

# Möglichkeiten und Grenzen der Simulation von Wasserhaushaltsgrößen grundwassernaher Standorte mit Lysimetern

Ottfried Dietrich<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Die Steuerung der unteren Randbedingung von Grundwasser(GW)-Lysimetern mittels Mariottscher Flasche kann den typischen GW-Tagesgang grundwassernaher Standorte nicht korrekt reproduzieren. Dieses hat keine direkten Auswirkungen auf die gemessene Verdunstung, allerdings haben Speicheränderung und Zufluss einen unnatürlichen Tagesgang und werden unter- oder überschätzt. Bei Steuerung nach einem gemessenen GW-Stand, werden alle Wasserhaushaltsgrößen korrekt simuliert, wenn die meteorologischen Bedingungen sowie Bodenaufbau und Vegetation im Lysimeter mit dem Referenzmessplatz übereinstimmen. Bei der Steuerung des Zu-/Abflusses als untere Randbedingung des Lysimeters zeigen alle Wasserhaushaltsgrößen im Lysimeter ebenfalls ein natürliches Verhalten. Im Gegensatz zu den beiden anderen Steuerungsarten kann hier auch die Entwicklung von GW-Ständen unter unterschiedlichen Randbedingungen untersucht werden, was für viele ökologische Fragestellungen oder auch Wassermanagementaufgaben von großem Interesse ist.

*Schlagwörter:* Grundwasser-Lysimeter, Lysimeter-Steuerung, Grundwasser-Tagesgang, Verdunstung, Wasserspeicheränderung, Zu- und Abfluss

## Summary

The control of the lower boundary condition of groundwater lysimeters with a Mariotte bottle is unable to reproduce the typical diurnal behaviour of the groundwater level of a shallow water table site. This has no effect on the measured evapotranspiration but the water storage change and the inflow/outflow of the system have an unnatural diurnal behaviour and were under or over estimated. The control of the groundwater level on basis of a measured groundwater level simulates all water balance components correct if the meteorological conditions, soil and vegetation of lysimeter and reference place agree. The control of inflow and outflow as lower boundary condition of a lysimeter creates also correct water balance components in the lysimeter. Compared to the other control systems this system enables the investigation of the behaviour of the groundwater level themselves. This is an interesting option for many ecological problems or water resources management problems at shallow water table sites.

*Keywords:* Groundwater lysimeter, Lysimeter control system, Diurnal groundwater fluctuations, Evapotranspiration, Water storage change, Inflow and outflow

## Einleitung

Flächen mit flurnahen Grundwasserständen (GW) sind weit verbreitete Standorte in Tieflandregionen (Fan et al. 2013). Häufig handelt es sich dabei um ehemalige Moorgebiete oder grundwassernahe (gw-nahe) Sandstandorte, die für eine land- oder forstwirtschaftliche Nutzung entwässert werden. Trotz der Entwässerung liegen die GW-Stände dieser Gebiete bei weniger als 2 m unter Flur. Ihr Wasserhaushalt ist gegenüber gw-fernen Standorten durch eine Reihe von Besonderheiten gekennzeichnet, da die Pflanzenwurzeln bis an den Kapillarsaum oder direkt bis ans GW reichen und dort Wasser für die Transpiration entnehmen können. Auf diesen Standorten ist der Wasserfluss nicht nur vorwiegend vertikal von oben nach unten gerichtet, sondern in Zeiten hoher Verdunstung findet auch ein umgekehrt gerichteter Wasserfluss statt (Acharya et al. 2012, Laio et al. 2009, Loheide II et al. 2005).

Zur Versickerung kommt es vor allem nach Niederschlägen und in den Wintermonaten. Dieses führt zum GW-Anstieg und zu einem lateralen Abfluss ( $R_{ab}$ ) im GW-/Grabensystem (Entwässerungsphase). In Phasen, in denen der Wasserent-

zug der Pflanzen den lateralen Zufluss ( $R_{zu}$ ) über das GW-/Grabensystem übersteigt (Bewässerungsphasen), sinken die GW-Stände dagegen ab. Dieses geschieht jedoch nicht kontinuierlich, sondern in einer typischen, sinusförmigen Bewegung des GW-Standes. *Abbildung 1* zeigt Beispiele für den GW-Gang eines gw-nahen Standorts zu unterschiedlichen Jahreszeiten. Im Winterhalbjahr zeigen die Stundenwerte und Tagesmittelwerte keine nennenswerten Unterschiede. Nach einem Niederschlagsereignis steigen die GW-Stände schnell an und sinken infolge von Entwässerung gleichmäßig ab. Der GW-Gang im Sommerhalbjahr zeigt typische, periodische innertägliche Schwankungen mit einem abwärts gerichteten Trend über einen längeren Zeitraum ohne Niederschlag. Zu diesem typischen Verhalten kommt es durch das Zusammenspiel von  $R_{zu}$ , Verdunstung (ETA) und Wasserspeicheränderung ( $\Delta S$ ) in der ungesättigten und gesättigten Zone.  $R_{zu}$  eines gw-nahen Standorts ist dabei eine relativ stabile Wasserhaushaltsgröße über den gesamten Tag. ETA findet dagegen nur während der Tageszeit statt. Hier kommt es zur Wasserentnahme aus dem Bodenspeicher und zum Absinken des GW-Standes. Während der Nachtstunden und bei geringer ETA wird der Wasserspeicher

<sup>1</sup> Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Str. 84, D-15374 MÜNCHENBERG

\* Ansprechpartner: Dr. Ottfried Dietrich, odietrich@zalf.de



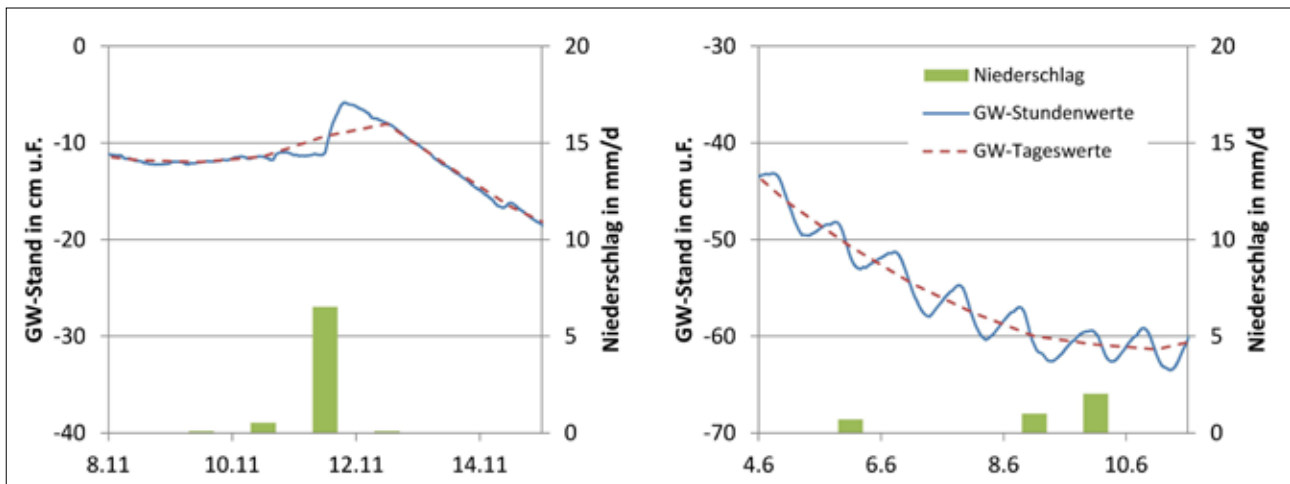


Abbildung 1: Typischer GW-Gang eines gw-nahen Standorts mit Niederschlag (links – Winterhalbjahr ohne ETa-Einfluss, rechts – Sommerhalbjahr mit ETa-Einfluss).

einer gw-nahen Fläche durch  $R_{zu}$  wieder aufgefüllt und der GW-Stand steigt wieder an. Dieses Wechselspiel führt zu einem typischen sinusförmigen Tagesgang des GW-Standes auf diesen Standorten. Die Größe der täglichen Amplituden hängt sowohl vom Betrag der Wasserbilanzgrößen als auch der Speichercharakteristik des Standorts ab, die von den bodenphysikalischen Eigenschaften und dem GW-Flurabstand (GWF) bestimmt werden. Je größer GWF und je mächtiger die ungesättigte Schicht, umso gedämpfter ist die Amplitude des GW-Standes.

Beim Einsatz von GW-Lysimetern für Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt gw-naher Standorte muss dieser komplexe Wasserhaushalt möglichst realitätsnah nachgebildet werden. Anders als bei Gravitations-Lysimetern können lateraler Wasserfluss und Masseänderung nicht nur passiv beobachtet werden, sondern es muss auch die Anbindung an den lateralen Wasserfluss im Lysimeter nachgebildet werden (Dietrich et al. 2016, Meissner et al. 2008). In GW-Lysimetern erfolgt dieses durch die Steuerung einer unteren Randbedingung. Klassischerweise wird der GW-Stand vorgegeben. Alle anderen Größen entwickeln sich entsprechend der meteorologischen und öko-hydrologischen Randbedingungen und können direkt gemessen oder indirekt berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass der sich einstellende  $R_{zu}$  oder  $R_{ab}$  dem eines Vergleichsstandorts entspricht.

Die am weitesten verbreitete technische Lösung zur Einstellung der unteren Randbedingung ist die Anwendung des Prinzips der Mariottischen Flasche durch Vorgabe eines Soll-GW-Standes (Noory et al. 2009, Yang et al. 2000, Yang et al. 2007). Neuere Lysimeteranlagen können den Soll-GW-Stand über Pumpen und Ventilsteuerungen auch nach gemessenen GW-Ständen aktiv regeln (Abteu und Melesse 2013, Bethge-Steffens et al. 2004, Meissner et al. 2008, Schwaerzel und Bohl 2003). Eine Weiterentwicklung dieses Systems nutzt dagegen anstelle des GW-Standes Soll-Werte für  $R_{zu}$  und  $R_{ab}$  zur Regelung der unteren Randbedingung (Dietrich et al. 2016).

Im Beitrag werden die drei unterschiedlichen Systeme zur Steuerung der unteren Randbedingung vorgestellt und hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Verhalten der Wasserhaushaltsgrößen verglichen.

## Material und Methoden

### Methoden zur Regelung der unteren Randbedingung von GW-Lysimetern

#### Mariottesche Flasche

Das Prinzip der Mariottischen Flasche ist ein alt bewährtes physikalisches Prinzip mit geringen technischen Anforderungen, welches sehr zuverlässig seit vielen Jahrzehnten zur Steuerung der unteren Randbedingung von GW-Lysimetern eingesetzt wird. Über die Höhenverstellung des Lufttritttröhrchens in der Mariottischen Flasche (Ausgleichsbehälter) wird die Höhe des GW-Standes eingestellt. Aus dem Ausgleichsbehälter fließt dann immer genau so viel Wasser in den Bodenmonolith nach, wie benötigt wird, um den GW-Stand konstant auf dem eingestellten Niveau zu halten. Übersteigt der Wasserstand im Monolith nach Niederschlägen den eingestellten Soll-Wasserstand eines ebenfalls verstellbaren Überlaufes, kommt es zur Abflussbildung. Die zu- oder abgelaufenen Wassermengen können gemessen werden.

#### Automatische GW-Steuerung

Bei der automatischen GW-Steuerung wird über die Regelung von Pumpen und Ventilen der Wasserstand in einem mit dem Bodenmonolith verbundenen Ausgleichsbehälter so verändert, dass er einem vorgegebenen Soll-Wasserstand entspricht. Dieser wurde zuvor an einem Referenz-GW-Rohr gemessen. Die zwischen Ausgleichsbehälter und Monolith fließenden Wassermengen können gemessen werden. Der GW-Stand ist eine vorgegebene Größe,  $ETa$ ,  $R_{zu}$  und  $R_{ab}$  können sich unabhängig entwickeln.

#### Automatische Zu-/Abflusssteuerung

Bei der automatischen Zu- und Abflusssteuerung wird über die Regelung von Pumpen und Ventilen  $R_{zu}$  oder  $R_{ab}$  zwischen dem Bodenmonolith und einem verbundenen Ausgleichsbehälter so geregelt, dass er einem vorgegebenen Sollwert entspricht (Dietrich et al. 2016). Der GW-Stand wird gemessen. Er kann sich frei entsprechend der meteorologischen, öko-hydrologischen und bodenphysikalischen Verhältnisse entwickeln und ist wie  $ETa$  keine vorgegebene Größe.

## Verwendete Lysimeteranlage

Die Untersuchungen wurden mit einer GW-Lysimeteranlage im Spreewald, ca. 70 km südöstlich von Berlin (51°52'N, 14°02'O) durchgeführt. Die Anlage besteht aus vier wägbaren Bodenmonolithen, die 2009 vor Ort gestochen wurden. Die Containerstation (UGT) wurde genau an der Entnahmestelle der Monolithe installiert. Zur Anlage gehören eine Wetterstation und ein Bodenmessplatz zur Erfassung von Referenzgrößen (Dietrich et al. 2016). Der Aufbau der Anlage entspricht dem Typ nach (Meissner et al. 2000), erweitert um die Möglichkeit, die untere Randbedingung wahlweise nach einem vorgegebenen GW-Stand oder  $R_{zu}$  oder  $R_{ab}$  zu steuern. Die vorzuziehenden Sollwerte können von einem gemessenen Wert übernommen werden oder auch als Zeitreihe vor Versuchsbeginn vordefiniert werden. Die Messwerte jedes einzelnen Monolith können wahlweise von jedem anderen Monolith als Sollwerte genutzt werden. Das Regelintervall wurde auf eine Stunde eingestellt. Dieses ist ausreichend lang, um den typischen Tagesgang der Wasserhaushaltsgrößen abzubilden. Das Messintervall beträgt 10 Minuten. Aufgezeichnet werden die Masse des Monolith,  $R_{zu}$  und  $R_{ab}$ , der GW-Stand, Saugspannungen und Wassergehalte in drei Tiefen (30 cm, 60 cm, 90 cm). An der Wetterstation werden der Niederschlag, Luft- und Bodentemperaturen in verschiedenen Höhen bzw. Tiefen, die relative Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und -richtung, die Nettostrahlung und der Bodenwärmestrom gemessen.

## Untersuchte Varianten

Drei unterschiedliche Varianten der Steuerung der unteren Randbedingung von GW-Lysimetern wurden mit der Anlage simuliert.

### Variante 1 - Mariottesche Flasche

Hierfür wurde ein Monolith nach einer vordefinierten Zeitreihe mit konstantem GW-Stand (50 cm u.F.) geregelt. Dadurch wurden wie bei der klassischen Mariottischen Flasche die natürlichen Tagesschwankungen im GW-Gang unterdrückt. Ein zweiter Monolith wurde nach einem GW-Stand geregelt, der an einem Referenzmessplatz unmittelbar neben der Station gemessen wurde. Er liefert die Vergleichswerte für das natürliche Verhalten eines gw-nahen Standorts.

### Variante 2 – automatische GW-Steuerung

Hierbei wurde ein Monolith nach einem GW-Stand geregelt, der an einem Referenzmessplatz unmittelbar neben der Station gemessen wurde. Der Bodenaufbau und die Vegetation am Referenzplatz und im Lysimeter waren gleich. Damit sind die Voraussetzungen für eine vergleichbare ETa und GW-Tagesschwankungen gegeben. In einem zweiten Monolith wurde der gemessene GW-Stand parallel um 20 cm abgesenkt, in einem dritten Monolith um 20 cm parallel angehoben. Beide GW-Gänge haben so die gleiche Tagesamplitude wie der gemessene GW-Gang, jedoch unterschiedliche Mächtigkeit der ungesättigten Zone.

### Variante 3 – automatische Zu-/Abflusssteuerung

Zwei Monolithe wurden nach dem gemessenen  $R_{zu}$  oder  $R_{ab}$  des ersten Monolith von Variante 2 geregelt (Referenzlysimeter). Sie stimmen im Bodenaufbau mit den anderen Monolithen überein, unterscheiden sich aber in der Vege-

tationszusammensetzung und im Ausgangsniveau ihres GW-Standes, welches höher ist.

## Datenaufbereitung

Die Speicheränderung  $\Delta S$  wurde direkt aus der Masseänderung des Monolith bestimmt.  $R_{zu}$  und  $R_{ab}$  wurden aus der gemessenen Wasserstandsänderung im Ausgleichsbehälter und seiner Fläche ermittelt. Der Niederschlag jedes Monolith wurde individuell aus seiner Wasserbilanz während eines Niederschlagsereignisses berechnet. Dabei wurde angenommen, dass ETa während der Zeit des Niederschlagsereignisses vernachlässigbar klein ist. Schließlich wurde ETa als Restgröße der Wasserbilanz ermittelt und alle Wasserbilanzgrößen zu Stunden- und Tageswerten aggregiert. Die gemessenen GW-Stände wurden ebenfalls zu Stunden- und Tageswerten gemittelt.

Für die Darstellung der Ergebnisse wurden nach Möglichkeit niederschlagsfreie Perioden von sieben Tagen ausgewählt, da sie anschaulicher die Besonderheiten des Wasserhaushalts gw-naher Standorte zeigen. Die Stundenwerte der Wasserbilanzgrößen ETa,  $\Delta S$  und  $R_{zu}$  oder  $R_{ab}$  der ausgewählten Perioden wurden zu Tageswerten aggregiert. Die Stundenwerte des GW-Standes wurden zunächst mit den Tagesmittelwerten normiert, indem diese von den Stundenwerten subtrahiert wurden und dann ebenfalls als Tagesgang der Periode gemittelt. Durch die Normierung wurde lediglich der ab- oder zunehmende Trend (Absinken oder Anstieg des GW-Standes) eliminiert.

## Ergebnisse und Diskussion

### Mariottesche Flasche

GW-Lysimeter mit Regelung der unteren Randbedingung über eine Mariottesche Flasche erzeugen einen weitgehend ausgeglichen, untypischen GW-Tagesgang (Abbildung 2). Nur zur Zeit der höchsten ETa reicht die Wassernachlieferung nicht ganz aus und es kommt zu einem geringen Absinken des GW-Standes, der dann aber schnell wieder auf das Ausgangsniveau ansteigt. Die ETa wird vor allem von den meteorologischen Bedingungen bestimmt und zeigt für das Lysimeter mit Mariottischer Steuerung das gleiche Verhalten wie für das Referenz-Lysimeter. Der Tagesgang von  $\Delta S$  entspricht ebenfalls dem natürlichen Verlauf, jedoch fällt die Wasserentnahme des Mariottischen Systems aus dem Bodenspeicher trotz gleicher ETa etwas kleiner aus. Die Ursache ist im überhöhten und ungleichmäßigen  $R_{zu}$  zu sehen. In der Summe aller Wasserbilanzgrößen führt dieses bei GW-Lysimetern mit Mariottischen Systemen zu einer Überschätzung von  $R_{zu}$  und einer zu geringen Beteiligung des Bodenwasserspeichers am Wasseraustausch.

### Automatische GW-Steuerung

Bei der automatischen GW-Steuerung wird bei ausreichend kurzem Regelintervall ein natürlicher Tagesgang des GW-Standes entsprechend dem gemessenen Referenzwert erzeugt. Dieser ist auch im Betrag der Amplitude korrekt, wenn die Standortbedingungen des Lysimeters mit dem Referenzstandort übereinstimmen. Durch die hier im Versuch praktizierte Parallelverschiebung des Referenzwertes kommt es zwar zu identischen Tagesgängen in den beiden

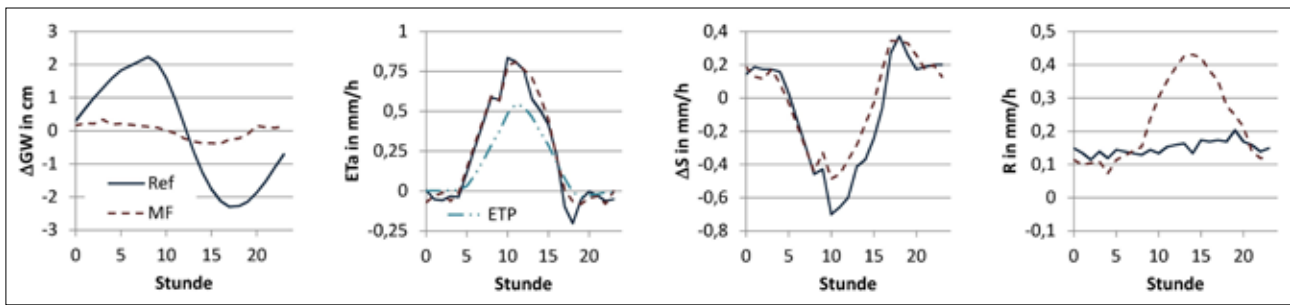


Abbildung 2: Mittlere Tagesgänge ausgewählter hydrologischer Größen eines gw-nahen Standorts ( $\Delta GW$  – GW-Standsänderung,  $ETa$  – tatsächliche Verdunstung,  $\Delta S$  – Speicheränderung,  $R$  – Zu-/Abfluss,  $ETP$  – FAO-Gras-Referenz-Verdunstung). Ein Lysimeter simuliert einen natürlichen, gemessenen Referenz-GW-Stand (Ref), ein zweites entspricht einem System mit Mariottscher Flasche (MF), welches einen nahezu konstanten GW-Stand erzeugt.

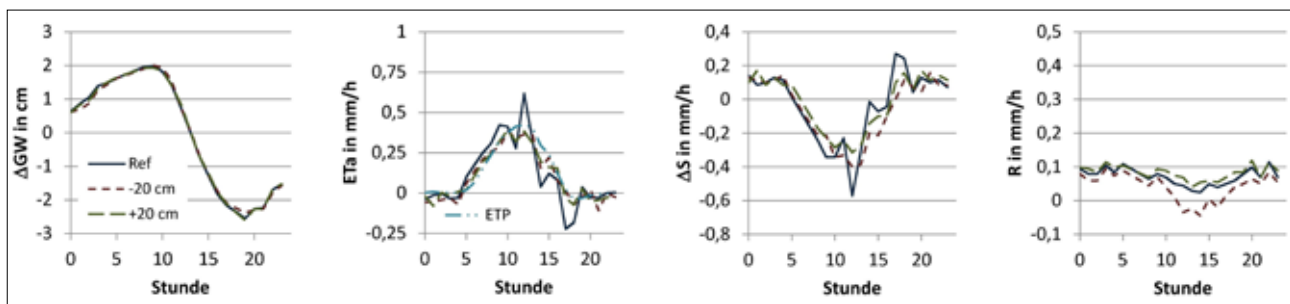


Abbildung 3: Mittlere Tagesgänge ausgewählter hydrologischer Größen eines gw-nahen Standorts bei automatischer Steuerung nach einem gemessenen GW-Stand. Ein Lysimeter regelt nach dem gemessenen Referenz-GW-Stand (Ref), ein zweites und drittes Lysimeter simulieren um  $-20$  cm bzw.  $+20$  cm parallel verschobene GW-Stände.

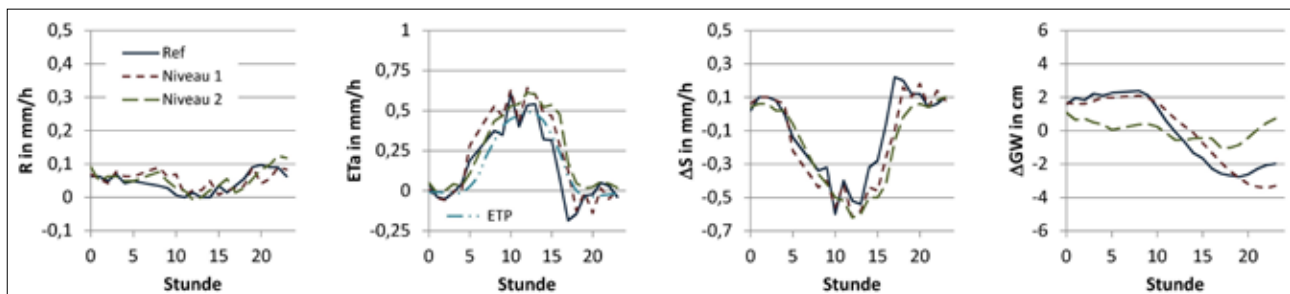


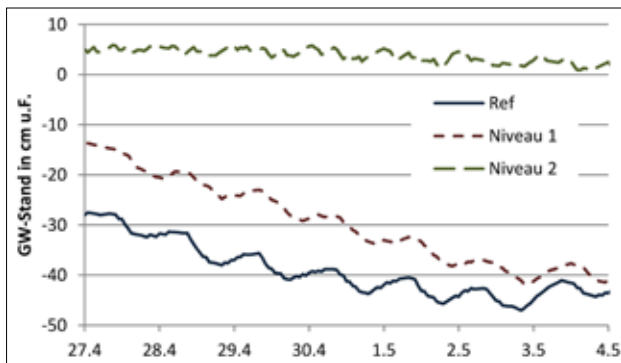
Abbildung 4: Mittlere Tagesgänge ausgewählter hydrologischer Größen eines gw-nahen Standorts bei automatischer Steuerung nach einem gemessenen  $R_{zu}$  oder  $R_{ab}$ . Ein Lysimeter regelt nach einem gemessenen Referenz-GW-Stand (Ref), ein zweites und drittes Lysimeter regeln nach dem gemessenen  $R_{zu}$  und  $R_{ab}$  des Referenz-Lysimeters.

betreffenden Lysimetern (Abbildung 3), diese weichen jedoch vom natürlichen Verhalten ab. Höhere Wasserstände müssten natürlicherweise größere Amplituden aufweisen solange sie unter Flur liegen und tiefere Wasserstände kleinere Amplituden. So kann es auch nicht zu dem damit einhergehenden unterschiedlich starken Absinken der Wasserstände kommen.  $ETa$  wird wieder wenig beeinflusst und hat bei allen drei GW-Varianten einen natürlichen Tagesgang. Bei der Variante mit dem um  $20$  cm abgesenkten GW-Stand führt die hier im Lysimeter vorgegebene, zu große GW-Amplitude auch zu Verschiebungen bei  $\Delta S$  und  $R_{zu}$ . So muss, um die zu große Amplitude im Lysimeter zu erzeugen, in der Mittagszeit sogar noch Wasser aus dem Monolith entwässert werden. Es zeigt, wie einzelne Wasserbilanzgrößen im Lysimeter falsch simuliert werden können, wenn die Standortbedingungen des Referenzmessplatzes nicht mit dem Lysimeter übereinstimmen.

### Automatische Zu-/Abflusssteuerung

Bei der automatischen Zu-/Abflusssteuerung werden die Messwerte des Referenz-Lysimeters (Abbildung 4, links) als Randbedingung für zwei andere Lysimeter genutzt. Diese unterscheiden sich vom Referenz-Lysimeter in der Vegetation (Blattflächenindex: Ref = 2,2; Niveau 1 = 3,3; Niveau 2 = 3,4) und haben ein anderes Ausgangsniveau des GW-Standes (Abbildung 5). Die Wasserstände von Niveau 2 liegen sogar über Gelände, wodurch die Tagesamplitude des GW-Standes sehr klein ist.

Die Messwerte von  $ETa$  und  $\Delta S$  zeigen bei allen Varianten ein natürliches Verhalten. Insbesondere bei der Überstauvariante hätte eine automatische GW-Steuerung anhand einer Amplitude eines Referenzwertes für Unterflur-Bedingungen zu großen fehlerhaften Verschiebungen in  $\Delta S$  und  $R$  geführt, da die spezifische Speicherkapazität von Überstau- und



**Abbildung 5: Unterschiedliche Entwicklung der GW-Stände eines Referenz-Lysimeters im Vergleich zu zwei Lysimetern mit gleichem  $R_{zu}$  und  $R_{ab}$  und höherem Ausgangsniveau der GW-Stände.**

Unterflurbedingungen große Unterschiede aufweist. Da der GW-Stand bei dieser Art der Steuerung nicht vorgegeben wird, kann er sich in jedem Lysimeter entsprechend dem Zusammenspiel aller meteorologischen, öko-hydrologischen und bodenphysikalischen Bedingungen entwickeln, was die unterschiedliche Absenkung in *Abbildung 5* zeigt.

## Schlussfolgerungen

Die Analyse des Einflusses der Art der Steuerung der unteren Randbedingung von GW-Lysimetern auf die gemessenen Wasserbilanzgrößen und den Tagesgang des GW-Standes zeigt die Stärken und Schwächen der einzelnen Systeme. Das technisch einfachste und kostengünstigste System, die Mariottesche Flasche, kann das natürliche Verhalten des GW-Standes eines gw-nahen Standorts nicht nachbilden. Das hat zur Folge, dass auch die gemessenen  $\Delta S$  und  $R_{zu}$  oder  $R_{ab}$  dieser Lysimeter ungenau sind. Auf ETa konnten dagegen keine relevanten Auswirkungen festgestellt werden, da hier die meteorologischen Randbedingungen und die Vegetation den dominierenden Einfluss haben.

Systeme mit automatischer GW-Steuerung sind technisch aufwendiger als Mariottesche Systeme. Sie können alle Wasserbilanzgrößen korrekt im Lysimeter abbilden, wenn alle Standorteigenschaften (Meteorologie, Boden, Vegetation) von Lysimeter und Referenzmessplatz übereinstimmen. Sie sind allerdings nicht geeignet, um das Verhalten des GW-Standes selbst in Abhängigkeit anderer Randbedingungen zu untersuchen, da dieser immer vorgegeben wird.

Die automatische Zu-/Abflusssteuerung ist die technisch aufwendigste und teuerste Lösung, da hier in der Regel ein zusätzlicher Monolith benötigt wird, um den Referenzwert für  $R_{zu}$  oder  $R_{ab}$  zu bestimmen. Alle Wasserbilanzgrößen werden bei dieser Art der Randbedingung korrekt im Lysimeter abgebildet. Der Anwendungsumfang von GW-Lysimetern wurde durch diese Art der Steuerung erweitert, da jetzt auch die Entwicklung des GW-Standes selbst Ziel der Untersuchung sein kann. Dieses ist insbesondere für viele ökologische Fragestellungen und auch Wassermanagementaufgaben von großem Interesse.

Jedes der drei Steuersysteme hat seine Vor- und Nachteile. Entscheidend für die Auswahl ist immer die Zielstellung der Untersuchung. Wichtig ist, dass sich auch der Nutzer der Daten der mit dem jeweiligen System verbundenen Einschränkungen bewusst ist.

## Danksagung

Ich möchte dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Landesamt für Umwelt und Gesundheit Brandenburg für die Förderung der Anlage im Rahmen des Projektes INKA BB (FKZ: 01LR0803A) danken. Der Fa. Umweltgerätetechnik Müncheberg danke ich für die vielfältige Hilfe bei der Umsetzung der technischen Entwicklung und meinem Kollegen Ralph Tauschke für die geleistete Feldarbeit.

## Literatur

- Abtew W., Melesse A. (2013) Evaporation and Evapotranspiration Estimation Methods, Evaporation and Evapotranspiration. Springer Netherlands, pp. 63-91. DOI:10.1007/978-94-007-4737-1\_6
- Acharya S., Jawitz J.W., Mylavarapu R.S. (2012) Analytical expressions for drainable and fillable porosity of phreatic aquifers under vertical fluxes from evapotranspiration and recharge. *Water Resources Research*, 48(11).
- Bethge-Steffens D., Meissner R., Rupp H. (2004) Development and practical test of a weighable groundwater lysimeter for floodplain sites. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(4): 516-524. DOI:10.1002/jpln.200321304
- Dietrich O., Fahle M., Seyfarth M. (2016) Behavior of water balance components at sites with shallow groundwater tables: Possibilities and limitations of their simulation using different ways to control weighable groundwater lysimeters. *Agricultural Water Management*, 163: 75-89. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.005
- Fan Y., Li H., Miguez-Macho G. (2013) Global Patterns of Groundwater Table Depth. *Science*, 339(6122): 940-943. DOI:10.1126/science.1229881
- Laio F., Tamea S., Ridolfi L., D'Odorico P., Rodriguez-Iturbe I. (2009) Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems: 1. Stochastic water table dynamics. *Water Resources Research*, 45(5): W05419. DOI:10.1029/2008WR007292
- Loheide II S.P., Butler J., Gorelick S.M. (2005) Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: A saturated-unsaturated flow assessment. *Water Resources Research*, 41(7): 1-14. DOI:10.1029/2005WR003942
- Meissner R., Rupp H., Seyfarth M. (2008) Advances in out door lysimeter techniques. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 8(2): 217-225. DOI:10.1007/s11267-007-9166-2
- Meissner R., Rupp H., Seyfarth M., Punzel J. (2000) Verfahren zum automatischen Betrieb eines wägbaren Grundwasserlysimeters, German Patent DE 19907462, Germany.
- Noory H., Liaghat A.M., Chaichi M.R., Parsinejad M. (2009) Effects of water table management on soil salinity and alfalfa yield in a semi-arid climate. *Irrigation Science*, 27(5): 401-407. DOI:10.1007/s00271-009-0155-2
- Schwaerzel K., Bohl H.P. (2003) An easily installable groundwater lysimeter to determine water balance components and hydraulic properties of peat soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(1): 23-32.
- Yang J.F., Li B.Q., Liu S.P. (2000) A large weighing lysimeter for evapotranspiration and soilwater-groundwater exchange studies. *Hydrological Processes*, 14(10): 1887-1897. DOI:10.1002/1099-1085(200007)14:10<1887::aid-hyp69>3.3.co;2-2
- Yang J.F., Wan S.Q., Deng W., Zhang G.X. (2007) Water fluxes at a fluctuating water table and groundwater contributions to wheat water use in the lower Yellow River flood plain, China. *Hydrological Processes*, 21(6): 717-724. DOI:10.1002/hyp.6246

