

# Gekoppelte Modellierung von Wasser, Wärme und Dampfströmen in wägbaren Lysimetern unter ariden Bedingungen

Sascha C. Iden<sup>1\*</sup>, Daniela Reineke<sup>1,2</sup>, Jeremy Koonce<sup>3</sup>, Markus Berli<sup>3</sup> und Wolfgang Durner<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Die Vorhersage der Grundwasserneubildung in ariden und semiariden Gebieten mit Simulationsmodellen erfordert eine genaue Simulation der realen Verdunstung. Durch geringe Bodenwassergehalte und geringe latente Wärmeströme entstehen im nicht bewachsenen Boden starke, zeitlich veränderliche Temperaturgradienten, welche Dampfströme im Boden antreiben. Die starke oberflächennahe Temperaturdynamik muss möglichst genau modelliert werden, um die reale Evaporation simulieren zu können. In diesem Beitrag analysieren wir die Flüsse von Wasser, Wasserdampf und Wärme in einem großen wägbaren Lysimeter in der Mojave Wüste in Nevada unter Nutzung eines gekoppelten Modells, welches durch meteorologische Messdaten als Randbedingung angetrieben wird und die Energiebilanz der Bodenoberfläche löst. Die Lysimeterdaten wurden sowohl für die Identifikation effektiver bodenhydraulischer Funktionen als auch für die Modellvalidierung in einem unabhängigen Zeitraum genutzt. Das gekoppelte Modell lieferte in einem Validierungszeitraum eine gute Vorhersage der lokalen Wassergehalte, der Bodentemperaturen und der realen Evaporation. Die Differenz zwischen der gemessenen und der durch das Prozessmodell vorhergesagten Evaporation betrug lediglich 5 %.

*Schlagwörter:* Reale Evaporation, inverse Modellierung, Parameteridentifikation, Wasserflüsse zwischen Boden und Atmosphäre, Validierung

## Summary

The prediction of groundwater recharge in arid and semiarid regions with numerical models requires an accurate simulation of actual evaporation. Low soil water contents and small fluxes of latent heat between soil and atmosphere result in pronounced, transient temperature gradients in the topsoil, which drive thermal vapor fluxes. The strong temperature dynamics in the topsoil must be modelled accurately to correctly predict evaporation from bare soil. We have analyzed the fluxes of water, water vapor, and heat in a large weighing Lysimeter in the Mojave desert, Nevada, with a coupled model which is driven by meteorological data as boundary conditions and which solves the surface energy balance. Lysimeter data were used to identify effective soil hydraulic properties and to validate the coupled model within an independent time period. In the validation period, the coupled model predicted the moisture and temperature dynamics in the soil profile very well. More importantly, the difference between the cumulative actual evaporation measured with the Lysimeter and the model-predicted cumulative evaporation was only 5 %.

## Einleitung

In ariden und semiariden Gebieten spielt die Evaporation aus dem nicht mit Pflanzen bewachsenen Boden eine große Rolle für die Energiebilanz der Erdoberfläche und die Frage, ob Grundwasserneubildung in nennenswertem Maß stattfindet. Der Einfluss der Evaporation auf die Energiebilanz und somit das Temperaturregime des Bodens hat eine Vielzahl ökologischer Implikationen. Durch die geringen Bodenwassergehalte und die hiermit verbundenen geringen latenten Wärmeströme entstehen im nicht bewachsenen Boden oberflächennah starke, zeitlich veränderliche Gradienten der Bodentemperatur, welche temperaturinduzierte Flüsse von Wasserdampf (im Folgenden: „Dampf“) verursachen. Die modellbasierte Vorhersage der realen Evaporation kann daher nur durch eine

Berücksichtigung des komplexen Wechselspiels zwischen Wasser-, Wärme und Dampfströmen erfolgen. Eine korrekte Modellierung der Oberflächentemperatur und des Wasserpotenzials an der Bodenoberfläche ist hierbei entscheidend, da der Wasserdampfdruck an der Oberfläche die Intensität des Austauschs latenter Wärme zwischen Boden und bodennaher Atmosphäre stark beeinflusst. In diesem Beitrag illustrieren wir die gekoppelte Modellierung von Wasser-, Wärme und Dampfströmen in einem wägbaren Großlysimeter in der Mojave-Wüste in Nevada mit einem numerischen Modell, welches die Energiebilanz der Oberfläche löst und durch meteorologische Daten angetrieben wird. Die Lysimeterdaten dienen hierbei (i) der Identifikation effektiver bodenhydraulischer Eigenschaften durch inverse Modellierung und (ii) der Validierung des Modells in einem unabhängigen Zeitraum.

<sup>1</sup> Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

<sup>2</sup> Department of Land, Air, and Water Resources, University of California, Davis, CA

<sup>3</sup> Desert Research Institute (DRI), Division of Hydrological Sciences, Las Vegas, NV

\* Ansprechpartner: Dr. Sascha Christian Iden, s.iden@tu-braunschweig.de



## Materialien und Methoden

### Lysimetermessung

Die in dieser Untersuchung verwendeten Messdaten wurden im Rahmen des Forschungsprojekts SEPHAS („Scaling Environmental Processes in Heterogeneous Arid Soils“) am Desert Research Institute (DRI) in Las Vegas erhoben und in Zusammenarbeit mit der Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik am Institut für Geoökologie der TU Braunschweig ausgewertet und numerisch modelliert. Die Daten entstammen einer Messkampagne an einem großen wägbaren Lysimeter (3 m Länge, 4 m<sup>2</sup> Fläche) in der Mojave Wüste, Nevada. Das Lysimeter enthält einen homogenisierten und gepackten Wüstenboden (19% Kies, 94% Sand in der Feinbodenfraktion) und ist mit insgesamt 152 Sensoren zur Messung lokaler Wassergehalte (TDR), Matrixpotenziale (Wärmedissipationssensoren, HDU) und Bodentemperaturen instrumentiert. Die Zeitreihe der Lysimetermasse (Auflösung 15 min) wurde zunächst manuell und halb-automatisch korrigiert, um tägliche Flüsse über

den oberen Rand (Niederschlag, reale Evaporation) mit einer Auflösung von umgerechnet 0,02 mm zu bestimmen. Das Lysimeter war im betrachteten Zeitraum vom 01.01.2009 bis 31.12.2011 nicht mit Pflanzen bewachsen.

### Meteorologische Daten

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die auf dem Gelände gemessenen meteorologischen Daten Nettostrahlung (NR-LITE Net Radiometer, Campbell Scientific), Lufttemperatur und Luftfeuchte (HMP45C Campbell Scientific), Windgeschwindigkeit (Anemometer CSAT3, Campbell Scientific) und Niederschlag (Kippwaage TE525WS-L, Campbell Scientific). Die Instrumentierung ermöglicht die Bestimmung der Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme mit der Eddy-Kovarianz-Methode. Die in *Abbildung 1* (unten) gezeigten potenziellen Evaporationsraten wurden mit der Penman-Monteith-Gleichung mit einem Oberflächenwiderstand von Null berechnet. Es wird deutlich, dass die reale Verdunstung permanent sehr viel geringer ist als die potenzielle und dass die mit dem Lysimeter bestimmte

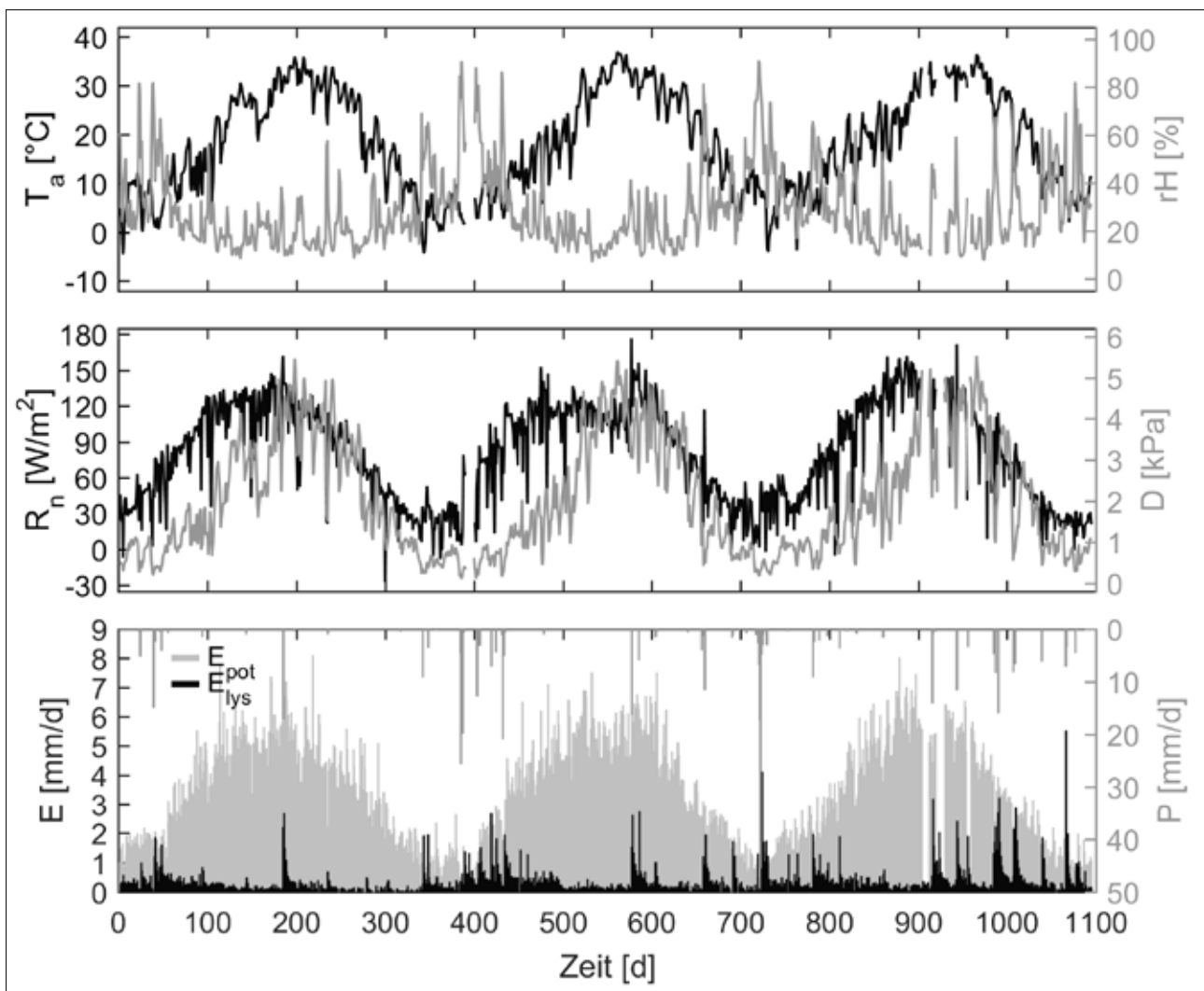


Abbildung 1: Gemessene meteorologische Daten an der SEPHAS Lysimeterstation und die mit dem Lysimeter bestimmten täglichen Verdunstungsraten ( $E_{lys}$ ) und Niederschläge (P) sowie die potenziellen Evaporationsraten nach Penman-Monteith ( $E_{pot}$ , Oberflächenwiderstand  $r_s=0$ ).  $T_a$ : Lufttemperatur, rH: relative Luftfeuchte,  $R_n$ : Nettostrahlung, D: Sättigungsdefizit, E: Evaporation, P: Niederschlag.

Evaporation sehr deutlich auf Niederschlagsereignisse reagiert. Ca. 70 % der Evaporation erfolgt in den ersten 7 Tagen nach dem letzten Tag mit Niederschlag (Reineke 2016). Die gezeigten Daten Nettostrahlung ( $R_n$ ), Luftfeuchte ( $rH$ ) und Lufttemperatur ( $T_a$ ) wurden als Eingangsdaten für die numerische Modellierung verwendet.

### Modellierung und Parameteridentifikation

Bodenhydraulische Eigenschaften haben einen großen Einfluss auf die Evaporationsrate in der zweiten Phase der Evaporation, in welcher die reale Evaporation geringer ist als die durch die meteorologischen Bedingungen definierte potenzielle Evaporation. Für größere Bodenkörper ist eine zuverlässige Bestimmung der effektiven hydraulischen Eigenschaften nicht durch Labormethoden an kleinen Bodensäulen möglich, sondern muss durch inverse Identifikation am interessierenden System erfolgen. Zu diesem Zweck wurde ein Kalibrationszeitraum definiert, in dem die effektiven hydraulischen Eigenschaften durch inverse Simulation ermittelt wurden. Für die numerische Lösung der Richardsgleichung kam das Programmwerkzeug Hydrus-1D (Simunek et al. 2008, 2016) zum Einsatz, für die Parameterbestimmung eine selbst entwickelte Software, welche die nach dem Kleinstes-gewichtete-Quadrate-Kriterium formulierte Zielfunktion iterativ minimiert. Die Daten in der Zielfunktion waren Wassergehalte und Matrixpotenziale in verschiedenen Bodentiefen und der kumulierte Fluss über den oberen Rand.

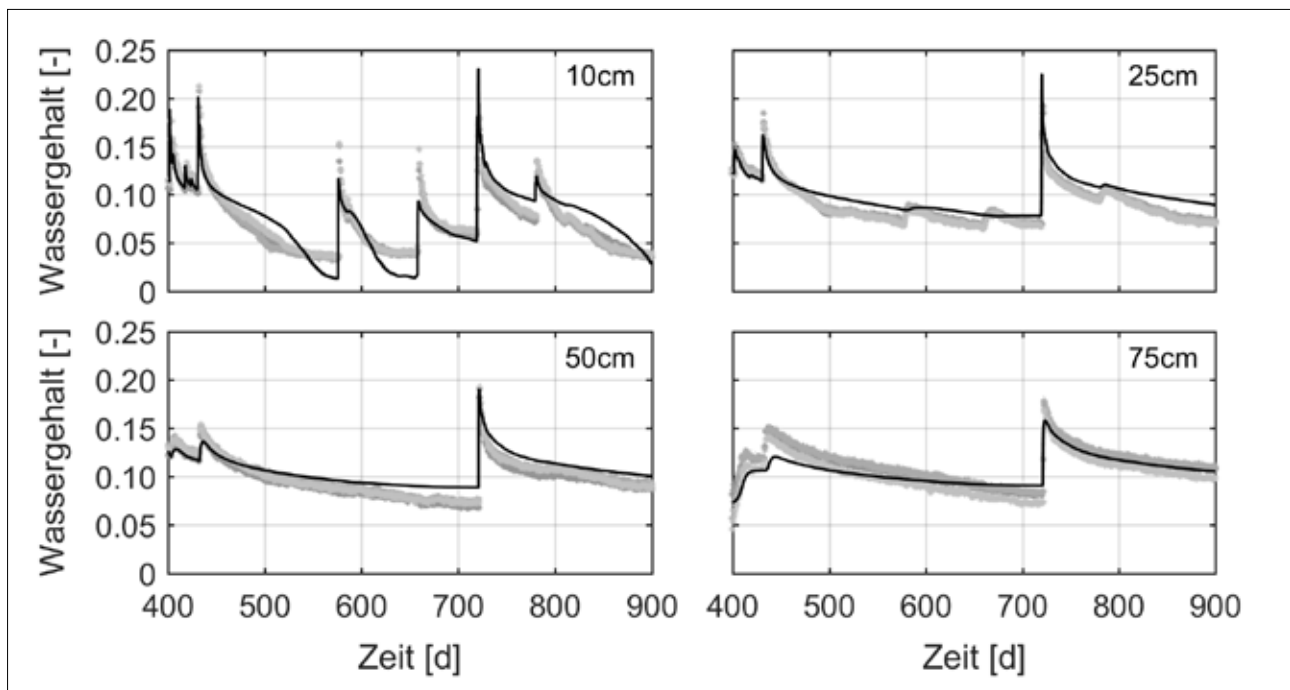
In einem Validierungszeitraum wurden anschließend die Flüsse von Wasser, Wärme und Wasserdampf im Großlysimeter numerisch simuliert. Die Simulation erfolgte wiederum mit Hydrus-1D, welches in diesem Fall das Modell von Saito et. al (2006) numerisch löst. Das Modell berücksichtigt folgende Flüsse (Philip und de Vries 1957, Milly 1982):

- flüssiges Wasser, angetrieben durch Gradienten im hydraulischen Potenzial und der Bodentemperatur,
- Wasserdampf, angetrieben durch Gradienten im hydraulischen Potenzial und der Bodentemperatur,
- fühlbare und latente Wärme, transportiert durch molekulare Wärmeleitung und die Flüsse von Wasser und Wasserdampf.

Am oberen Rand wird das Modell durch meteorologische Randbedingungen angetrieben und löst die Energiebilanz der Bodenoberfläche. Die Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme werden durch einen Widerstandsansatz parametrisiert und der aerodynamische Widerstand durch Anwendung der Ähnlichkeitstheorie nach Monin-Obukhov (MOST) unter Berücksichtigung der atmosphärischen Schichtung berechnet.

### Ergebnisse und Diskussion

Die *Abbildung 2* zeigt die gemessenen und simulierten Bodenwassergehalte in vier Bodentiefen im Validierungszeitraum. Zu beachten ist, dass die Bodenwassergehalte in vier Quadranten des Lysimeters gemessen wurden (Grautöne) und eine bemerkenswerte Übereinstimmung untereinander aufweisen. Die zeitliche Dynamik der Bodenwassergehalte wird insgesamt sehr gut durch das Modell nachvollzogen, insbesondere die Ankunft der Feuchtefront nach ca. 720 Tagen wird sehr gut getroffen. Es wird jedoch auch deutlich, dass die Unterschiede in der Tiefe 10 cm relativ ausgeprägt sind. *Abbildung 3* zeigt in analoger Form die Bodentemperaturen in vier Bodentiefen. Hierbei ist zu beachten, dass als Randbedingung für den Wärmehaushalt des Bodens keine Temperatur am oberen Rand vorgegeben wurde, sondern die Energiebilanz gelöst wurde. In Anbetracht dessen, ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Modell



*Abbildung 2:* Gemessene volumetrische Wassergehalte (Grautöne, vier Quadranten) in den oberen vier Messtiefen und die mit dem Modell vorhergesagten Wassergehalte im Validierungszeitraum.

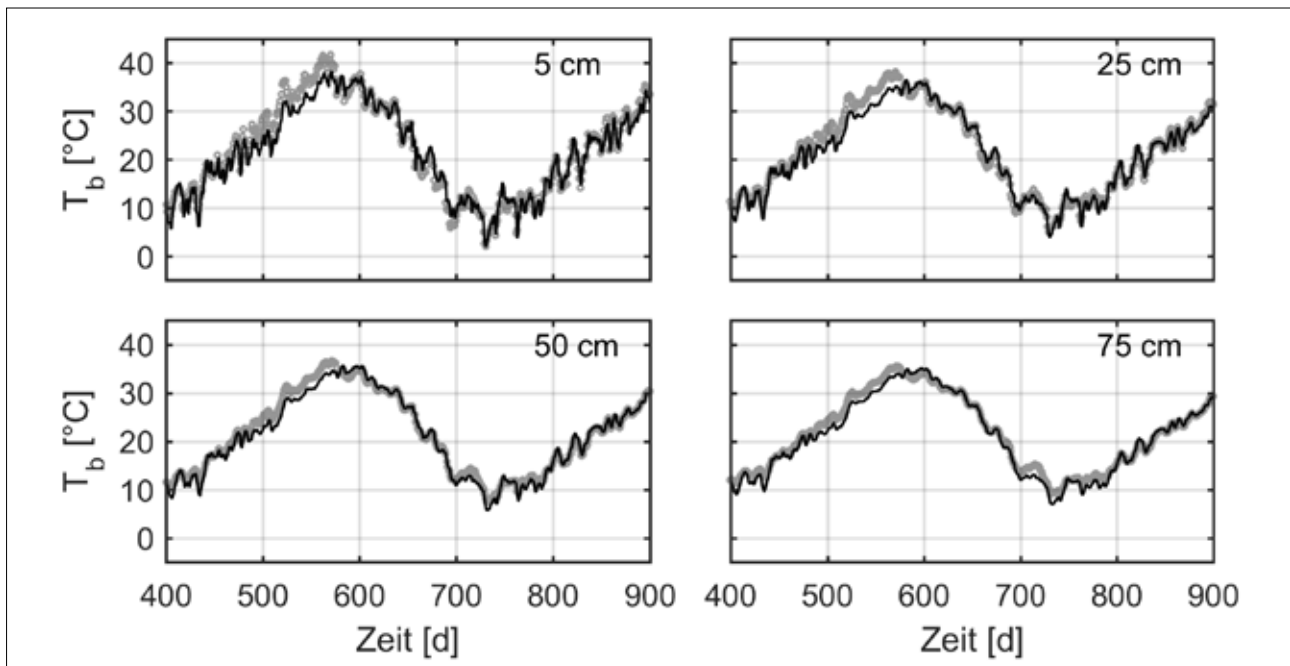


Abbildung 3: Gemessene Bodentemperaturen in den oberen vier Messtiefen und die mit dem Modell vorhergesagten Wassergehalte im Validierungszeitraum.

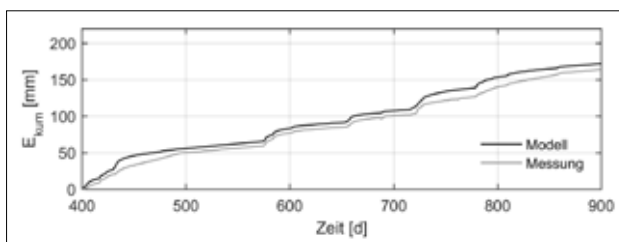


Abbildung 4: Vergleich von vorhergesagter und gemessener kumulierter Evaporation  $E_{\text{kum}}$  im Validierungszeitraum.

im Validierungszeitraum, insbesondere ab dem Tag 600, hervorragend. Im Erwärmungszeitraum zwischen Tag 400 und 600 ergeben sich teilweise deutliche systematische Abweichungen in allen Bodentiefen, die nicht erklärt werden können.

Die Abbildung 4 zeigt die am Lysimeter gemessene und mit dem gekoppelten Modell vorhergesagte kumulierte Evaporation (kein Fit!). Die Übereinstimmung zwischen Modell und Messung im Validierungszeitraum ist insgesamt sehr gut. Im Zeitraum von 400 bis 580 Tagen ist die Übereinstimmung weniger gut und die zeitliche Dynamik von Messung und Simulation weicht voneinander ab. Ab dem Tag 500 wird die Dynamik der am Lysimeter gemessenen Evaporation jedoch sehr gut nachvollzogen. Die Abweichung zwischen Messung und Modell über den gesamten Validierungszeitraum von 500 Tagen beträgt lediglich 5 % (Modell: 172 mm, Messung: 164 mm).

Die durch inverse Modellierung identifizierten hydraulischen Funktionen sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Funktionen wurden mit dem sog. Peters-Durner-Iden-Modell (PDI) parametrisiert (Peters 2013, Iden und Durner 2014, Peters 2014). Anders als klassische hydraulische Funktionen, z.B. nach van Genuchten oder Brooks und Corey, beschreibt das PDI-Modell eine Retentionskurve, welche

bei Ofentrockenheit (Matrixpotenzial ca.  $-10^{6.8}$  cm) den Wassergehalt Null annimmt. Die hydraulische Leitfähigkeit besteht aus den beiden Komponenten kapillare Leitfähigkeit und Leitfähigkeit in an der Bodenmatrix sorbierten Wasserfilmen. Laboruntersuchungen, z.B. mit der vereinfachten Verdunstungsmethode nach Schindler, haben gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion sandiger Böden mit klassischen Funktionen, welche den Filmfluss nicht berücksichtigen, nicht korrekt beschrieben werden kann. In der Analyse der SEPHAS-Lysimeterdaten konnten die Verdunstungsflüsse und lokalen Wassergehalte ohne die Berücksichtigung des Filmflusses ebenfalls nicht beschrieben werden (nicht gezeigt). Dies ist ein erster Beleg für die Notwendigkeit der Berücksichtigung des Filmflusses auf der Lysimeterskala. Die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion (Abbildung 5, rechts) wird bis zu einem Matrixpotenzial von ca.  $-10^3$  cm durch den kapillaren Fluss dominiert, im trockeneren Boden dominiert der Filmfluss.

## Schlussfolgerungen

Unsere modellgestützten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Theorie von Philip-de Vries (1957) mit korrekt parametrisierten hydraulischen Funktionen in der Lage ist, den gekoppelten Wasser-, Wärme und Dampfhaushalt eines Großlysimeters unter ariden Bedingungen mit hoher Genauigkeit in einem Validierungszeitraum zu beschreiben. Dies ist von großer wissenschaftlicher Bedeutung, weil die Validierung bzw. Falsifikation dieser Theorie bislang nur wenig Aufmerksamkeit erlangt hat (Novak 2016). Hierbei ist es wichtig zu betonen, dass eine fehlerhafte Parametrisierung der bodenhydraulischen Funktionen zu der falschen Schlussfolgerung führen kann, die Theorie sei fehlerhaft und somit abzulehnen. Die Evaporation aus dem nicht bewachsenen Großlysimeter wurde im Validierungszeitraum mit einer Genauigkeit von 5 % mit dem Modell simuliert. Zusätzlich wurden die lokalen Wassergehalte

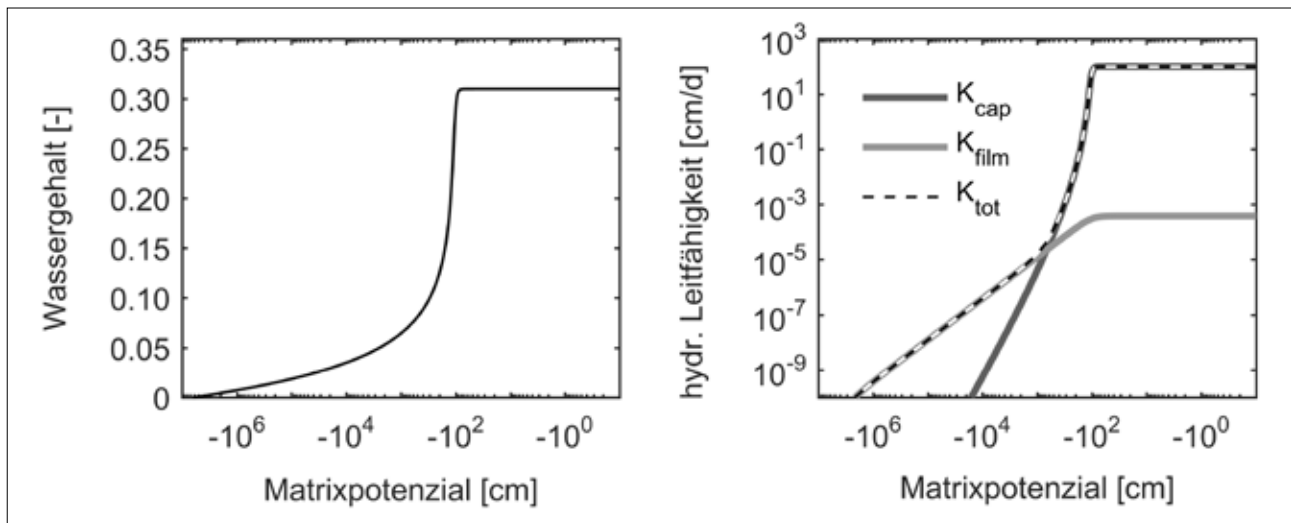


Abbildung 5: Identifizierte bodenhydraulische Funktionen. Die hydraulische Leitfähigkeit ( $K_{tot}$ ) besteht aus den Komponenten kapillare Leitfähigkeit ( $K_{cap}$ ) und Leitfähigkeit in Filmen und Ecken ( $K_{film}$ ).

und die Bodentemperaturen weitestgehend gut mit dem Modell beschrieben. Mögliche Fehlerquellen resultieren aus der Tatsache, dass die Nettostrahlung nicht am Lysimeter gemessen wurde. Da der Boden im Lysimeter nicht direkt am Standort entnommen wurde und der Standort teilweise bebaut ist, können mögliche Unterschiede in der Albedo zu Fehlern in der gemessenen Nettostrahlung führen. Dies ist ein Erklärungsansatz für die bislang unbefriedigende Leistungsfähigkeit des Modells im ersten Viertel des Validierungszeitraums. Eine weitere Fehlerquelle ist die Abbildung des turbulenten Austauschs von latenter und fühlbarer Wärme im Modell. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die MOST der Standardansatz für Modelle des Boden-Atmosphäre-Austauschs ist und auch die Grundlage für die Messung der Verdunstung auf größeren Skalen (LIDAR bzw. LAS) bildet (Wang et al. 2012).

## Literatur

- Iden S.C., Durner W. (2014) Comment on "Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range" by A. Peters, *Water Resources Research*, 50, doi:10.1002/2014WR015937.
- Milly P.C.D. (1982) Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric-head based formulation and a numerical model, *Water Resources Research*, 18(3), 489–498, doi: 10.1029/WR018i003p00489.
- Novak M.D. (2016) Importance of soil heating, liquid water loss, and vapor flow enhancement for evaporation, *Water Resources Research*, 52, 8023–8038, doi:10.1002/2016WR018874.
- Peters A. (2013) Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range, *Water Resources Research*, 49(10), 6765–6780, doi:10.1002/wrcr.20548.
- Peters A. (2014) Reply to comment by S. Iden and W. Durner on "Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range," *Water Resources Research*, 50, doi:10.1002/WR016107.
- Philip J.R., de Vries D.A. (1957) Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Trans. Am. Geophys. Union*, 38(2), 222–232.
- Reineke D. (2016) Numerical simulation of water, heat and vapor flow in weighable lysimeters under arid conditions, Masterarbeit, Institut für Geoökologie, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- Saito H., Šimunek J., Mohanty B. (2006) Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport in the Vadose Zone, *Vadose Zone Journal*, 5, 784–800, doi:10.2136/vzj2006.0007.
- Šimunek J., van Genuchten M.T., Šejna M. (2008) Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes, *Vadose Zone Journal*, 7(2), 587–600, doi:10.2136/vzj2007.0077.
- Šimunek J., van Genuchten M.T., Šejna M. (2016) Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Package, *Vadose Zone Journal*, 15(7), 25, doi:10.2136/vzj2016.04.0033.
- Wang K., Dickinson R.E. (2012) A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modelling, climatology, and climatic variability, *Rev. of Geophysics*, 50, 1–54, doi:10.1029/2011RG000373.

