76	17.65
Kalium	kg ha^{-1}	4.97	1.66
Magnesium	kg ha^{-1}	26.87	14.45
Kalzium	kg ha^{-1}	318.30	229.39
Chlorid	kg ha^{-1}	52.78	5.41
Nitrat	kg ha^{-1}	243.03	77.21
Sulfat	kg ha^{-1}	206.42	114.73
Mittlere Konzentrationen			
Natrium	mg l^{-1}	7.54	5.31
Kalium	mg l^{-1}	0.81	0.52
Magnesium	mg l^{-1}	4.16	4.23
Kalzium	mg l^{-1}	48.35	67.00
Chlorid	mg l^{-1}	8.54	1.72
Nitrat	mg l^{-1}	40.18	22.42
Sulfat	mg l^{-1}	33.00	31.07

Deutlich erkennbar sind auch die unterschiedlichen Bodenwasserspeichervermögen in den beiden Lysimetern: während im organisch-biologischen Lysimeter mit einer Feinbodenmächtigkeit von etwa 110 cm die maximale Bodenwasserausschöpfung im Sommer 2006 mit etwa 300 mm erreicht wurde, stehen am konventionell bewirtschafteten Lysimeter (Feinbodenmächtigkeit ~70 cm) nur etwa 230 mm an Bodenwasser für den Pflanzenaufwuchs zur Verfügung.

Stoffbilanz

Zur Erstellung der Stoffbilanz der Lysimeter wurde das anfallende Sickerwasser üblicherweise in wöchentlichem Rhythmus hydrochemisch analysiert und die wesentlichsten Nährstoffe bestimmt. Durch Multiplikation der gemessenen Konzentrationen mit den im Probenahmeintervall anfallenden Sickerwassermengen wurden die Nährstoff-Austragsfrachten in Richtung Grundwasser bestimmt. Ein Vergleich der berechneten Stickstoffausträge von Oktober 2005 bis Mai 2006 mit den Ergebnissen von Markierungsversuchen (FANK 2008 b) belegt, dass die anfänglich extrem hohe Auswaschung eine Folge des Einbaus der Lysimeter und der dabei erforderlichen Bodenbearbeitung (Pflug) im August mit daran gekoppelter Mineralisierung von Nitratstickstoff im Boden ist. Für die Bewertung der Nährstoffausträge aus den unterschiedlich bewirtschafteten Lysimetern wird daher der Zeitraum ab April 2006 herangezogen.

Aus den Darstellungen der Ergebnisse in *Tabelle 2* wird klar, dass im bisherigen Beobachtungszeitraum, der in etwa die ersten drei Jahre einer vierschlägigen Fruchtfolge umfasst, sowohl die konventionelle, als auch die organisch-biologische Bewirtschaftung grundwasserverträglich sind: die mittlere Konzentration des kritischen Parameters Nitrat im Sickerwasser liegt in beiden Fällen deutlich unter dem Grundwasserschwellenwert von 45 mg l^{-1} . Aufgrund der

unterschiedlichen Fruchtfolge liegt im dargestellten Zeitraum (01.04.2006 bis 05.11.2008) die Sickerwassermenge am organisch-biologischen Lysimeter deutlich unter derjenigen des konventionell bewirtschafteten. Betrachtet man diesbezüglich die Jahre 2005 bis 2007 (*Tabelle 1*) so sind die Unterschiede wesentlich geringer (827 zu 934 mm). Diese Daten belegen andererseits auch deutlich, dass diese ersten Auswertungen auf einer jedenfalls noch zu kurzen Beobachtungsdauer basieren. Zuverlässige Auswertungen hinsichtlich eines Vergleiches der Bewirtschaftungsformen sind erst nach vollständiger Untersuchung der vierschlägigen Fruchtfolge und einer Nachlaufzeit von 2 Jahren ab etwa 2010 zu erwarten.

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 ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81, 1-22, Elsevier.
- 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., 2008 a: Comparison of calculated ET_0 to measured Lysimeter grass ET . *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-12046, 2008 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-12046 EGU General Assembly 2008.
- FANK, J., 2008 b: Die Auswirkung der Anwendung der „sachgerechten Düngung“ am Versuchsfeld Wagna auf die Sicker- und Grundwasserqualität. *Bericht zum Umweltökologischen Symposium am 04. und 05. 03. 2008 in Raumberg - Gumpenstein*, 29-34.
- FANK, J. and G. v. UNOLD, 2007: High-precision weighable field Lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters. *International Water & Irrigation*, Vol. 27, No. 3, 28-32, Tel Aviv.

KÖSTENBAUER, H., 2008: Grundwasserverträgliche ackerbauliche Bewirtschaftungsformen über seichtliegenden gering mächtigen Grundwasserleitern/5.3. Der organisch-biologische Ackerbau und dessen versuchstechnische Umsetzung im Vergleich zur konventionellen ackerbaulichen Bewirtschaftung am Versuchsfeld Wagna.– 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.

Das landwirtschaftliche Versuchsfeld Wagna und seine hydrometeorologischen Messeinrichtungen

Johann Fank^{1*}

Zusammenfassung

Die landwirtschaftliche Versuchfläche (4,2 ha) Wagna (Steiermark, Österreich) besteht aus 32 Feldern mit einer Ausdehnung von je 1000 m². Im Zentrum wurden zwei Felder mit je einem wägbaren Präzisionslysimeter und einem bodenhydrologischen Messprofil ausgestattet. Ein „Gras“-Referenz-Lysimeter befindet sich an der Grenze des Versuchsgeländes von Wagna. Wetterdaten werden an der teilautomatischen Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, die auch auf dem Versuchsfeld platziert ist, sowie an zwei weiteren Messplätzen im Versuchsgelände erfasst. Im Jahre 2007 wurden in Ergänzung zu den beiden existierenden Grundwasserpegeln zwei neu entwickelte Probenahmestellen unter den beiden Lysimeter-Versuchspartellen installiert. Hier wird die Grundwasserspiegellage gemessen und Wasserproben aus dem tieferen Teil der ungesättigten Zone, dem Kapillarsaum und dem Grundwasserspiegelschwankungsbereich gewonnen.

Schlagwörter: Lysimeter, Messtechnik, Hydrologie, Meteorologie

Summary

The agricultural test site (4.2 ha) in Wagna (Styria, Austria) consists of 32 test fields with an area of 1000 m² each. In the centre of the test site two of the test fields in 2004 have been equipped with weighable monolithic equilibrium suction field lysimeters and an accompanied soil hydrologic measuring profile. An additional grass reference lysimeter has been installed in 2006 at the southeast border of the test site. Weather data are acquired at a weather station of the “Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik” which is situated at the test site as well. Two further weather stations are situated close to the lysimeters. In 2007 at the lysimeter test fields two depth oriented sampling sites have been installed in addition to the existing groundwater wells. The depth oriented sampling sites allow the sampling of soil water in the saturated – unsaturated interface region.

Keywords: lysimeter, measurement, hydrology, meteorology

Einleitung

Im Jahr 1987 wurde in der Gemeinde Wagna (Steiermark, Österreich) ein Großparzellenversuch angelegt um unter ortsüblichen Bewirtschaftungsbedingungen die Auswirkung unterschiedlicher Kulturführungen und Düngeneiveaus auf die Ertragssituation untersuchen zu können (FASTL und ROBIER 2008). Hinsichtlich der Bodenartenverteilung und auch der Gründigkeit ist das Versuchsfeld repräsentativ für große Teile der quartären Schotterterrassen des Murtales. Der Grundwasserspiegel des seichtliegenden gering mächtigen Aquifers liegt im Mittel in einer Tiefe von etwa 4 m und weist eine Spiegelschwankung von ca. 1,5 m auf. Der Grundwasserstauer in Form von sehr schlecht bis undurchlässigen Sedimenten des Neogen liegt in einer Tiefe von etwa 8 m.

Im Jahre 2004 wurde die Bewirtschaftung des Versuchsfeldes vollständig umgestellt. Ziel der derzeitigen Versuchsanlage ist es, einen Vergleich der Auswirkungen von ackerbaulichen Maßnahmen einer konventionellen Bewirtschaftung unter Befolgung der Maßnahmen des Gewässerschutzprogramms mit jenen der organisch biologischen Bewirtschaftung auf das Grundwasser unter dem Aspekt einer ökonomischen Verträglichkeit versuchstechnisch zu ermöglichen.

Messeinrichtungen zur Erfassung von Wasserkreislaufparametern und zur Probengewinnung am Versuchsfeld Wagna

In *Abbildung 1* ist das Versuchsfeld Wagna mit den 32 je etwa 1000 m² großen Versuchspartellen und die Lage der Messeinrichtungen zur Erfassung von Wasserkreislaufparametern und zur Grundwasser-Probennahme dargestellt. Die eingeblendeten Bilder a) bis f) zeigen Details der monolithischen Feldlysimeter sowie ein Detailbild (*Abbildung 1 g*) des Standardlysimeters HYDROLYS (UNOLD und FANK 2007) und der Erweiterung zur Erfassung der meteorologischen Messgrößen zur Berechnung der Gras-Referenzverdunstung (ALLEN et al. 1998).

Lysimeter zur Erfassung von Wasserkreislaufparametern

Zur Erfassung von Parametern der Wasserbilanzgleichung $P - ET - D - \Delta S = 0$ (P = Niederschlag, ET = Evapotranspiration, D = Grundwasserneubildung, ΔS = Änderung des im Boden gespeicherten Wasservolumens) werden schon seit langem Lysimeter eingesetzt. Üblicherweise dienen sie zur Ermittlung der Sickerwassermenge, sind sie wägbare kann

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

* johann.fank@joanneum.at

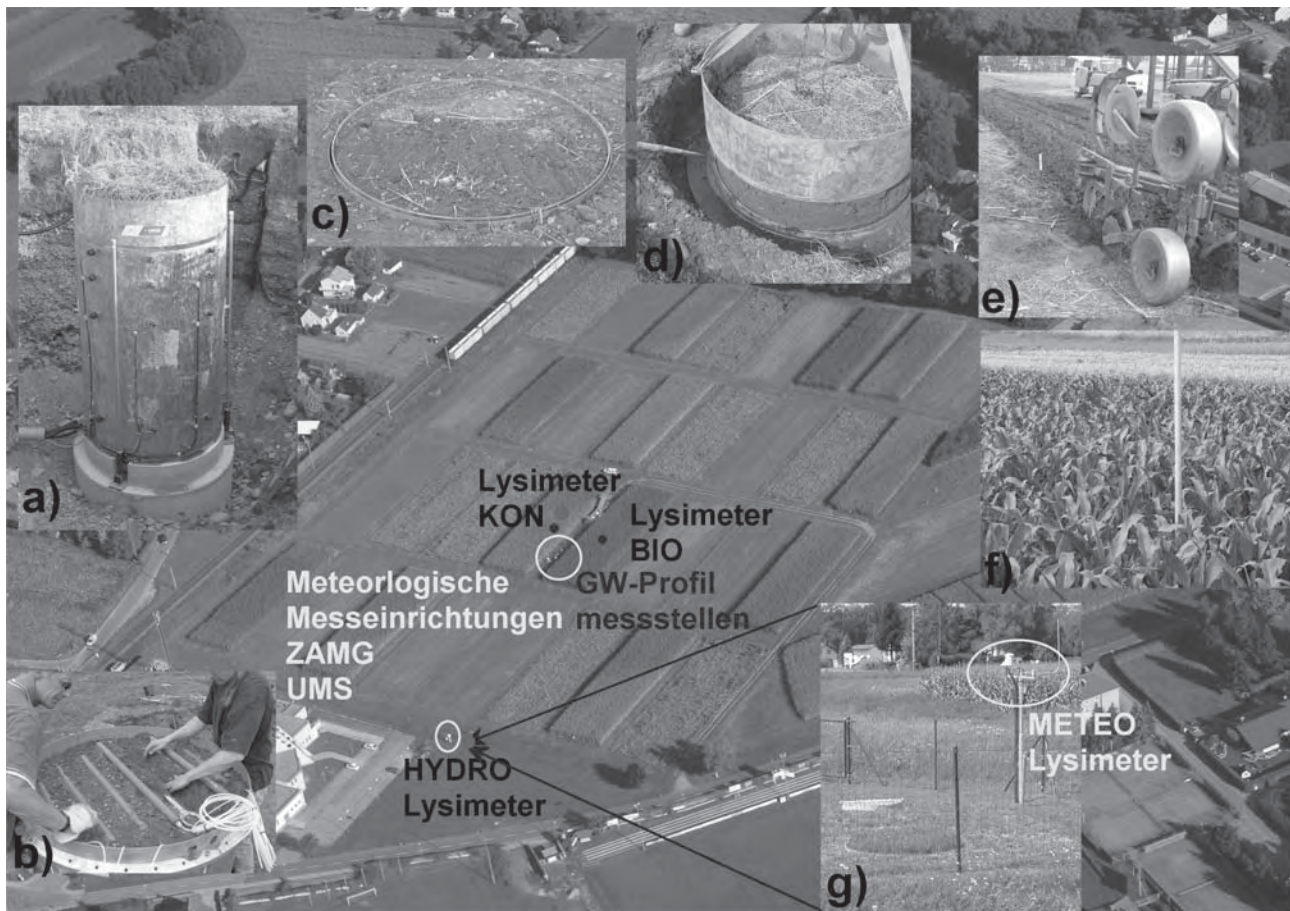


Abbildung 1: Hydro-meteorologische und bodenphysikalische Messeinrichtungen sowie Probenahmesysteme am landwirtschaftlichen Versuchsfeld in Wagna (FANK und UNOLD 2007 – verändert).

auch die Verdunstung und die Änderung des gespeicherten Bodenwassers gemessen werden.

Am Versuchsfeld Wagna wurden monolithisch gestochene wägbare Lysimeter in das Versuchsfeld direkt eingebaut um Oaseneffekte möglichst zu vermeiden (Abbildung 1 f). Um Messfehler aufgrund unterschiedlicher Bodenbearbeitungsart zu minimieren wurden die Lysimeter mit einem abnehmbaren Bewirtschaftungsring ausgestattet (Abbildung 1 d) wodurch die Bearbeitung mit ortsüblichen Geräten auf gewohnte Weise durchgeführt werden kann (Abbildung 1 e). Aufgrund des nur etwa 0,5 cm breiten Ringspalts (Abbildung 1 c) zwischen dem Lysimeterkörper und dem äußeren Lysimeterzylinder können atmosphärische Einflüsse auf die Bodentemperatur weitgehend vermieden werden. Üblicherweise verwendete Filterkörper an der Unterseite des Lysimeters verfälschen den natürlichen Wasserfluss in der ungesättigten Zone. Zur Vermeidung dieser Unsicherheiten wurde die Lysimeterunterseite in Form eines Saugkerzenrechs (Abbildung 1 b) ausgebildet. An diese Saugkerzen wird der in einem ungestörten Bodenprofil gemessene Druck in seinem zeitlich variablen Verlauf als Saugspannung angelegt.

Die beiden im Versuchsfeld angelegten Lysimeter weisen bei einer Oberfläche von 1 m² eine Tiefe von 2 m auf. Die Unterkante des Lysimeters liegt damit bei den am Versuchsfeld Wagna herrschenden Verhältnissen deutlich

unterhalb der hydraulischen Wasserscheide. Dadurch ist gewährleistet, dass an dieser nur noch vertikale Flüsse in Richtung Grundwasser auftreten. Das HYDRO-Lysimeter im Grünlandbereich am Rande des Versuchsfeldes (Abbildung 1 g) weist nur eine Tiefe von 1 m auf. Um die hier möglicherweise auch vertikal nach oben gerichteten Flüsse abbilden zu können wird die Steuerung des angelegten Unterdruckes mittels einer bidirektionalen Vakuumpumpe durchgeführt, die bei höheren Saugspannungen im Lysimeter (im Vergleich zum Freiland) auch Wasser in das Lysimeter zurück fördern kann.

Die beiden Lysimeter auf den unterschiedlich ackerbaulich bewirtschafteten Versuchsflächen sind in Abstimmung mit den unterschiedlichen Bodenhorizonten mit zusätzlichen Sensoren zur Erfassung der Bodentemperatur, des Bodenwassergehaltes (TDR-Sonden) und des Matrixpotentials (Tensiometer und SIS-Sensoren) ausgestattet. Die gleichen Parameter werden in denselben Tiefen auch in einem bodenhydrologischen Messprofil im durch die Errichtung der Anlage ungestörten Bodenprofil erfasst (Abbildung 1 a).

Meteorologische Messeinrichtungen

Seit November 2003 betreibt die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) am Versuchsfeld Wagna eine teilautomatische Wetterstation. Zur Erfassung des Niederschlags ist neben der Niederschlagswippe der

ZAMG eine Niederschlagswaage des Hydrografischen Dienstes des Landes Steiermark, eine bodeneben eingerichtete Niederschlagswippe von JOANNEUM RESEARCH und ein Totalisator von Umweltanalytische Messsysteme GmbH (UMS) zur manuellen Kontrolle der automatisch registrierten Niederschlagsdaten sowie zur Niederschlagsbeprobung eingerichtet. In der Fahrgasse zwischen den beiden Lysimeterparzellen des Versuchsfeldes Wagna ist eine Wetterstation von UMS eingerichtet, an der die Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in 2 m über Gelände und die Windgeschwindigkeit in 2 und 4 m über Gelände erfasst wird. Am METEO-Lysimeter werden die Parameter zur Berechnung der Gras-Referenzverdunstung nach Penman-Monteith – Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit - in einer Messhöhe von 2 m gemessen.

Probenahmesysteme zum Grundwassermonitoring

Am Versuchsfeld wurden bereits 1991 zwei Bohrungen niedergebracht und als 4" Grundwasserpegel ausgebaut. Der Pegel im Eingangsbereich ist seit 2007 auch im Monitoringnetz der österreichischen Grundwasserzustandsüberwachung (GZÜ) integriert. Aus der monatlichen Beprobung des Grundwassers und der hydrochemischen Analyse liegt eine inzwischen 15-jährige Reihe der Nitratbelastung des Grundwassers vor.

Die Auswertung von Modellberechnungen der Nitratverteilung im Grundwasser auf Basis einer sequentiellen Kopplung von Wasserfluss- und Stickstofftransportberechnung der ungesättigten Zone mit dem 2D Grundwassermodell zeigte Unterschiede zu den Grundwasser-Messwerten. Um die dafür möglichen Ursachen – notwendige Verbesserungen in der Modellkopplung oder detaillierte Messungen an der Schnittstelle ungesättigte und gesättigte Zone - experimentell abklären zu können, wurden im Oktober 2007 zwei Grundwasser – Profilmessstellen (*Abbildung 1*) errichtet. Durch diese Vorrichtung können im Bereich zwischen 2 m unter Gelände und dem Grundwasserstauer in Abständen von 11.5 cm Wasserproben zur hydrochemischen Analytik entnommen werden. Durch Anlegen eines Unterdrucks an die Saugkerzen können tiefenorientierte Proben aus den tieferen Bereichen der ungesättigten Zone, aus dem Grundwasserkapillarsaum, dem Grundwasserspiegel-Schwankungsbereich und dem dauernd wassergesättigten Bereich entnommen werden (WALTHER et al. 2009). Durch das am unteren Ende des Saugkerzenbaumes installierte Tensiome-

ter wird der darüber lagernde Wasserdruck registriert und dadurch die Grundwasserspiegellage und deren zeitliche Variabilität mit hoher Genauigkeit (0.1 cm) registriert. Dadurch ist gewährleistet, dass das Probenahmesystem in Abhängigkeit von der Änderung der Grundwasserspiegellage in der Zeit für eine etwaige Ereignisbeprobung in Betrieb genommen werden kann.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Bereich der Lysimetertechnik wurde durch die Arbeiten am Versuchsfeld Wagna ein international anerkannter Standard zur Untersuchung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern geschaffen. Diese neue Lysimetertechnologie liefert bei der Präzision von Laboruntersuchungen Grundlagen für die Regionalisierung von Wasserbilanzparametern und stellt damit ein Bindeglied zwischen der Labor- und der Feldskala dar (FANK 2008). Aufgrund seiner modularen Konzeption (UNOLD und FANK 2007) sind die entwickelten Lysimeter und die Einrichtung zur tiefengestaffelten Grundwasser-Probennahme kostengünstig für eine Vielzahl von Fragestellungen einsetzbar.

Literatur

- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES and M. Smith, 1998: Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 300 S.
- 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 G. von UNOLD, 2007: High-precision weighable field Lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters. International Water & Irrigation, Vol. 27, No. 3, 28-32, Tel Aviv.
- FASTL, G. und J. ROBIER, 2008: Grundwasserverträgliche ackerbauliche Bewirtschaftungsformen über seichtliegenden gering mächtigen Grundwasserleitern/5.2. Der Großparzellenversuch Wagna und dessen Bewirtschaftung (1987 bis 2003). – 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.
- VON UNOLD, G. and J. FANK, 2008: Modular Design of Field Lysimeters for Specific Application Needs. Water Air Soil Pollut: Focus (2008) 8:233-242.
- WALTHER, M., J. FANK, Th. REIMAN und R. LIEDL, 2009: Messsystem zur Beprobung und Überwachung des gesamten Bereich der ungesättigten und gesättigten Zone einschließlich des Kapillarsaums. 13. Gumpensteiner Lysimetertagung 21.-22. April, Irnding, in diesem Heft.

Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt in Sachsen - Modellierung und Lysimeterbeobachtungen

Beate Klöcking^{1*}, Ulrike Haferkorn² und Arndt Bräunig³

Zusammenfassung

Auf der Grundlage des Klimaszenarios WEREX IV (ECAM5, A1B, 1961-2100) wurden mit dem Modell ArcEGMO-PSCN nach der Validierung an Lysimetermessungen für repräsentative Böden im Freistaat Sachsen Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt durchgeführt. Ziel des Projektes ist die standortbezogene Analyse der Folgen des Klimawandels in verschiedenen Klimaregionen Sachsens für verschiedene Bodenformen und Landnutzungsarten.

Schlagwörter: öko-hydrologische Modellierung, Phänologie, Verdunstung, Sickerwasserraten

Summary

Based on the climate scenario WEREX IV (ECAM5, A1B, 1961-2100) calculations on soil water budget have been done using the model ArcEGMO-PSCN after validation at lysimeter data for representative soils in Saxony. The project aims to analyse site-specifically the impact of climate change on various climatic areas in Saxony with respect to different kinds of soil and land use.

Keywords: eco-hydrological modelling, phenology, evaporation, rates of seepage water

Einleitung/Methodik

Der Bodenwasserhaushalt nimmt eine Schlüsselstellung für viele Fragen der Landnutzung und des Bodenschutzes ein. Auf der Grundlage repräsentativer Boden- und Klimadaten für den Freistaat Sachsen erfolgten deshalb Szenariosimulationen mit dem Ziel, die Auswirkungen eines potenziellen Klimawandels auf den Wasserhaushalt repräsentativer Böden Sachsens besser abschätzen zu können.

Entsprechend der klimatischen Bedingungen in Sachsen wurden acht Klimastationen ausgewählt, denen jeweils sechs, für diese klimatischen Regionen typische, Leitbodenformen (SLULG 2007) zugeordnet wurden. Als Klimaszenarien wurden die mit der Regionalisierungsmethodik WEREX IV auf der Grundlage des globalen Klimamodells ECHAM5 und dem SRES-IPCC-Emissionsszenario A1b für diese Standorte simulierten Normalreihen (nor) genutzt (CEC 2008). Diese Regionalisierungsmethodik verbindet ein objektives Wetterlagenkonzept mit Zeitreihensimulationen und nutzt langjährigen meteorologischen Messdaten an den Beobachtungsstationen des DWD. Für den Kontrolllauf wurde die Periode 1961-2000 genutzt. Dieser dient zur Kalibrierung und Validierung der Regionalisierungsmethodik an das Ist-Klima und erbrachte für die Mehrzahl der Attribute gute Ergebnisse.

Bezüglich der Landnutzung erfolgte eine Beschränkung auf die standardisierten Hauptnutzungsarten Ackerbau (konventionell), Grünland, Laubwald und Nadelwald ohne Berücksichtigung langfristiger Bewirtschaftungsmaßnahmen, jedoch bei Modellierung der Phänologie in Abhängigkeit

von der Witterung. Durch diese Kombination ergeben sich insgesamt 192 Standortvarianten. Außerdem wurden gebietsmorphologische Eigenschaften wie z.B. mittlere Hangneigungen und typische Grundwasserflurabstände in den acht Landschaftsregionen berücksichtigt, da sie neben den vorab genannten Einflussgrößen stark den Bodenwasserhaushalt beeinflussen (Oberflächenabfluss, Interflow und Kapillaraufstieg).

Eine gute Möglichkeit der Qualitätssicherung der modellgestützten Analysen der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Bodenwasserhaushalt stellt eine Überprüfung der Simulationsergebnisse anhand langjähriger Beobachtungsergebnisse dar. Deshalb wurde eine Modellvalidierung an den Messdaten der Lysimeterstation Brandis (HAFERKORN 2000) zum Bodenwasserhaushalt und der Vegetationsdynamik durchgeführt. Ziel war hierbei vor allem, die Tauglichkeit des genutzten Modells ArcEGMO-PSCN auf der Basis allgemeiner Frucht- und Bodenartspezifischer Parameter für Szenariountersuchungen am Standort nachzuweisen.

Klimatische Bedingungen am Standort Brandis

Die Lysimeterstation Brandis und die Herkunftsflächen der Lysimeterböden liegen in der nördlichen gemäßigten Zone in der Übergangszone zwischen maritimem und kontinentalem Klima in der mitteldeutschen Trockenregion des Norddeutschen Tieflandes (Jahresmitteltemperatur 9.3°C; Jahresniederschlag 660 mm/a). Entsprechend WEREX IV A1b (nor) nehmen im langjährigen Mittel die Niederschläge

¹ Büro für Angewandte Hydrologie, Murnauer Straße 102a, D-81379 MÜNCHEN

² Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Kleinsteinberger Straße 13, D-04821 BRANDIS

³ Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, PF 540137, D-01311 DRESDEN

* Ansprechpartner: kloeking@bah-muenchen.de

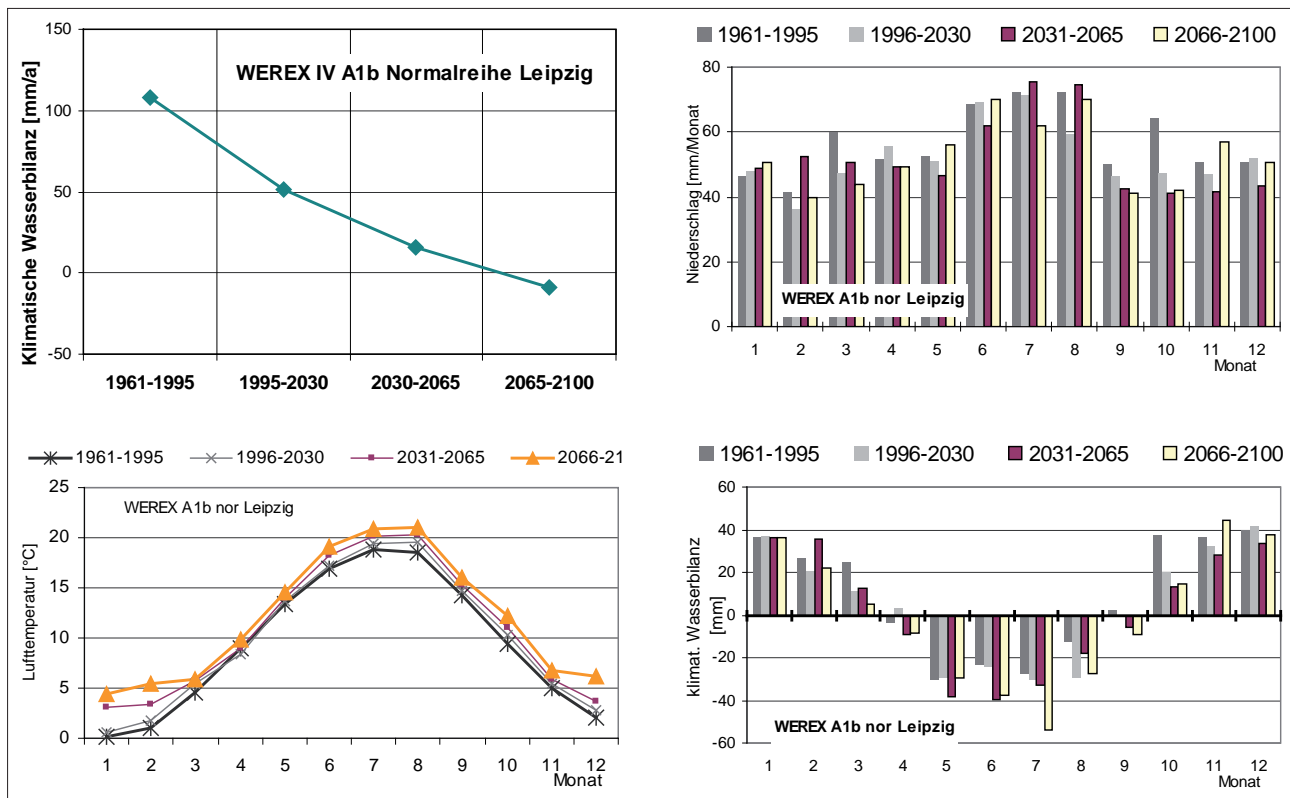


Abbildung 1: Prognostizierte Klimaentwicklung für Leipzig nach WEREX IV A1b (nor), langjähriger Trend und innerjährliche Veränderungen

im Leipziger Raum um 8 % bei gleichzeitigem Anstieg des Verdunstungspotenzials um 11 % ab. Das führt zu einer drastischen Verschlechterung der klimatischen Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration, wie *Abbildung 1* verdeutlicht. Von April bis September werden die monatlichen klimatischen Wasserbilanzen wie schon bisher im Mittel immer unter Null liegen, aber noch mit deutlich höheren negativen Bilanzwerten.

Das Simulationsmodell ArcEGMO-PSCN

Die Untersuchungen wurden mit dem ökohydrologischen Modell ArcEGMO-PSCN durchgeführt. Dieses primär für die kontinuierliche Simulation der Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsprozesse sowie des Kohlenstoff/Stickstoffhaushalts im Einzugsgebietsmaßstab entwickelte Modell entstand durch die Kopplung des GIS-basierten hydrologischen Modells ArcEGMO (PFÜTZNER 2002, BECKER et al. 2002) mit komplexen Wachstumsmodellen für land- und forstwirtschaftliche Flächen und einem detaillierten Bodenmodell. Die Simulation der Vegetationsdynamik erfolgte in diesem Projekt auf Basis eines Wärmesummenansatzes zur Simulation der phänologischen Entwicklung.

Durch die GIS-Kopplung werden Flächen mit bestimmten Eigenschaften ausgewiesen und flächengenau die einzelnen hydrologischen Teilprozesse simuliert. Dadurch ist es problemlos möglich, dieses Modell auch für Standortsimulationen einzusetzen (s. KLÖCKING et al. 2008).

Modellvalidierung an Lysimetermessungen

Schwerpunkt der Modellvalidierung war neben der Überprüfung der simulierten Sickerwasser- und Verdunstungsdynamik der Test des Vegetationsmodells. Bis auf wenige Ausnahmen stimmen die simulierten Vegetationsperioden gut mit den beobachteten überein. Die Bewertung der simulierten Pflanzenentwicklung erfolgte u.a. indirekt über den Vergleich von simulierter und gemessener Evapotranspiration, da diese neben den meteorologischen Bedingungen und dem Bodenwasservorrat entscheidend vom Vegetationsstatus (Bedeckungsgrad, Wurzeltiefe, Phänophase) bestimmt wird. Auch hier konnte ein befriedigendes Ergebnis erreicht werden.

Von den insgesamt acht Lysimetergruppen der Lysimeteranlage Brandis wurden drei für die Modellvalidierung ausgewählt: LG5 (Erodierte Braunerde BB); LG7 (Braunerde-Pseudogley BB-SS) und LG9 (Parabraunerde aus Löss LL). Es zeigte sich, dass die deutlich unterschiedlichen Verdunstungsleistungen und Sickerwasserverhältnisse der drei Böden gut durch das Modell abgebildet werden. Die absoluten Abweichungen zwischen Simulation und Beobachtung betragen weniger als 20 mm/a im Durchschnitt, was bei der Verdunstung einer prozentualen Abweichung < 10 % entspricht (*Tabelle 1*).

Szenariosimulationen für Leitbodenformen im Leipziger Raum

In die Untersuchungen wurden typische Böden der Region wie eine Pseudogley-Parabraunerde (SS-LL), ein Pseu-

Tabelle 1: Bodentypen in den untersuchten Lysimetergruppen mit nutzbarer Feldkapazität nFK bis 2m Tiefe, mittlere jährliche Sickerwasserspenden SWR in 3 m Tiefe und Verdunstungswerte AET [mm] 1993-2006, MW - Messwert, sim - Simulation

Bodentyp	nFK [mm]	Niederschlag -SWR	AET _{MW}	AET _{sim}	Δ AET [%]	SWR _{MW}	SWR _{sim}
BB	125	455	477	459	-3.8	196	193
BB-SS	270	515	554	535	-3.4	133	119
LL	352	559	610	559	-8.3	72	98

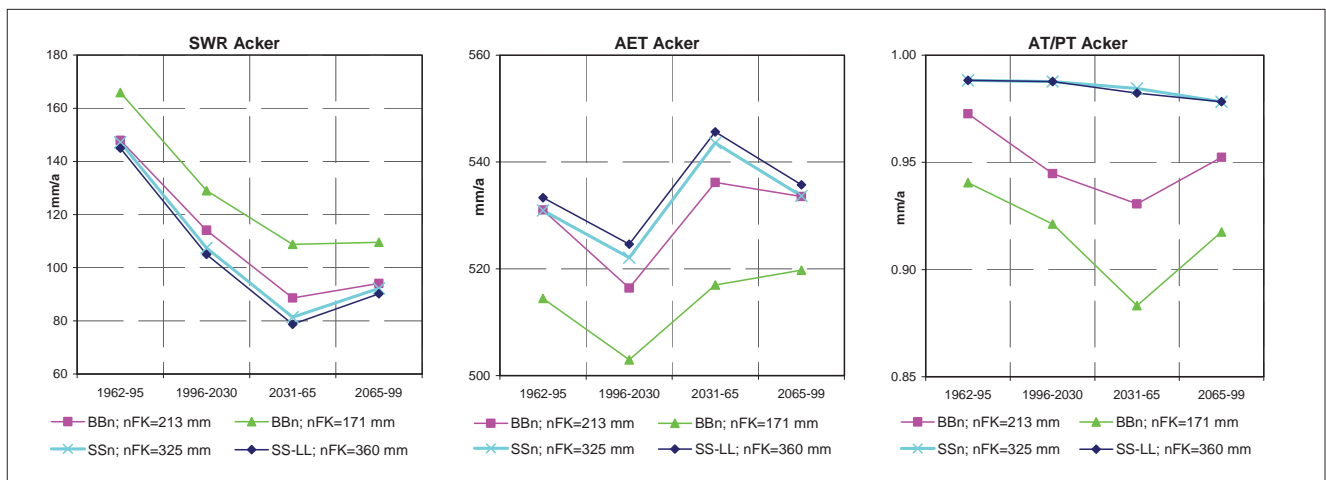


Abbildung 2: Veränderung der Sickerwasserspende, Verdunstung und des Transpirationsdefizits zwischen 1961 und 2100 (WEREX IV A1b nor) im 35 jährigen Mittel unter Ackernutzung

dogley (SSn), zwei Braunerden (BBn) unterschiedlicher Speicherkapazität nFK sowie zwei Auenböden einbezogen. Die Parametrisierung erfolgte bei Berücksichtigung ihrer Nutzung nach SLULG (2007). Entsprechend ihrer unterschiedlichen Eigenschaften wurden für den Referenzzeitraum 1961-1995 Sickerwasserspenden in 2 m Tiefe im Bereich 145 (SS-LL) - 166 (BBn) mm/a und eine mittlere Verdunstung von 514 (BBn) - 533 (SS-LL) mm/a auf grundwasserfernen Standorten simuliert. Die Spannweite ist damit nicht ganz so extrem wie für die beim Modelltest an der Großlysimeteranlage Brandis genutzten Böden.

In *Abbildung 2* sind die für vier nicht grundwasserbeeinflussten Leitbodenformen unter Ackernutzung simulierten Veränderung der Sickerwasserspende, der Verdunstung und des Transpirationsdefizits als Verhältnis zwischen realisierter und potenzieller Transpiration im 35-jährigen Mittel unter den Bedingungen des Klimaszenarios WEREX IV A1b (Normalreihe 1961 bis 2100) dargestellt. Entsprechend der Szenarioprognosen führt die kontinuierliche Erwärmung bei gleichzeitiger Abnahme der Niederschläge in dieser, heute schon trockenen, Region zu deutlichen Rückgängen bei der Sickerwasserspende aller untersuchten Böden. Trockenstressbedingte Ertragsverluste bei landwirtschaftlicher Nutzung sind auf Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität (z.B. Braunerden) zu erwarten. Die Abflussspenden dieser Böden werden sich jedoch in geringerem Umfang verändern als in den Böden mit hoher Wasserspeicherkapazität. Es kommt aber zu einer Verschiebung der Aufteilung der Abflusskomponenten zu Lasten der Grundwasserneubildung. Damit besteht hier weiterhin ein hohes Risikopotenzial durch die schnellen Abflusskomponenten nach Starkregenereignissen.

Auf den Pseudogleyen ist auch unter den Bedingungen des A1b-nor-Szenarios auf den meisten Standorten die Versorgung der Feldfrüchte mit Bodenwasser nur mit geringen Einschränkungen gewährleistet. Wesentlich kritischer stellt sich die Situation unter forstlicher Nutzung dar. Hier geht einerseits die Sickerwassernachlieferung drastisch zurück, und außerdem steigt die Wahrscheinlichkeit von Dürreschäden.

Auf den grundwasserbeeinflussten Standorten ist zwar weitestgehend die Versorgung der Pflanzen mit Wasser gesichert. Das ist aber nur durch die Zehreigenschaft dieser Flächen gewährleistet. Somit ist mit einer drastischen Verschlechterung des Gebietswasserhaushaltes zu rechnen.

Große Veränderungen sind entsprechend des WEREX A1b-Szenarios erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu erwarten. Da jedoch heute schon die Jahresmitteltemperaturen stärker steigen als es durch das IPCC-Szenario A1b 2000 prognostiziert wurde, sollte auch bei der mittelfristigen Maßnahmenplanung die prognostizierte Entwicklung bis 2100 berücksichtigt werden.

Literatur

- BECKER, A., B. KLÖCKING, W. LAHMER and B. PFÜTZNER, 2002: The Hydrological Modelling System ArcEGMO. In: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology (Eds.: Singh, V.P. and Frevert, D.K.). Water Resources Publications, Littleton/Colorado, 321-384. ISBN 1-887201-34.
- CLIMATE & ENVIRONMENT CONSULTING (CEC), 2008: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für den Freistaat Sachsen und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31

- 2010 bis 2100 für die Szenarios B1, A1B und A2 (WEREX IV). Abschlussbericht an das SLULG, Dresden.
- HAFERKORN, U., 2000: Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes - Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Diss., Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen, 184 S.
- KLÖCKING, B., F. SUCKOW, S. KNOBLAUCH and B. BEUDERT, 2008: Using plot measurement data for the validation of an eco-hydrological river basin model. In: Fank, J., Lanthaler, Ch. (Hrsg.):
- Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring - Modellierung – Management. - Beiträge zur Hydrogeologie, Band 56, Graz (in press).
- PFÜTZNER, B. (ed.), 2002: Description of ArcEGMO. Official homepage of the modelling system ArcEGMO, <http://www.arcegmo.de>, ISBN 3-00-011190-5.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (SLULG), 2007: Bodenatlas des Freistaates Sachsen im Übersichtsmaßstab 1: 200.000, Teil 4: Auswertungskarten zum Bodenschutz, DVD.

Langjährige Ergebnisse über das pflanzenspezifische Aneignungsvermögen von Bodenwasser landwirtschaftlicher Kulturen auf einem tiefgründigen Braunerde-Tschernosem aus Löß

Steffi Knoblauch^{1*}

Zusammenfassung

Die geprüften Ackerkulturen beginnen weitgehend unabhängig von ihrer Art Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe nach Erreichen von Bestandesschluss bzw. während des Übergangs zur Produktbildungsphase (Knospenbildung, Beginn Schossen) zu erschließen. Im weiteren Tiefenverlauf und der Intensität zeigen sich allerdings beträchtliche Unterschiede. Winterraps, Zuckerrübe und Winterweizen nehmen Bodenwasser bis in 2 m Tiefe auf, wobei Zuckerrübe eher eine intensive Ausschöpfung des Oberbodens und Winterraps einen stärkeren Tiefenentzug entwickelt. Silomais, Sommergerste und Ackerbohne nehmen eine Mittelstellung in Bezug auf den Tiefenentzug ein. Unter der Bedingung knappen Wasserdargebotes gilt es, das Bodenwasser tiefgründiger Lehmböden durch eine günstige Stellung in der Fruchtfolge optimal zu nutzen. Brachebegrünungen mit tiefwurzelnden Arten wie Phacelia sind ebenso wie unkontrolliert aufwachsender Unkrautbestand zu vermeiden, um das Bodenwasser für nachfolgende Kulturpflanzen zu schonen.

Summary

This paper describes the extraction patterns of available water by several field crops. The crops begin to extract water below 0.5 m during full covering independent of the species. In contrast there are great differences in the maximal depth and intensity of water extraction. Sugar beet, winter rape and winter wheat exhaust the available soil water to 2 m. Sugar beet takes up the water more intensively in the upper 1.2 m; instead winter rape withdraws the water deeper. Corn, summer barley and field beans take up water to 1.3 – 1.7 m with different intensity. In conclusion a change of crops in the crop rotation with differences in the depth and intensity of water extraction is necessary for an optimized management of soil water. Uncontrolled growth with weeds should to be avoided ensuring soil water for the following field crop.

Einleitung

Pflanzen unterscheiden sich in ihrem Aneignungsvermögen von Bodenwasser. Das betrifft den Verlauf der Tiefenausschöpfung, die Intensität der Bodenwasserausschöpfung und den Bodenwassergehalt im Wurzelraum, ab dem die Pflanze beginnt, die Transpiration einzuschränken. Neben der Wassernutzungseffizienz, die darüber Auskunft gibt, wie viel kg Trockenmasse je kg transpirierte Wassermenge produziert werden, geben diese Parameter Auskunft über das Potenzial der Pflanze, das Bodenwasser auszunutzen.

Prognosen des Klimawandels sagen für die Ackerbauregionen Ostdeutschlands in den kommenden Jahrzehnten eine Zunahme der Temperatur und eine ungünstigere Verteilung des Niederschlages mit einer Abnahme im Sommer und Herbst voraus. Der Faktor Wasser wird nicht nur für die landwirtschaftliche Produktion zu einem knappen Gut, sondern auch für andere Nutzer, wie Wasserwirtschaft und Industrie, vor allem aber auch für angrenzende Ökosysteme. Die sich daraus entwickelnden Interessenkonflikte sind abwägend zu lösen. Dafür bedarf es nicht nur detaillierter Kenntnisse über den Wasserbedarf und die Wassernutzungseffizienz landwirtschaftlicher Kulturen sondern auch über ihr Aneignungsvermögen von Bodenwasser. Im folgenden Beitrag werden dazu

Ergebnisse über den zeitlichen Verlauf und die Intensität der Bodenwasserausschöpfung ausgewählter Ackerkulturen aus langjährigen Messungen an der Lysimeteranlage Butteltstedt (Feldlysimeter, angrenzender Feldschlag) vorgestellt.

Material und Methoden

Der Versuchsboden ist ein tiefgründiger Braunerde-Tschernosem aus Löß aus dem Thüringer Keuperbecken. Mit Grobporengehalten von > 7 Vol.% bis in 1,4 m Tiefe, mittleren Bodendichten und einem Nadelstichporengefüge bestehen günstige Bedingungen für die Durchwurzelung. Bedingt durch den für Lössböden überdurchschnittlich hohen Tongehalt liegt der nutzbare Bodenwassergehalt des schluffig-lehmigen Substrates mit 9,3 bis 15,5 Vol.% (FK bei pF 2,0) nur auf mittlerem Niveau. Aufgrund der nahezu uneingeschränkten Durchwurzelbarkeit stehen den tiefer wurzelnden Kulturen bei einer effektiven Durchwurzelungstiefe von 1,6 m trotzdem bis zu 220 mm nutzbares Bodenwasser zur Verfügung.

Der Versuchsstandort liegt klimatisch im mitteldeutschen Trockengebiet mit einer vieljährigen Jahresniederschlags-summe von 552 mm und einer vieljährigen Jahresdurchschnittstemperatur von 8,2 °C.

¹ Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Naumburger Str. 98, D-07743 JENA

* Ansprechpartner: s.knoblauch@lysimeter.tll.de

Tabelle 1: Ausgewählte bodenphysikalische Kennwerte des Braunerde-Tschernosem aus Löß im Thüringer Becken.

Horizont	Tiefe cm	Körnungsart	Tongehalt %	Bodendichte g/cm ³	Groporen- volumen Vol. %	Bodenwassergehalt bei		
						pF 4,2 Vol. %	pF 2,5 Vol. %	pF 2,0 Vol. %
Ap	...25	Lu	26,6	1,33	20,5	17,5	29,2	33,0
Ah	...43	Lu		1,46	13,1	21,3	31,9	34,9
Ah-Bv	...65	Lu	29,4	1,49	9,8	27,0	34,2	36,3
Ckc ₁	...85	Lu	20,3	1,53	12,7	19,9	29,4	34,1
Ckc ₂	...150	Lu	19,2	1,63	6,9	21,1	32,1	34,7
Ckc ₃	...195	Lu	22,2	1,60	5,7	22,2	34,0	37,2

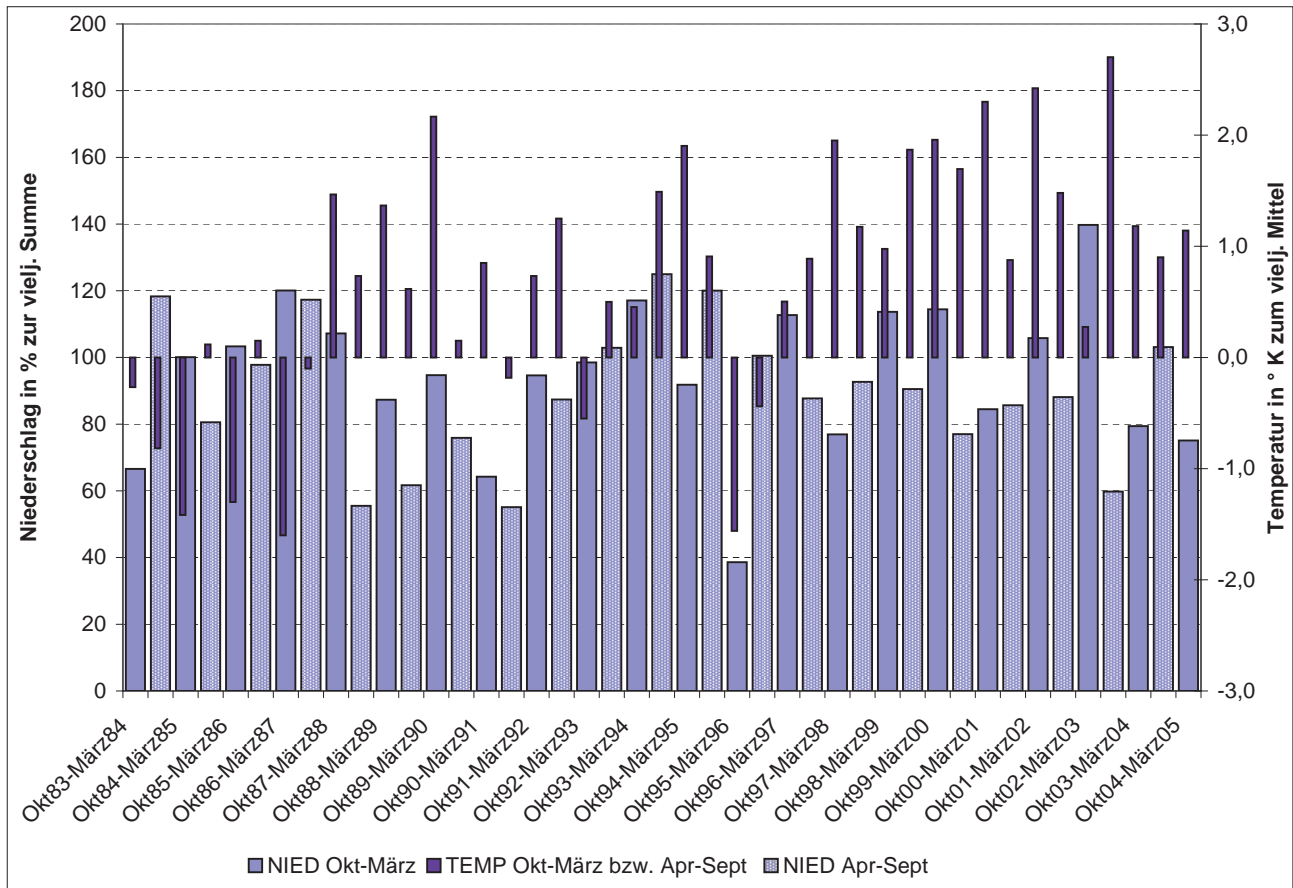


Abbildung 1: Niederschlag und Temperatur im Verlauf des Untersuchungszeitraumes 1983 bis 2004.

Die Witterung im Untersuchungszeitraum zeichnet sich in den Jahren 1984 bis 87 durch zu niedrige Temperaturen und normale Niederschläge aus (Abbildung 1). Darauf folgt in den Jahren 1988 bis 1992 eine zu warme und ausgesprochen trockene Witterung. Diese Periode wird abgelöst durch eine zu warme und überdurchschnittlich feuchte Witterung in den Jahren 1993 bis 1995. Im darauffolgenden Jahr 1996 ist es deutlich zu kühl und zu trocken. Daran schließt sich bis 2004 eine überdurchschnittlich warme Periode mit fast durchgängig zu trockenen Sommerhalbjahren und wechselnd zu trockenen (4 a) und zu feuchten (5 a) Winterhalbjahren. Die Feldlysimeter der Versuchsanlage Buttstedt weisen eine Oberfläche von 2 m² und eine Tiefe von 2,5 m auf, sind monolithisch befüllt und kontinuierlich wägbare mit einer Genauigkeit von 0,05 mm (ROTH et al. 1994). Das Sickerwasser wird zur Vermeidung von unnatürlich hohem

kapillarem Aufstieg in 2,3 m Tiefe mit Hilfe von keramischen Saugkerzen unter Einwirkung von Unterdruck gewonnen. Die Bodenfeuchtemessung erfolgt mit Hilfe einer Am/Be-Neutronen-sonde in 20 cm-Tiefenabstufungen bis in 200 cm Tiefe in vierzehntägigem bis wöchentlichem Rhythmus während der Vegetationszeit. Der geringste Wert der Bodenfeuchte, der in Jahren mit starker Inanspruchnahme des Bodenwassers gemessen wird liegt in etwa im Bereich des Bodenwassergehaltes bei pF 4,2 und der höchste Wert, der nach Abfluss größerer Sickerwassermengen ermittelt wird im Bereich von pF 2,5 (Abbildung 3). Eine Überprüfung der mit der Neutronen-sonde für den Boden des Lysimeters ermittelten Bodenfeuchteänderung mit der im gleichen Zeitraum mit Hilfe der Lysimeterwägung ermittelten Gewichtsänderung ergab eine tolerierbare Abweichung von nur 0,2 mm/d.

Die Bodenfeuchteausschöpfung der Ackerkulturen wurde auf den Feldlysimetern und dem umgebenden Feldschlag, auf dem die Lysimeter gewonnen worden sind, gemessen.

Auf den Feldlysimetern wurden ebenso wie auf dem umgebenden Feldschlag von 1990 bis 1993 die Ackerkulturen Welsches Weidelgras, Kartoffel, Winterweizen und Silomais angebaut und 1994 Brachebewuchs mit Unkraut bzw. Phacelia etabliert. Darauf folgen auf den Feldlysimetern bis 2004 Feldgemüseulturen, ausgenommen 1998 mit Winterraps. Auf dem umgebenden Feldschlag wird bis 2004 Ackernutzung fortgesetzt mit der Anbaufolge Ackerbohne, Winterweizen, Sommergerste, Winterraps, Winterweizen, Sommergerste, Winterweizen, Winterraps, Winterweizen, Sommerweizen und Sommergerste.

Ergebnisse

Erträge

Die Erträge von Welschem Weidelgras und Kartoffel in den trockenen Jahren 1990 und 1991 liegen im mittleren Bereich und erreichen nur 70 und 76 % der mit Zusatzwasser versorgten Lysimeter. Bei Winterweizen im trockenen Jahr 1992 fällt der Ertragsabfall im Vergleich zur berechneten Variante mit 93 % nur gering aus. Im niederschlags- und temperaturnormalen Jahr 1993 erzielt Silomais einen ebenso hohen Ertrag wie unter Berechnung. Die auf dem umgebenden Feldschlag in den Jahren 1995 bis 2004 ermittelten Erträge von Ackerbohne, Silomais, Zuckerrübe, Eliteweizen, Sommergerste und Winterraps sind als mittel bis hoch einzustufen. Eine Abhängigkeit vom Ertragsfaktor Wasser ist hier nicht geprüft worden.

Verlauf der Tiefe der Bodenfeuchteausschöpfung

Winterraps beginnt während des Entwicklungsstadiums Ende Knospe/ Anfang Blüte Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe zu erschließen (Abbildung 2). In den Jahren 1995 und 1998 mit einem frühen Vegetationsbeginn wird dieser Zeitpunkt bereits Mitte bis Ende April erreicht, im Jahr 2003 nach einem temperaturnormalen Winter mit einem zu kühlen Februar (-2,2 K) erst Anfang Mai. Darauf folgt eine ausgesprochen rasche Inanspruchnahme des Bodenwassers bis in 200 cm Tiefe, insbesondere in den Jahren 1998 und 2003 mit z.T. sehr trockener Witterung in der Vegetationszeit. Im Jahr 1995 geht dieser Prozess deutlich langsamer vonstatten,

vermutlich aufgrund ausreichender Wasserversorgung über Niederschläge während der gesamten Wachstumszeit.

Winterweizen beginnt Anfang bis Mitte Mai während der Entwicklungsphase Beginn Schossen, kurz nach Bestandesschluss Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe aufzunehmen. In den Jahren 1992 und 1999 mit trockener Witterung im April und Mai setzt daraufhin eine rasche Tiefenausschöpfung ein, die in den Jahren 1996 und 2004 mit ergiebigen Niederschlägen im Mai länger andauert aber unter der daraufhin folgenden trockenen Witterung im Juni auch 1996, wie 1992, 1999 und 2001 bis in 200 cm Tiefe reicht. Unter den durchgängig feuchten Bedingungen im Jahr 2004 bestand dieses Erfordernis offenbar nicht.

Zuckerrübe nimmt nach einer langsamen Jugendentwicklung ab Mitte bis Ende Juni, kurz vor Bestandesschluss in den Jahren 1992 und 1994 Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe in Anspruch. Daraufhin folgt, ebenso wie bei Winterraps, eine rasche Erschließung des Unterbodenwassers bis in 200 cm Tiefe, trotz ergiebiger Niederschläge in den Monaten Juli und August in beiden Jahren und im Monat September im Jahr 1994. In beiden Jahren war allerdings der Juni sehr trocken und hat diesen raschen Tiefgang möglicherweise initiiert. Natürlich aufwachsender Unkrautbewuchs im Jahr 1994 mit den Hauptbestandbildnern Windenknöterich, Klettenlabkraut, Schwarzer Nachtschatten und Weißer Gänsefuß entzieht Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe ab Anfang bis Mitte Juni, deutlich vor Bestandesschluss, der erst Mitte Juli erreicht wird. Eine gezielte Begrünung mit Phacelia mit Aussaat Ende April ist dazu bereits Ende Mai kurz vor Bestandesschluss in der Lage. Phacelia vermag daraufhin das Bodenwasser bis in 200 cm Tiefe ähnlich wie Zuckerrübe sehr rasch zu erschließen trotz niederschlagsreicher Bedingungen von Juli bis September, aber sehr trockener Witterung während der Jugendperiode im Juni. Unkrautbewuchs erreicht eine Entzugstiefe von 170 cm.

Sommergerste beginnt Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe ab Mitte bis Ende Mai, kurz nach Bestandesschluss und Entfaltung des Fahnenblattes aufzunehmen und setzt den Bodenwasserentzug bis in 170 cm Tiefe fort.

Silomais erschließt das Bodenwasser unter 50 cm Tiefe im Jahr 1995 ab Mitte Juni während des 9-Blatt-Stadiums und setzt die Bodenwasserausschöpfung unter wechselnd feuchten (Mai bis Juli) und trockenen (August) Bedingungen bis Anfang September bis in 130 cm Tiefe fort.

Ackerbohne nimmt das Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe ab Mitte Mai, kurz vor Bestandesschluss auf und erreicht bis

Tabelle 2: Erträge (Hauptprodukt) der Ackerkulturen in dt/ha Trockenmasse in der Fruchtfolge 1990 bis 2004 und zusätzlich auf einem weiteren benachbarten Feldschlag 1992 und 1995.

1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
	Kart	WiWei	Silomais	Unkr/ Phac	Aboh	WiWei	SoGe	WiRa
135/ 192 ¹	47/ 62 ¹	67/ 72 ¹	199/ 189 ¹	35/ 58 ¹	42	59	58	38
1999	2000	2001	2002	2003	2004	benachbar.	1992	1995
WiWei	SoGe	WiWei	SoWei	WiRa	WiWei	Feldschlag	ZuRü	Silomais
75	64	76	76	42	81		157	208

¹ Erträge der Feldlysimeter unberechnet/ berechnet 1990 bis 1993, Bewuchs mit Unkraut/ Phacelia 1994; Kart...Kartoffel, WiWei...Winterweizen (Elitesorten), Aboh...Ackerbohne, SoGe...Sommergerste, WiRa...Winterraps, SoWei...Sommerweizen, ZR...Zuckerrübe

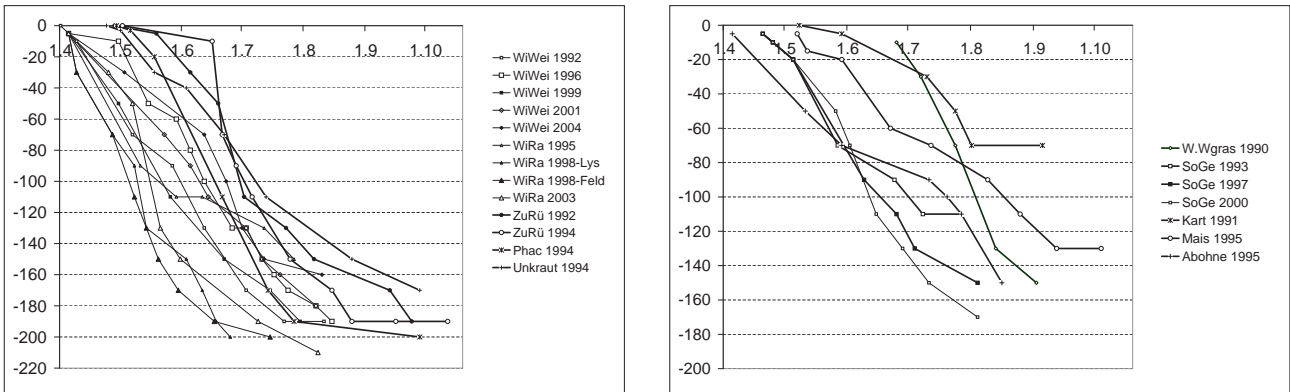


Abbildung 2: Verlauf der Tiefe der Bodenwasserausschöpfung durch Ackerkulturen in cm während der Vegetationszeit vom 1. April bis 30. Oktober.

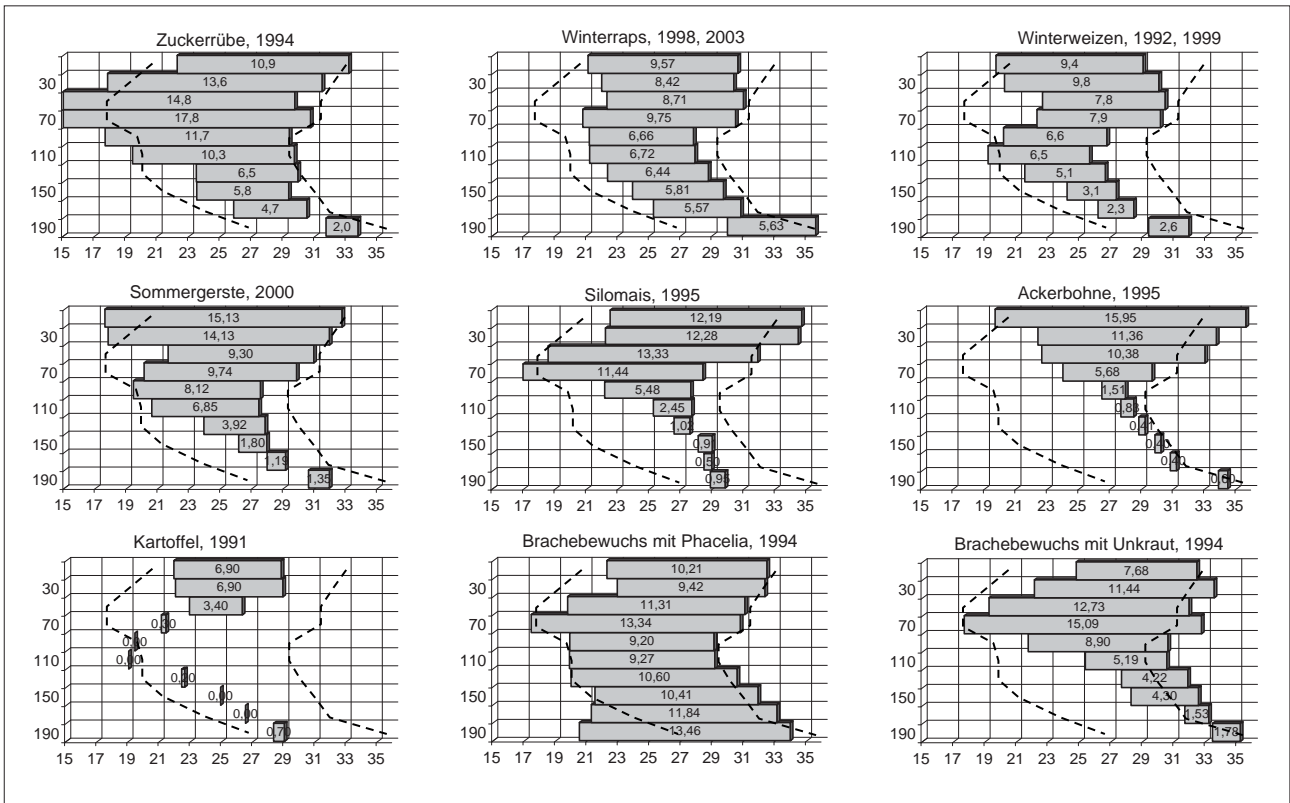


Abbildung 3: Intensität der Bodenwasserausschöpfung in den einzelnen Bodenschichten (0...20, 20...200 cm Tiefe) in Vol.%, unterbrochene Linien PWP und FK, abgeleitet aus langjährigen Bodenfeuchtemessungen mit der Neutronensonde.

zur Ernte unter dem Einfluss niederschlagsreicher Witterung im Jahr 1995 einen maximalen Tiefgang von 150 cm.

Welsches Weidelgras zeigt unter den extrem trockenen Bedingungen im Jahr 1990 eine Tiefenausschöpfung bis in 130 cm Tiefe. Die Messungen begannen erst nach dem 2. Schnitt, der Zeitpunkt des Zugriffs auf das Unterbodenwasser kann deshalb nicht ausgewiesen werden. Kartoffel nimmt Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe im extrem trockenen Jahr 1991 ab Ende Juli, während der Blüte in Anspruch und setzt die Tiefenausschöpfung nur bis in 70 cm Tiefe fort. Ein weiterer Tiefgang war offenbar aufgrund der geringen Anfangswassergehalte des Unterbodens infolge

nicht vollständiger Auffüllung des Bodenwasserspeichers nicht möglich (Abbildung 3).

Intensität der Bodenwasserausschöpfung

Unter niederschlagsnormalen Bedingungen stehen im Zeitraum von Oktober bis März aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung (Lysimetermessungen im Mittel der Jahre 1983 bis 2004 mit 16 a Brache und 6 a Winterkulturen) nur 110 mm für die Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers zur Verfügung. In der Ackerbau-Fruchtfolge von 1990 bis 2004 ist der Bodenwasserspeicher zu Vegetationsbeginn in elf von fünfzehn Jahren nicht aufgefüllt.

Im Folgenden werden nur diejenigen Jahre dargestellt, in denen die Pflanze zu Vegetationsbeginn einen weitgehend aufgefüllten Bodenwasserspeicher vorfindet und während der Wachstumszeit möglichst trockene Witterungsverhältnisse vorherrschen, um die größtmöglichen Ausschöpfungsbeträge an Bodenwasser darstellen zu können (*Abbildung 3*).

Unter der Bedingung eines weitgehend aufgefüllten Bodenwasserspeichers zeigt sich folgende Reihenfolge der Intensität der Bodenwasserausschöpfung in mm : Zuckerrübe 196 > Phacelia 218 > Winterraps 146 > Winterweizen 122 = Sommergerste 138 > Unkrautbewuchs 146 > Silomais 121 > Ackerbohne 95 > Kartoffel 37 mm.

Zuckerrübe nimmt das Bodenwasser in der oberen 120 cm-Bodenzone bis über den PWP hinaus vollständig in Anspruch und in der darunter liegenden Bodenzone bis in 200 cm Tiefe bis auf 40 % nFK (*Abbildung 3*).

Winterraps schöpft zwar die obere Bodenzone bis in 120 cm Tiefe mit einem Restwassergehalt von 20 % nFK nicht vollständig aus, vermag aber die darunter liegenden Bodenschichten bis in 200 cm Tiefe bis auf 30 % nFK in Anspruch zu nehmen, etwas stärker als *Zuckerrübe*.

Winterweizen senkt den Bodenwassergehalt in der oberen 120 cm-Zone bis auf 20 % nFK und darunter bis auf 35 % nFK. Es zeigt sich eine leichte Depression im Bereich des Ah-Bv-Horizontes in 50 bis 70 cm Tiefe, vermutlich aufgrund der dort höheren Bodendichten und geringeren Grobporengehalte.

Sommergerste zeigt unter gleichen Bedingungen (weitgehende Auffüllung des Bodenwasserspeichers, trockene Witterung während der Vegetationszeit) ein ähnliches Entzugsverhalten, allerdings mit geringerer Beanspruchung des Bodenwassers unterhalb 120 cm Tiefe. Die *Abbildung 3* zeigt des Weiteren, dass *Winterweizen* weder 1992 und 1999, viel weniger noch in den anderen vier Jahren (hier nicht dargestellt) ein vollständig aufgefülltes Bodenwasserreservoir vorfindet. Das ist unter den klimatischen Bedingungen im Trockengebiet auch die Folge der häufigen Fruchtfolgestellung nach *Winterraps*.

Silomais schöpft das Bodenwasser im Jahr 1995 unter dem Einfluss übernormaler Niederschläge bis in 80 cm Tiefe fast

vollständig aus (10 % nFK) und darunter bis in 120 cm Tiefe bis auf 50 % nFK. *Ackerbohne* eignet sich das Bodenwasser unter den gleichen Witterungsbedingungen im Jahr 1995 in der oberen 80 cm-Bodenzone bis auf 30 % nFK an, darunter bis in 100 cm Tiefe nur noch wenig.

Davon deutlich abgesetzt vermag *Kartoffel* das Bodenwasser der oberen 60 cm-Bodenzone bis auf 25 % nFK auszuschöpfen, einer Beanspruchung tieferer Bodenzone sind aufgrund sehr geringer Anfangs-Bodenfeuchtegehalte im Jahr 1991 Grenzen gesetzt.

Ein beträchtliches Aneignungsvermögen von Bodenwasser zeigt *Phacelia*. Innerhalb einer kurzen Wachstumszeit von 118 d (im Vergleich dazu *Kartoffel* 105 d) wird der gesamte pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicher bis in 200 cm Tiefe entleert. Auch *Selbstbegrünung mit Unkraut* führt zu einer beträchtlichen Inanspruchnahme von Bodenwasser, vergleichbar der unter *Winterweizen*.

Schlussfolgerung

Unter der Bedingung knappen Wasserdargebotes gilt es das Potenzial der Pflanze zur Ausnutzung von Bodenwasser optimal zu nutzen durch eine geeignete Stellung in der Fruchtfolge. Tiefer wurzelnde Kulturen wie *Winterraps*, *Zuckerrübe* und *Winterweizen* vermögen auf tiefgründigen Lehmböden Bodenwasser unterhalb 150 cm Tiefe aufzunehmen. Nach Anbau von Kulturen mit mittlerem Wurzeltiefgang und zudem geringeren Wasserbedarf, wie z.B. *Silomais* steht ihnen dieses Reservoir noch zur Verfügung. Umgekehrt sind Kulturen mit mittlerem Wurzeltiefgang nach tiefer wurzelnden Kulturen nicht sehr stark benachteiligt, weil sie das tiefere Bodenwasserreservoir ohnehin kaum nutzen können. Tieferwurzelnde Arten mehrere Jahre hintereinander schränken sich in ihrem Potenzial zur Aufnahme von Tiefenwasser ein. *Winterraps* scheint im Unterschied zu *Zuckerrübe* und *Winterweizen* mehr Bodenwasser im Oberboden zurückzulassen zugunsten eines stärkeren Tiefgangs. Sollte sich diese Beobachtung bestätigen ist *Winterraps* eine günstige Vorfrucht für flacher wurzelnde und intensiver den Oberboden ausschöpfende Kulturen.

Effects of Global Warming on Root Growth, Nutrient and Water Flow in an Oak Model Ecosystem

Thomas Kuster^{1,2*}, Madeleine S. Goerg-Günthardt¹ und Rainer Schulin²

IPCC scenarios predict a global mean annual temperature increase during the 21st century of approximately 2 – 6 °C, as well as a different precipitation pattern compared to the last decades (IPCC 2007). The effects and the importance of global warming will strongly differ between regions according to their latitude, topography or elevation. In Middle Europe (Switzerland), for example, mean temperature has increased since 1970 approximately 1.5 °C, which is about 1.5 times more than in the rest of the northern hemisphere (IPCC 2007, OcCC 2008). Until 2050, temperature in Switzerland will increase for another 1.8 °C in winter and 2.7 °C in summer respectively. The amount of precipitation in 2050 compared to now will increase about 8% in winter and decrease approximately 17% in summer (FREI et al. 2004). Therefore, dry and hot summers like 2003 in Middle Europe will be quite usual (SCHÄR et al. 2004).

How will global warming affect the trees in Middle Europe? Oak species are known to be tolerant of warmer temperatures and drought periods. They are therefore foreseen for future silviculture in Europe. However, knowledge of the specific reactions of the three most important oak species of Switzerland (*Quercus robur*, *Q. pubescens* and *Q. petraea*) to global warming and drought alone or in combination is lar-

gely missing. To know the reactions of the different species (or provenance) to a future climate will be necessary not only for science but also for forestry management.

The WSL lysimeter experiment "Quercu" will help to address this issue for answering how the expected climate change will influence young trees of three different oak species growing together in large chambered lysimeters on two different forest soils. The present PhD thesis focuses on effects of increased air temperature and droughts on soil water and nutrient regime as well as root growth.

Literature

- FREI, C., Eidgenössische Technische Hochschule (Zürich) Institut für Atmosphäre und Klima, und MeteoSchweiz. 2004: Klimazukunft der Schweiz - Eine probabilistische Projektion. MeteoSchweiz, Zürich.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report.
- OcCC, 2008: Das Klima ändert - was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. OcCC - Organ consultatif sur les changements climatiques, Bern.
- SCHÄR, C., P.L. VIDALE, D. LUTHI, C. FREI, C. HABERLI, M.A. LINIGER and C. APPENZELLER, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427:332-336.

¹ Swiss Federal Research Institute WSL, Zürcherstraße 111, CH-8903 BIRMENS DORF

² Institute of Terrestrial Ecology ITES, ETH Zürich, Universitätsstraße 16, CH-ZÜRICH

* Ansprechpartner: thomas.kuster@wsl.ch

Sickerwasseruntersuchungen bei Einsatz von Kompost zur Rekultivierung einer Kalirückstandshalde

Franziska Liemen^{1*}, Ralph Meißner² und Sabine Bernsdorf¹

Zusammenfassung

Die Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH hat ihren Ursprung in der Kali- und Salzindustrie. Die Abraumphalde, welche einen hohen Salzgehalt aufweist, muss mit geeigneten Materialien abgedeckt werden, um eine Auswaschung der salzhaltigen Sickerwässer in angrenzende Oberflächen- und Grundwässer zu verhindern. In der vorliegenden Untersuchung wurde eine Kulturschicht aus einem Gemisch aus Klärschlammkompost (KSK) und mineralischem Boden aufgebaut. Es soll sowohl der Einfluss von KSK auf die Sickerwassermenge und -qualität als auch auf die angebauten Energiepflanzen und deren Nutzung im Biogasbereich untersucht werden. KSK besitzen unter anderem eine hohe Wasserspeicherkapazität und einen hohen Nährstoffvorrat.

Schlagwörter: Klärschlammkompost, Kulturschicht, Energiepflanzen

Summary

The Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH has its origin in the potassium and salt industry. The tailings dump, which has a high salt content, has to be covered by suitable minerals to prevent saline water penetrating into the near-surface water. In our study we built up a recultivation layer by mixing sewage sludge compost with a sandy soil to investigate the influence of sewage sludge compost on the quantity and quality of seepage water and to analyse the growth of bioenergy crops and their use in a biogas plant. Sewage sludge composts have a high water storage capacity and constitute an immense source of nutrients.

Keywords: Sewage sludge compost, recultivation layer, energy crops

Zielstellung

Das Ziel des Forschungsvorhabens besteht darin, durch Aufbringen von KSK im Gemisch mit mineralischen Bodenmaterialien die Kulturschicht der Kalirückstandshalde der Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH aufzubauen. Mit diesem Ansatz wird eine Verbesserung des Wasserhaushaltes angestrebt, da sowohl die Sickerwassermenge verringert als auch die Sickerwasserqualität (vor allem Reduzierung der Salzausträge) und die Standortbedingungen für die Vegetation verbessert werden.

In Sondershausen wurden Kalirohsalze für die Düngemittelproduktion gefördert. Es entstand eine Halde mit einer Fläche von 65 ha und einem Rückstandsvolumen von 27 Mio. m³ ohne Dichtungsschicht. Bei einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 452 mm/a ist ein hoher Salzaustrag von durchschnittlich 339 g Salz / l (NaCl, CaSO₄, MgSO₄, K₂SO₄, KCl, MgCl₂) Haldenlösung zu verzeichnen. Der hauptsächliche Teil der chloridischen und sulfatischen Salze gelangt durch diffuse Einträge in die angrenzenden Oberflächen- und Grundwässer. Um dem Effekt der Auswaschung entgegen zu wirken, ist nach der Thüringer Kalihaldenrichtlinie eine 3-schichtige Haldenabdeckung (kapillarbrechende, konturgebende und Kulturschicht) vorzunehmen. Die Kulturschicht sollte eine geringe Schad-

stoffbelastung, eine gute Durchwurzelbarkeit und eine hohe Wasserspeicherkapazität aufweisen. Der Stickstoffgehalt darf einen Wert von 0,3 % der Trockenmasse oder 10000 kg/ha nicht überschreiten. Es muss weiterhin ein optimaler Nährstoffvorrat geschaffen werden, der eine gute Biomasseproduktion garantiert und eine Nachdüngung nicht erforderlich macht. Die Mächtigkeit der Kulturschicht wird von der Durchwurzelungstiefe der Pflanzen bestimmt und sollte mindestens 70 cm betragen.

KSK sind aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften geeignete Rekultivierungsmaterialien zur Verbesserung der Standorteigenschaften. Sie tragen zu einer Erhöhung der Wasserspeicherkapazität und damit zu einer Reduzierung der Sickerwassermengen mit den darin enthaltenen hohen Salzkonzentrationen bei. In Studien von TAUCHNITZ (2006) wurde eine nutzbare Feldkapazität von bis zu 39 Vol% bei einem Gemisch aus KSK und einem leicht tonigen Schluff nachgewiesen. Somit speichert eine Wasserhaushaltsschicht von 1 m Mächtigkeit eine Niederschlagsmenge von bis zu 390 mm. Weiterhin wurde festgestellt, dass durch die Kombination des Einsatzes von KSK, einer ausreichenden Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von 1 m und einer Begrünung mit Welschem Weidelgras die Sickerwassermengen um ein vielfaches reduziert werden konnten. Neben der Verbesserung der bodenphysikalischen Eigenschaften sind als weitere posi-

¹ Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, D-06099 HALLE (SAALE)

² Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Bodenphysik, Lysimeterstation Falkenberg, Dorfstraße 55, D-39615 FALKENBERG

* Ansprechpartner: franziska.liemen@landw.uni-halle.de

tive Faktoren unter anderem die hohe Nährstoffzufuhr, die Erhöhung der Puffereigenschaften und die Verbesserung der Durchwurzelbarkeit durch den KSK zu nennen.

Weiterhin sollen bei den Untersuchungen optimale Voraussetzungen für das Wachstum von Kulturpflanzen geschaffen werden, was eine zusätzliche Minimierung des Sickerwassers und der Erosion zur Folge hat. Hinsichtlich des ökonomischen Aspektes ist die Nutzung von Energiepflanzen und deren anschließende energetische Verwertung in Betracht zu ziehen.

Material und Methoden

Auf einem Plateau der Halde wurde ein Versuchsfeld mit der Abmessung von einem halben Hektar errichtet. Wie aus *Abbildung 1* ersichtlich, wurden die Parzellen mit einer Größe von 70 m² und Mächtigkeiten der Kulturschicht von 70 und 100 cm angelegt. Zu der mineralischen Bodenkomponente (Ss) wurden 50 und 75 Vol% Klärschlammkompost gemischt. Um einen direkten Vergleich zu erhalten, wurde zusätzlich mit einer Nullvariante aus reinem Sand gearbeitet. Dies ergibt einen Versuchsumfang von 6 Varianten.

Es werden 3 verschiedene Fruchtfolgen auf allen Varianten angebaut. Die erste ist eine Energiegrasmischung (Knaulgras, Glatthafer, Rotschwingel), die über die gesamte Versuchsdauer bestehen bleibt und zwei- bis dreimal jährlich gemäht wird. Des weiteren werden zwei unterschiedliche Fruchtfolgen angebaut, die sich nach der üblichen landwirtschaftlichen Praxis richten. Dies waren in den letzten zwei Versuchsjahren Senf-Winterweizen-Winterraps und Winterroggen-Sudangras.

In *Tabelle 1* sind die Eigenschaften des Rekultivierungsmaterials der Varianten vom Juli 2007, sowohl die Nähr- als auch die Schadstoffe, dargestellt. Hier zeigt sich eine gute

Tabelle 1: Eigenschaften des Rekultivierungsmaterials der Varianten

		0% KSK	50% KSK	75% KSK
pH		7,8	7,6	7,7
Mg	mg/100g Boden	22,3	78,1	74,3
K	mg/100g Boden	26,9	101	99
P	mg/100g Boden	4,4	74,9	83,4
C _t	% TS	0,46	6,61	5,96
N _t	% TS	0,02	0,41	0,34
As	mg/kg TS	5,2	5,3	5,2
Pb	mg/kg TS	9,5	22	18
Cd	mg/kg TS	<0,1	0,18	0,17
Cr	mg/kg TS	49	48	48
Cu	mg/kg TS	11	37	35
Ni	mg/kg TS	33	23	29
Hg	mg/kg TS	0,01	0,047	0,05
Zn	mg/kg TS	86	150	170
Summe PCB	mg/kg TS	n.n.		
Summe PCDD/PCDF	ng TE/kg TS	0,1		
Summe PAK	mg/kg TS	0,06		

Nährstoffversorgung der mit KSK versetzten Varianten, die in Bereichen der Versorgungsstufen C bis E liegen. Die geltenden Schwermetallgrenzwerte nach BBodSchV werden eingehalten.

Intensive Untersuchungen finden zum Sickerwasserhaushalt mit Hilfe der eingebauten 36 Sickerwassersammler statt. Die Probenahme der Wasser erfolgt in einem 4-wöchigen Rhythmus. Einerseits wird die Sickerwassermenge betrachtet, da ein Hauptziel des Versuches die Minimierung der Sickerwasserausträge und damit der Frachten an Nähr- und Schadstoffen aus dem Haldenkörper aufgrund der Kombination eines optimalen Mischungsverhältnisses Klärschlammkompost/Boden, der Mächtigkeit und einem ganzjährigen Bewuchs ist. Weiterhin wird die Qualität der Sickerwässer auf Nitrat-, Ammonium-, Gesamt-Stickstoff,

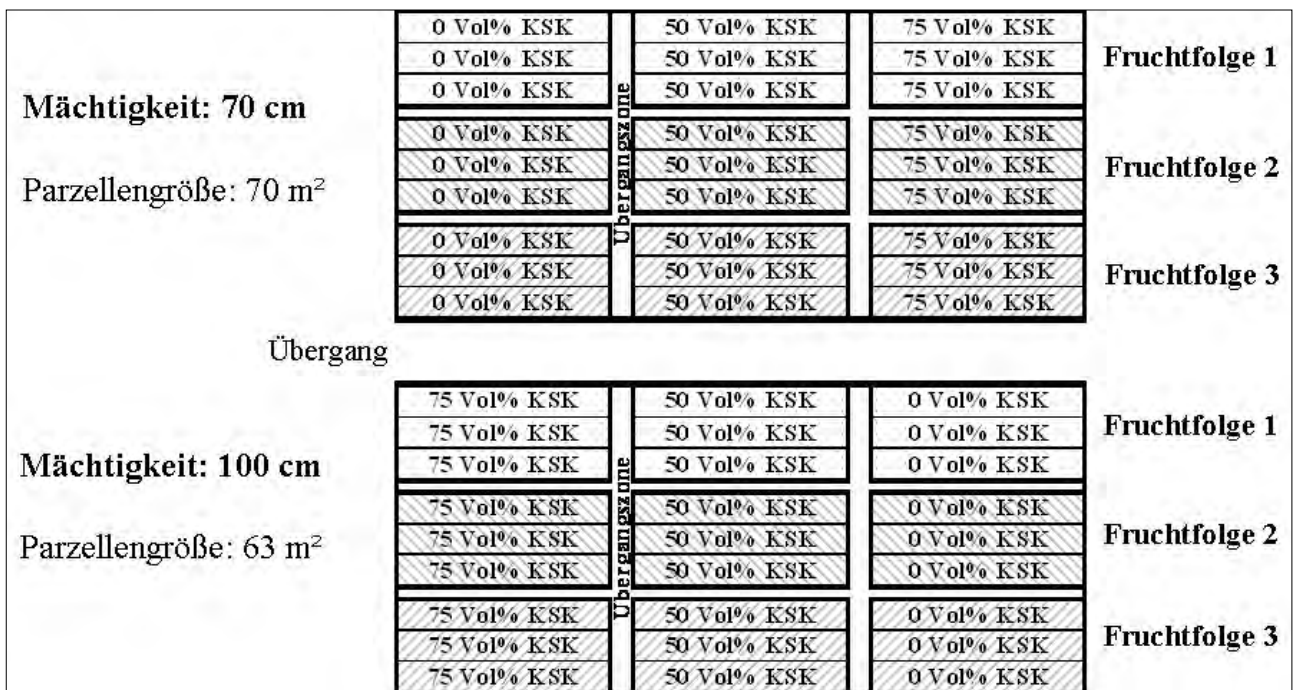


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Sulfat, Phosphat, Chlorid, pH-Wert und Leitfähigkeit untersucht. Hauptaugenmerk wird auf die Stickstoffparameter gelegt, da diese für eine behördliche Genehmigung einer Landschaftsbaumaßnahme mit dem Einsatz von Klärschlammkomposten entscheidend sind.

Die geerntete Biomasse wird auf verschiedene Parameter, wie Nähr- und Schadstoffe als auch Rohprotein, -fett und -faser untersucht, um Aufschluss über die Eignung zur Biogasverwertung zu erlangen. Zusätzlich wird in einem Kleinreaktor der Methanertrag der unterschiedlichen Varianten getestet. Ebenso wie die Inhaltsstoffe spielt der Ertrag der unterschiedlichen Mischungen eine Rolle. KSK eignen sich hinsichtlich der Nährstoffversorgung, da in den verwendeten Mengen eine Nachdüngung in den nächsten 20 Jahren nicht erforderlich ist. Lediglich Kalium wirkt sich nach 10 Jahren als begrenzender Faktor aus.

Es soll in der gesamten Prozesskette der Einfluss des in unterschiedlichen Mächtigkeiten aufgebrachten KSK auf den Stoff- und Wasserhaushalt der Kulturschicht untersucht werden.

Fazit

Die erhaltenen Erkenntnisse zu KSK sind auf andere Flächen mit ähnlichen Standortverhältnissen übertragbar und somit ein geeignetes Instrument, um die Eigenschaften degradierter Flächen zu verbessern und eine Eingliederung von Halden- und Tagebauflächen in das Landschaftsbild zu ermöglichen sowie ökonomisch zu bewirtschaften.

Literatur

- BERNSDORF, S., S. TAUCHNITZ, F. LIEMEN und R. MEISSNER, 2008: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Nr. 55, 1323-1328.
- BUNDES-BODENSCHUTZ- UND ATLASTENVERORDNUNG (BBodSchV), 1999: BGBl.I, Nr 36, 1554-1582.
- RICHTLINIE FÜR DIE ABDECKUNG UND BEGRÜNUNG VON KALIHALDEN IM FREISTAAT THÜRINGEN - KALI-HALDEN-RICHTLINIE, 2002: ThürStAnz Nr. 19: 1539-1560.
- TAUCHNITZ, S., 2006: Untersuchungen zum Wasserhaushalt und Stickstoffumsatz von Rekultivierungsschichten aus Klärschlammkomposten. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle.

Verfahrensentwicklung zur Gülleinjektion unter Berücksichtigung umweltrelevanter, wirtschaftlicher und pflanzenbaulicher Aspekte

Johannes Maßwohl^{1*} und Sandra Mathy²

Abstract

The application of liquid manure in crop rotations with high percentage of corn can cause some problems: bad smell, ammonia emission, run-off of liquid manure in surface waters and leaching of nitrate in ground water.

A group of farmers from the south of Styria tries to solve these problems with a new technology. The group constructed and built a liquid manure injector. The first attempts with this liquid manure injector produce promising results. The corn yield from the injector variant reached the yield of the variants with mineral fertilizer and exceed the yield of the conventional liquid manure variants. A substantial reduction of liquid manure quantities seems possible. The mineral nitrogen amounts after the harvest in the soil (N_{\min}) have the values of the test average or they are even low. In the next years the optimisation of the technology should allow a wide use in the agriculture.

Einleitung

Die Probleme der Grundwasserqualität in der südlichen Steiermark sind zum Teil durch die regionsweise intensive Schweinehaltung und mit einer Gülleausbringung in der vegetationslosen Zeit verbunden. Fehlendes Lagerräumvolumen erfordert eine Gülleausbringung im Herbst auf Brachflächen. Um dieses Manko zu beheben wurden im Rahmen eines Gülleprojektes des Maschinenringes Steiermark im Jahr 2007 Gemeinschafts-Lagerräume zu günstigen Preisen errichtet.

Problemstellung - Motivation

Die Folgen der Lagerräumvergrößerung sind entweder erhöhte Ausbringungsmengen vor dem Anbau, oder die Bestandesdüngung der in dieser Region vorherrschenden Maiskulturen. Die Bestandesdüngung mit Gülle in den Mais ist kostenintensiv und verursacht in der Praxis hohe Ammoniakabgasungen.

Rechtlich sind Güllegaben zu Mais auf Hangflächen, auf Flächen mit leichten Bodenarten unter 15% Tonanteil bzw. auf Flächen in Schutz- und Schongebieten zu teilen. Flächen, die diese Einschränkungen nicht haben, sind grundsätzlich geeignet um die notwendige Stickstoffversorgung in einem Arbeitsgang vor dem Anbau zu erledigen.

Unter der Annahme, dass die Stickstoffversorgung in einem Arbeitsgang keine negativen Auswirkungen auf die

Grundwasserqualität hat, bringt die Düngung in einer Gabe ökonomische Vorteile (reduzierte Maschinenkosten, Einsparung von Zukaufdünger) sowie Vorteile für die Umwelt (reduzierte Emissionen von CO_2 und Ammoniak).

Mit der Entwicklung dieses Gülleinjektors sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Reduktion der Ammoniakemissionen
- Bodenschonende Gülleausbringung
- Reduktion der Arbeitsgänge
- Verhinderung von Gülleverlust durch oberflächliche Abschwemmung
- Effizientere Nutzung der Gullenährstoffe
- Reduktion der Nitratauswaschung
- Ertragsoptimierung

Entwicklungsschritte

Eine engagierte Gruppe von fünf Landwirten und eines Maschinenteknikers aus der Süd- und Weststeiermark suchte nun, unter der Mitarbeit der Landwirtschaftlichen Umweltberatung, eine Lösung um die Gülle diesen Anforderungen entsprechend ausbringen zu können.

Als Prototyp wurde in den Jahren 2007/2008 ein Gerät konstruiert, das diese Anforderungen annähernd erfüllt. Auf

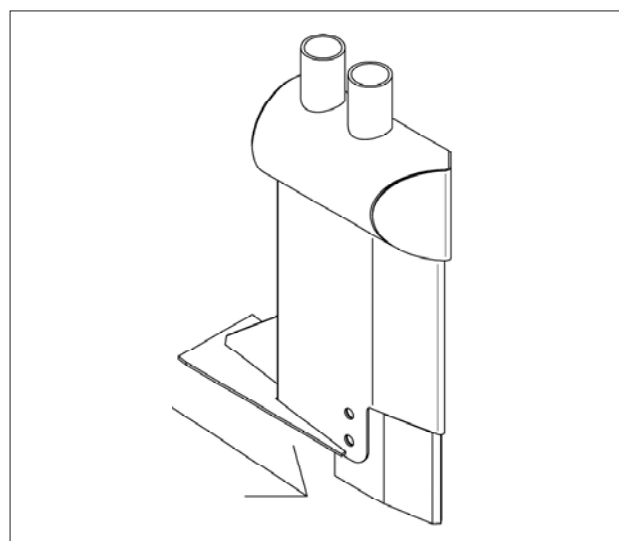


Abbildung 1: Injektor

¹ Landwirtschaftliche Umweltberatung Steiermark, Grazertorplatz 3, A-8490 BAD RADKERSBURG

² Landwirtschaftliche Umweltberatung Steiermark, Julius Strauß Weg 1, A-8430 LEIBNITZ

* Ansprechpartner: johannes.maszwohl@lk-stmk.at



Abbildung 2: Gülleinjektor mit Gülleverschlachtung

einer herkömmlichen Ackerschleppes wurden eigens dafür entwickelte Injektoren (s. *Abbildung 1*) im Abstand von 50 cm aufgebaut. Diese Injektoren wurden im Sommer 2008 zum Patent angemeldet.

Die Güllezufuhr zu diesen Injektoren wurde über einen Gülleverteilkopf mit Schneidwerk und einer handelsüblichen Gülleverschlachtung gelöst. Das System ermöglicht eine bodenschonende Kombination von Gülleausbringung und Abschleppen in einem Arbeitsgang (s. *Abbildung 2*).

Die Injektoren sollen im Boden einen Hohlraum schaffen, der unter der Bearbeitungsgrenze nachfolgender Bodenbearbeitungsgeräte liegt (Saatbeetbereitung, Saat, Hacke). In

diesem Hohlraum, der in einer Tiefe von 8 - 12 cm liegt, wird die Gülle injiziert. Der Injektor musste so gestaltet werden, dass der entstandene Hohlraum nach der Injektion wieder verschlossen wird, um ein Abfließen der Gülle im Hohlraum auf Hangflächen zu verhindern.

Versuchstätigkeit

In den Jahren 2007 und 2008 wurden auf drei Standorten Versuche mit diesem System durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen zu mineralisch gedüngten Varianten keine Ertragsverluste. Im Vergleich zu herkömmlich gedüngten Güllevarianten mit Pralltellerausbringung sind nach diesen ersten zwei Versuchsjahren Mehrerträge festgestellt worden.

Beispielhaft ist in der *Abbildung 3* ein Versuchsergebnis aus dem Jahr 2008 dargestellt. Getestet wurden eine Mineraldüngervariante (MD) und drei unterschiedliche Gülleausbringetechniken in jeweils zwei Düngungsstufen (130 und 170 kg N). Die Pralltellervarianten (PT) und die Schleppschuhvarianten (Ss) reagierten auf die unterschiedliche Düngungshöhe indifferent. Die Injektorvarianten (Inj) lagen nahe am Ertragsmaximum (13,153 kg/ha) dieses Standortes. Das Gesamtmittel des Versuchs liegt bei 12,475 kg/ha die Grenzdifferenz (5%) der Versuchsglieder bei 555 kg.

Begleitend zu diesen Ertragsversuchen werden Eiweißuntersuchungen (Ermittlung des N-Entzugs) und N_{min} -Messungen durchgeführt. Die Reststickstoffwerte zeigen keine eindeutig interpretierbaren Ergebnisse (s. *Abbildung 4*). Auffallend sind jedoch bei allen Null-Varianten die relativ hohen Rest- N_{min} -Werte.

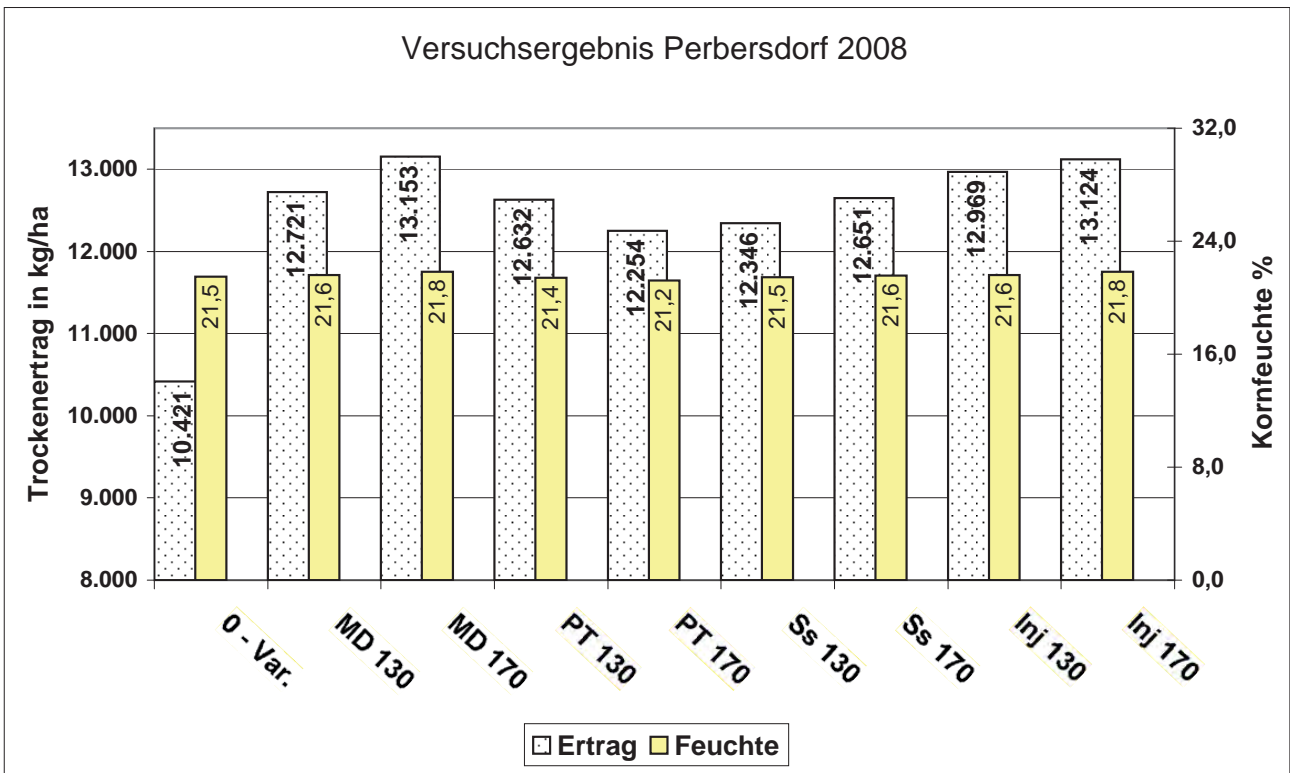
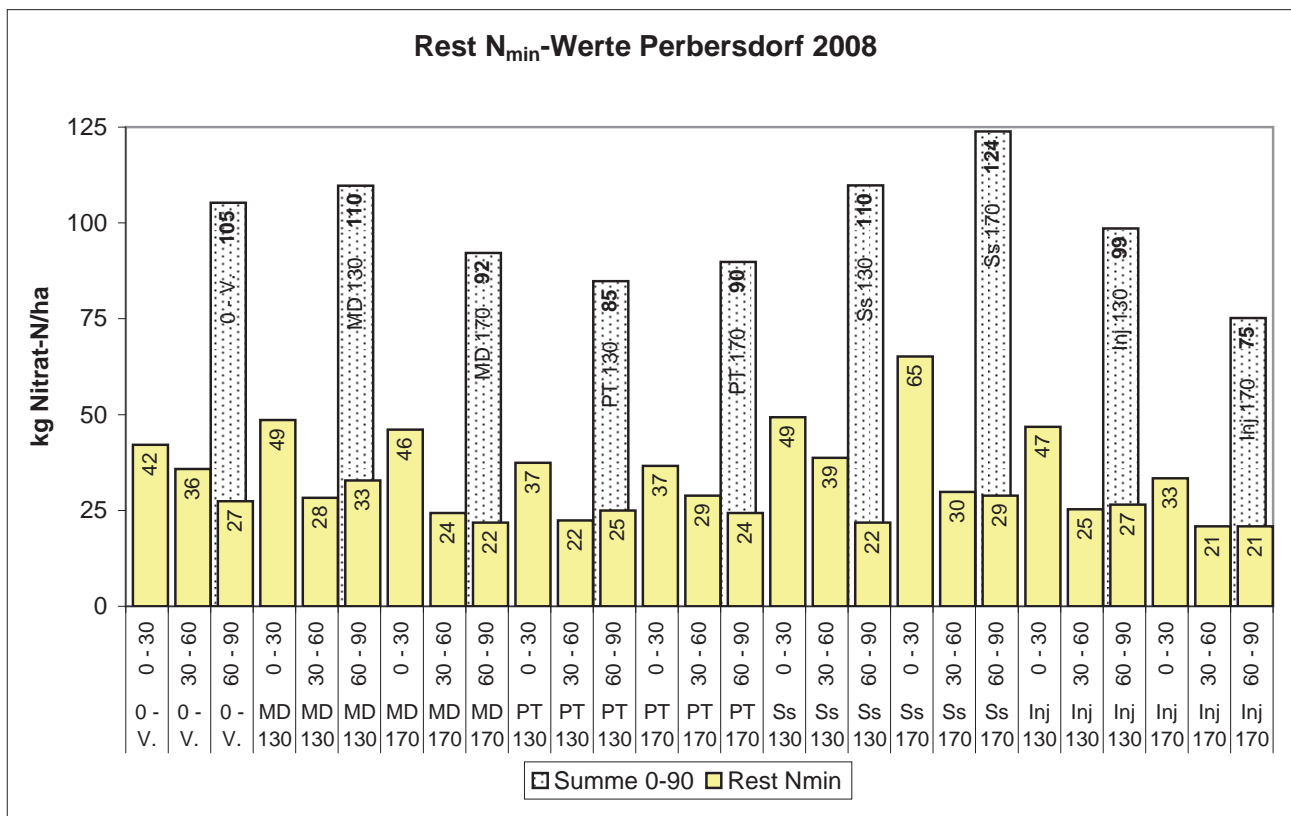


Abbildung 3: Versuchsergebnisse mit Biogasgülle

Abbildung 4: Rest-N_{min}-Werte

Zusammenfassung und Ausblick

Die an der Entwicklung dieses Injektors beteiligten Landwirte sind von den offensichtlichen Vorteilen dieses Systems (Geruchsreduktion, Reduktion der Arbeitsgänge, schlagkräftige Gülleausbringung) nach zwei Versuchsjahren überzeugt. Für die breite Anwendung dieser Gülleinjektion in der Landwirtschaft sind allerdings noch „Kinderkrankheiten“ zu beseitigen (Verstopfungsanfälligkeit der Injektoren, Optimierung der Schlepparbeit).

Das Erreichen der gesetzten Ziele scheint mit diesem System durchaus realisierbar zu sein. Die Versuchsergebnisse (Ertrag, Rest-N_{min}, N-Entzug) aus den Jahren 2007 und 2008 sind durchaus positiv. Analytische Untersuchungen im Bereich der Schadgasemissionen, Nitratauswaschung ins Grundwasser und Nährstoffabtrag auf Hangflächen übersteigen derzeit das Versuchsbudget und können nur geschätzt werden. Die Versuche werden in der bisherigen Form noch mindestens zwei Jahre fortgeführt, um eindeutige Ergebnisse zu erhalten.

Wasserhaushaltsschichten zur Oberflächensicherung von Deponien und Altablagerungen Teil 1: Lysimeterbau und Ergebnisse

Mario Müller^{1*}, Said Al-Akel², Toni Baloun¹, Enrico Kammel²,
Jürgen I. Schoenherr¹ und Jan Engel²

Zusammenfassung

In Kooperation zwischen der Hochschule Zittau/Görlitz und der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden wird seit 09/2007 eine Lysimeteranlage auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz betrieben. Ziel ist die Untersuchung von Rekultivierungsböden hinsichtlich ihrer Funktion als Wasserhaushaltsschicht. Erste Tendenzen zum Verhalten der Böden lassen sich nach einem hydrologischen Jahr gut ausweisen. Die Integration einer Beregnungsanlage ermöglicht Vergleiche und Aussagen zum zeitlichen Verhalten der Böden bei höheren Niederschlagsmengen. Versuchsbegleitende Aufgrabungen/Bodenprobenahmen in speziellen Aufgrabungsfeldern ermöglichen untersuchungsparallele Labortests. Mit deren Hilfe sind die Resultate der in situ Messtechnik in den Lysimetern verifizierbar und spezifische Materialkenndaten, wie Änderung der Dichte, Wassergehalt, Porosität, etc., definierbar. Vegetationsbestimmungen ermöglichen eine Quantifizierung des Vegetationseinflusses.

Summary

Between Zittau University of Applied Science and Dresden University of Applied Sciences a special Lysimeter Test Site at Bautzen/Nadelwitz landfill was established. It is in operation since September 2007. The main goal is to detect how different types of recultivation soils will behave over a long duration and will act as a defined water balancing system. Characteristic results can be shown already, even after the first Hydrological Year of 2008. By the help of sprinkler irrigation, the behavior of soil exposed to significant higher rainfall rates can be investigated as well. The digging fields with identically soil set ups allow soil sampling and comprehensive lab scale soil testing. Lab test results will help to explain in situ Lysimeter data, like bulk density, water content, porosity, etc. Time related vegetation characterization helps to verify its influence to soil water balance effectiveness.

Einleitung

Die Oberflächenabdichtung von Deponien soll Schadstoffemissionen verhindern. Dies betrifft den Austrag von gasförmigen Schadstoffen an der Deponieoberfläche, aber auch die Auslaugung von Schadstoffen durch eindringendes Sickerwasser und der damit einhergehenden Schadstoffemission in den Untergrund. Das zweite Ziel wird durch Minimierung des auftreffenden Niederschlagswassers angestrebt. Durch die Wechselwirkung von Rekultivierungsschicht/Wasserhaushaltsschicht und Bewuchs, wird eine günstige Beeinflussung des Wasserhaushalts erreicht [1]. Die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht ergeben sich, unter Beachtung der Standortgegebenheiten, aus der Sicherungsfunktion, die das Oberflächenabdichtungssystem zu erfüllen hat. Neben der Funktion als Tragschicht für den Bewuchs und der Integration des gesicherten Deponiekörpers bzw. der Altablagerung in die umliegende Landschaft, bildet die Abdeckung/Abdichtung auch die Grundlage für eine, zu diesem Zeitpunkt oft noch unbekannte, Folgenutzung sowie zur Eingliederung ins Landschaftsbild. Schwerpunktmäßig ist die Vegetationsbedeckung an die natürlichen Gegebenheiten (z. B. Boden, Relief, Klima, ... usw.) anzupassen, wobei

günstigstenfalls auf die natürliche Vegetationsentwicklung (Sukzession) hinzuwirken ist [2].

Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Seit Oktober 2006 wird, unter Leitung der Hochschule Zittau/Görlitz und der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, das Verhalten und die Wirksamkeit von Wasserhaushaltsschichten untersucht. Die Versuchsanlage besteht aus insgesamt 10 nichtwägbaren Rundlysimetern (\varnothing 1,5 m) und weiteren 2 Rundlysimetern (\varnothing 1,0 m) sowie 6 rechteckigen Aufgrabungslysimetern mit einer Grundfläche von jeweils 1,5 m x 7,5 m. Für die Befüllung der Lysimeter sind zwei regional anstehende Böden (leicht toniger, leicht sandiger Schluff und feinkiesiger, leicht schluffiger Sand) verwendet worden (s. *Abbildung 1*).

Eine Beregnungseinheit an ausgewählten Rund- und Aufgrabungslysimetern ermöglicht die Bewertung des Verhaltens der Wasserhaushaltsschichten auch für Regionen mit höheren Niederschlagsmengen, bis zu 1.000 mm/a. Durch bodenmechanische und wasserhaushaltliche Labor- und Felduntersuchungen können die Änderungen des Wasserhaushalts in Bezug auf anthropogene und natürliche Ein-

¹ Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, D-02763 ZITTAU

² HTW Dresden, Friedrich-List-Platz 1, D-01069 DRESDEN

* Ansprechpartner: mmueller@hs-zigr.de

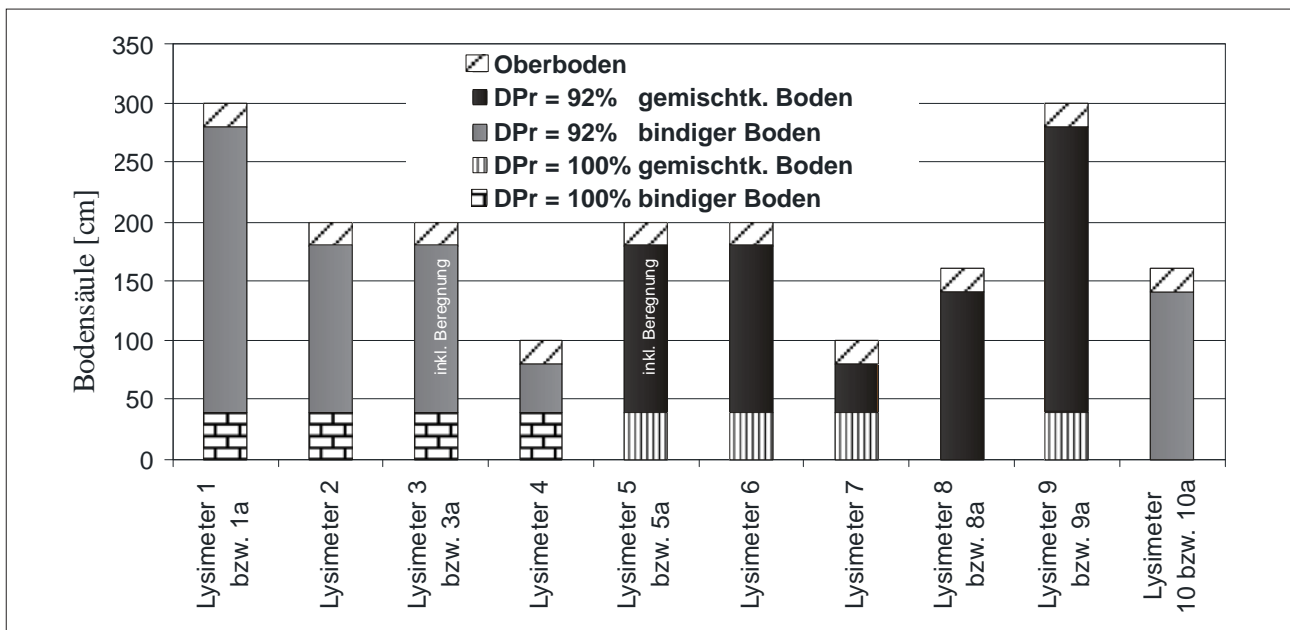


Abbildung 1: Aufbau der Bodensäulen in den Lysimetern (ohne Drainageschicht).

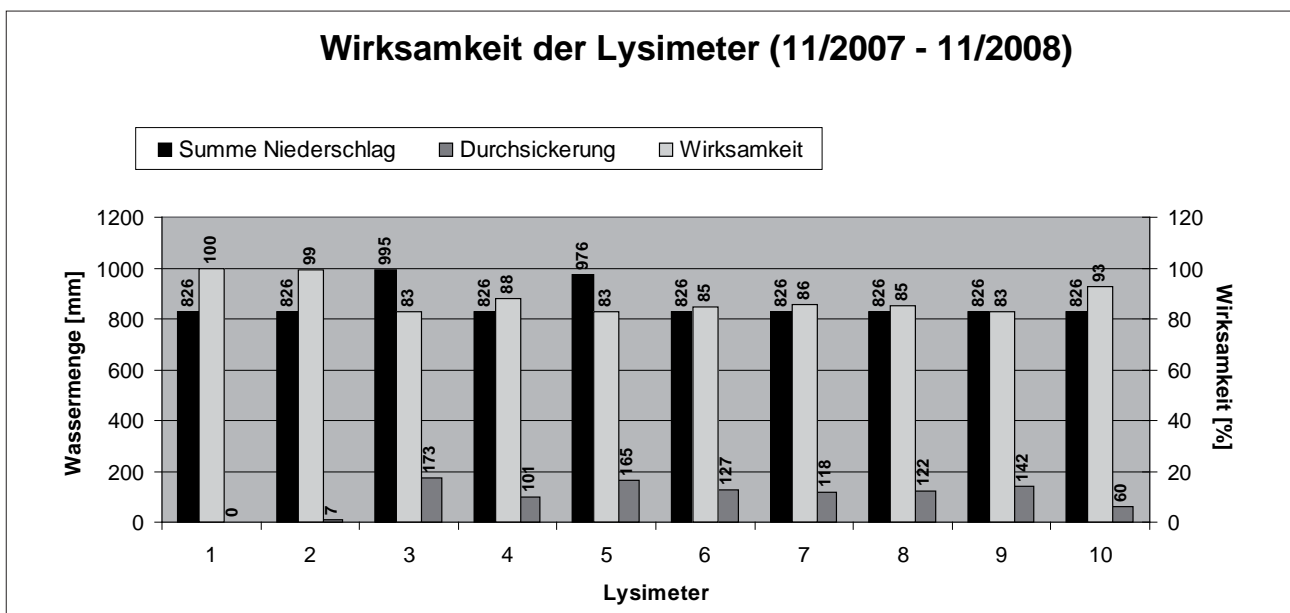


Abbildung 2: Wirksamkeitsbetrachtungen zu den Lysimetern.

flüsse sowie den daraus resultierenden bodenmechanischen Eigenschaftsänderungen exakt analysiert, charakterisiert und wissenschaftlich bewertet werden. Nach dem Abschluss der Arbeiten zur Geländeprofilierung wurden alle Lysimeter und Aufgrabungsfelder sowie das direkt angrenzende Geländeumfeld mit einer üblichen Grasvegetation eingesät. Die in situ-Messtechnik dient zur kontinuierlichen Erfassung wasserhaushaltsrelevanter und setzungsspezifischer Kenngrößen (z. B. Wassergehalt, Saugspannung, Temperatur, Versickerung, Setzungen). Diese ist in den Rundlysimeter eingebaut. Die Daten werden über ein Datenloggersystem in der Messstation erfasst. Alle meteorologischen Parameter werden über eine Klimastation am Standort ebenfalls erfasst.

Ergebnisse des ersten hydrologischen Untersuchungsjahres (11/2007 – 11/2008)

Mit dem Beginn des hydrologischen Jahres 2008 werden die Messdaten erfasst, aufbereitet und ausgewertet. Der Bilanzierungsrahmen wird durch das hydrologische Jahr gesetzt. Bei allen Auswertungen und Interpretationen der Messergebnisse muss beachtet werden, dass die eingebauten Böden bzw. Systeme sich noch in der Konsolidierungs- bzw. „Einschwingphase“ befinden. Ein ausgeprägter Bewuchs auf den Lysimetern/Feldern konnte erstmals im Laufe des hydrologischen Sommerhalbjahrs 2008 verzeichnet werden. Bis Ende November 2008 wurden die Lysimeter (außer Lysimeter 3 und 5) mit einer natürlichen Niederschlagsmenge

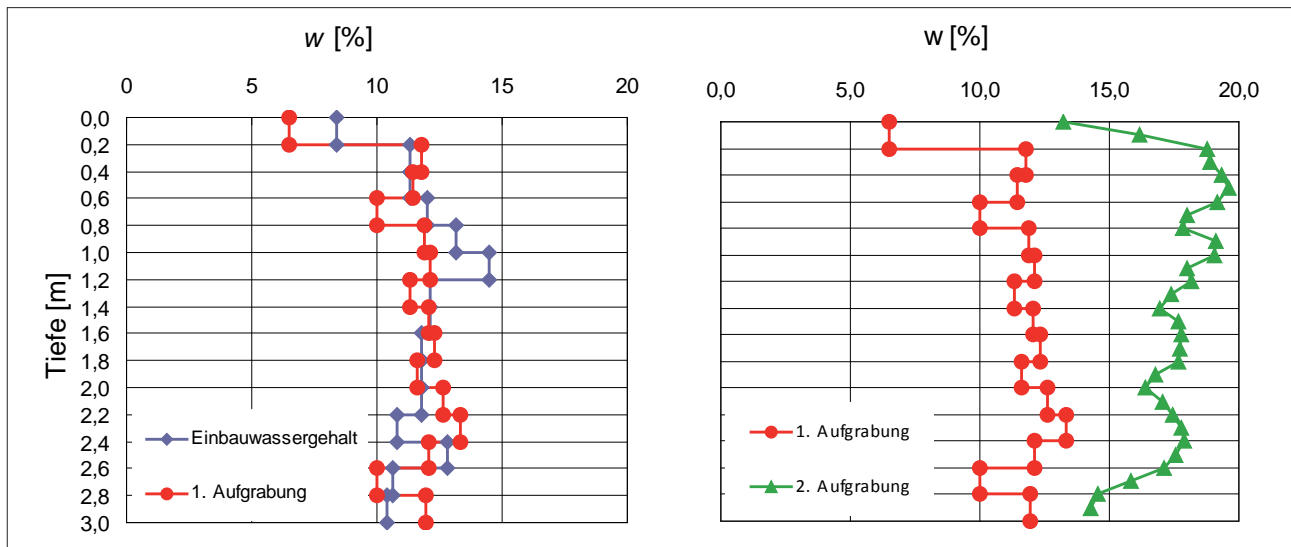


Abbildung 3: Vergleich der Wassergehalte w von Feld 1a (3,0 m, bindiger Boden).

Tabelle 1: Mittelwerte der Wassergehalte (w) in den Aufgrabungsfeldern.

Aufgrabungsfeld	Boden	nFK	1. Aufgrabung	2. Aufgrabung
1a	bindig	23%	$w = 11,5\%$	$w = 17,4\%$
8a	gemischt.	13%	$w = 7,7\%$	$w = 9,6\%$
9a	gemischt.	13%	$w = 6,1\%$	$w = 8,3\%$
10a	bindig	23%	$w = 13,3\%$	$w = 18,4\%$

von 826 mm beaufschlagt. Die Lysimeter 3 und 5 besitzen zusätzlich eine Beregnungsanlage. Lysimeter 3 erhielt im Untersuchungszeitraum insgesamt 995 mm und Lysimeter 5 insgesamt 976 mm Wasser. Um mögliche Frosteinflüsse zu vermeiden, wird die Beregnungsanlage in den Wintermonaten (z.B. 11/2007 - 04/2008) temporär abgeschaltet.

Eine vergleichende Beurteilung des Perkulationsverhaltens der eingesetzten Böden, unter Beachtung der unterschiedlichen Bodenmächtigkeiten und Verdichtungsgrade, kann aus dem Diagramm in *Abbildung 2* entnommen werden. Die ausgewiesenen Abdichtwirksamkeiten lassen u. a. Rückschlüsse auf die notwendigen maximalen Mächtigkeiten, den Einfluss stark verdichteter Schichten sowie die grundlegende Wasserhaushaltsfunktion zu.

Bei der Betrachtung der Sickerwassercharakteristiken und der Wirksamkeiten (s. *Abbildung 2*) zeigt sich deutlich, dass aufgrund der Korngrößenzusammensetzung sowie der daraus resultierenden Porencharakteristik der Böden erhebliche Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften bestehen. Der größere Anteil an Grobporen bewirkt geringere Kapillarspannungen und somit ein schnelleres gravitatives Entwässerungsverhalten des gemischtkörnigen Bodens bei gleichem Niederschlag. Der feinkörnigere (bindige) Boden kann nur teilweise und nach längeren Zeiträumen entwässert werden. Dies resultiert aus den relativ großen Saugspannungsänderungen bei geringen Wassergehaltsänderungen [3].

Insgesamt lassen sich erste Tendenzen dahingehend aufzeigen, dass beim Einsatz des bindigen Bodenmaterials, dem ausgewählten Bewuchs und einer Schichtstärke von mind.

etwa 2 m sowie einem Verdichtungsgrad von ca. 92%, vergleichbare Wasserhaushaltsschichten gebaut werden können, die die Anforderungen (max. 60 mm/a Durchsickerung) gemäß dem Entwurf der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts (Stand 24.09.08) tendenziell erfüllen [4]. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Wirksamkeiten der eingesetzten Böden, aufgrund der Vegetationsentwicklung und der Konsolidierung des Gesamtsystems noch nicht stabil sind.

Bis zum August 2008 erfolgten insgesamt 2 Aufgrabungskampagnen (10/2007; 04/2008) an den analog aufgebauten Aufgrabungsfeldern 1a, 8a, 9a, und 10a. *Tabelle 1* fasst die Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmungen zusammen. Die guten nutzbaren Feldkapazitäten (nFK) bedingen die guten Wirksamkeiten (*Abbildung 2*) der Lysimeter mit bindigen Böden.

Die Wassergehaltsprofile im Vergleich, d. h. vom Einbau bis zur 2. Aufgrabungskampagne sind in *Abbildung 3* dargestellt. Es wird deutlich, dass erst nach den Wintermonaten 2008 (rechtes Diagramm) deutliche Änderungen in den Wassergehalten erkennbar gewesen sind.

Der Einfluss der Wintermonate mit den höheren Wasserinfiltrationsraten, hervorgerufen auch durch die geringere Evapotranspirationsleistung der Vegetation, ist deutlich zu erkennen. Die höheren Wassergehalte belegen das Auffüllen des Bodenwasserspeichers im Winter.

Literatur

- [1] SCHOENHERR, J.I., M. MÜLLER, R. BAUMERT, J. LIPPMANN-PIPKE, C. SEIDLER, F. SÄNGER, K. DEUTSCH, P. SCHNEIDER, K. BARTUSCH, G. KOSTELETZKY und H. WERNER, 2005: Entwicklung eines methodischen Verfahrensansatzes zur Erstellung von Gleichwertigkeitsnachweisen für Deponieabdichtungen in Sachsen. Bericht zum BMBF-Forschungsprojekt: 01707003, Zittau.
- [2] MELCHIOR, S. und A. CLAUSSEN, 2004: Praxiserfahrungen und Ergebnisse der Qualitätssicherung bei der Rekultivierung von Deponien. In: KÜHLE-WEIDEMEIER, M. (Hrsg.): Praxistagung Deponie 2005. 1. Auflage 2004, Tagungsband WASTECONSULT INTERNATIONAL, Göttingen, Cuvillier Verlag.

- [3] SCHNEIDER, P., 2005: Alternative Methoden in der Bergbausanierung – Konzeption von reaktiven Abdecksystemen am Beispielstandort Halde Schlüsselgrund. Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- [4] ENGELMANN, B., 2008: Die Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts. In: Šembera, J.; Schoenherr, J. I.; Zeman, J.: Perspektivy nových technologií ve skládování a rekultivaci v mezinárodním kontextu. Skládkový workshop Liberec – Zittau 2008, Liberec, 27./28.11.2008.

Wasserhaushaltsschicht zur Oberflächensicherung von Deponien und Attablagerungen Teil 2: verwendete Böden

Said Al-Akel^{1*}, Mario Müller², Jens Engel¹, Enrico Kammel¹,
Jürgen I. Schoenherr² und Toni Baloun²

Zusammenfassung

Der Einsatz von Wasserhaushaltsschichten als Oberflächenabdichtungssystem insbesondere in regenarmen Gebieten stellt eine Alternative zu den vorhandenen Systemen dar. Der Entwurf erfordert eine einheitliche Betrachtung von bodenmechanischen, bodenkundlichen und geohydraulischen Anforderungen und der Kenntnis über das zeitliche Verhalten des Bodens.

Im Rahmen eines laufenden Forschungsprojekts werden Bemessungsregeln für qualifizierte Rekultivierungsschichten erstellt. Bestandteil des Bemessungskonzepts sind Kriterien und Kennwerte, die eine optimale Auswahl des Bodenmaterials und der Einbaumethode sicherstellen. Der Beitrag gibt einen ersten Überblick zur Verfahrensentwicklung.

Schlagwörter: Lysimeter, Rekultivierung, Bodenkunde, Bodenmechanik

Summary

The use of water balance layer as a capping system particularly in rain poor areas is an alternative to the common systems. The design requires an interdisciplinary evaluation of the soil mechanical and soil physical parameters. The knowledge about the long time behaviour of Soils is also required.

In the context of a research project is the aim to develop a design methods for qualified recultivation layers and to assure an optimal choice of the Soils and the installation method. This paper gives a survey of first results.

Keywords: landfill, recultivation, soil physics, soil mechanics

Einleitung

Im Rahmen eines BMBF geförderten FH³-Forschungsprojekts gemeinsam mit der Hochschule Zittau/Görlitz und in Zusammenarbeit mit verschiedenen Praxispartnern und Behörden wurde eine Lysimeteranlage auf dem Gelände der Hausmülldeponie des regionalen Abfallverbandes Oberlausitz Niederschlesien – RAVON in Bautzen/Nadelwitz errichtet und seit September 2007 betrieben. In diesem Beitrag werden die verwendeten Böden kurz beschrieben und ein Modell zur Quantifizierung der Materialeigenschaften vorgestellt.

Eigenschaften der verwendeten Böden

Im Vorfeld des Baus der Lysimeteranlage wurden regional anstehende Böden auf ihre Eignung für den Einsatz als qualifizierte Rekultivierungsschicht untersucht. Es wurden zwei Bodenarten mit signifikanten Eigenschaftsunterschieden ausgewählt. Als Oberboden kam humusreicher Boden zum Einsatz. In der *Tabelle 1* sind die ausgewählten Böden beschrieben.

Die Eignungsprüfung erfolgte im geotechnischen Labor der HTW Dresden. In der *Tabelle 1* sind einige relevante Versuchsergebnisse dargestellt.

Modell zur Quantifizierung der Materialeigenschaften

Grundlage des Modells $n_w/(1-n)$ Koordinatensystem

Grundlage des Modells ist die Idealisierung der Bodenzusammensetzung. Mit Hilfe des rechtwinkligen Koordinatensystems, (RUDERT 1977), nach *Abbildung 1* kann man den Zustand des Bodens mit 2 Bestimmungsgrößen ($1-n$ und n_w) beschreiben. Diese Methode erlaubt es, den Zusammenhang zwischen Phasenzusammensetzung, Formänderung, Spannungen und Scherfestigkeit, s. *Abbildung 1* und *Abbildung 2*, einfach und übersichtlich darzustellen, da sich diese Zusammenhänge mit Geraden gleicher Eigenschaften beschreiben lassen.

Die Linien gleicher Spannung sind in *Abbildung 2* dargestellt. Das Bild zeigt die Ergebnisse von Kompressionsversuchen (Ödometerversuche) im teilgesättigtem Zustand, (ENGEL 2003), bei denen der Wassergehalt konstant gehalten wurde. Die Verbindung der Endpunkte der Phasenzusammensetzung nach jeweils der gleichen Belastung und bei unterschiedlichen Wassergehalten ergibt Linien gleicher Konsolidationsspannungen bzw. äquivalenter Spannungen.

¹ HTW Dresden, Friedrich-List-Platz 1, D-01069 DRESDEN

² Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, D-02763 ZITTAU

* Ansprechpartner: al-akel@htw-dresden.de

Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse zu bodenmechanischen Untersuchungen.

Boden	D_{pr}^* [%]	ρ_d [g/cm ³]	k_f [m/s]	w^* [%]	FK [%]	nFK [%]	pWP [%]	LK [%]
Gemischtkörniger Boden	92	1,83	$8,7 \cdot 10^{-6}$	5	18	13	5	12
feinkiesiger, leicht schluffiger Sand	100	1,99	$5,8 \cdot 10^{-7}$	5	20	14	6	12
Bindiger Boden	92	1,65	$2,9 \cdot 10^{-8}$	12	38	23	15	8
leicht toniger, leicht sandiger Schluff	100	1,8	$1,3 \cdot 10^{-8}$	12	39	23	16	7
Oberboden								
mittel- bis grobsandiger, leicht kiesiger, leicht feinsandiger Schluff	62	1,26	$1,0 \cdot 10^{-7}$	8	30	23	7	8

* Verdichtungsgrad und Wassergehalt als Vorgabe für den Bodeneinbau in den Lysimetern

Der Vergleich der Phasenzusammensetzung mit der Phasenzusammensetzung bei Erstbelastung und gleichem Überlagerungsdruck lässt die Vorhersage von Sacken oder Schwellen, *Abbildung 2*, zu.

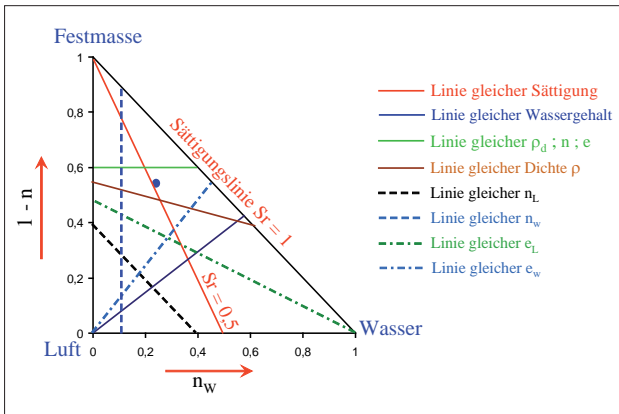


Abbildung 1: Geraden gleicher Eigenschaft im modifizierten Dreiecksnetz nach RUDERT.

Auswahl der Böden für Rekultivierungsschichten mit Hilfe des $n_w / (1-n)$ Koordinatensystems

Im Vorfeld mussten die Einbauparameter des Bodens so festgelegt werden, dass Schrumpfen vermieden und eine ausreichende nutzbare Feldkapazität und Festigkeit sichergestellt wird, (AL-AKEL et al. 2007). Dazu wurde das $n_w / (1-n)$ Koordinatensystem eingesetzt. Durch Einzeichnen der entsprechenden Linien für die Feldkapazität, den permanenten Welkepunkt und die mindest nutzbare Feldkapazität in das modifizierte Dreieck, siehe *Abbildung 3*, unter Berücksichtigung der Verdichtungskurve aus dem Proctorversuch, wird der zulässige Bereich für den Einbau des Bodens begrenzt.

Die Schrumpfgrenze w_s wurde bei der Bestimmung der Einbaukriterien des bindigen Bodens als maximaler Grenzwert des Einbauwassergehaltes festgelegt. Im Ergebnis konnten die Einsatzgrenzen des jeweiligen Bodens bestimmt und visualisiert werden. Die schraffierte Fläche in *Abbildung 3* definiert den zulässigen Bereich der Phasenzusammensetzung des untersuchten Bodens. Außerhalb dieser Fläche erfüllt der Boden die Vorgaben nicht.

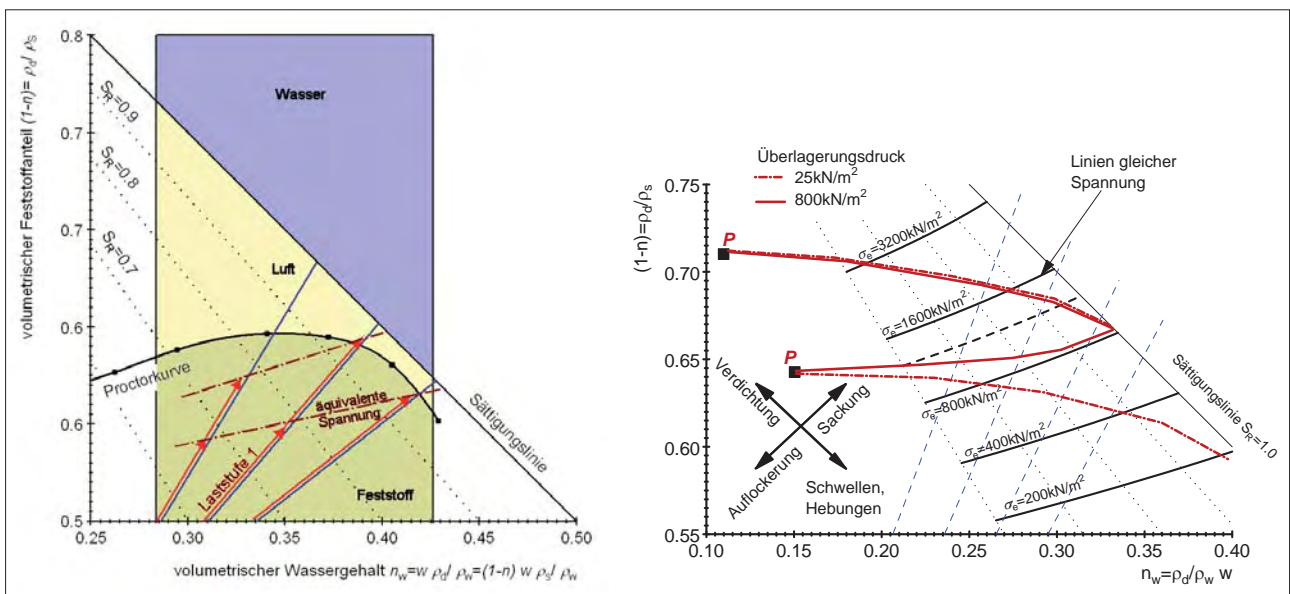


Abbildung 2: Linien äquivalenter Spannungen sowie Sacken und Schwellen künstlich verdichteter Böden in Abhängigkeit von Phasenzusammensetzung und Spannungszustand, (ENGEL 2003).

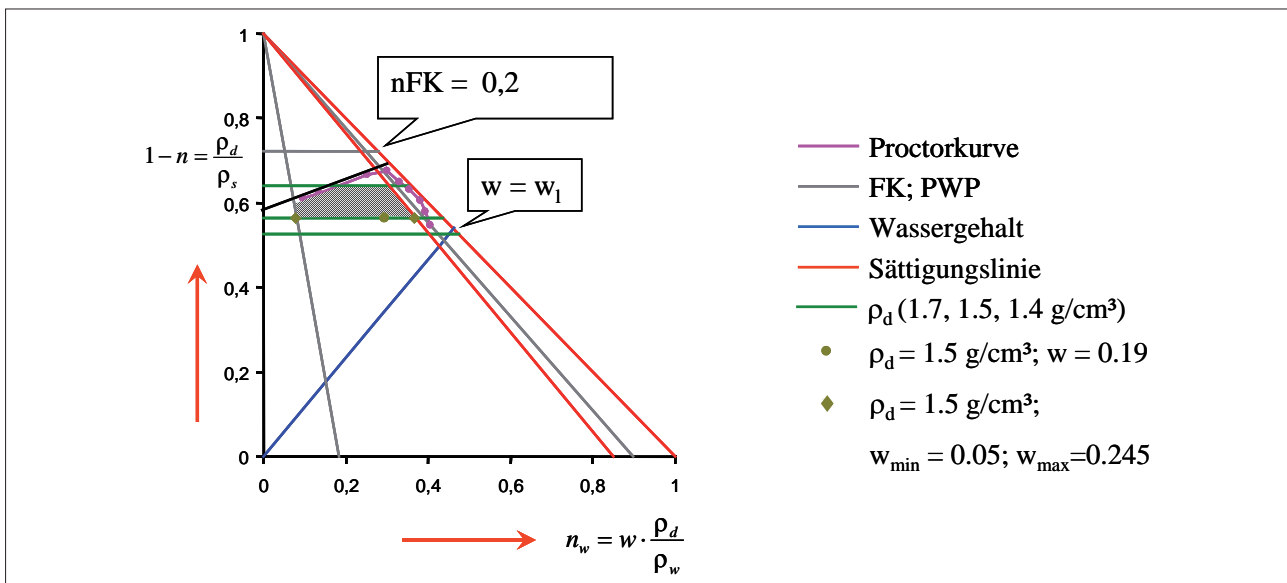


Abbildung 3: Eigenschaften des verwendeten bindigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz.

Literatur

AL-AKEL, S., J. ENGEL, C. LAUER, M. MÜLLER, R. BAUMERT und J.I. SCHOENHERR, 2007: Zusammenhängende Betrachtung geotechnischer und bodenkundlicher Aspekte bei der Planung von qualifizierten Rekultivierungsschichten. Deponieworkshop Zittau - Liberec, Tagungsband, ISBN 978-3-9811021-6-1.

ENGEL, J., 2003: Verfahren zur Vorhersage der Eigenschaften verdichteter Böden. Workshop Bodenverdichtung, Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Geotechnik und Baubetrieb.

RUDERT, J., 1977: Beitrag zur quantitativen Erfassung der Abhängigkeit mechanischer Eigenschaften feinkörnig-bindiger Lockergesteine von Lockergesteinsart und Phasenzusammensetzung. Habilitation, TU Dresden.

Water balance of two lysimeter sites: Karcag vs. Groß-Enzersdorf

Reinhard Nolz^{1*}, Gyorgyi Kovacs², Jozsef Zsembeli² and Peter Cepuder¹

Zusammenfassung

In den letzten beiden Jahren wurde vom Karcag Forschungsinstitut der Universität Debrecen (HU) und dem Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien (AUT) ein gemeinsames Projekt zum Thema Lysimeter-Wasserbilanz in Hinblick auf Bewässerung durchgeführt. Beide Institute betreiben eine Lysimeteranlage und können eine langjährige Erfahrung in diesem Bereich vorweisen. Um eine gemeinsame Basis für die Projektumsetzung zu finden war es notwendig, beide Lysimeteranlagen in Hinblick auf Ausstattung, Instrumentierung und Betriebsweise (Forschungsaufgaben) zu vergleichen.

Der Vergleich umfasste die Aufarbeitung von zwei Workshops und die Anpassung der Tätigkeiten und der Methoden, um eine allgemeine Parameter-Datenbank zu schaffen (meteorologische-, Boden-, Pflanzen-), die für weitere Berechnungen notwendig ist. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sowie Wetterdaten und die berechnete Evapotranspiration verglichen mit Lysimetermessungen werden in einem Poster dargestellt. Außerdem wurden Lysimeter-Wasserbilanzen für die Jahre 2005 und 2006 ermittelt.

Schlagwörter: Evapotranspiration, Wasserbilanz, Bodenwassergehalt

Summary

A bilateral project on water balance of lysimeters with respect to irrigation was carried out in the past two years between Karcag Research Institute of University of Debrecen (HU) and Institute of Hydraulics and Rural Water Management of the University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna (AUT). Both institutes operate a lysimeter site and have a long-term experience with lysimeters. In order to find a common basis for the project implementation, it was essential to compare both lysimeter stations regarding configuration, instrumentation and operation (research objectives). The comparison included the processing of two research workshops and the harmonisation of the activities and methods to create a common database of parameters (meteorological-, soil-, plant production-) necessary for further calculations. The results of this comparison will be shown in a poster as well as weather data and calculated Evapotranspiration ET related to the measured lysimeter ET. Furthermore, lysimeter water balances for the years 2005 and 2006 have been calculated.

Keywords: evapotranspiration, water balance, soil water content

Introduction

During the years 2007 and 2008 a bilateral cooperation between Austria and Hungary took place with respect to the optimisation of irrigation on the base of water balance data determined by weighing lysimeters. The lysimeters of the University of Debrecen and the University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna (BOKU) were the basis of the work, which was focused on the water balance of the two typical agricultural sites (CEPUDER et al. 1991, CEPUDER 2002).

Materials and Methods

The lysimeter station Karcag (Kg) is part of the Karcag Research Institute of the University of Debrecen. Several types of lysimeters are operated on the station, i.a. six electronic weighing lysimeters with 100 cm depth and a surface area of 2 m². The soil type is a Meadow Chernozem. Basic treatments include different soil surface formations

simulating different soil tillage operations and techniques (seed-bed, cloddy, mulch, tarping, shallow cultivation etc.), and different field crops (maize, sorghum, millet, sunflower, grass). Further treatments are set according to actual annual experiments. A nearby meteorological station delivers continuously measured weather parameters. The change of lysimeter weight is read out hourly with a resolution of ± 0.5 mm, the measurement range is ± 300 kg. The amount of drainage water is detected weekly. Soil moisture content and temperature is measured at the depths of 10, 20, 30, 40 cm every 6 hours.

The lysimeter station Groß-Enzersdorf (GE) is located a few kilometres eastern from Vienna within the agricultural area "Marchfeld" at the experimental farm of the BOKU University in Groß-Enzersdorf. It contains several types of lysimeters, including two weighable, backfilled gravitation lysimeters with 2.9 m² surface area and 2.5 m depth. The soil type is Chernozem, soil texture is sandy loam to loamy sand. The lysimeters are operated by the Institute of Hyd-

¹ Institute of Hydraulics and Rural Water Management of University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, Muthgasse 18, A-1190 VIENNA

² Karcag Research Institute of University of Debrecen, Centre for Agricultural Sciences, Kisujszallasi ut 166, H-5300 KARCAG

* Ansprechpartner: reinhard.nolz@boku.ac.at

Table 1: Harmonisation of data.

Similarities	Differences
Lysimeter: type, function, parameters	Measuring frequency
climate and weather	Soil type
scientific approach and objectives	database (basic- versus applied research)
Measuring range (lysimetry, meteorology)	
Vegetation	

Table 2: Mean annual weather data for Groß-Enzersdorf and Karcag.

	Rad MJ/cm ²	Tmean °C	Tmax °C	Tmin °C	Rain mm	relH %	Wv m/s	PET mm
2005								
GE	4525	10,4	14,8	6,1	522	72	3,2	865
Kg	5144	9,9	15,1	4,7	743	77	1,9	799
2006								
GE	4595	11,0	15,3	6,6	522	71	3,1	902
Kg	4971	10,6	15,8	5,8	585	76	1,9	819

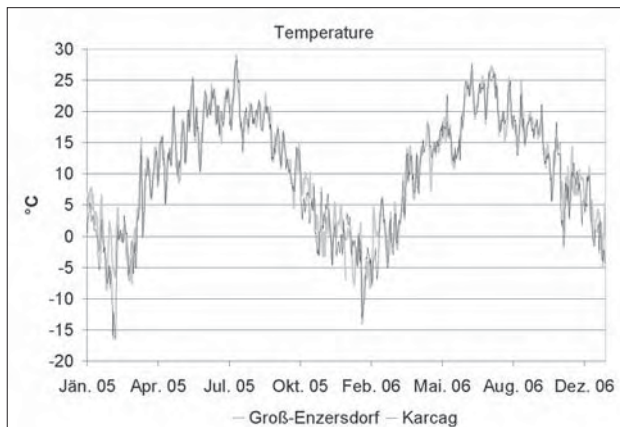


Figure 1: Daily mean temperatures in Groß-Enzersdorf and Karcag from 2005 to 2006.

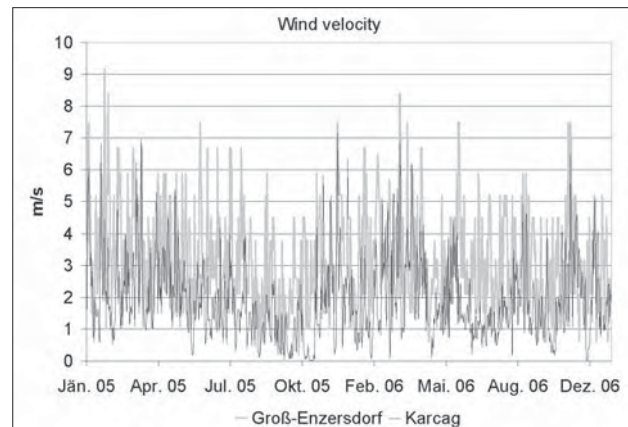


Figure 2: Daily mean wind velocities, measured in 10 m height, in Groß-Enzersdorf and Karcag, respectively.

raulics and Rural Water Management. One of the lysimeters is planted with different field crops, e.g. maize, wheat, oat, sugar beet, according to a typical local crop rotation. The other one is planted with grass for determination of potential reference-evapotranspiration ETo . The attached meteorological station is operated by Austria's national weather service agency. The meteorological parameters are recorded in 10-minute-intervals. Currently, the change of weight of the lysimeters is measured every few seconds and stored every 10 minutes. The resolution of the weighing system is ± 0.1 mm, the measurement range about ± 300 kg. The amount of percolation water is measured by a tipping bucket and stored also every 10 minutes. Furthermore, FDR (Frequency Domain Reflectometry) soil water sensors determine the soil water content every 10 cm depth down to 160 cm.

Results and Discussion

In order to improve the common basis for further work, compliances and differences concerning activities, methods and properties of the lysimeter stations were worked out (Table 1).

Climatic conditions are similar for both lysimeter stations (Table 2, Figure 1, Figure 2). The mean temperature

(Tmean) is slightly higher in Groß-Enzersdorf, whereas the daily mean maximum and minimum temperatures (Tmax, Tmin) are higher in Karcag. Differences can be found in the wind velocities (Wv), which are higher in Groß-Enzersdorf. That fact seems to cause the higher rates of potential Evapotranspiration (PET).

Figure 3 and Figure 4 show the change of the soil water content in the lysimeter Groß-Enzersdorf determined based on weighing data (Lys ET), soil water sensor readings (FDR ET) and ET calculation with the Penman-Montieth formula (PM ET; ALLEN et al. 1998). All three graphs show the same trend. The Penman-Montieth formula calculates the potential evapotranspiration and therefore this graph lies below the measured graphs. FDR sensors (CAMPBELL 1990, PALINEANU et al. 1997) just measure up to 10 cm around the installation tube. The readings are really close to the actual measured data of the lysimeter, but with decreasing soil water content the FDR sensors seem to deliver higher soil water contents. Nevertheless, irrigated sugar beet reduced the soil water content from April to October from 380 to 210 mm (Figure 3).

Oat in year 2006, grown under rainfed conditions, reduced the soil water content in the period from April to August

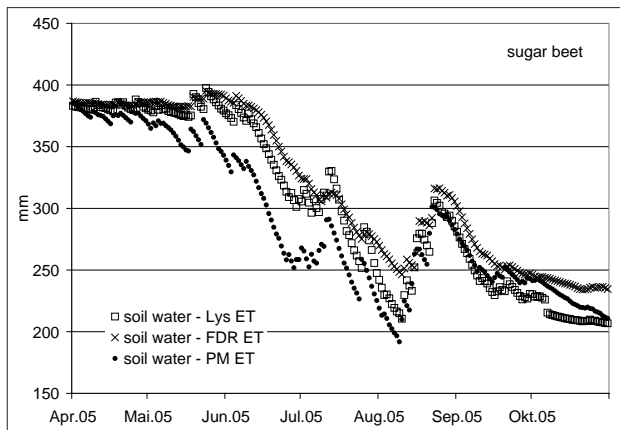


Figure 3: Soil water content (mm) of the lysimeter Groß-Enzersdorf, sugar beet 2005.

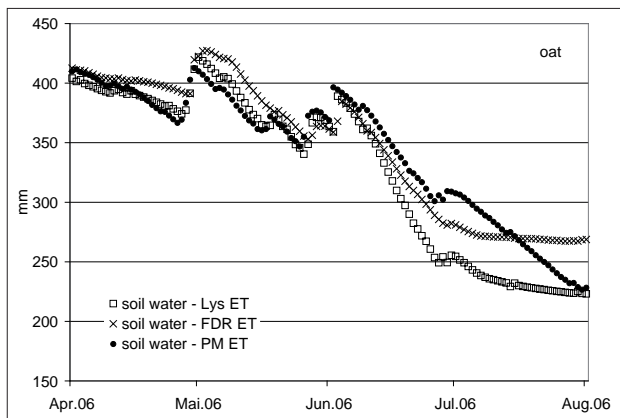


Figure 4: Soil water content (mm) of the lysimeter Groß-Enzersdorf, oat 2006.

from 410 to 230 mm, which means that the water consumption of oat was not so high as for sugar beet (Figure 4).

In 2006, the Karcag lysimeters were grown with sorghum. Figure 5 shows the measured (lys ET) and the calculated (PM ET) soil water content of an irrigated lysimeter. Soil water content from May to September was reduced from 410 mm to 380 mm.

The graphs show that with lysimeters and soil water sensors water consumption of the crops can be monitored and

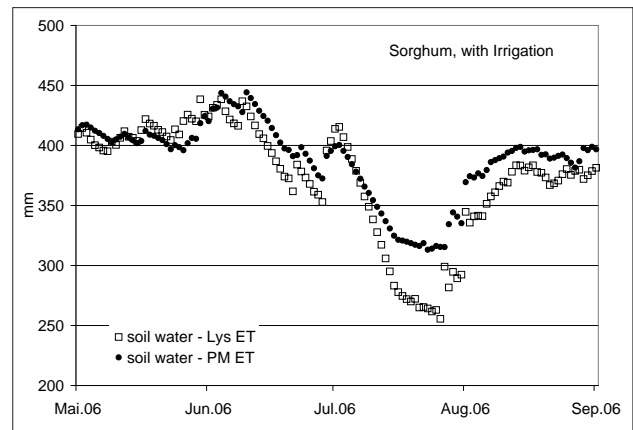


Figure 5: Relative soil water content (mm) of the lysimeter Karcag, irrigated sorghum 2006.

controlled, but nevertheless further research has to be done with respect to improvement of irrigation management in the vicinity of the lysimeter station in Groß-Enzersdorf and Karcag, respectively.

Acknowledgement

The project was financed by the Scientific and Technological Cooperation of the Austrian Exchange Service and the respective Hungarian partner organisation.

Literature

- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH, 1998: Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56.
- CAMPBELL, J.E., 1990: Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty Megahertz. SSSA, Vol. 54.
- CEPUDER, P. und H. SUPERSPERG, 1991: Erfahrungen mit der Lysimeteranlage Groß-Enzersdorf. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, BAL-Bericht.
- CEPUDER, P., 2002: Erfassung der Wasserbilanzgrößen mittels Lysimeter. In: Joanneum Research und Österreichische Vereinigung für Hydrologie (Hrsg.): Workshop Lysimeter der Österreichischen AG Lysimeter und UMS, 25.-26.09.2000, Graz, 124.
- PALINEANU, I.C. and J.L. STARR, 1997: Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1576-85.

Eine wägbare teilversiegelte Lysimeteranlage in Berlin

Yong-Nam Rim^{1*}, Gerd Wessolek¹, Steffen Trinks¹ und Thomas Nehls¹

Zusammenfassung

Versiegelung der Oberflächen und Bodenverdichtung sind die wichtigsten Einflüsse, die sich in urbanen Böden auf den Wasser- und Stoffhaushalt auswirken. Bei dem aus bodenkundlich-stadthydrologischer Sicht wichtigsten Ziel, Regenwasser länger in der ungesättigten Bodenzone zu halten und nicht als Oberflächenabfluss in die Kanalisation zu verlieren, spielen die teilversiegelten Flächen eine sehr wichtige Rolle. Ziel unseres Lysimeterprojektes ist es, eine genaue Analyse des Abflussverhaltens speziell bei Extremereignissen von unterschiedlich teilversiegelten Flächen zu erhalten.

Im Mittelpunkt unserer Arbeiten stehen zwei wägbare teilversiegelte Lysimeteranlagen; jeweils mit Bernburger Mosaikpflastern und mit Gehwegplatten belegt. Der Aufbau soll dabei einer typischen Berliner Straßenfläche entsprechen. Damit können zeitlich hochauflösend die genauen Abfluss-, Versickerungs- und Verdunstungsprozesse unter den Bedingungen des realen Stadtklimas simuliert werden. Aus dem entwickelten Prozessmodell sollen im Anschluss die zukünftig zu erwartenden Abfluss- und Versickerungsszenarien als Folge des Klimawandels prognostiziert werden.

Einleitung

Mit dem Klimawandel sind Extremwetterlagen häufiger zu erwarten, so dass das bestehende Abwassersystem bei Starkregen häufiger an seine Grenzen stößt. Mit den ebenfalls prognostizierten geringeren Niederschlägen ist es wichtig, den Oberflächenabfluss in Städten zu minimieren oder soweit zu verzögern, dass mehr Niederschlagswasser im Boden infiltrieren und die Verdunstung in der Stadt verbessert werden kann. Wie in *Abbildung 1* dargestellt ist, hat die Versiegelung der Stadt und der Landschaft folgende Auswirkungen (WESSOLEK et al. in SUKOPP 1998, S 186): Erhöhung des Oberflächenabflusses, Verminderung der Grundwasserneubildung und der Evapotranspiration, Veränderung des Wärmehaushaltes und Verstärkung des Hochwasserabflusses in den Vorflutern und natürlichen Gewässern.

Um vermeidend bzw. vermindern auf diese Änderungen zu reagieren, werden in der Planungspraxis die nach ATV-DVWK-A 117 und ATV-DVWK-M 153 empfohlenen mittleren Abflussbeiwerte als Grundlage für eine urbane Wasserwirtschaftsplanung verwendet (z.B. DWA 2005, S. 21). Diese Abflussbeiwerte berücksichtigen lediglich die Art der Versiegelung durch Angaben mittlerer prozentualer

Summary

In comparison to natural habitats there have been many physical and hydraulic modifications of soils in urban industrial settlements and congested urban areas in the last few decades. The most important influence on urban soil and water budgets are paving, compression and addition of foreign materials in soils. In the discipline of soil science and urban hydraulics one of the important goals is to keep rain water in the unsaturated soil area as long as possible and not to let it flow down to the sewers in the form of run-off. Here the partial paved surfaces will take a relevant role. Our lysimeter research addresses an exact analysis of run-off behaviours, especially in extreme precipitation events on different street pavements.

In our research focus, we have two lysimeter facilities with Bernburger mosaic pavements and concrete paving tiles. These facilities simulate typical pedestrian walkways found in Berlin, therefore we can simulate run-off, infiltration and evaporation processes under real urban climate conditions in a high-resolution timeframe. Furthermore, the impact scenarios of expected climate change will be estimated using this developed process model.

Abflüsse. In der Annahme, dass unterschiedlich starke Niederschlagsereignisse zu einem deutlich unterschiedlichen Abflussverhalten führen, werden zur Verbesserung der Prognosen in der Siedlungswasserwirtschaft bessere Grundlagen über das Niederschlagsabflussverhalten teilversiegelter Flächen benötigt. Dafür wurden in der Vergangenheit bereits in Berlin-Dahlem und in Hamburg eine teilversiegelte Kippenlysimeteranlage über einen längeren Zeitraum betrieben und zahlreiche Forschungen durchgeführt (FLÖTER, WESSOLEK und FACKLAM 1999).

Auf dem Gelände des Umweltbundesamtes in Berlin Marienfelde wurde im Dezember 2008 eine neue wägbare teilversiegelte Lysimeteranlage für hydrologische und stadtoökologische Grundlagenforschung in Betrieb genommen. In diesem Beitrag werden die wägbare teilversiegelte Lysimeteranlage und die Untersuchungskonzepte erstmals vorgestellt.

Voruntersuchungen

Um den Zusammenhang zwischen Abfluss und Oberflächeneigenschaft zu erklären, wurden mittels der teilversiegelten Kippenlysimeter in Berlin Dahlem einige Voruntersuchungen durchgeführt. Für den Zeitraum Juni 2006 bis Dezember

¹ Standortkunde und Bodenschutz, Institut für Ökologie, TU Berlin, Salzufer 11-12, D-10587 BERLIN

* Ansprechpartner: yongnam.rim@mailbox.tu-berlin.de

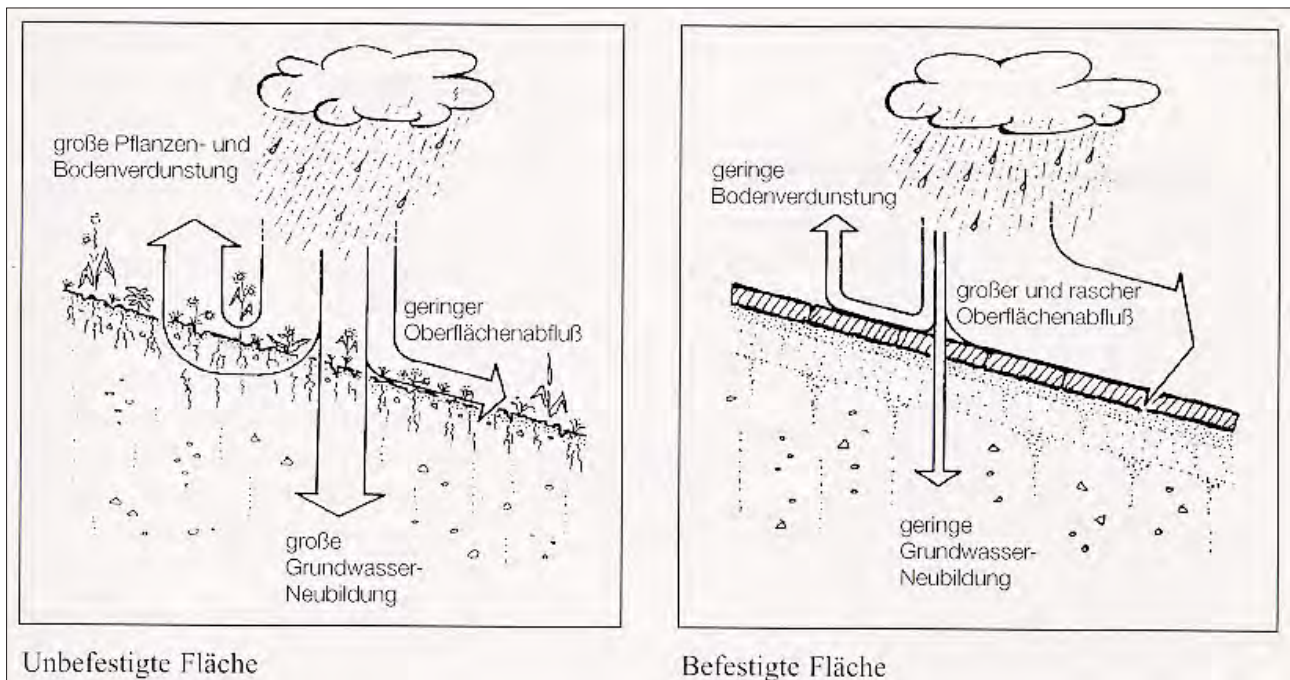


Abbildung 1: Wasserhaushalt befestigter und unbefestigter Flächen (DREISEITL et al. 2001, S. 3).

2007 wurde das Abflussverhalten auf insgesamt 13 unterschiedlichen Teilversiegelungsflächen für verschiedene Niederschlagsbedingungen beobachtet und ausgewertet. Als obere Randbedingung der Versuche stand der Fugenanteil im Mittelpunkt. Diese Voruntersuchungen zeigten bereits deutlich, dass das Auftreten des Oberflächenabflusses nicht nur vom Fugenanteil der Fläche und der Oberflächenbeschaffenheit der Versiegelungsmaterialien abhängig ist, sondern auch von der Niederschlagsintensität (Abbildung 2).

Aus der begrenzten Messkapazität der Kippwaagen (Auflösung von 100 ml) war allerdings die genaue Bestimmung der tatsächlichen Abflussrate nicht möglich. Insbesondere konnte die genaue Abgrenzung eines Ereignisses nicht getroffen werden, um mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten die Abflussraten zu bestimmen.

Aus diesem Grunde wurde eine wägbare teilversiegelte Lysimeteranlage Berlin Marienfelde gebaut. In der Lysimetrie wird erstmals ein Lysimeter speziell für städtische Bedingungen eingesetzt.

Aufbau der wägbaren teilversiegelten Lysimeteranlage

Die gesamte Lysimeteranlage befindet sich in Berlin Marienfelde am Schichauweg auf dem Außengelände des UBA's. Die Besonderheit dieser Lysimeteranlage liegt darin, dass die zwei Lysimeter so gebaut sind (jeweils mit einem Bernburger Mosaikpflaster und mit Gehwegbetonsteinplatten) dass sie die typische Struktur der so genannten „Berliner Gehwege“ nachbilden (Abbildung 3).

In der Stadt nehmen diese Pflaster- und Gehwegplatten einen erheblichen Flächenanteil ein. Der Fugenraum stellt die eigentlichen Sicker- und Rückhaltewege des Regenwassers dar. Er ist unmittelbar der urbanen Umweltverschmutzung

ausgesetzt und meistens stark belastet. Die Belastung des Fugenmaterials ist standortspezifisch und u.a. abhängig vom Verkehrsaufkommen, Alter des Belags und der Bodentiefe. Um auf der neuen Lysimeteranlage vergleichbare Randbedingungen wie in der Stadt zu erzielen, wurde „gealtertes“ Fugenmaterial aus der Innenstadt gewonnen und zwischen den Pflastersteinen und Gehwegplatten eingebracht. Zu diesem Zweck wurde oberes Fugenmaterial (von der Oberfläche bis 1 cm Tiefe) sowie unteres Fugenmaterial (von 1 cm bis ca. 5 cm Tiefe) getrennt von unterschiedlichen Standorten in Berlin entnommen, homogenisiert und verfüllt (Abbildung 4).

Die Lysimeteroberflächen haben eine Flächengröße von jeweils 1 m²; die Oberflächen haben 2 % Gefälle und schließen bodengleich mit dem umgebenden Gelände ab. Der Lysimeterkörper steht 1,5 m tief in einem Lysimeterkeller auf einer Präzisionswaage mit der Auflösung von 100 g. Das Lysimeter wurde mit Bausand bis auf 1,3 m verfüllt; darunter liegt eine 2 dm starke Kiesschicht. Diese dient als kapillare Sperrschicht am unteren Lysimeterrand. Über dieser Kiesschicht liegt ein Geotextil als kapillare Leitschicht, mit der das Sickerwasser durch vier Saugplatten erfasst wird (Abbildung 3).

Um den Oberflächenabfluss gesondert messen zu können, sind am oberen Rand des Lysimeterkörpers spezielle Abflussrinnen angebracht. Diese Abflussrinne führt direkt zu einem separaten Auslassrohr in den Lysimeterkeller und der Abfluss wird dort zeitlich hochauflösend gemessen; es geht kein Wasser bei dieser Prozedur verloren (Abbildung 4).

Die Lysimeterwand und Abflussrinne bestehen aus Edelstahl. Im Lysimeterboden (Bausand) werden die Wassergehalte und die Bodentemperaturen durch TDR Sonden erfasst. An die Saugplatten ist ein Unterdruck von -63 hPa

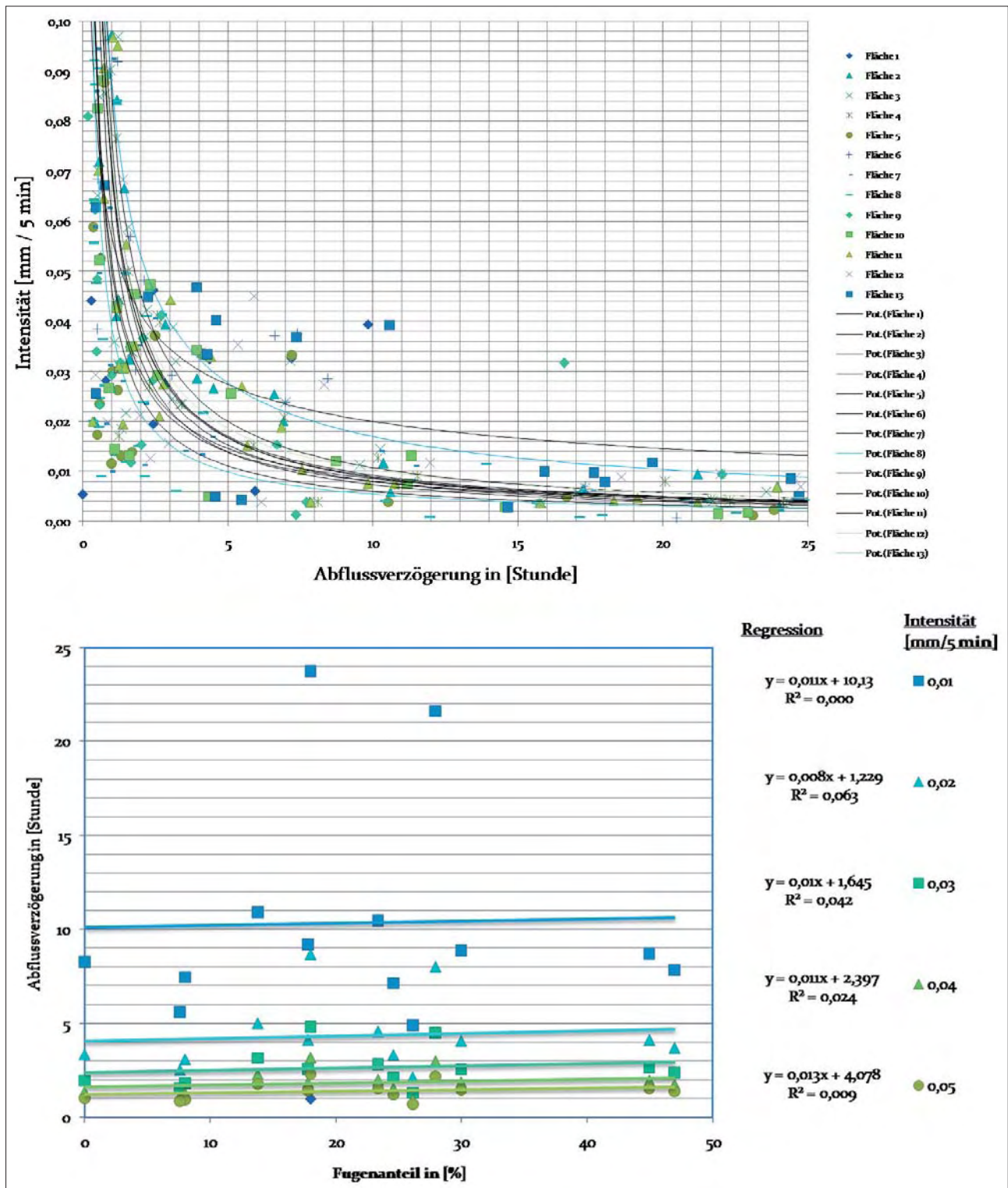


Abbildung 2: Intensitätsabhängige Abflusswirksamkeit. In Abbildung 2 oben: Je größer die Intensität ist, desto abflusswirksamer ist die Fläche. In Abbildung 2 unten: Je größer der Fuganteil ist, desto länger dauert der Abfluss an. In beiden Bildern ist deutlich zu erkennen, dass die Kippenlysimeter schlecht auf geringe Niederschlagsintensitäten reagieren.

angelegt. *Abbildung 5* veranschaulicht die Anlage nach der Fertigstellung. Um einen Insel- bzw. Oaseneffekt zu vermeiden, wurde die angrenzende Fläche um die Lysimeteranlage ebenfalls mit den gleichen Materialien versiegelt.

Untersuchungskonzept

Mit diesen wägbaren teilversiegelten Lysimeter sollen die relevanten Teilprozesse Verdunstung, Versickerung und Oberflächen-

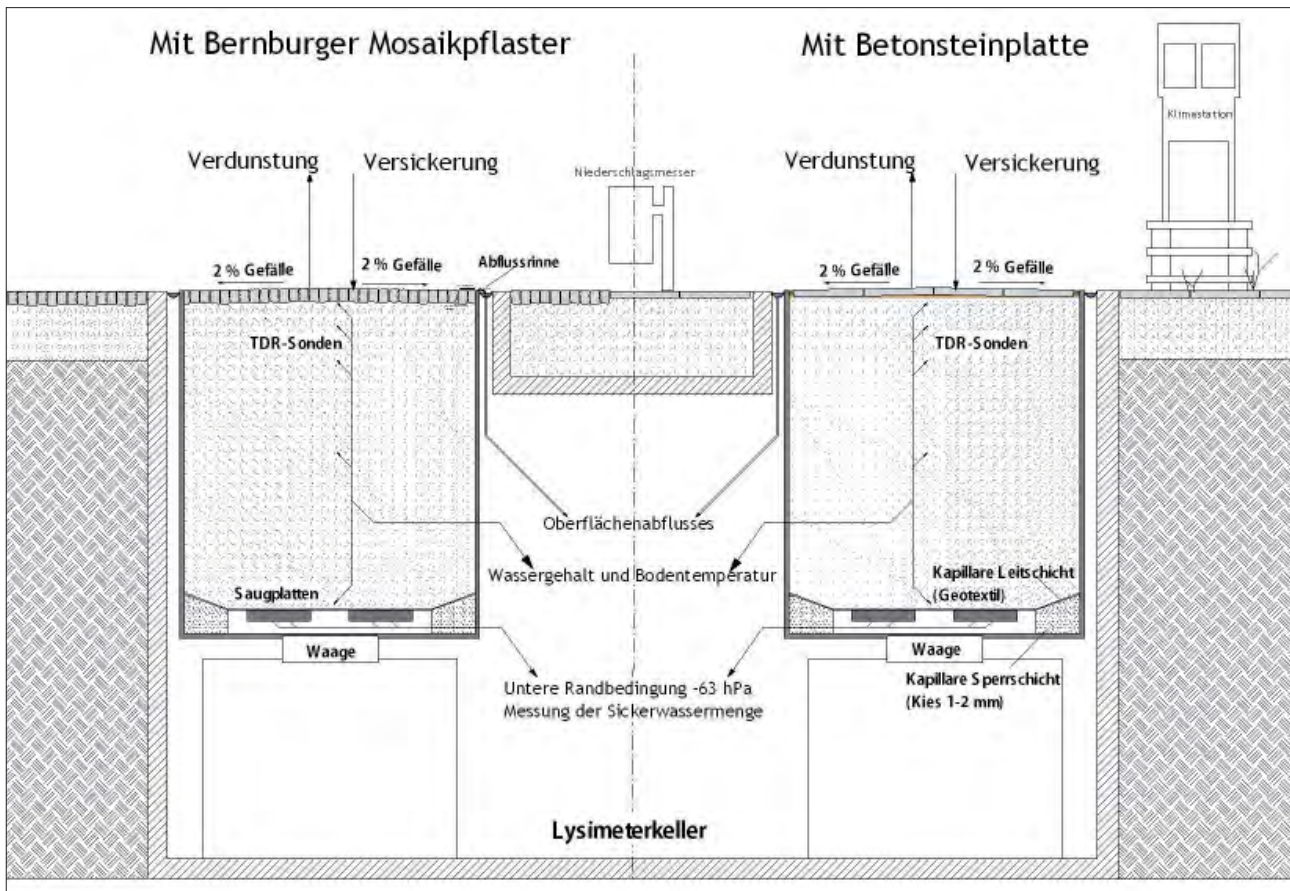


Abbildung 3: Aufbau der wägbaren teilversiegelten Lysimeteranlage.

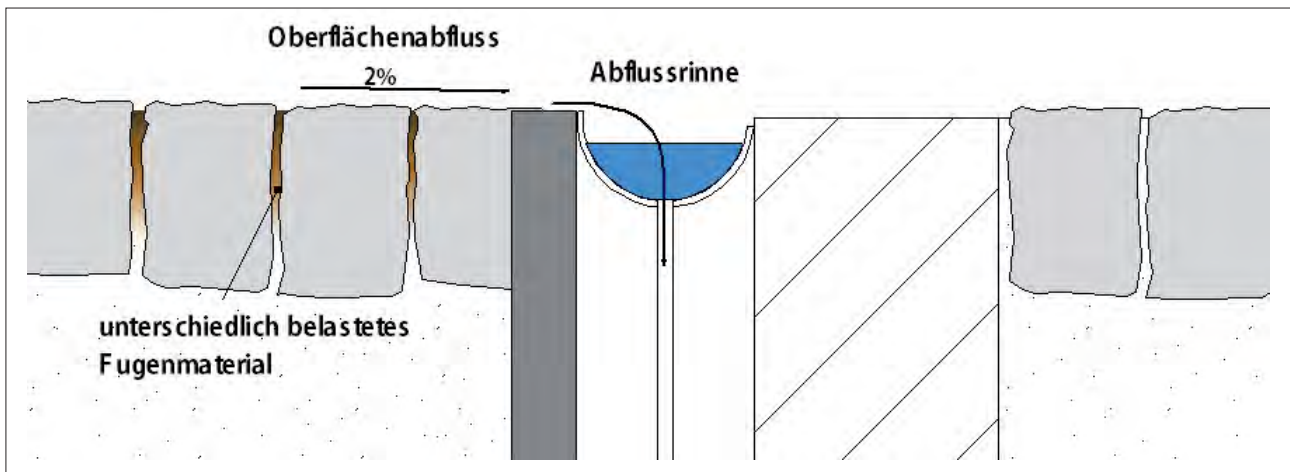


Abbildung 4: Lysimeteroberfläche und Abflussrinne.

abfluss erstmals direkt gemessen werden. Durch Beobachtung der Extremereignisse sollen Ereignisabhängige Abflussbeiwerte bestimmt werden. Sie sollen helfen, hydrologische Modelle zu verbessern und auf dieser Basis städtische Wasserwirtschaftskonzepte zu optimieren und neue Straßenbaukonzepte quantitativ besser zu begründen. Auch das entwässerbare Porenvolumen sowie die bodenhydrologischen Kennwerte des Berliner Gehwegunterbaus können z.B. durch gezielte Auslaufexperimente abgeleitet werden. Ebenso kann etwa die Porenraumkonsolidierung eines Lysimeters erstmals abgeleitet werden.

Ferner ist geplant, Tagesmessungen für unterschiedliche Feucht- und Wärmesituationen gezielt durchzuführen und durch eine parallele Bestimmung der relevanten klimatischen Faktoren eine Kopplung zwischen Wasser- und Energiehaushalt zu ermöglichen. Mit numerischen Modellen sollen schließlich die Einflüsse von Klimawandel bzw. von neuen städtebaulichen Gestaltungen auf den Energie- und Wasserhaushalt teilversiegelter Flächen simuliert und bewertet werden. Auch können die Untersuchungen auf Fragen des Stoffhaushalts ausgedehnt werden.



Abbildung 5: Unterschiedliche Aspekte der teilversiegelten Lysimeteranlagen.

Literatur

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.v., 2005: Arbeitsblatt DWA-A 138, Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. DCM, Meckenheim.

FLÖTER, O., 2006: Wasserhaushalt gepflasterter Straßen und Gehwege. Lysimeterversuche an drei Aufbauten unter praxisnahen Bedingungen unter Hamburger Klima. Dissertation, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, ISSN: 0724-6382, 329 pp.

GEIGER, W. und H. DREISEITL, 2001: Neue Wege für das Regenwasser: Oldenbourg, München.

WESSOLEK, G. und M. RENGGER, 1998: Bodenwasser- und Grundwasserhaushalt. In: Sukopp, H. und Wittig, R. (Hrsg): Stadtökologie. Gustav Fischer, Stuttgart, 186-200.

WESSOLEK, G. und M. FACKLAM, 1999: Aspekte zur Wasserbilanz versiegelter Standorte. In: Burghardt, W., Mohs, B. und Winzig, G. (Hrsg): Regenwasserversickerung und Bodenschutz. Erich Schmidt, Regensburg, 50-55.

Vergleich von mit Lysimetern gemessenen und errechneten Wasserhaushaltsgrößen

Juliane Seeger^{1*}, Ralph Meißner¹ und Holger Rupp¹

Zusammenfassung

Es wurden berechnete und gemessene Wasserhaushaltsgrößen aus unterschiedlichen Lysimetertypen, die gleichzeitig Referenzgefäße für eine größere Gebietseinheit darstellen, sowohl untereinander als auch mit der auf der Grundlage von gewonnenen klimatischen Daten errechneten Grasreferenzverdunstung verglichen. Mit beiden Lysimetertypen ist es möglich, Wasserhaushaltsgrößen für eine größere Gebietseinheit zu ermitteln. In Perioden mit einem jährlichen Niederschlagsangebot über 600 mm stimmen die ermittelten Evapotranspirationswerte aus Lysimetern gut mit den berechneten Werten der Grasreferenzverdunstung überein. Entgegen den Erwartungen kann es bei vergleichsweise hohen Tagestemperaturen im Januar und Februar (bis zu 10 °C) zu mehrfach höheren Werten der tatsächlichen Evapotranspiration im Vergleich zur Grasreferenzverdunstung kommen.

Summary

Both calculated and measured soil water budget parameters of different lysimeter types were compared. The lysimeters were considered as the reference for larger field areas. The results of the different lysimeter types were internally compared and faced with the grass reference evapotranspiration based on climatic data. Water budget parameter for larger entities could be identified by the results of both lysimeter types. The evapotranspiration measured by lysimeter corresponds to the calculated values of grass reference evapotranspiration if the annual precipitation exceed 600 mm. Contrary to our expectations, the actual evapotranspiration can multiple exceed the grass reference evapotranspiration if the average daytime temperatures in January and February were comparatively high (up to 10 °C).

Einleitung

Lysimeter sind geeignete Instrumente zur Bestimmung von Wasserhaushaltsgrößen. Dabei stellt die Evapotranspiration in der Wasserhaushaltsgleichung neben dem unterirdischen Abfluss das am schwersten zu quantifizierende Glied dar und ist für Hydrogeologen und Wasserwirtschaftler wegen ihrer defizitären Wirkung für die Grundwassererneuerung von großer Bedeutung. Mit nicht wägbaren Lysimetern ist es möglich, unter zur Hilfenahme der Wasserhaushaltsgleichung langjährige Mittelwerte der Evapotranspiration zu berechnen. Dabei ist es wichtig, die Höhe der Niederschläge genau zu bestimmen. Bei der in wägbaren Lysimetern direkt messbaren tatsächlichen Evapotranspiration hängt die Genauigkeit der ermittelten Werte stark von der Präzision der Wägetechnik ab. Eine wichtige Kontrollgröße bei der Übertragung von Erkenntnissen aus Lysimeterversuchen auf größere Gebietseinheiten ist der Vergleich mit Ergebnissen aus Berechnungen der Grasreferenzverdunstung auf der Grundlage von gewonnenen klimatischen Daten. Unter den Bedingungen eines niedrigen Bewuchses und ohne Wasserstress im Boden (vorwiegend in den Wintermonaten und im zeitigen Frühjahr) gibt die Grasreferenzverdunstung annähernd die tatsächliche Evapotranspiration eines Standortes an.

Sowohl langjährig vorliegende gemessene (Niederschlag, Sickerwassermenge) als auch errechnete (Grasreferenzverdunstung) Wasserhaushaltsgrößen bieten die Möglichkeit, Erkenntnisse über Entwicklungstrends zu erlangen, die

im Rahmen der Diskussionen über die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die ober- und unterirdische Abflussbildung einer größeren Gebietseinheit relevant sind. Dabei liegen bisher kaum eindeutige Informationen über sich daraus ergebende Änderungen der Wasserhaushaltskomponenten im regionalen Maßstab vor.

Zwei verschiedene Lysimetertypen auf der Lysimeterstation des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung GmbH - UFZ in Falkenberg, die gleichzeitig Referenzlysimeter für ein in unmittelbarer Nähe befindliches Kleineinzugsgebiet darstellen, sowie eine integrierte Wetterstation, bieten gute Möglichkeiten gemessene und berechnete Wasserhaushaltsgrößen auf zwei Skalenebenen zu vergleichen. Darüber hinaus ist es auf der Basis von Langzeitlysimeterversuchen auch möglich, Erkenntnisse über Entwicklungstrends von Wasserhaushaltsgrößen zu erlangen.

Material und Methoden

Zur Bestimmung der langjährigen mittleren tatsächlichen Evapotranspiration (Eta) werden seit 1986 zwei nicht wägbare Grünlandlysimeter Lys 3 und 4 (Kastenlysimeter, 1m² Oberfläche, 125 cm nutzbare Tiefe, Bodenart SL, mittleres Düngungsniveau, unbewässert) genutzt. Als Berechnungsbasis dient dabei die Wasserhaushaltsgleichung unter Vernachlässigung der Wasservorratsänderung:

$$\begin{aligned} \text{Eta} &= \text{Po} - \text{SW} && \text{Gl. 1} \\ \text{Po} & \text{ - korrigierter Niederschlag} \\ \text{SW} & \text{ - Lysimetersickerwasser} \end{aligned}$$

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department Bodenphysik, Lysimeterstation Falkenberg, Dorfstraße 55, D-39615 FALKENBERG

* Ansprechpartner: juliane.seeger@ufz.de

Die Niederschlagsmenge wird in einem Hellmann-Regenmesser in einer Aufstellhöhe von 1 m gemessen. Der auf der Station direkt ermittelte Korrekturfaktor zwischen der Aufstellhöhe von 1 m und Erdbodenniveau beträgt 9%.

Seit 2002 werden mit wägbaren monolithisch befüllten Lysimetern Wasserhaushaltsgrößen direkt ermittelt. Dabei werden die Ergebnisse aus zwei Grünlandlysimetern Lys 211 und 212 (1 m² Oberfläche, 200 cm nutzbare Tiefe, Bodenart S, mittleres Düngungsniveau wie Lys 3 und 4) mit integrierter innovativer Wägetechnik (Wägegenauigkeit 20 g) und einer online Sickerwassermengenmessung dazu genutzt, um nach Gl. 2 die ETa auch für kurze Zeitabschnitte direkt zu bestimmen.

$$E_{ta} = \frac{P_o - SW - \Delta W}{\Delta t} \quad \text{Gl. 2}$$

ΔW - Änderung des Wasservorrates

Δt - beliebiger Zeitabschnitt

Alle vier in diese Auswertung einbezogenen Lysimeter stellen aufgrund der darin enthaltenen vergleichbaren Bo-

denarten Referenzlysimeter für ein 24 km² großes Kleineinzugsgebiet „Schaugraben“ dar. Dabei wird durch die räumliche Nähe von 15 km zur Lysimeterstation auch von ähnlichen klimatologischen und hydrologischen Bedingungen ausgegangen. Die Bewirtschaftungsweise der Lysimeter ähnelt der im Kleineinzugsgebiet.

Komplettiert wird die Ermittlung von Wasserhaushaltsgrößen seit 1994 durch die Berechnung der täglichen Grasreferenzverdunstung auf der Grundlage stationseigener meteorologischer Daten.

Ergebnisse

Ein für den Versuchszeitraum von 2004 bis 2007 durchgeführter Vergleich jährlicher Sickerwassermengen der integrierten vier Lysimeter zeigt in *Abbildung 1* erwartungsgemäß Unterschiede zwischen den jeweiligen Parallellysimetern und in Abhängigkeit vom Niederschlagsdargebot auch in den einzelnen Versuchsjahren. Die Differenzen zwischen den Lysimetertypen können durch die voneinander abweichende Bodenart (2 Lysimeter SL, 2 Lysimeter S) erklärt werden. Trotz dieser Unterschiede lagen die mittleren

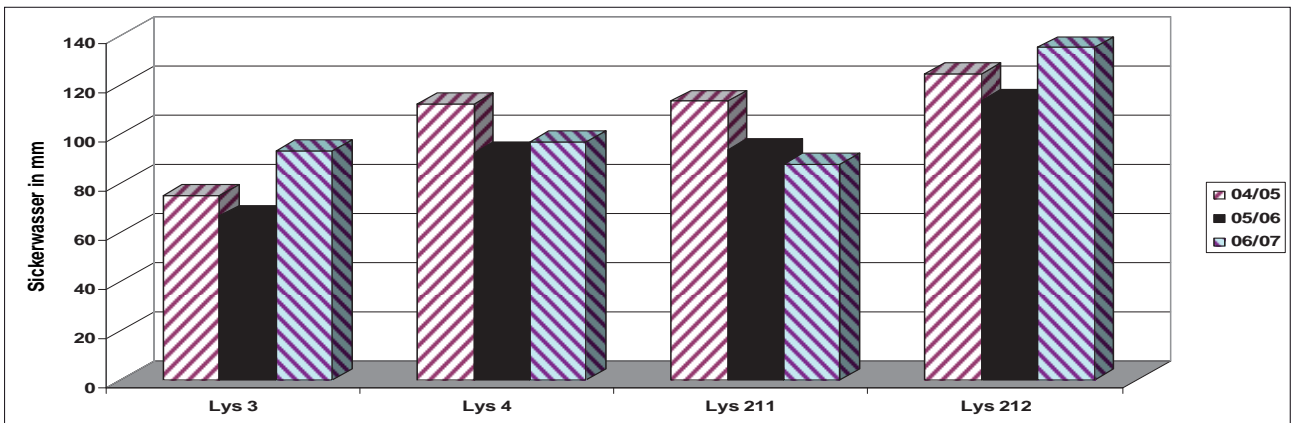


Abbildung 1: Vergleich jährlicher Lysimetersickerwassermengen im Zeitraum von 2004 bis 2007

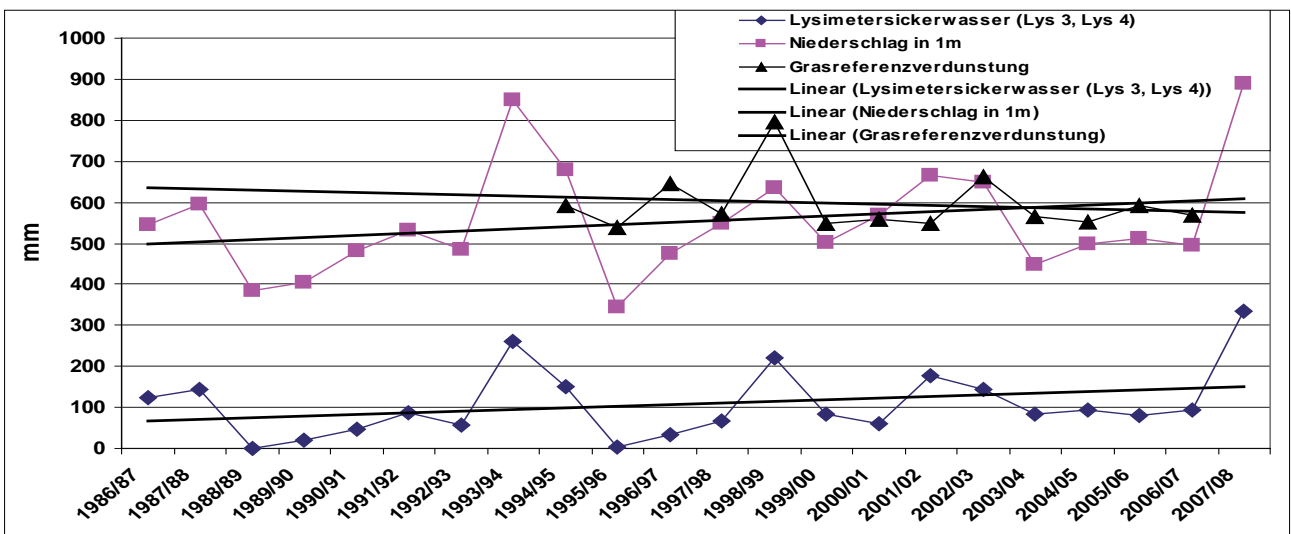


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf von Jahreswerten der Grasreferenzverdunstung und der Lysimetersickerwassermengen in Abhängigkeit vom Niederschlagsdargebot im Zeitraum von 1986 bis 2008

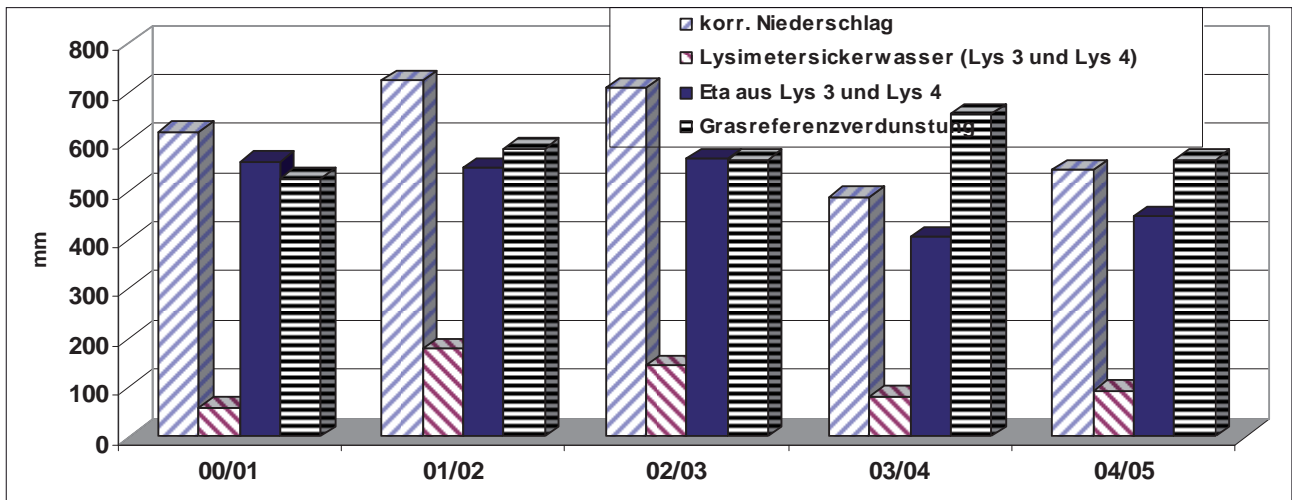


Abbildung 3: Vergleich von gemessenen und unterschiedlich errechneten Wasserhaushaltsgrößen in Abhängigkeit vom Niederschlagsdargebot im Zeitraum von 2000 bis 2005

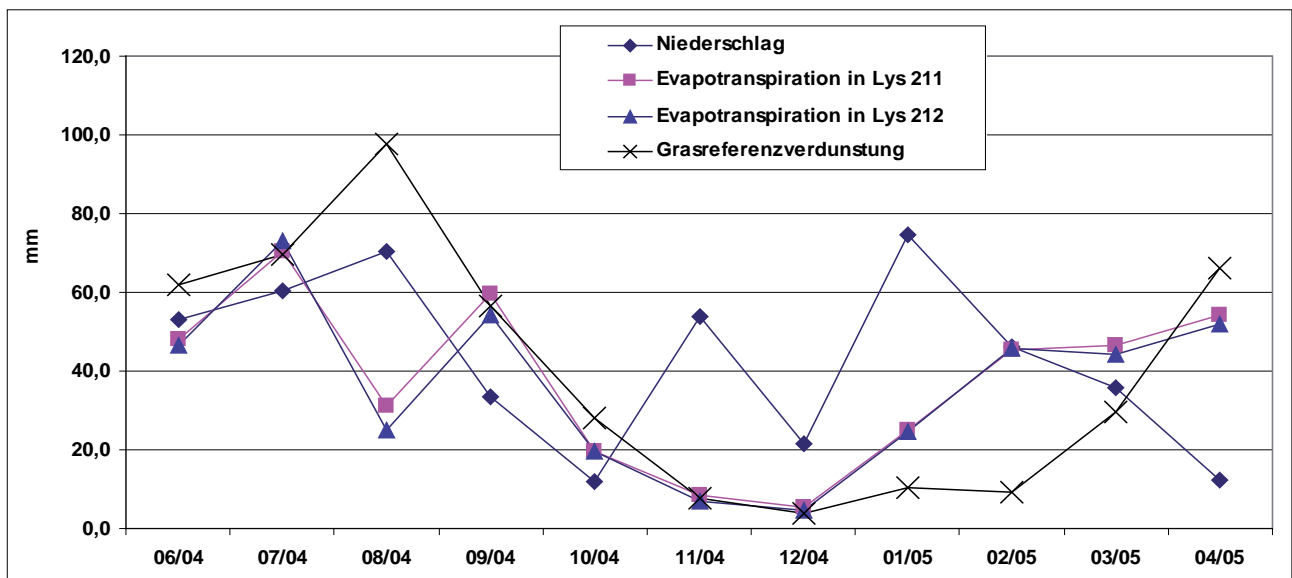


Abbildung 4: Vergleich von gemessener monatlicher ETa und errechneter Grasreferenzverdunstung in Abhängigkeit vom Niederschlagsdargebot für das Versuchsjahr 04/05

Sickerwassermengen mit Werten zwischen 78 und 124 mm alle in einem Schwankungsbereich, der sich mit eigenen Messwerten aus dem Untersuchungsgebiet „Schaugraben“ sowie mit denen aus der Literatur deckt. Das gilt auch für die zwischen 1986 und 2008 gemessene mittlere Sickerwassermenge der Lys 3 und 4 in Höhe von 108 mm. Diese Messgröße bildet wiederum die Grundlage, um gemeinsam mit der mittleren Niederschlagsmenge von 554 mm - korrigiert auf 604 mm - nach Gl. 1 einen langjährigen Mittelwert für die ETa von 496 mm zu errechnen.

Dabei zeigt die graphische Darstellung der zeitlichen Entwicklung dieser Sickerwassermengen in Abhängigkeit vom Niederschlagsdargebot einen ansteigenden Trend beider Wasserhaushaltsgrößen (Abbildung 2). Das gilt sowohl für die Sommer- als auch für die Winterniederschläge, so dass die für das Gebiet prognostizierte Abnahme des sommerlichen Wasserdargebotes aufgrund der Klimaveränderung bisher nicht bestätigt werden kann. Bei der Grasrefe-

renzverdunstung ist eine leicht abnehmende Tendenz zu verzeichnen.

Eine Gegenüberstellung dieser Grasreferenzverdunstung mit berechneten Werten für die ETa aus den Versuchsgläsern Lys 3 und 4 für einen Zeitraum von 2000 bis 2005 lässt in Abbildung 3 erkennen, dass in Perioden mit einem Niederschlagsaufkommen >600 mm pro Jahr (korr. Niederschlag) beide Größen nahezu identisch sind. So betrug der gesamte Unterschied zwischen der gemessenen und der berechneten Evapotranspiration (Grasreferenzverdunstung) im Zeitraum von 2000 bis 2003 lediglich 3 mm. Während also bei fehlendem Wasserstress im Boden die Grasreferenzverdunstung der ETa eines Standortes nahe kommt, werden in Versuchsjahren mit niedrigem Niederschlagsaufkommen in den Lysimetern erheblich geringere Evapotranspirationen im Vergleich zur Höhe der Grasreferenzverdunstung gemessen. So wurde in den Versuchsjahren 2003/04 und 2004/05 mit 19 % bzw. 10 % geringerem Niederschlags-

aufkommen (gemessen am langjährigen Mittel) eine um 38 % bzw. 20 % geringere Evapotranspirationshöhe auf den Lysimetern ermittelt.

Der Jahreswert aus den mit Hilfe von Gl. 2 ermittelten täglichen Eta-Werten von Lys 211 und 212 fällt dagegen im Vergleich zu Werten der Grasreferenzverdunstung für das Versuchsjahr 2004/05 (bedingt durch einen technischen Defekt liegen für den Mai 2004 keine Werte vor) lediglich um 10 % geringer aus.

Aus *Abbildung 4* wird aber deutlich, dass auch in Versuchsjahren, die sich insgesamt durch ein geringeres Niederschlagsaufkommen auszeichnen, die Grasreferenzverdunstung und die ETa eines Standortes zumindest zum Teil in den Wintermonaten - November und Dezember - erwartungsgemäß identisch sind. Dagegen konnten die für die Monate Januar und Februar ebenfalls erwarteten vergleichbaren Größenordnungen aufgrund hoher mittlerer Tagestemperaturen (bis ca. 10 °C im Januar) nicht bestätigt

werden. Es wurden vielmehr im Januar und Februar mit ca. 25 bzw. 45 mm 2,5 bzw. 4,5fach höhere Eta-Werte im Vergleich zur Grasreferenzverdunstung ermittelt.

Schlussfolgerungen

- Ergebnisse aus Langversuchen mit einfach konstruierten Lysimetern lassen es zu, sowohl langjährige mittlere Wasserhaushaltsgrößen als auch Entwicklungstrends für größere Gebietseinheiten zu ermitteln.
- Unter den vorliegenden Versuchsbedingungen sind in Jahren mit einem Niederschlagsangebot über 600 mm die ermittelten ETa in den Lysimetern mit den Werten der Grasreferenzverdunstung nahezu identisch.
- Auch in Jahren mit geringem Niederschlagsaufkommen (gemessen am langjährigen Mittel) können vergleichsweise hohe Temperaturen im Winter bzw. im zeitigen Frühjahr zu mehrfach erhöhten monatlichen Eta-Werten gegenüber Werten der Grasreferenzverdunstung führen.

The acoustical methods of precipitation stimulations in natural clouds to get rains for agriculture

Tamara Tulaikova^{1*}, Armin Raabe², Oleg Ivanov³ and Jalil Sahibgareev⁴

Abstract

The different methods for stimulation precipitation from natural clouds are discussed to get rains. Presented technologies are shortly described. Artificial rains could be used as for agriculture, as for air purification and cooling directly in the atmosphere in warm and drought days.

Method background

Active methods for precipitation stimulation inside natural clouds are based on the fact that a typical cloud (~1 km³) can contain thousands of tons of water, because cloud moisture is about 1÷100 gram/m³. Only quarter of this water mass falls down during natural rains, so artificial precipitation enhancement for improving cloud seeding becomes more attractive every year. The most popular methods used today for creating artificial rain are the shrinking of hygroscopic small particles or of a special salt solution for 'warm' clouds and the introduction of glaciogenic substances into 'cold' clouds [1,2]. The aforementioned methods have been developed and thoroughly studied in experiments in Russia with high efficiency in practical applications [3]. They have shown good results during artificial stimulation enhancement, as well as a decrease of rain if necessary. There is short review with introduction to indicated topic and results. From the analysis of the relationship between the state of equilibrium for the cloud condensation nuclei and the relative air humidity, the resulting preference of poorly soluble substances was found for the introduction of the nuclei generated by artificial condensation for the modification of warm clouds and fogs [4,5] in addition to classical silver iodide and other methods. This study shows a fast increase of drops with radii ranging from 0.01 ÷ 0.1 µm up to 1 ÷ 3 µm. Such growth occurred inside the cloud in the first fifteen seconds after introducing the hygroscopic substances. The same first seconds demonstrate also fast changes in the main cloud characteristics, as the decrease of supersaturation and spectrum dispersion. This is accompanied by an increase of the radii in a drop. However, after the first major variations of these parameters they slowly increase with the same tendencies up to half an hour. This method proves to be the especial reorganization within small drops only and water vapors in the first few seconds, but it shows later a poor efficiency for the mentioned hygro-

scopic mechanisms. Further condensation and coalescence processes could be effectively continued with vibrations of the drop ensemble through the application of acoustical power inside the clouds. Each artificial hygroscopic particle or its natural analogous conglomerate is already completely saturated with water, so additional motions are necessary as a second step.

The acoustically influence to the area of cloud with aerosols tends to fast coalescence of drops, precipitation and seeding. The method of acoustically influencing natural aerosols, mists and fogs, was widely used from 1940s and counteracting industrial pollution was the central purpose for the development of this methods, also the acoustically influence for fogs and mists and they proved the high efficiency of this method [6]. However, this method was not later widely applied in practice, probably due to high noise in industrial areas and resulting impracticality of the method that prevented its real utilization. Previous result study shows three main disadvantages for today. Firstly, a complete theory that is strongly connected to the experiments in the real atmosphere should be further developed and improved. Secondly, most experiments were only carried out near the ground, but the method could be more effective by directly placing the sound generator inside a natural cloud at a height of 3 to 5 km into the region with supersaturated water steam. The sound generator should be placed inside a cloud through the use of modern aircraft. Particularly useful there are helicopters hovering in one area during a necessary time, but parachutes, balloons and planes would also be suitable, according to our calculation of times as 5-30 minutes.

The most interesting variant is a joint utilization of both methods at the same time, which means that hygroscopic particles and acoustic influence, which would be directly applied inside clouds to increase the precipitation significantly. The main idea behind combining both methods is that each has different functions that can reinforce and improve the overall effectiveness. Sound waves can easily provide additional motion for drops with greater velocities. The main kinds of movement for water drops triggered by sound waves are analyzed: (1) a drop's vibrations together with gas, (2) the circular motion together with gas and also the turbulent motion together with gas, (3) different kinds of a drop's drift. The drift can be caused by a number of

¹ Moscow Institute of Physics & Technology, 9 Institute per., Dolgoprudny, 141700 MOSCOW, Russia

² Leipzig University, Institute of Meteorology, Stefan-Str. 3, D-04103 LEIPZIG

³ Lomonosov Moscow State University, GSP-2, Leninskie Gory, 119992 MOSCOW, Russia

⁴ Rushydromet, NPO „Taifun“, 82 Leninsky Prospect, Kaluga region, 240038 OBNINSK, Russia

* Correspondence: tulaik@yandex.ru

phenomena, such as: (3.1) the pressure of sound irradiation, (3.2) pulses of viscosity, (3.3) no symmetry of the sound-waves and other phenomena. Different additional forces and special kinds of interactions between drops will appear in the case of sound waves with greater power. And besides, the pressure pulses in sound waves can be exploited as additional increase of supersaturation and condensation [6-7]. Optimal frequencies were found during this regime of pulsing pressure: in spite of the additional air pressure disappears in some moments, but the condensation is not stopped then special frequency/power conditions could be kept. All mentioned phenomena increase the condensation and coalescence processes. Calculations show for example, that low power sound waves with an power of 0.1 W/cm² and $f = 1$ Hz can generate air vibrations with driving amplitudes for a water drops of ~ 35 to 57 mm with a radius ranging from 1 to 5 μm ; high-power drift velocities are up to 40 cm/sec. In addition, acoustics/hygroscopic joint action could increase the variety of weather conditions for which these methods could be successfully applied to get the rain. Usually hygroscopic particles are dispersed by an aircraft into the lowest part of a natural cloud where rising air flows must have an air velocity of about 2 m/sec, which means that in the absence of rising air flows this method becomes ineffective. High acoustical power increases the area and real cases of a particular drop where hygroscopic methods are involved. The precise calculation of the regimes of artificial rain will bring the controlled cooling of the air within approximately the lowest height above the ground [8].

Resulting regimes for optimal acoustics inside clouds

I. The next promising regime was found through the calculations of the low-frequency vibrations [8,9], for example there are presented at *Figures 1* for frequencies of $f = 10$ to 100 Hz with acoustical power up to 1 kW/m². One can see that such regimes are very good for vibrated coalescence, because they can provide high velocity and drop's amplitudes. The advantage of a low-frequency regime is that no high acoustical power is required; but low power acoustical generator is simpler with respect to device design and in the later practical realization. Such regimes are particularly

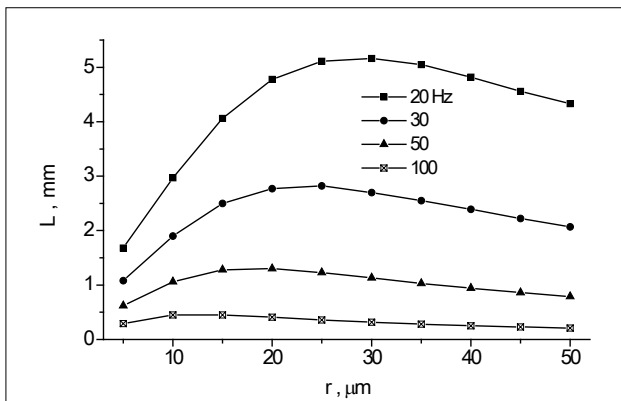


Figure 1: The drop's displacement and velocity due to acoustical irradiation; these parameters are: frequency $f = 20, 30, 50$ and 100 Hz with a acoustical power $Q = 0.1$ W/cm².

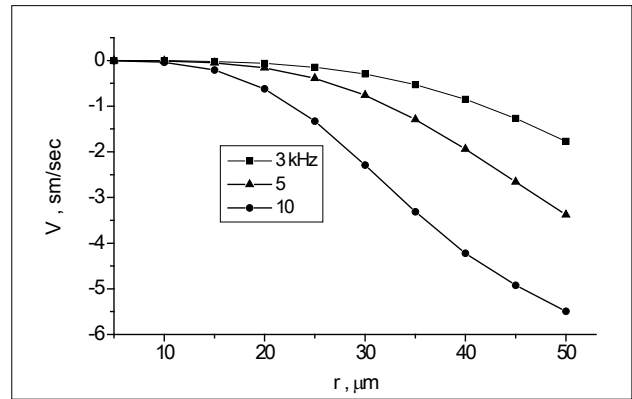


Figure 2: Asymmetry-wave drift V_h in the sound wave with frequency 3, 5 or 10 kHz and power $Q = 1$ W/cm². (Negative values means the direction of drop's motion to the sound source.)

relevant inside natural clouds. According to measurements the number of water drops inside natural clouds with typical radii of $r = 1$ to 50 μm is $N \sim 64 - 600$ in 1 cm³. A simple estimation for average number of ~ 300 cm⁻³ show the area occupied by one drop is about 3.3 mm³, so the approximate distance between neighboring drops is $L_m \sim 1.5$ mm. As a result, these calculation permit finding the first optimal interval for practical utilization within the regimes with low acoustical power and no high frequencies $f \approx 20$ to 50 Hz. In addition to presented data, calculations show that values for both considered parameters L, V will rapidly go up when the applied power Q will be increased according to these equations and results. For example, the comparison the high frequency acoustical influence in the range of several kHz with the low frequency acoustical influence in *Figure 1* which has the same acoustical power $Q = 1$ kW/m² were done. There is more attractive low-frequency regimes with $10 \div 50$ Hz due to higher displacement $L \approx 3.6 \div 0.6$ mm in comparison with very small one $L = 14$ μm during 1 kHz influences for the same drops of a radius of $r = 5$ μm . So, the acoustical power should be increased significantly in kHz regimes.

II. The character of the motion for the rain drops caused by the high power of acoustical waves changes from oscillation to motion in one direction (drift). Most experiments with high acoustical power were performed in a range of 1 to 10 W/cm² with high frequencies of 0.5 to 30 kHz, where optimum was found near 3 - 4 kHz. The drift based on the asymmetry of sound waves provides the highest velocities for considered cloud drops $V_h \approx 10 \div 40$ cm/sec in comparison with air viscosity and other kinds and reasons of the drifts. There sinusoidal wave is changed to a triangular shape due to high acoustical power. For the mathematical interpretation the triangular form of the sound wave should be presented approximately as the sum of the first and second harmonics P_1 and P_2 , of the appropriate Fourier spectrum, their ration is titled h in the following. This wave asymmetry becomes greater with increasing distance from the source x , also with its frequency f and sound power Q ; and wave profile becomes more abrupt according to the distance up to certain overflow region x_m . For example, then asymmetry strong and $h = 0.25, \Psi = \pi/2$ this kind of drift show enough

good velocity $V \approx 0.01 \div 16$ cm/s for the drops of $r = 10 \div 50$ μm then $Q = 1$ kW/m² and $f = 5$ kHz (*Figure 2*). Another mechanisms for the drop's drift was indicated also, as sound pressure to drops as the surrounding viscosity. First one provides negligible small values of drift, but air viscosity can give speed up to 5 cm/sec. There viscosity variations follow to the temperature variations in sound waves with producing an additional one-directional force, which means physically the difference of the Stock's reaction during horizontal oscillating air motion in sound wave. Calculation show also that lifting of the sound generator to an altitude of several km with a specially equipped modern aircraft would be very effective due to the significant increase of the method's efficiency according our calculations. This has the additional advantage of reducing the noise levels for citizens near the ground.

Conclusion

The series of technologies for precipitation stimulation inside natural clouds was described. Mechanisms of acoustical driving for typical water drops in clouds were analyzed. Two intervals of optimal regimes were found as low frequency and low acoustical power (I) or high frequency with necessary high power (II).

References

1. RAUBER, R.M. et al., 2007: Rain shallow cumulus over the ocean. BAMS, v.88, 1912-1928.
2. NEVZOROV, A.N., 2006: The inside mechanisms for the crystallization of meta stable liquid water and its influence to the cloud processes. Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics. V.42, 830-838.
3. SHMETER, S.M. and G.P. BERYULEV, 2005: Efficiency of cloud and precipitation modification with hygroscopic aerosols. Rus. Meteorology and Hydrology, N.2, 43-60.
4. ROMANOV, N.P. et al., 2006: On the use of poorly soluble hygroscopic substances for modification of warm clouds and fogs. Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics. V.42, 80-91.
5. DROFA, A.S., 2006: Formation of cloud microstructure: the role of hygroscopic particles. Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics. V.42, 355-366.
6. MEDNIKOV, E.P., 1963: Acoustic coagulation of aerosols. ANUSSR-press, Moscow.
7. GRIGORIEV, V.G. and E.T. PROTASEVICH, 1994: The condensation-coalescence mechanism. Tomsk, Nauka, Russia.
8. GLADUN, A.D. and T.V. TULAIKOVA, 2008: Artificial rains for the cooling and cleaning of the astmosphere, Rus. Science technology, V.9, N.3, 94-96.
9. TULAIKOVA, T., A. KRISHNAN and S. AMIROVA, 2008: Acoustical method for precipitation stimulation inside natural clouds." IAMO-forum, Halle, Germany, Conf.Proceedings ISBN 978-3-938584-29-3.

Soil moisture conditions in lysimeter on the Water Pumping Station Kleče

Vesna Zupanc^{1*}, Branka Bračič-Železnik² and Marina Pintar¹

Summary

Soil moisture conditions are an important interface between agriculture and the environment. The optimum soil moisture conditions for plant growing are around field capacity. Both significantly high or significantly low soil moisture contents have agronomic and environmental consequences, such as reduction in plant growth, decrease in the nitrogen uptake efficiency and more. Measurements of the soil moisture conditions in the lysimeter on the premises of the Water Pumping Plant Station Kleče in Ljubljana, Slovenia are currently not possible. Therefore soil water balance was calculated using a predictive model Soil Moisture Deficit simulator to estimate soil moisture conditions within the lysimeter. Observed period 2000 - 2007 showed increase in soil moisture deficit in several parts of the year. Annual amount of precipitation of the observed period was substantially lower than the average annual precipitation of the standard meteorological period 1961 - 1991.

Keywords: water balance, soil moisture, modeling

Introduction

Soil moisture conditions are an important interface between agriculture and the environment (SCHULTE et al. 2005), as they impact vegetation season length, plant growth rate, nutrient uptake, as well as cycling of the chemicals and the loss thereof from the soil to the environment. The optimum soil moisture conditions for plant growing are around field capacity and both significantly high or significantly low soil moisture content has agronomic and environmental consequences. Soil moisture content is an important part of the soil water balance. For determination of soil moisture content in the field soil moisture measurements are necessary. However, such measurements are expensive and sometimes not possible. In such cases, the use of computer model is extremely useful method for determination of soil moisture conditions. One disadvantage of such models is that they can have high data input demand i.e. SWAP (VAN DAM et al. 1997). SCHULTE et al. (2005) developed a hybrid model to predict soil moisture deficit (SMD) of the top layer (rooting zone) of grasslands on contrasting soil types in Ireland with the objective to formulate a predictive model with minimum requirements for input parameters in order to maximize its practical applicability.

Lysimeter station in Kleče, Ljubljana, which is situated on the premises of the main Water Pumping Station of Water

and Waste Water Public Utility Supply of Ljubljana (*Figure 1*), was built in 1991 for water balance studies. Measurements of the soil moisture conditions in the lysimeter are currently not possible. In the paper we present the results of the SMD model simulation for Kleče soil with green cover.

Material and methods

Lysimeter station

Concrete container of the lysimeter is 2.0 m deep with 0.9 m radius, filled with autochthon soil, sand (pebbles of 2-4 cm diameter), gravel and drainage material in 50 cm layers respectively, total volume of the lysimeter is 5.09 m³, and volume of pores is 1.45 m³. At the bottom of the container outflow drain pipe leads into adjacent collecting shaft. Outflow is measured with tipping bucket inside the adjacent bunker (*Figure 1*).

Daily measurements of rain, air humidity, average air temperature and lysimeter outflow are measured. Recordings of the measurements are available since 2000. Mean annual precipitation in the study area for 1971 - 2000 period is 1435 mm (EAS, 2008), measured at Ljubljana (299 m a.s.l., N 46°3'57", E 14°31'2"), with average annual T of 10.2 °C.

Soil moisture deficit (SMD) calculator

Model

Model distinguishes three different hydrological classes of soil, well drained, moderately drained and poorly drained soils, which can be determined by observation of their hydrological status during winter (SCHULTE et al. 2005). SMD is defined as the necessary water amount (mm), deriving from either precipitation or irrigation, to replenish soil water content to field capacity and can be calculated as soil water mass balance, which proved to be a very useful tool in environmental studies for assessment of soil water deficit (BERGANT and KAJFEŽ-BOGATAJ 1998). SMD is calculated from cumulative balance of precipitation (P), evapotranspiration (ET) and drainage (SCHULTE et al. 2005):

$$SMD_t = SMD_{t-1} - P + ET_t + Drain$$

Where SMD_t and SMD_{t-1} are soil moisture deficits on day t and day $t-1$ respectively (mm), P the daily precipitation (mm/day), ET_t the daily actual evapotranspiration (mm/day), calculated according to FAO Penman-Monteith equation (ALLEN et al. 1998). Drainage rate (mm/day) is described

¹ University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department for Agronomy, Jamnikarjeva 101, SI-1000 LJUBLJANA

² Public Water Supply Company, Vodovodna cesta 90, SI-LJUBLJANA

* Correspondence: vesna.zupanc@bf.uni-lj.si

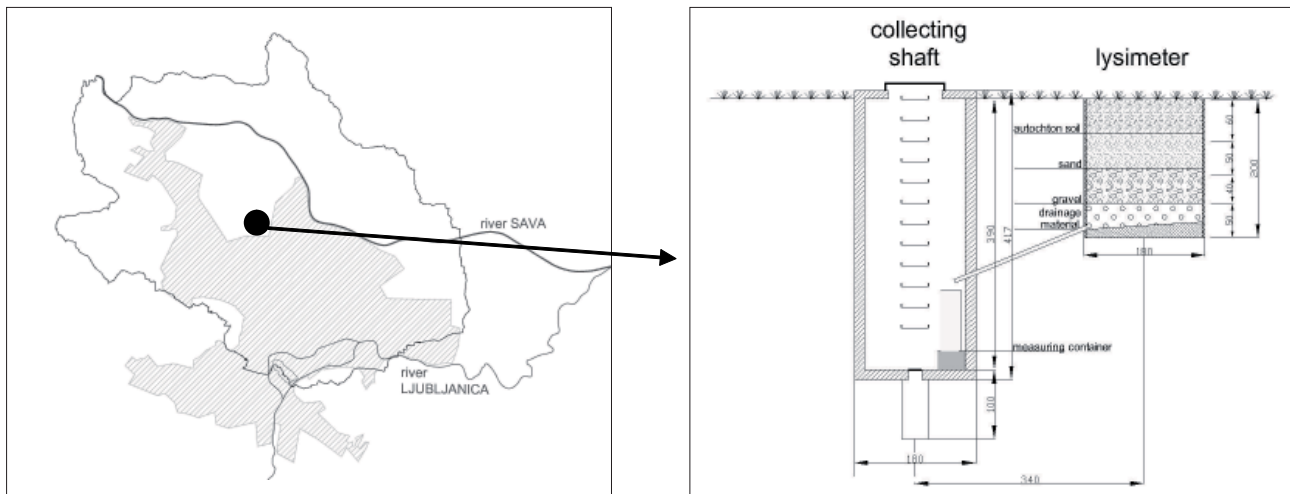


Figure 1: City of Ljubljana, Slovenia with the location of lysimeter station in Kleče (black dot) and lysimeter cross section.

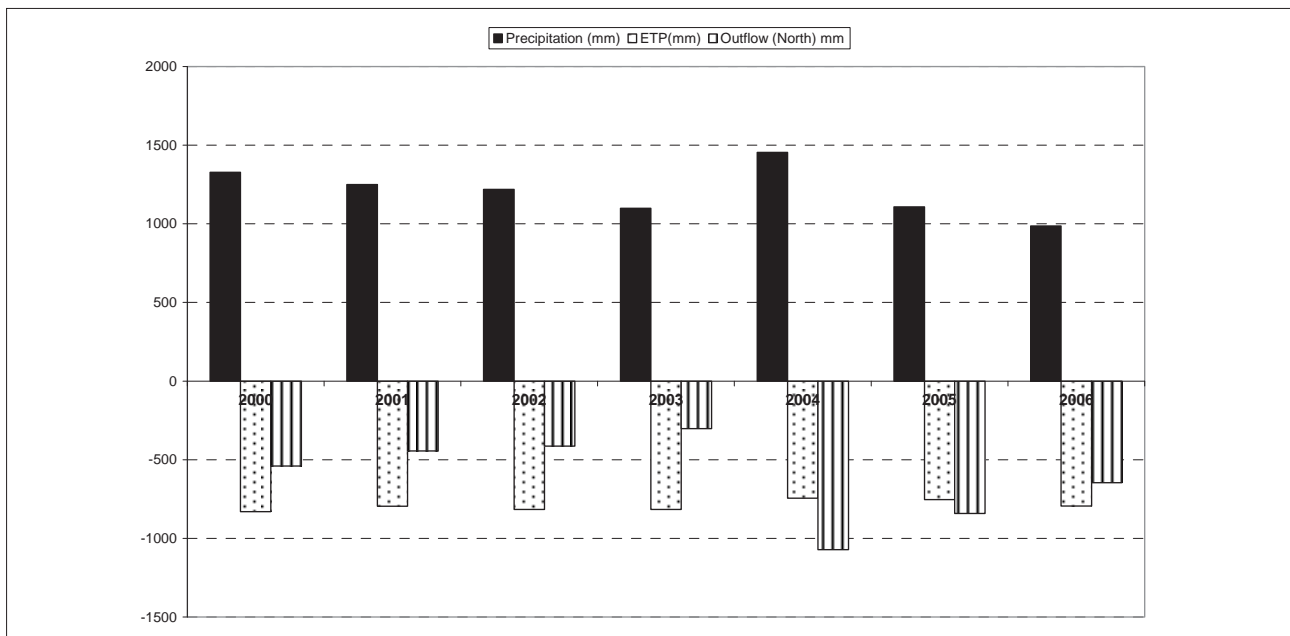


Figure 2: Annual precipitation (mm), evapotranspiration (mm) and outflow (mm) for lysimeter station in Kleče, Ljubljana, Slovenia between 2000 and 2006.

as a linear function of SMD , when $SMD \leq 0$ (SCHULTE et al. 2005).

As SMD simulator employs no soil profile description, beyond hydrological nature of the soil and vague notion that it calculates SMD of the root zone, SMD is difficult to determine. SMD value cannot be directly correlated to soil water status. One possibility is compare measured soil water status with soil water retention characteristics or pedotransfer function, i.e. Van Genuchten's model (VAN GENUCHTEN et al. 1991).

Results

Water Balance

During the standard meteorological period 1961 - 1990 the average air temperature (T_{avg}) in Ljubljana was $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{max}

$14.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{min} $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) and the average annual precipitation 1393 mm. For the observed period 2000 - 2006 the measured parameters on the Lysimeter station in Kleče show higher T_{avg} (T_{avg} $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$), higher extreme minimal and maximal T values (T_{max} $16.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{min} $7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), with lower annual precipitation amount, 1206 mm. The driest years was year 2003 (1091 mm) (Figure 2).

Soil moisture deficit (SMD) simulation results

We compared lysimeter outflow (in mm, Figure 3) and SMD simulation results (in mm, Figure 4) for the year 2006.

Outflow (mm) occurred from March till beginning of May 2006, then again at the beginning of June and mid August - October 2006. Finally, there was outflow at the end of the year in December 2006 (Figure 3).

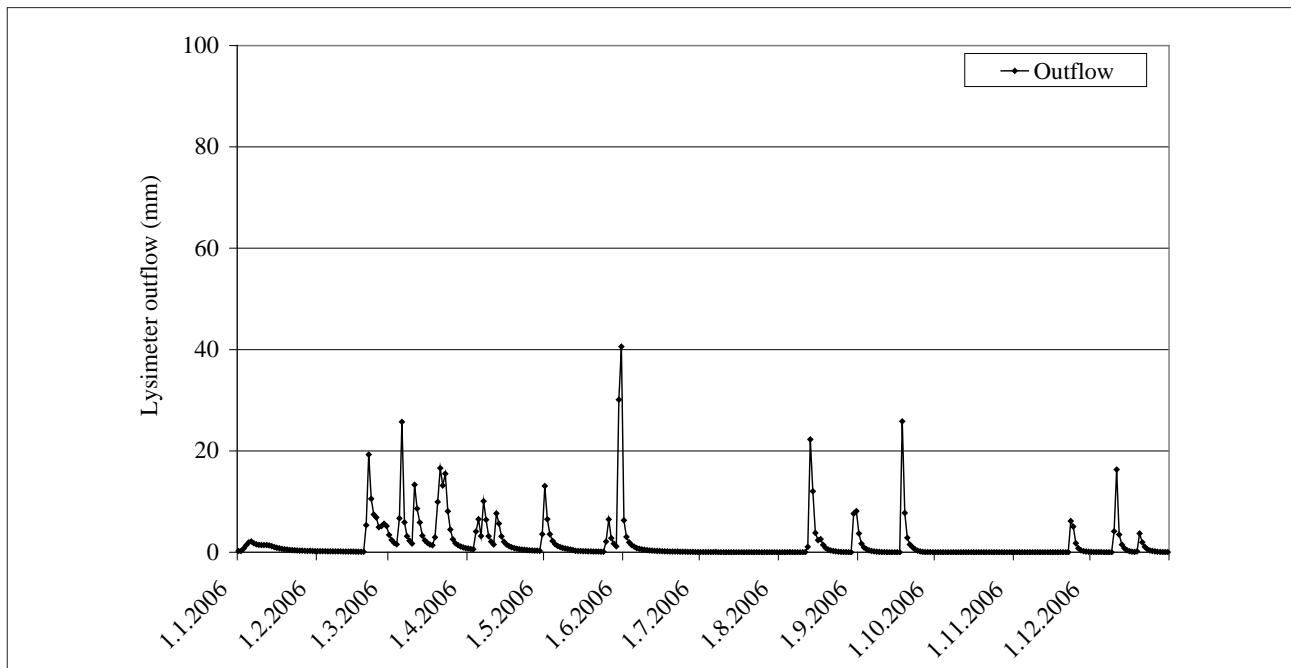


Figure 3: Daily outflow (mm) from lysimeter in year 2006 in Kleče, Ljubljana, Slovenia.

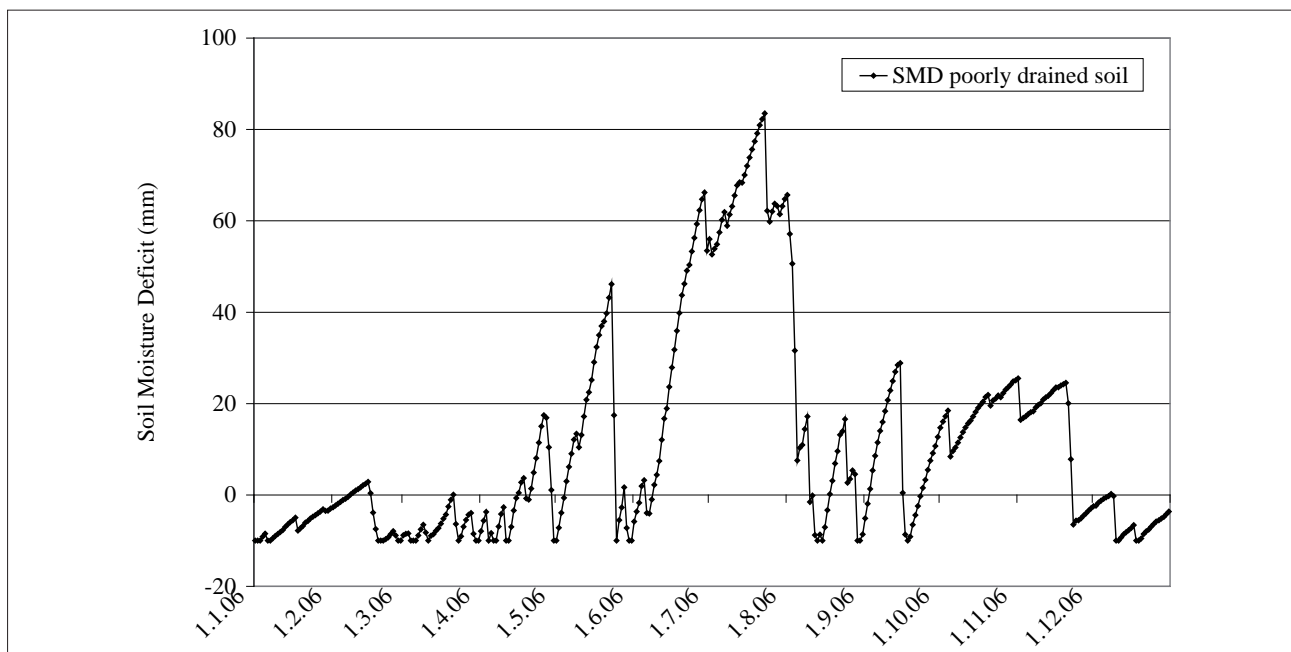


Figure 4: Daily Soil moisture deficit (mm) in lysimeter in Kleče, Ljubljana, Slovenia, calculated with SMD simulator for year 2006.

Simulation results show same dynamic as outflow occurrence (Figure 4), with sever SMD in June and July 2006. However, since there is no input for soil profile description, use of SMD values for actual soil moisture conditions is problematic.

Conclusions

The SMD model is simple and easy to use, with daily meteorological data of precipitation, T_{\min} and T_{\max} as

input. The interface is easy to user friendly and easy to understand. That makes SMD simulator a very useful for clarification of soil water conditions, and assessment of the severity of the SMD. For year 2006 model simulated drainage and outflow showed good accordance, which suggests suitability of the model for calculation of SMD within the lysimeter. For further nitrate leaching studies, the model should be carefully calibrated and validated against measured data.

References

- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH, 1998: Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- BERGANT, K. and L. KAJFEŽ-BOGATAJ, 1998: Possible influence of climate change on the spatial distribution of soil moisture deficit areas in Slovenia. V: 2nd European Conference on Applied Climatology, 19 to 23 october 1998, Vienna, Austria, (Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik, Heft 19, 1998). Vienna: Central Institute for Meteorology and Geodynamics, 1998, str. [1-6].
- SCHULTE, R.P.O., J. DIAMOND, K. FINKELE, N.M. HOLDEN and A.J. BRERETON, 2005: Predicting the soil moisture conditions of Irish grasslands. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*: 44: 95-110.
- VAN DAM, J.C., J. HUYGEN, J.G. WESSELING, R.A. FEDDES, P. KABAT, P.E.V. van WASLUM and P. GROEDIJK, 1997: Theory of SWAP 2.0: simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. Technical document 53. DLO Winand Staring Centre, Wageningen Report 81, Wageningen Agricultural University.
- VAN GENUCHTEN, M.Th., F.J. LEIJ and S.R. YATES, 1991: The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. CA, USSS, USDA: 85 str.
- ZUPANC, V., B. BRAČIČ-ŽELEZNIK and M. PINTAR, 2005: Water balance assessment for lysimeter station based on Water Pumping Station Kleče in Ljubljana = Ocena vodne bilance za lizimetro postajo pri Vodarni Kleče v Ljubljani. *Acta agric. Slov.* Vol. 85: 1, 83-90.

Bericht

13. Gumpensteiner Lysimetertagung 2009

Herausgeber:

Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning

Druck, Verlag und © 2009

ISBN-13: 978-3-902559-31-9

ISSN: 1818-7722