

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 Bodengeneese (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 "Vege", 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

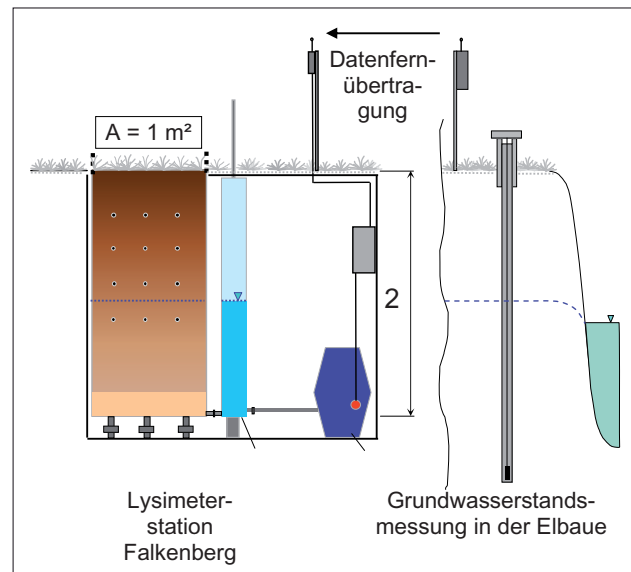


Abbildung 1: Prinzipskizze des wägbaren Grundwasserlysimeters und der dazugehörigen Erfassung und Übertragung von *in situ* Grundwasserständen

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:

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

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-

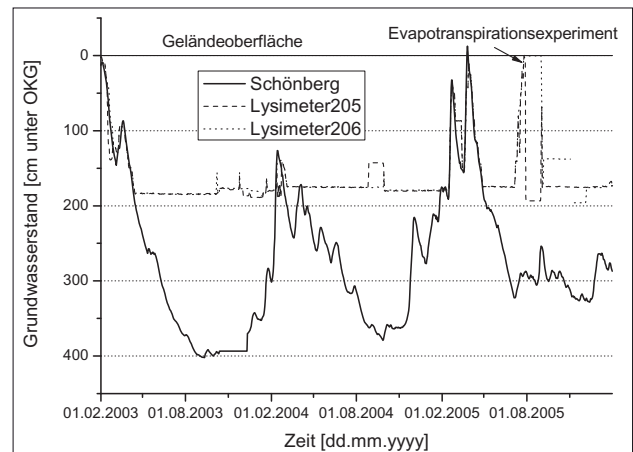


Abbildung 2: Vergleich in situ gemessener und in den Lysimetern eingestellter Grundwasserstände (01.02.2003 – 31.12.2005)

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)

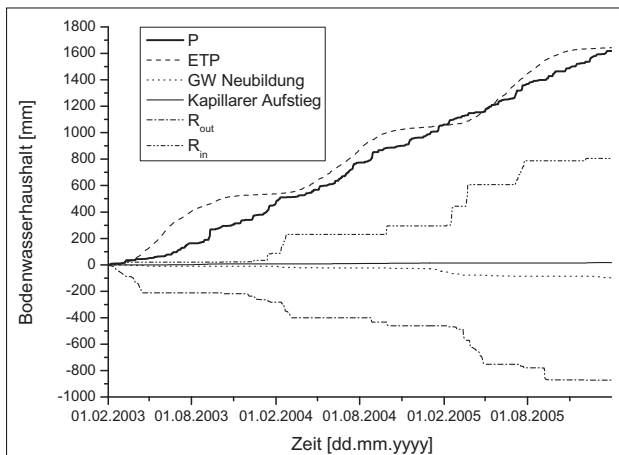


Abbildung 3: Summenlinien der Bodenwasserhaushaltsparameter P-Niederschlag, ETP-Evapotranspiration; Grundwasserneubildung, kapillarer Aufstieg, R_{out} – Grundwasserabfluss und R_{in} – Grundwasserzuzfluss

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-

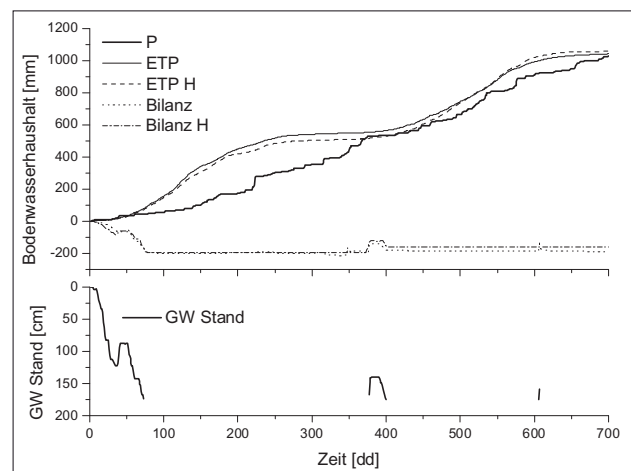


Abbildung 4: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Bodenwasserhaushaltsgrößen (P Niederschlag, ETP Evapotranspiration, ETP H mit HYDRUS 1D modellierte ETP sowie die gemessene und mit HYDRUS 1D modellierte Bodenwasserbilanz)

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 Mittel-Elbe 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 Mittel-Elbe. 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. GROENGRÖEFT, 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 and 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 and 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.