

Wasserdynamiken in semiariden Böden: Ein Vergleich zwischen Acker- und Grasland

Lisa Haselow^{1*}, Holger Rupp² und Ralph Meissner²

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Studie mit 2 monolithisch befüllten Lysimetern, die von einem Acker- und einem Graslandstandort in der Trockensteppe Kasachstans entnommen wurden, sind in der Vegetationsperiode 2019 Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt unterzogen worden. Aufgrund der unterschiedlichen Bewirtschaftung wurde ein Vergleich der Wasserdynamiken in Abhängigkeit vom Landmanagement angestrebt. Die Beobachtungen wurden zudem mit den von HYDRUS-1D modellierten Bodenoberflächenflüssen verglichen. Die Messergebnisse zeigten hohe negative Wasserbilanzen mit einem höheren Wasserverlust durch Evapotranspiration des Graslandes. Die feuchteren Bedingungen des Ackerbodens konnten durch die Simulationen nachgewiesen werden, während die trockeneren Bedingungen des Graslandes vom Modell nicht erfasst wurden. Als ein wesentliches Ergebnis wurde festgestellt, dass das Modell nicht in der Lage war, Trockenperioden korrekt zu simulieren.

Schlagwörter: Bodenwasserhaushalt, Dürre, HYDRUS-1D, wägbare Lysimeter

Summary

Within the framework of a lysimeter study with 2 lysimeters filled with monoliths originating from an agricultural and grassland site, soil water balance studies were carried out in the dry steppe of Kazakhstan during the growing season 2019. Due to differences in cultivation, a comparison of soil water dynamics as a function of land management has been sought. The observations were also compared to surface fluxes simulated by HYDRUS-1D. The results showed high negative water budgets with higher water loss of the grassland by evapotranspiration. The simulations proved the wetter conditions of the cropland, while the model did not capture the drier conditions of the grassland. This indicated an insufficient model performance for dry periods.

Keywords: soil water balance, drought, HYDRUS-1D, weighable lysimeter

Einleitung

Der hydrologische Kreislauf in ariden und semiariden Regionen wird von der Evapotranspiration dominiert. Als Teil des Wasserhaushalts kann der Prozess aufgrund hoher Temperaturen und geringer Niederschläge die Wasserverfügbarkeit übersteigen. Grund für hohe Evapotranspirationsraten ist unter anderem auch eine unangemessene Landwirtschaft (Smits et al. 2012), die zudem zu Ertragseinbußen führen kann. Um landwirtschaftliche Erträge zu stabilisieren, sind nachhaltige Landbewirtschaftungsmethoden unabdingbar (Belyaev et al. 2020). Hinzu kommt, dass die Umwandlung von ungenutzten Flächen in Agrarflächen zu einer zusätzlichen Ertragssteigerung führen würde. In Osteuropa und Zentralasien gibt es „Transformationsländer“, die aufgrund

¹ Professur Hydrologie und Angewandte Meteorologie, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock, Satower Str. 48, D-18059 Rostock; ² Department Bodensystemforschung, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Falkenberg 55, D-39615 Altmärkische Wische

* Ansprechpartner: Lisa Haselow, email: lisa.haselow@uni-rostock.de

ihrer großen Landreserven eine wichtige Rolle in der globalen Ernährungssicherheitsdebatte spielen (Swinnen et al. 2017). Darüber hinaus haben sie aufgrund ihrer bereits großen Weizenproduktion das Potenzial, ein globaler „Brotkorb“ zu werden. Eines der wichtigsten Weizen produzierenden Länder ist Kasachstan. Von ca. 208 Mio. Hektar Grünland wurden einst 23 Mio. Hektar in Ackerland umgewandelt (Kraemer et al. 2015). Die übrigen 185 Mio. Hektar Land blieben bis heute landwirtschaftlich ungenutzt. Somit gibt es ein großes Potenzial an Fläche für die Nahrungsmittelproduktion. Neben unzureichenden Kenntnissen über bodenkundliche Aspekte fehlen Informationen über den Bodenwasserhaushalt und speziell die Wasserdynamik als Grundlage für die Ableitung von nachhaltigen Nutzungs- und Bewirtschaftungsstrategien.

Im Rahmen einer Lysimeterstudie sollen erste Informationen über die Wasserdynamik in Abhängigkeit des regionalen Landmanagements gewonnen werden. Mithilfe von in situ Messungen in der kasachischen Steppe werden die Bodenwasserhaushaltskomponenten bestimmt. Zudem werden die Daten für numerische Simulationen mit einem prozessbasierten, bodenphysikalischen Modell verwendet, um zu prüfen, inwieweit das Modell die Wasserflüsse unter trockenen Bedingungen widerspiegeln kann.

Innerhalb dieser Arbeit zielen die oben beschriebenen Aktivitäten auf:

- die Quantifizierung der Bodenwasserhaushaltskomponenten für die Vegetationsperiode 2019 in Abhängigkeit von der jeweiligen Landbewirtschaftung und
- die Simulation der Oberflächenflüsse für die jeweils untersuchten Böden.

Material und Methoden

Die Studie basiert auf Langzeituntersuchungen in der semiariden Grassteppe im Nordosten Kasachstans (51°14'13.2"N, 70°04'12.0"E). Im Jahr 2018 wurden für zwei Lysimeter von einer Ackerfläche (LYS 1), die für den Anbau von Sommerweizen genutzt wird, und von einem unberührten Steppenstandort (LYS 2), jeweils ein Bodenmonolith entnommen (Tabelle 1). Die wägbaren Lysimeter haben eine Oberfläche von 1 m² und eine Tiefe von 2 m. Die Masse wird mit einer Genauigkeit von ± 20 g gemessen (Xiao et al. 2009). In den Tiefen 30, 50 und 120 cm werden Bodenfeuchte und Bodentemperatur durch SMT-100-Sonden (Umwelt-Geräte-Technik GmbH-UGT, Deutschland) und Saugspannung durch Tensiomark-Sensoren (ecoTech, Deutschland) erfasst. Das Sickerwasser, das durch die Drainage am Lysimeterboden abgeführt wird, wird mit einem Kippzähler quantifiziert. Der Oberflächenabfluss wird über einen zwischen Lysimeterkragen und Containerwand befestigten Ablauf gesammelt und zu einem zusätzlichen Kippzähler geleitet. Eine detaillierte Beschreibung der Lysimeter ist Haselow et al. (2020) zu entnehmen.

Die Untersuchung basiert auf den Beobachtungszeitraum 01. April bis 31. Oktober 2019, wobei die Lysimeterdaten zusätzlich zu einer Simulation der Bodenwasserdynamik mit HYDRUS-1D (Simunek et al. 2016) herangezogen wurden. Um den Einfluss der Landbewirtschaftung zu identifizieren, wurden zwei Modelle entsprechend der Eigenschaften der Lysimeterfüllböden erstellt. Für beide Modelle wurde das hydraulische Modell von van Genuchten-Mualem verwendet. Die Modelle erhielten als Eingangsdaten die von den Lysimetern gemessenen Niederschlags- und Verdunstungsraten, berechnet nach Schrader et al. (2013), in täglicher Auflösung sowie die von den Tensiomark-Sensoren gelieferten Daten in den oben genannten Tiefen als Ausgangswerte für die Saugspannung. Der

Tabelle 1: Standortfaktoren und Lysimeteigenschaften.

| Standortfaktoren | | Lysimeteigenschaften | LYS 1 | LYS 2 |
|--|--------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Höhe über NN | 322 m | Entnahmestandort | Ackerfläche | Grassteppe |
| Durchschnittstemperatur (Apr – Okt 2019) | 13 °C | Kultur/Vegetation | Sommerweizen | Steppengras |
| Niederschlag (Apr - Okt 2019) | 139 mm | Bodentyp | Schwarzerde (Chernozem nach WRB) | Schwarzerde (Chernozem nach WRB) |

Kalibrierungszeitraum vom 01. Mai bis 31. Mai weicht von dem Beginn der Beobachtungsperiode ab, da der Einfluss der Schneeschmelzperiode im April 2019 reduziert werden sollte. Der Validierungszeitraum reicht vom 01. Mai bis zum 30. September.

3 Ergebnisse

Die Lysimeterdaten bieten einen Überblick hinsichtlich Änderungen im Bodenwasservorrat, wobei die Differenz zwischen Niederschlag, tatsächlicher Evapotranspiration (ETa), Sickerwasser und Oberflächenabfluss die Bodenwasserbilanz bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass diese mit -57,4 mm bei LYS 1 bzw. -88,3 mm bei LYS 2 die trockenen Standortbedingungen widerspiegeln. Im Einzelnen verlor LYS 1 269,1 mm Wasser durch ETa, während 211,7 mm durch Niederschlag bereitgestellt wurden. Bei LYS 2 waren es eine ETa von 283,6 mm und ein Niederschlag von 195,4 mm. Zusätzlich wurde bei LYS 2 während der Schneeschmelze im April ein Oberflächenabfluss von 0,1 mm gemessen. Bei beiden Lysimetern wurde während des gesamten Beobachtungszeitraums kein Sickerwasser gemessen.

Mit Blick auf die monatlichen ETa- und Niederschlagsraten ergeben sich auffällige Muster (Abbildung 1). Hinsichtlich des Niederschlags gab es keine großen Differenzierungen zwischen den Lysimetern. Den größten Unterschied gab es im April durch den Eintrag von Schmelzwasser. Mit nur 5% am Gesamtniederschlag waren Mai und Juli durch eine Trockenperiode gekennzeichnet. Insbesondere in diesen Perioden gab es erhebliche Unterschiede in der ETa. LYS 1 zeigte im Mai mehr als das Dreifache der monatlichen Niederschlagsmenge, während LYS 2 sechsmal mehr ETa als Niederschlag maß. Im Juli konnte ein umgekehrtes Muster beobachtet werden. Ab August haben beide Lysimeter die gleiche Menge an Wasser durch ETa verloren; wobei zu beachten ist, dass nur der Anteil verdunstet ist, der durch Niederschlag bereitgestellt wurde.

An beiden Lysimetern war die Schneeschmelze zu Beginn des Beobachtungszeitraums sichtbar (Abbildung 2). Es zeigte sich ein deutlicher Anstieg der Bodenfeuchte im Oberboden mit 16 Vol.-% (von 14 auf 30 Vol.-%) bei LYS 1 und 13 Vol.-% (von 15 auf 28 Vol.-%) bei LYS 2. Ab Juni konnte an LYS 1 ein starker Rückgang festgestellt werden, der ab Mitte Juli bis auf ein Wassergehaltsniveau von 10 Vol.-% sank. Im Gegensatz dazu zeigte LYS 2 schon Anfang Mai einen Rückgang und erreichte im Juni bereits den Ausgangszustand von 15 Vol.-%. Bis zum Ende der Beobachtungsperiode sank der Wassergehalt bei LYS 2 bis auf 11 Vol.-%. Ein ähnliches Muster mit einer minimalen zeitlichen Verschiebung wurde in der Tiefe von 50 cm beobachtet. Im Unterboden hingegen war mit einer Veränderung von 7 Vol.-% (von 15 auf 22 Vol.-%) bei LYS 1 bzw. 2 Vol.-% (von 12 auf 14 Vol.-%) bei LYS 2 ein Anstieg zu verzeichnen.

Da die täglich gemessenen ETa- und Niederschlagsraten als Eingangsdaten für die Modelle verwendet wurden, sollten Schätzungen und Beobachtungen identisch sein.

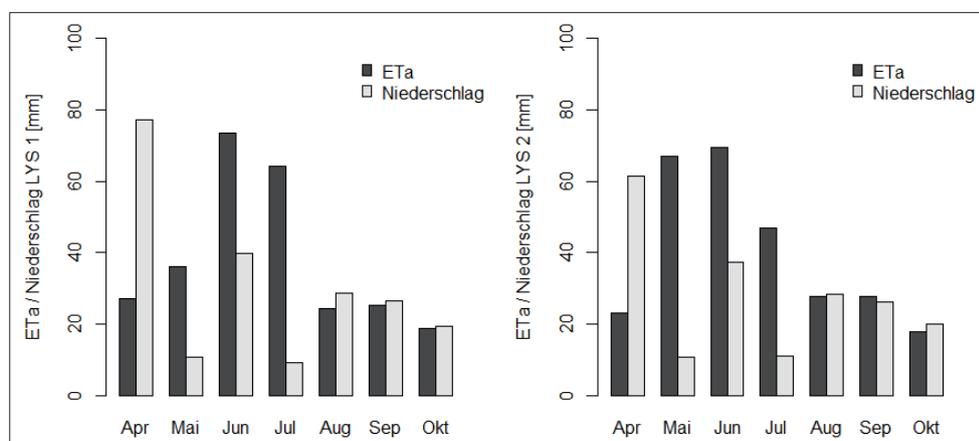


Abbildung 1: Monatliche ETa- und Niederschlagsraten gemessen bei LYS 1 (links) und LYS 2 (rechts) im Beobachtungszeitraum April – Oktober 2019. Das Wasseräquivalent vom Schnee wurde hinzugerechnet.

Abbildung 2: Bodenwasser-
gehalte in den Tiefen 30, 50
und 120 cm bei LYS 1 (links)
und LYS 2 (rechts) im Be-
obachtungszeitraum April –
Oktober 2019.

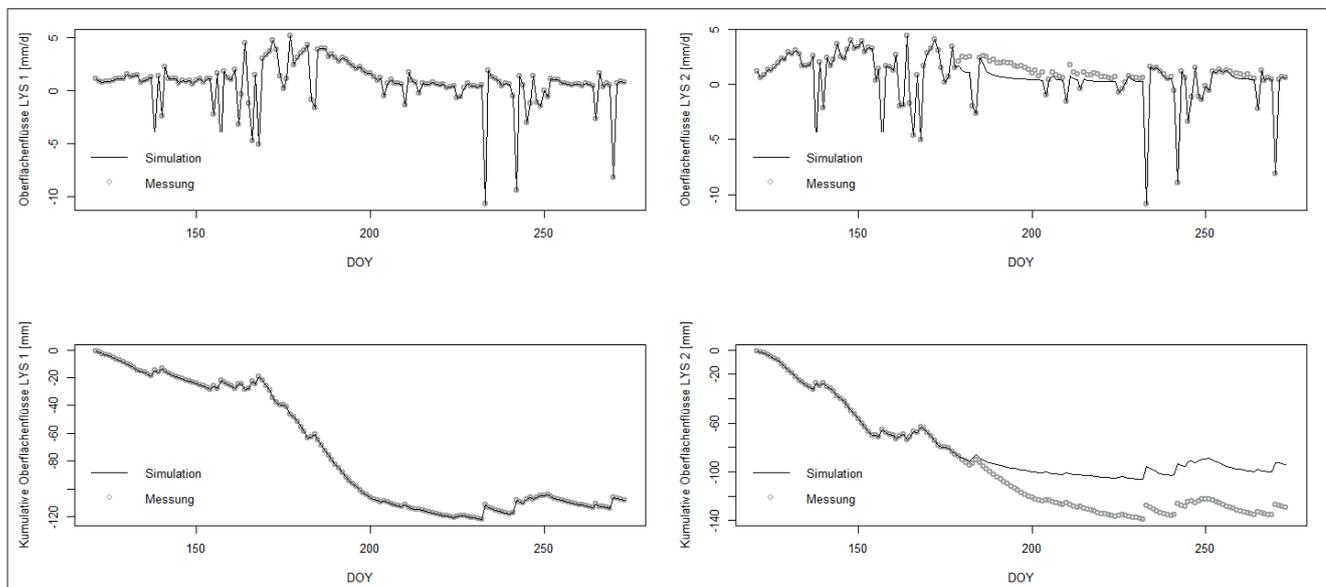
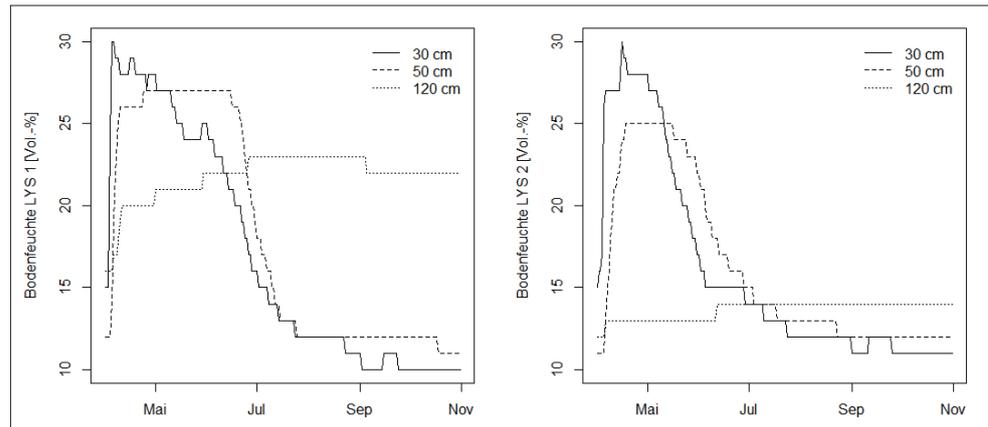


Abbildung 3: Gemessene
und simulierte (kumulative)
Oberflächenflüsse für LYS 1
(links) und LYS 2 (rechts) im
Beobachtungszeitraum Mai –
September 2019.

Dies war bei LYS 1 der Fall, während die simulierten Oberflächenflüsse bei LYS 2 nicht mit den Beobachtungen übereinstimmten (*Abbildung 3*). Das Modell simulierte geringere ETa-Raten während der Trockenperiode. Mit Blick auf die kumulierten Oberflächenflüsse kann festgestellt werden, dass die Beobachtungen und die Simulation eine Wasserbilanz von -108,3 mm für 153 Tage bei LYS 1 ergaben. Bei LYS 2 wurden insgesamt -128,9 mm gemessen, während das Modell den Wert von -93,8 mm ermittelte. Die sich daraus ergebende Differenz von 35,1 mm belegt die Unterschätzung durch das Modell.

Diskussion

Die Unterschiede bei den Parametern Niederschlag und ETa sind auf die Bewirtschaftung der Lysimeter zurückzuführen. Nach der Schneeschmelze waren beide Lysimeter nur von Vegetation bedeckt, die <10% Bodenbedeckung aufwies. In diesem Stadium ist der Prozess der Evaporation dominant (Allen et al. 1998), was die ähnlichen ETa-Werte im April erklärt. Die ETa-Werte im Mai repräsentieren die ersten Wachstumsstadien der Vegetation. Die Aussaat des Sommerweizens erfolgte am 18. Mai, während das Steppengras bereits >10% Bodenbedeckung aufwies. Dies führte zu einer höheren Transpirationsrate und damit zu einer fast doppelt so hohen ETa. Die ETa-Raten von LYS 1 stiegen ab Mitte Juni deutlich an. Das Erreichen des Mid-Season-Stadiums vom Sommerweizen wurde im Juli beobachtet. Im Gegensatz dazu hatte das Steppengras eine effektive

Vollvegetationsdecke im Juni erreicht, was sich in der höchsten monatlichen ETa-Rate widerspiegelt. Diese Wachstumsstadien zeigten auch einen wechselwirkenden Einfluss auf den Bodenwassergehalt. Aufgrund des niedrigen Wassergehalts im Juli sank die ETa bei beiden Lysimetern. Dies führte zu einem früh beobachteten Spätsaisonstadium mit einer durch Vergilbung der Blätter angezeigten Reife.

Die niedrigen ETa-Raten ab August können durch eine ausgetrocknete Bodenschicht verursacht worden sein. In ariden und semiariden Regionen ist es nicht ungewöhnlich, dass der Wassertransport als Wasserdampf erfolgen kann, wenn die flüssige Kontinuität durch den Boden verloren geht und der Verdunstungsbedarf höher als das Wasserangebot ist (Balugani et al. 2018). In einem solchen Fall bildet sich im Oberboden eine trockene Bodenschicht, die sich auf den Verdunstungsprozess auswirkt. Abhängig von der Ausdehnung dieser Schicht können trotz hochsommerlicher Bedingungen Verdunstungsraten von <1 mm/d auftreten (Dijkema et al. 2017). Assouline et al. (2013) beobachteten eine vollständig ausgetrocknete Bodenschicht an der Oberfläche nach 5 Tagen reiner Verdunstung. Dieser Umstand wurde auch häufig innerhalb dieser Studie beobachtet, die letztendlich durch ETa-Raten mit $<0,7$ mm/d gekennzeichnet waren.

Von Balugani et al. (2018) wird das Vorhandensein einer trockenen Bodenschicht als eine Schicht mit einer Druckhöhe von < -15.000 cm definiert. Da bei den hier vorgestellten Untersuchungen die Druckhöhe an der Bodenoberfläche nicht gemessen wurde, konnte mit den Modellergebnissen eine Abschätzung vorgenommen werden. Die simulierte Druckhöhe von LYS 1 korrespondiert gut mit den niedrigen ETa-Raten (<1 mm/d) und stützt damit die Theorie von Balugani et al. (2018). Die Oberflächendruckhöhe von LYS 2 hingegen deutet eine Trockenschichtbildung beim Übergang von einer feuchten zu einer trockenen Periode an, in der die ETa-Raten noch vergleichsweise hoch waren. Dies ist wahrscheinlich auf die Modelleistung zurückzuführen, da HYDRUS-1D auf der numerischen Lösung der Richards Gleichung basiert und eine Flüssigkeitskontinuität voraussetzt. Das Modell ist jedoch aufgrund der vorliegenden Flüssigkeitsdiskontinuität nicht in der Lage, eine lufttrockene Bodenschicht korrekt zu simulieren (Dijkema et al. 2017). Wenn der Boden lufttrockene Bedingungen mit einer Druckhöhe von -106 cm annimmt, kann der starke Gradient der Druckhöhe den steilen Abfall der hydraulischen Leitfähigkeit nicht überwinden. Infolgedessen kann das Modell den Austrocknungsprozess nicht ausreichend erfassen. Die modellierten Oberflächendruckhöhen von LYS 2 deuteten auf diesen Fall hin und höchstwahrscheinlich auf das zeitliche Vorhandensein einer ausgetrockneten Bodenschicht, während der Ackerboden von LYS 1 im Oberboden feuchter zu sein schien, was zu identischen simulierten und beobachteten Oberflächenflüssen führte.

Die Veränderung des Wassergehalts und sein Verlauf in den ersten beiden Beobachtungstiefen (30 und 50 cm) sind hauptsächlich von der ETa und dem Einfluss der oben beschriebenen Landbewirtschaftung abhängig. Interessant war jedoch die Beobachtung in der Tiefe von 120 cm. Es wird angenommen, dass die Lagerungsdichten der Grund für den Anstieg des Wassergehalts in beiden Unterbodenprofilen sind. Diese war bei LYS 1 geringer als bei LYS 2. Die somit höhere potentielle Infiltrationsrate führte im Falle der Schneeschmelze zu einem schnelleren Anstieg im Bodenwassergehalt. Aufgrund dessen und der höheren Menge an infiltriertem Schmelzwasser lag der Wassergehalt von LYS 1 auf einem höheren Niveau als der von LYS 2. Letzteres deutet auf einen höheren Verdichtungsgrad im Unterboden hin, der zu einer geringeren Infiltrationsrate führt und weniger Wasser in diese Tiefe gelangen lässt.

Schlussfolgerungen

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann festgestellt werden, dass der Steppenboden eine nachhaltige, landwirtschaftliche Nutzung als Ackerland erlaubt. Da der Beobachtungszeitraum eine für dieses Klima übliche Trockenperiode mit einschloss, konnten die bodenhydrologischen Prozesse auch unter diesen extremen Bedingungen beobachtet werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Studie nur ein erster

Schritt in Richtung einer Betrachtung der Umwandlung von ungenutztem Grünland in Ackerland mit nachhaltiger Landwirtschaft ist. Für aussagekräftige Informationen sind Langzeitmessungen notwendig. Da Lysimeteruntersuchungen punktuelle Messungen darstellen, sind Simulationen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Gebietseinheiten unbedingt erforderlich. Allerdings wurde festgestellt, dass das bodenphysikalische Modell von HYDRUS-1D nicht in der Lage war, die ETa während der Trockenperiode ausreichend korrekt abzuschätzen. Deshalb sind weitere Untersuchungen unerlässlich, um vor allem die für den hydrologischen Kreislauf in diesen Gebieten besonders relevanten Trockenperioden möglichst präzise zu simulieren und zu quantifizieren.

Danksagung

Dieser Beitrag basiert auf Studien, die im Rahmen des Forschungsprojektes ReKKS (FKZ 01LZ1704C) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird. Wir danken allen Mitarbeitern der TOO Fermer 2002 für ihre Hilfe beim Aufbau und der Betreuung des Feldexperiments.

Literatur

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop Evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp. 95-164.

Assouline S., Tyler S.W., Selker J.S., Lunati I., Higgins C.W., Parlange M.B. (2013) Evaporation from a shallow water table: Diurnal dynamics of water and heat at the surface of drying sand. *Water Resour. Res.* 49, 4022-4034.

Balugani E., Lubczynski M.W., van der Tol C., Metselaar K. (2018) Testing three approaches to estimate soil evaporation through a dry soil layer in a semi-arid area. *J. Hydrol.* 567, 405-419.

Belyaev V.I., Grunwald L.-C., Akshalov K.A., Meinel T., Sokolova L.V. (2020) Modernization of current agricultural technologies of grain production under the conditions of a steppe zone of the Altai region. In: Fruehauf M., Guggenberger G., Meinel T., Theesfeld I., Lentz S. (eds.) KULUNDA: Climate Smart Agriculture, Innovations in Landscape Research. Springer Nature Switzerland AG 2020, Cham, Switzerland, pp. 341-354.

Dijkema J., Koonce J.E., Shillito R.M., Ghezzehei T.A., Berli M., van der Ploeg M.J., van Genuchten M.T. (2017) Water distribution in an arid zone soil: Numerical analysis of data from a large weighing lysimeter. *Vadose Zone J.* 17, 1-17.

Haselow L., Rupp H., Akshalov K., Meißner R. (2020). Forschungsarbeiten zum Bodenwasserhaushalt in der kasachischen Steppe. *WasserWirtschaft* 110, 34-40.

Kraemer R., Prishchepov A.V., Mueller D., Kuemmerle T., Radeloff V.C., Dara A., Terekhov A., Fruehauf M. (2015) Long-term agricultural land-cover change and potential for cropland expansion in the former Virgin Lands area of Kazakhstan. *Environ. Res. Lett.* 10, 054012.

Schrader F., Durner W., Fank J., Gebler S., Pütz T., Hannes M., Wollschläger U. (2013) Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements. *Procedia Environ. Sci.* 19, 543-552.

Simunek J., van Genuchten M.T., Sejna M. (2016) Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone J.* 15, 1-25.

Smits K.M., Ngo V.V., Cihan A., Sakaki T., Illangasekare T.H. (2012) An evaluation of models of bare soil evaporation formulated with different land surface boundary condition and assumptions. *Water Resour. Res.* 48, W12526.

Swinnen J., Burkitbayeva S., Schierhorn F., Prishchepov A.V., Müller D. (2017) Production potential in the „bread baskets“ of Eastern Europe and Central Asia. *Glob. Food Sec.* 14, 38-53.

Xiao H., Meißner R., Seeger J., Rupp H., Borg H. (2009) Testing the precision of a weighable gravitation lysimeter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 194-200.

