

19. Gumpensteiner Lysimetertagung

Lysimeter und Bodenwasserhaushalt: Trockenheit -
Bewässerung - Ertragssicherheit

Lysimeter and soil water management: drought - irrigation -
yield stability

13. und 14. April 2021
HBLFA Raumberg-Gumpenstein

www.raumberg-gumpenstein.at

19. Gumpensteiner Lysimetertagung 2021

Herausgeber:
Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein
A-8952 Irdning-Donnersbachtal

Druck, Verlag und © 2021

ISBN-13: 978-3-902849-83-0

ISSN: 1818-7722

Eine Einrichtung des Bundesministeriums
für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus



19. Gumpensteiner Lysimetertagung 2021

Lysimeter und Bodenwasserhaushalt: Trockenheit -
Bewässerung - Ertragssicherheit

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:
HBLFA Raumberg-Gumpenstein
Landwirtschaft
Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal
raumberg-gumpenstein.at
Für den Inhalt verantwortlich:
die AutorInnen
Gestaltung: Brigitte Marold
ISBN-13: 978-3-902849-83-0
Alle Rechte vorbehalten
Irdning-Donnersbachtal 2021

Inhaltsverzeichnis

Vergleich von Lysimeter- und Szintillometerverdunstung mit Referenzverdunstungsmethoden.	7
M. Herndl, M. Vremec, V. Forstner, M. Orsag und S. Birk	
Estimating crop evapotranspiration of managed alpine grassland using remotely sensed LAI.	17
M. Vremec, A. Klingler, M. Herndl, A. Schaumberger und S. Birk	
Partitioning evapotranspiration based on lysimeter water balance data and stable isotope profiles.	25
G. Liebhard, A. Klik, Ch. Stump und Reinhard Nolz	
Evaluation of evapotranspiration methods by means of weighing lysimeter data in Argentina.	31
A.M.G. Faraminan, F. Carmona, R. Rivas, F. Degano und P. Olivera Rodriguez	
Multi-source characterisation of non-rainfall water inputs to a semi-arid ecosystem.	37
S. Paulus, T.S. El-Madany, R. Orth, A. Hildebrandt und M. Migliavacca	
Wasserdynamiken in semiariden Böden: Ein Vergleich zwischen Acker- und Grasland.	43
L. Haselow, H. Rupp und R. Meissner	
Investigating shrub-encroached mountain grassland using high precision lysimeters.	51
G. Leitinger, B. Mouhamadou, U. Tappeiner, U. Peintner und S. Lavorel	
Vergleich der Bodenfeuchteausschöpfung eines Lobbodens im Lysimeter und im Feld unter Ackerkulturen.	57
S. Knoblauch	
Modellbasierte Bewertung von Bewässerungsmaßnahmen auf Grundwassermenge und -qualität.	65
J. Fank und G. Klammler	
Identification of mechanisms controlling nitrogen export from agricultural lysimeters.	71
S. Werisch und D. Burghardt	
Die Wirkungen von Austrocknung und Wiederbefeuchtung auf die Stickstoffauswaschung.	79
H. Rupp und R. Meißner	
Nitratauswaschung unter Gemüse bei unterschiedlichem Ernterückstandsmanagement.	87
E. Spiess, C. Humphrys, F. Liebisch, V. Prasuhn und R. Neuweiler	

Auswaschung von Pflanzenschutzmittelwirkstoffen auf sandigen Lehmböden. ...	95
N. Tauchnitz, H. Rupp, K. Florian, Ch. Wolff und R. Meissner	
Transport von organischen Umweltchemikalien in Lößböden.	101
Th. Demmel, Th.R. Rüde, J. Schwarzbauer und U. Boester	
Wasserverbrauch und Wachstumsdynamik von Quercus frainetto und Tilia cordata.	109
M. Schreiner, B. Jäckel, J. Müller, A. Block und F. Böttcher	
Aktuelle Entwicklungen in der Lysimetertechnik: Das Lysimeter-Hebesystem.	117
G. Klammler, J. Fank und G. von Unold	
Ein Vergleich von Gesamtdeposition und nasser Deposition am Almstandort Stoderzinken.	123
M. Schink, M. Herndl und M. Kandolf	
Drought and heat cause a shift in vegetation composition in an intensive grassland.	129
E. Tello-García, L. Huber, G. Leitinger, A. Peters und E. Tasser	
Water use of lawns determined in weighing lysimeters.	133
J. Zsembeli, L. Sinka, G. Tuba, A. Rivera-García und G. Kovács	
Impact of crop residues on soil water evaporation in weighing lysimeters.	139
M. Jancsó, I. Balla, N. Valkovszki, C. Bozán und J. Pauk	
Predicting bare soil evaporation by numerical modeling - the role of hydraulic functions.	143
D.C. Joshi, A. Peters, S.C. Iden, B. Zimmermann und W. Durner	
Estimating soil hydraulic parameters from lysimeter data: a Bayesian perspective.	149
M. Schübl, G. Brunetti und Ch. Stumpp	
Abschätzung und Reduktion der Nitratauswaschung im Feldgemüsebau.	153
E. Spiess, F. Liebisch, R. Neuweiler und O. Zemek	
Substratevaluierung anhand von Stadtbaumlysimetern mit pflanzenphysiologischem Monitoring.	157
A. Zeiser, Th. Weninger, S. Schmidt, R. Weisgram und E. Murer	
Zum Wasserhaushalt grundwassernahe Standorte im Wechselspiel von Nass- und Trockenjahren.	163
O. Dietrich, A. Behrendt und M. Wegehenkel	
Modellierung hydraulischer und geochemischer Prozesse in Grundwasser-Lysimetern.	169
M. Davies ^{1*} , O. Dietrich und Ch. Merz	

Vorträge

Vergleich von Lysimeter- und Szintillometerverdunstung mit Referenzverdunstungsmethoden

Markus Herndl^{1*}, Matevz Vremec², Veronika Forstner², Matej Orság³
und Steffen Birk²

Zusammenfassung

Die Evapotranspiration (ET) ist ein wichtiger Parameter im Wasserkreislauf eines Ökosystems. Die ET ist jedoch auch oft schwierig zu bestimmen. Das Ziel dieser Arbeit ist, ein erster Vergleich verschiedener Methoden zur Ermittlung der ET an einem alpinen Grünlandstandort. Dabei werden die Daten eines Lysimeters und eines Szintillometers mit Daten von zwei Referenzverdunstungsmethoden (ET_c, ET₀) verglichen. Betrachtet man die ET in der Periode April-August 2018, so zeigt sich der beste Zusammenhang beim Lysimeter mit ET_c ($R^2=0,83$) sowie beim Szintillometer mit ET₀ ($R^2=0,97$). Diese Beziehungen können auf die unterschiedliche Berücksichtigung des LAI und der Wuchshöhe in den einzelnen Methoden zurückgeführt werden. Als mögliche Konsequenz könnte man bei der Abschätzung der ET bei heterogenen Grünlandbeständen und -nutzungen die ET₀-Methode nehmen, sowie bei homogenen eher auf ET_c zurückgreifen. Um diese Schlussfolgerung festigen zu können, müssen jedoch weitere Datensätze analysiert werden.

Schlagwörter: Energiebilanz, Latenter Wärmestrom, Verdunstung, Grünland

Summary

Evapotranspiration (ET) is an important parameter in the water cycle of an ecosystem. However, ET is also often difficult to determine. The aim of this work is to make a first comparison of different methods for determining ET at an alpine grassland site. Data from a lysimeter and a scintillometer are compared with data from two reference evapotranspiration methods (ET_c, ET₀). For the period April-August 2018, ET_c showed the best fit with the lysimeter ET ($r^2=0.83$), whereas ET₀ correlated best with the scintillometer ET ($r^2=0.97$). These relationships can be attributed to the different consideration of the LAI and the growth height in the two different methods. As a possible consequence, the ET₀ method could be used to estimate ET for heterogeneous grassland stands and ET_c for homogeneous ones. However, further datasets must be analysed to be able to consolidate this conclusion.

Keywords: energy balance, latent heat flux, evapotranspiration, grassland

Einleitung

Die Evapotranspiration (ET) ist ein Schlüsselparameter, der auf einzigartige Weise den Wasser-, (Verdunstung), Energie-, (latenter Wärmefluss) und Kohlenstoffkreislauf (Transpiration/Photosynthese) verbindet (Monteith 1965, Wong et al. 1979, Fisher 2013). ET spielt eine entscheidende Rolle in der Bestimmung des Pflanzenwasserbedarfs und ist oft Basis für die Bewässerung in der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion (Allen et al. 1998, Anderson et al. 2011). Sie kann als Frühindikator von Extremereignissen wie Blitz-

¹ Institute of Plant and Cultural Landscape, Agricultural Research and Education Centre Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal, ² Institute of Earth Sciences, NAWI Graz Geocenter, University of Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 Graz, ³ Global Change Research Institute CAS, Belidla 154, 60300 Brno-stred-Staré Brno

* Ansprechpartner: Dr. Markus Herndl, email: markus.herndl@raumberg-gumpenstein.at

dürren dienen (Anderson et al. 2013, Otkin et al. 2016) aber auch zur Diagnose der Klimavariabilität und -veränderung verwendet werden (z.B. Dai et al. 2004, Greve et al. 2014). Eine Schätzung oder genaue Messung der ET kann schwierig sein. Es gibt jedoch zahlreiche Methoden und Instrumente wie beispielsweise das oft verwendete Produkt aus Referenzverdunstung (ET_0) und kulturspezifischem Korrekturwert (K_c) (Allen et al. 2005). Technologien zur Bestimmung von ET umfassen beispielsweise Lysimeter, Eddy-Kovarianz (EC), Szintillometrie und Fernerkundungsmodelle. Wägbare Lysimeter sind die genaueste Methode zur Ermittlung von ET (Evetts et al. 2012), sie sind aber auch sehr teuer in Installation, Wartung und Betrieb. Darüber hinaus erfordern sie ein hohes Maß an operativen Kenntnissen und Datenverarbeitungserfahrung, um genaue und repräsentative Messungen zu erhalten. EC und Szintillometrie sind zwei turbulente Fluss-Methoden, die typischerweise verwendet werden. Szintillometer messen Beiträge auf Flüsse über eine feste Weglänge, die EC kann Beiträge zu Flüssen über einen variablen Bereich messen die durch Windbewegungen beeinflusst werden. Obwohl Szintillometer weniger kostspielig und relativ portabel sind, weisen sie oft Diskrepanzen bei der Schließung der Energiebilanz auf. Frühere Szintillometerstudien benutzten EC für Bodenvergleichsmessungen, bis dato gibt es aber nur wenige Vergleiche mit Lysimetermessungen und Referenzverdunstungsmethoden.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher, ein erster Vergleich von Szintillometer- mit Lysimetermessungen und verschiedener Methoden zur Abschätzung der ET an einem alpinen Grünlandstandort.

Material und Methoden

Versuchsstandort

Um die ET der Messsysteme mit Referenzverdunstungsmethoden vergleichen zu können wurden Daten aus der Vegetationsperiode 2018 (27.04.2018-08.08.2018) auf dem Versuchsstandort der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal herangezogen. Die Versuchsfläche ist bewachsen mit Dauergrünland und befindet sich in 700 m Seehöhe wobei die langjährige Jahresmitteltemperatur $8,2^{\circ}\text{C}$ und der durchschnittliche Jahresniederschlag 1059 mm beträgt.

Lysimeter

Als Standardmethode, um ET hochaufgelöst messen zu können wurden Daten eines Lysimeters (Lys2 – COT0, *Abbildung 1*) aus dem Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“ herangezogen. Im Versuchskonzept wird ein Dauergrünlandpflanzenbestand auf sechs Lysimetern seit dem Jahr 2014 einer Faktorkombination von einer erhöhten Temperaturstufe ($+3^{\circ}\text{C}$; COT2) und einer Behandlungsstufe mit gesteigerter CO_2 -Konzentration der Luft ($+300\text{ ppm}$; C2T0) ausgesetzt (Herndl et al. 2011). Der wägbare Lysimeter besteht aus einem Bodenmonolithen mit 1 m^2 Oberfläche und 1,5 m Tiefe. Die Sensorausstattung ist auf die Tiefen 10, 30 und 50 cm konzentriert und umfasst TDR-Trime Sonden pico32 (IMKO GmbH) zur Wassergehaltsmessung sowie mit Temperaturerfassung kombinierte Tensiometer T8-30 (UMS GmbH) zur Bestimmung des Matrixpotentials. Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 50-Liter-Tank und eine Waage, die grammgenau den Sickerwasseraustrag erfassen kann. Der Einsatz einer bidirektionalen Pumpe sowie eines Saugkerzenrechens an der Unterseite des Lysimeters und Tensiometer im Freiland in gleicher Tiefe, ermöglichen feldidentische Wasserflüsse an der Unterkante der Bodensäule (Unold und Fank 2008).

Szintillometer

Als zweite Methode um ET abschätzen zu können wurden Daten aus einem Szintillometer herangezogen. Für die szintillometrischen Messungen wurde ein Zweischiebentyp vom

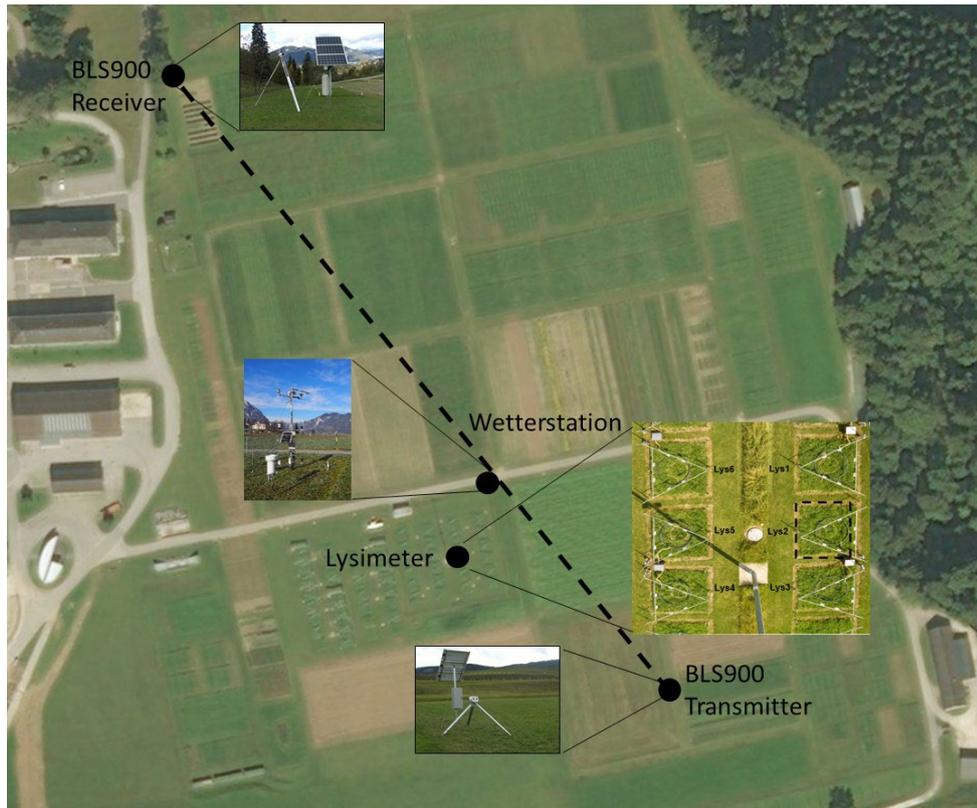


Abbildung 1: Versuchsfläche am Standort Raumberg-Gumpenstein mit Lysimeter, Szintillometer BLS900 (Receiver, Transmitter) und Wetterstation.

BLS-Typ BLS900 (Scintec, Deutschland) verwendet. Sein Öffnungsdurchmesser beträgt 0,15 m, und er arbeitet bei einer Wellenlänge von 880 nm. Der BLS wurde in einer Höhe von 3 m über der Bodenoberfläche installiert und die 355 m lange Messstrecke war in nordöstlicher Richtung ausgerichtet (Abbildung 1). Wenn man die Wellengleichung mit Hilfe der Rytov-Theorie löst und ihre Lösung mit der Turbulenztheorie kombiniert, erhält man den „Refractive Index Structure Parameter“ C_n^2 . Verrechnet man diesen Index mit den Wetterparametern (Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftdruck) erhält man den sensiblen Wärmestrom aus dem in weiterer Folge ET abgeleitet werden kann (Poznikova et al. 2018).

Energiebilanz

In vielen Studien werden Szintillometer mit der Energiebilanz verwendet. Die Energiebilanzgleichung lautet:

$$LE = R_n - H - G,$$

wobei LE der latente Wärmestrom, R_n die Nettostrahlung, H der fühlbare Wärmestrom und G der Bodenwärmestrom ist (W/m^2) (Allen et al. 2007).

Referenzverdunstungsmethoden

Zwei Varianten der Penman-Monteith-Gleichung (Monteith 1965) wurden zur Schätzung der kulturspezifischen Verdunstung (ET_c) und der Gras-Referenzverdunstung (ET_0) verwendet. Die kulturspezifische Verdunstung (Gleichung 1) und die Gras-Referenzverdunstung (Gleichung 2) wurden auf stündlicher Basis nach Empfehlungen der FAO (Food and Agriculture Organization) berechnet (Allen et al. 1998):

$$ET_c = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]} \quad 1$$

wobei ET_c , R_n und G in $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$; Δ die Steigung der Sättigungsdampfdruck-Temperatur-Beziehung ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); ρ_a die Luftdichte (kg m^{-3}); c_p die spezifische Wärme der Luft ($\text{MJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$); γ die psychrometrische Konstante ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$) ist; r_a und r_s sind der aerodynamische bzw. Oberflächenwiderstand (ms^{-1}) die unter Verwendung linear interpolierter Daten von LAI- und Bestandeshöhenmessungen (h_{crop}) berechnet werden.

ET_0 wird aus Gleichung 2 abgeleitet, wobei eine Bestandeshöhe (h_{crop}) von 12 cm, ein LAI von $h_{crop} \cdot 24$ und ein r_s von 70 (sm^{-1}) angenommen wird:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad 2$$

Die Auswertung der Verdunstung über den Lysimeter erfolgt über eine technisch und manuelle Datenkorrektur (Slawitsch et al. 2016) sowie mit der Filtermethode AWAT (Peters et al. 2016).

Ergebnisse und Diskussion

Referenzverdunstung

Vergleicht man ET_c mit ET_0 in der Versuchsperiode (*Abbildung 2*), sieht man vor allem den Einfluss (die Berücksichtigung) von gemessenem LAI und der Wuchshöhe auf ET_c im Zeitraum bis zum 1. Schnitt (29.05.2018) und 4 Wochen nach dem 1. Schnitt bis zum 2. Schnitt (24.07.2018). Auffallend waren die unüblich hohen Verdunstungen von Ende April bis Ende Mai die hauptsächlich durch die hohen Lufttemperaturen zustande kamen, die im April im Mittel $4,4^\circ\text{C}$ und im Mai $2,1^\circ\text{C}$ über dem langjährigen Durchschnitt (1981-2010) lagen. Zusammen mit den geringen Niederschlägen im April (2/3 weniger als im langjährigen Durchschnitt) ergaben sich für den Standort relativ trockene Bodenbedingungen. Messungen der Bodenfeuchte anhand der Saugspannung zeigten, dass Wasser in der Hauptwurzelzone des Grünlandes bis weit in den Juni hinein nur schwer verfügbar ($> 300 \text{ hPa}$) war (vgl. Herndl et al. 2019). Da der Stressfaktor (K_s), der über die Saugspannung in 10 cm Bodentiefe berechnet wurde, aber selbst in der trockensten Periode Ende April und Anfang Mai $>0,97$ war, wurde ET_c dahingehend nicht korrigiert.

Vergleich Lysimeter und Szintillometer

Energiebilanz

Der Verlauf des latenten Wärmestroms (LE) auf dem Lysimeter ist weitgehend durch die Nettostrahlung (R_n) beeinflusst, folgt aber auch dem Trend der Entwicklung des LAI bis zum ersten Schnitttermin (*Abbildung 3, Abbildung 4*). Nach dem Schnitt nimmt der latente Wärmestrom ab und steigt wieder bis zum zweiten Schnitttermin. Diese Tatsache wurde auch in anderen Studien für Grünland beobachtet (Rosset et al. 1997, Hammerle et al. 2008). Der LE-Verlauf auf dem Szintillometer folgt über den gesamten Versuchszeitraum hauptsächlich dem Trend der Nettostrahlung, was darauf hinweist, dass sich über die Messstrecke von 355 m kein Einfluss von LAI Zu- oder Abnahme erkennen lässt. Das scheint plausibel, da die Nutzung und die Bestandeszusammensetzung über die Versuchsfläche doch recht unterschiedlich ist (*Abbildung 1*). Der Anteil der Nettostrahlung (R_n), der für den fühlbaren Wärmestrom (H) verwendet wurde, nahm dementsprechend auf dem Lysimeter mit steigendem LAI ab bzw. nach dem Schnitttermin zu, was sich wiederum in den Daten der Szintillometermessungen nicht erkennen lässt.

Evapotranspiration

Vergleicht man die Summe der Evapotranspiration über die Versuchsperiode des Szintillometers (387 mm) mit der des Lysimeters (316 mm), zeigt sich eine Überschätzung von

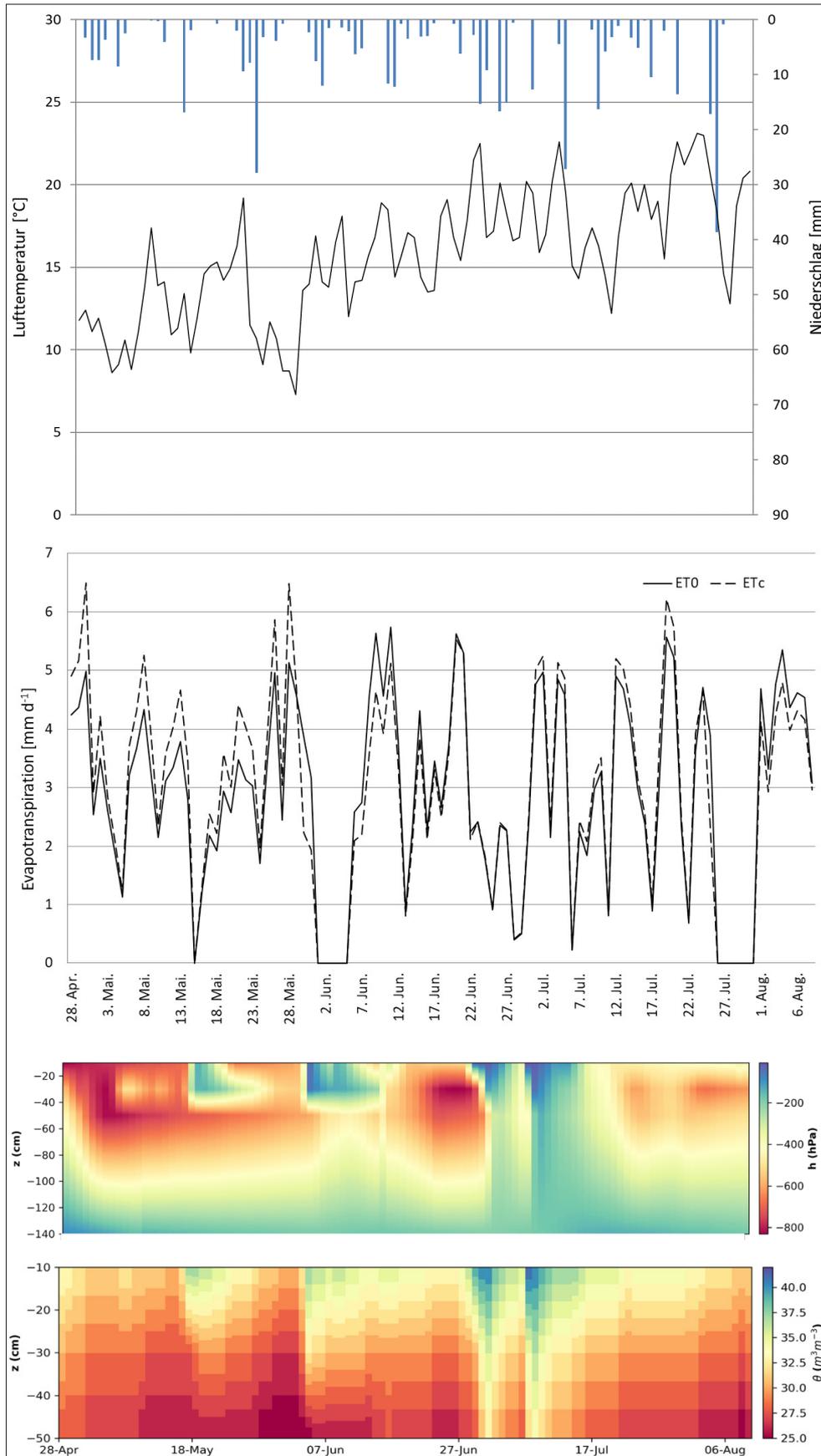
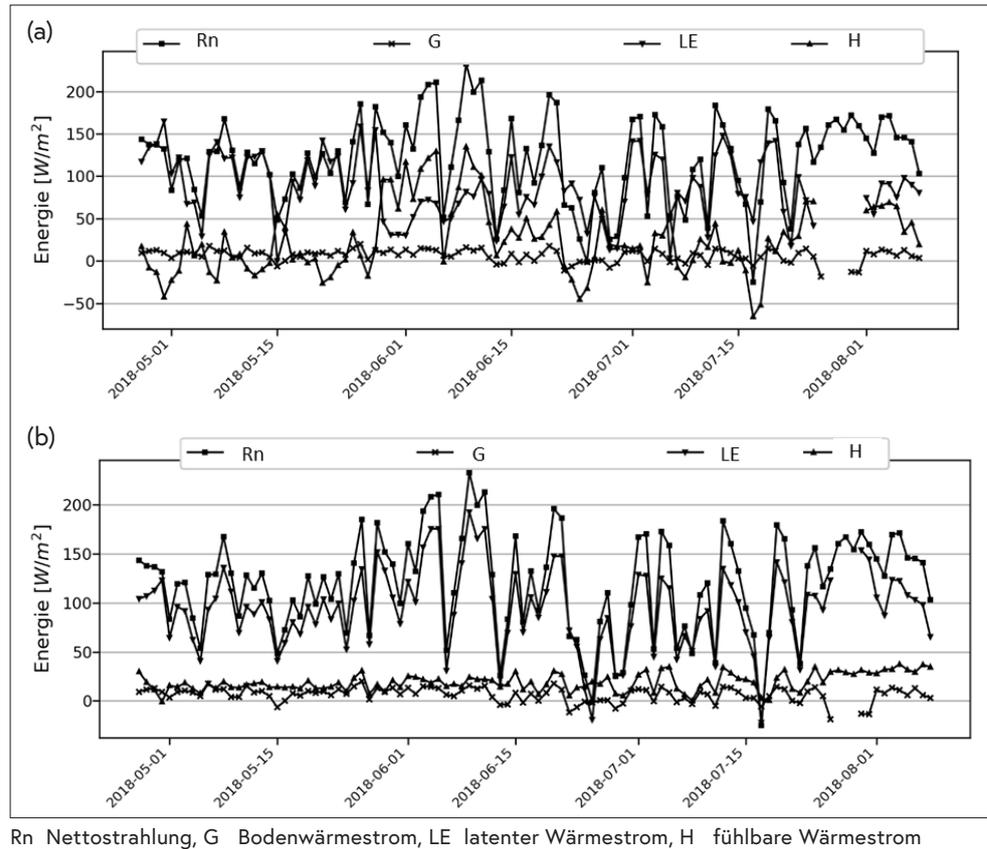


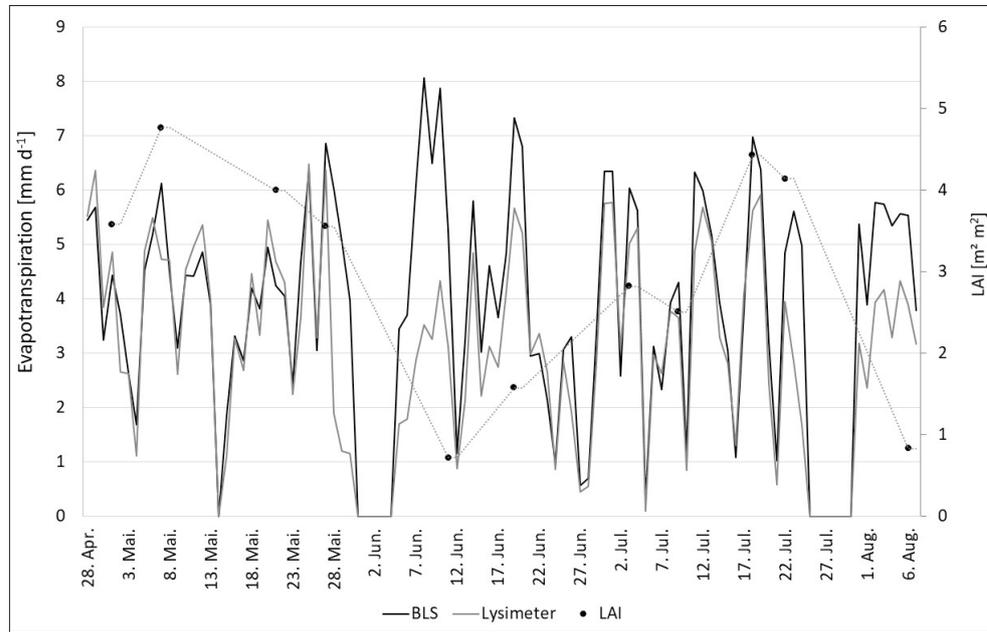
Abbildung 2: Mittlere Tages-temperatur, Niederschlags-summe, ET_0 und ET_c sowie Saug-spannung h und Bodenfeuchte θ in der Tiefe z für die Periode 28.04-08.08.2018 am Standort Raumberg-Gumpenstein.

Abbildung 3: Durchschnittliche Energiebilanzkomponenten ($W\ m^{-2}$) am (a) Lysimeter und (b) am Szintillometer in der Versuchsperiode 2018.



Rn Nettostrahlung, G Bodenwärmestrom, LE latenter Wärmestrom, H fühlbarer Wärmestrom

Abbildung 4: Verlauf der täglichen Evapotranspiration gemessen auf dem Lysimeter und dem Szintillometer (BLS) in der Versuchsperiode 2018.



rund 20%. Betrachtet man den Verlauf der täglichen ET der beiden Messsysteme, zeigen sich ähnliche Zusammenhänge wie bei der Energiebilanz. Die ET am Lysimeter folgt im Wesentlichen dem Lufttemperaturverlauf, aber auch der Entwicklung des LAI, wobei bei der ET des Szintillometers kein Einfluss dahingehend zu sehen ist (Abbildung 4). Vergleicht man die stündlichen ET-Werte der beiden Messsysteme zeigt sich ein relativ geringer Zusammenhang von $R^2=0,65$ bei einem RMSE von 0,18 mm (Abbildung 5). Die Studie von Moorhead et al. (2017) fand eine Korrelation von $R^2=0,83$ bei einem RMSE von 0,13 mm.

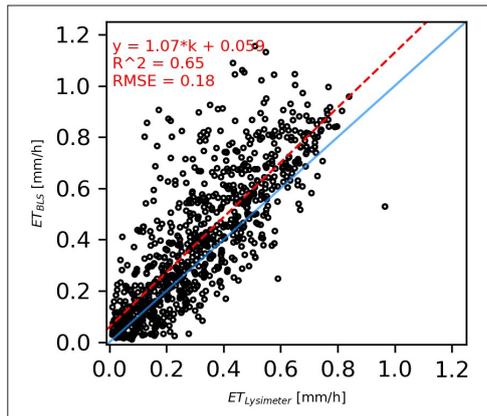


Abbildung 5: Vergleich der stündlichen Evapotranspiration gemessen auf dem Lysimeter und dem Szintillometer (BLS) in der Versuchsperiode 2018.

Vergleich Referenz- mit Lysimeter und Szintillometerverdunstung

Stellt man die stündlichen Evapotranspirationssummen aus den Lysimeter- und Szintillometermessungen jenen der Referenzverdunstungsmethoden (ET_0 und ET_c) gegenüber so zeigt sich ein genauere Zusammenhang von ET_0 mit der ET des Szintillometers ($RMSE=0,09$) und von ET_c mit der ET des Lysimeters ($RMSE=0,11$) (Abbildung 6). Ähnliche Zusammenhänge ($RSME=0,07$) von ET_0 und ET eines Szintillometers wurden auch von Miniciapilli et al. (2014) beobachtet. Als mögliche Konsequenz, könnte man bei der Abschätzung der aktuellen Evapotranspiration bei heterogener Bestandeszusammensetzung und -nutzung eher die Wuchshöhen- und LAI-korrigierte ET_0 -Methode nehmen, sowie bei homogenen Grünlandbeständen und Nutzungen eher auf ET_c zurückgreifen. Um diese Schlussfolgerung festigen zu können, müssen in weiterer Folge jedoch Daten über mehrere Jahre analysiert werden.

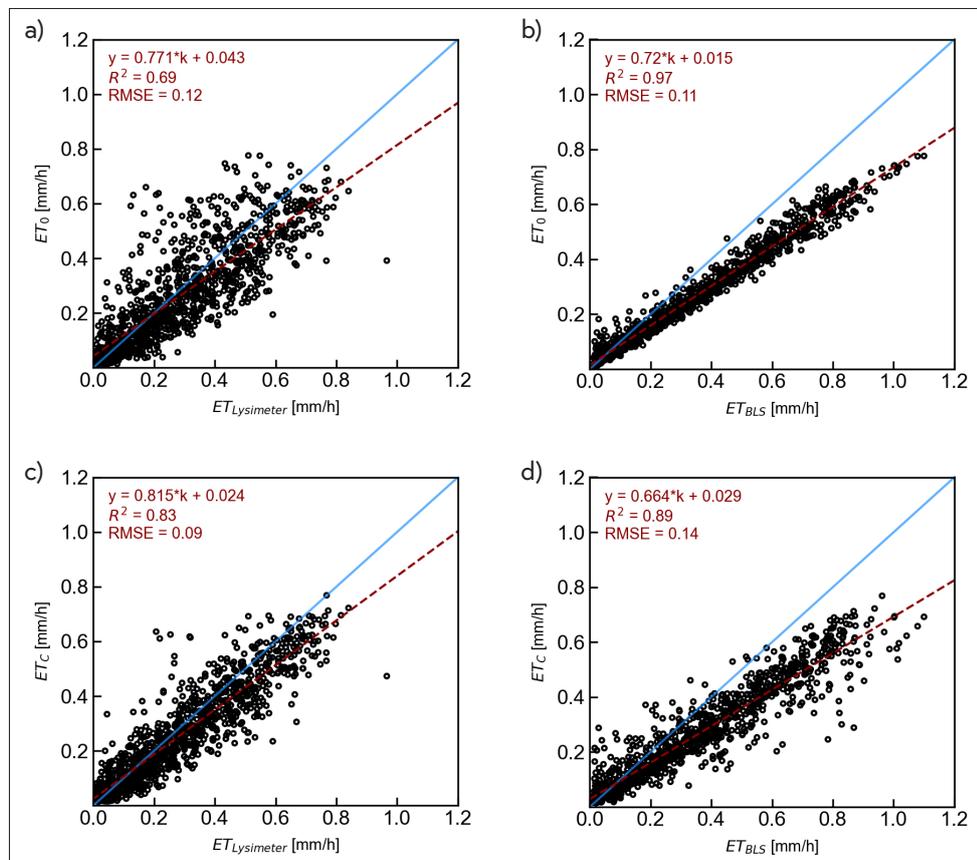


Abbildung 6: Vergleich der stündlichen Evapotranspiration gemessen auf dem Lysimeter und dem Szintillometer mit (a,b) ET_0 und (c,d) ET_c in der Versuchsperiode 2018.

Literatur

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper), 328 pp., FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Allen R.G., Tasumi M., Morse A., Trezza R. (2005) A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning, *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 251-268.

Allen R.G., Tasumi M., Trezza R. (2007) Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (metric) - Model. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 133, 380-394.

Anderson M.C., Kustas W.P., Norman J.M., Hain C.R., Mecikalski J.R., Schultz L., González-Dugo M.P., Cammalleri C., d'Urso G., Pimstein A., Gao F. (2011) Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 223-239.

Anderson M.C., Hain C., Otkin J., Zhan X., Mo K., Svoboda M., Wardlow B., Pimstein A. (2013) An intercomparison of drought indicators based on thermal remote sensing and NLDAS-2 simulations with US Drought Monitor classifications, *Journal of Hydrometeorology*, 14, 1035-1056.

Dai A., Trenberth K. E., Qian T. (2004) A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming, *Journal of Hydrometeorology*, 5, 1117-1130.

Evelt S.R., Schwartz R.C., Howell T.A., Baumhardt R.L., Copeland K.S. (2012) Can weighing lysimeter ET represent surrounding field et well enough to test flux station measurements of daily and sub-daily ET? *Adv. Water Resour.*, 50, 79-90.

Fisher J.B., Sikka M., Sitch S., Ciais P., Poulter B., Galbraith D., Lee J.-E., Huntingford C., Viovy N., Zeng N., Ahlström A., Lomas M.R., Levy P.E., Frankenberg C., Saatchi S., Malhi Y. (2013) African tropical rainforest net carbon dioxide fluxes in the twentieth century, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368,1625.

Greve P., Orłowsky B., Mueller B., Sheffield J., Reichstein M., Seneviratne S.I. (2014) Global assessment of trends in wetting and drying over land, *Nature geoscience*, 7, 716-721.

Herndl M., Pötsch E.M., Bohner A., Kandolf M. (2011) Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung, LFZ Raumberg-Gumpenstein.

Herndl M., Slawitsch V., Pötsch E.M., Schink M. (2019) Das hydrologische Jahr 2018 -Ausnahmejahr oder Beginn eines Trends für das inneralpine Grünland. 21. Alpenländisches Expertenforum „Klimawandel im Alpenraum - Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung, HBLFA Raumberg-Gumpenstein.

Minacapilli M., Cammalleri C., Ciralo G., Provenzano G. (2014) Evaluating the performance of reference evapotranspiration equations with scintillometer measurements under Me-

diterranean climate and effects on olive grove actual evapotranspiration estimated with FAO-56 water balance model. EGU General Assembly, 27.04-02.05.2014, Vienna. DOI: 10.13140/2.1.2223.3609.

Monteith J.L. (1965) Evaporation and the environment, Symposium of the Society of Exploratory Biology, 19, 205-234.

Moorhead J.E., Marek G.W., Colaizzi P.D., Gowda P.H., Evett S.R., Brauer D.K., Marek T.H., Porter D.O. (2017) Evaluation of Sensible Heat Flux and Evapotranspiration Estimates Using a Surface Layer Scintillometer and a Large Weighing Lysimeter. *Sensors*, 17, 2350.

Otkin J.A., Anderson M.C., Hain C., Svoboda M., Johnson D., Mueller R., Tadesse T., Wardlow B., Brown J. (2016) Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought, *Agricultural and Forest Meteorology*, 218, 230-242.

Peters A., Nehls T., Wessolek G. (2016) Technical note: Improving the AWAT filter with interpolation schemes for advanced processing of high resolution data. *Hydrological Earth System Sciences* 20, 2309-2315.

Pozníková G., Fischer M., van Kesteren B., Orság M., Hlavinka P., Žalud Z., Trnka M. (2018) Quantifying turbulent energy fluxes and evapotranspiration in agricultural field conditions: A comparison of micrometeorological methods. *Agric. Water Manag.*, 209, 249-263.

Slawitsch V., Birk S., Herndl M. (2016) A lysimeter-based approach to quantify the impact of climate change on soil hydrological processes. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-15838.

Unold G.v., Fank J. (2008) Modular Design of Field Lysimeters for Specific Application Needs. *Water Air Soil Pollution*, 8:233-242.

Wong S., Cowan I., Farquhar G. (1979) Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity. *Nature* 282, 424-426.

Estimating crop evapotranspiration of managed alpine grassland using remotely sensed LAI

Matevz Vremec^{1*}, Andreas Klingler², Markus Herndl²,
Andreas Schaumberger² and Steffen Birk¹

Zusammenfassung

Die Auswirkungen von Management und Pflanzenentwicklung auf die Verdunstung von Grünland (ET_C) können mithilfe von Blattflächenindexmessungen (LAI) und Wuchshöhe (h_{crop}) geschätzt werden. Die Verfügbarkeit von satellitenbasierten LAI-Produkten verringert dabei den Bedarf an In-situ-Messungen. In dieser Studie haben wir die geschätzte ET_C nach Penman-Monteith mit einer In-situ-LAI (AccuPAR- ET_{AP}) und einer Fernerkundungsmethode (Feldspektrometer- ET_{FS}) auf einem Dauergrünland der HBLFA Raumberg-Gumpenstein verglichen. Der Vergleich von ET_{FS} und ET_{AP} mit dem Lysimeter (ET_a) zeigt eine starke Korrelation und geringe Abweichungen zwischen den Ansätzen. Um unabhängig von In-situ-Messungen zu werden, haben wir eine Beziehung zwischen h_{crop} und LAI hergestellt. Auch diese Methode zeigt eine starke Übereinstimmung mit ET_a . Aufgrund der breiten Verfügbarkeit empfehlen wir die Verwendung eines Fernerkundungs-LAI, um die Schätzung der Grünland- ET_C auf Feldstücks- und regionaler Ebene zu verbessern.

Schlagwörter: Evapotranspiration, Leaf area index, Fernerkundung, Wirtschaftsgrünland

Summary

Impacts of management and crop development on crop evapotranspiration (ET_C) can be estimated using measurements of leaf area index (LAI) and crop height (h_{crop}). Recent progress in retrieving LAI from remote sensing platforms diminishes the need for in situ LAI measurements. In this study, we compared the estimated Penman-Monteith ET_C using LAI of an in situ (AccuPAR- ET_{AP}) and a remote sensing method (field spectrometer- ET_{FS}) on a managed grassland at AREC Raumberg-Gumpenstein. Comparing ET_{FS} and ET_{AP} with lysimeter (ET_a) showed a high correlation with little deviations between the two approaches. To become independent of in situ measurements, we established a relationship between h_{crop} and LAI to estimate $ET_{c-remote}$. We observed a much better agreement of $ET_{c-remote}$ with ET_a than that of the FAO reference ET_o . Because of the open access and the wide availability, we encourage the use of remotely sensed LAI to improve the estimation of managed grassland ET_C on a plot and regional scale.

Keywords: Evapotranspiration, Leaf area index, Remote sensing, Managed grassland

Introduction

Permanent grassland covers about 50% of the total agriculturally used area in Austria and is used either for livestock grazing, is sustainably managed, or is left abandoned (BMLRT 2020). As such, understanding water-related processes in mountain grassland is of high importance for the agricultural and energy sectors (Schaumberger et al. 2008).

¹ Institute of Earth Sciences, University of Graz, ² Institute of Plant Production and Cultural Landscape, Agricultural Research and Education Centre Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: Matevz Vremec, email: matevz.vremec@uni-graz.at

Crop evapotranspiration (ET_c) plays a significant role in grassland water budgets, especially in managed grassland, where the crop vegetation stage highly affects ET_c . The Penman-Monteith equation, recommended by the Food and Agriculture Organizations (FAO), includes the effect of crop development and management practices on ET, by including the leaf area index (LAI) and crop height (h_{crop}) in the calculation of the surface and aerodynamic resistances (Allen et al. 1998). As in-situ measurements of LAI are very scarce, laborious and expensive, remote sensing products are increasingly used) to monitor the changes of grassland development due to management activities or abiotic effects (droughts) (Darvishzadeh et al. 2008). Recent studies have shown a high correlation between direct respectively indirect in-situ methods and proximal and remotely sensed LAI-data (Klingler et al. 2020).

This study compares the LAI measurement method's influence on estimating ET_c of a managed permanent grassland. Estimated values of ET_c are compared with actual evapotranspiration (ET_a) values of a high precision lysimeter, managed according to the surrounding grassland (3-cut system).

Material and methods

Study area

The study was conducted at the test site at the Agricultural Research and Education Centre Raumberg-Gumpenstein in Austria (707 m above sea level) (Pötsch et al. 2019). The experiment is equipped with high precision weighable lysimeters, which offer a unique opportunity to study soil water fluxes of permanent grassland. The dominant species at the experimental site are *Arrhenatherum elatius*, *Dactylis glomerata*, *Taraxacum officinale* and *Lotus corniculatus*. The agricultural management of the grassland lysimeters corresponds to the regional management of the surrounding grassland at Gumpenstein, which includes three cuts per year and a fertilization intensity of 90 kg nitrogen, 65 kg phosphor and 170 kg potassium per year (Herndl et al. 2011).

Penman-Monteith equation

The Penman-Monteith equation is regarded as a standard method for estimating crop evapotranspiration (Monteith 1965) using measured meteorological (radiation, temperature, humidity, wind) and crop specific data (LAI and h_{crop}). Evapotranspiration of a reference crop can be estimated following the FAO-56 methodology (Allen et al. 1998), diminishing the need for crop phenological data. ET_c and ET_0 were calculated on a daily basis after recommendations by FAO (Food and Agriculture Organization) (Allen et al. 1998):

$$ET_c = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]} \quad 1$$

The ET_0 is derived from equation 1, assuming a constant grass height of 12 cm, LAI= h_{crop} · 24 and r_s of 70 (sm^{-1}):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad 2$$

where ET_c , ET_0 , R_n and G are in $MJm^{-2}d^{-1}$; Δ is the slope of the saturation vapor pressure temperature relationship ($kPa^{\circ}C^{-1}$); ρ_a is the air density ($kg\ m^{-3}$), c_p is the specific heat of air ($MJkg^{-1}^{\circ}C^{-1}$); γ is psychrometric constant ($kPa^{\circ}C^{-1}$); r_a and r_s are the aerodynamic and surface resistances (ms^{-1}), respectively. r_a and r_s are calculated using linearly interpolated data of LAI and crop height (h_{crop}) measurements:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - \frac{2}{3} h_{crop}}{0.123 h_{crop}} \right] \ln \left[\frac{z_h - \frac{2}{3} h_{crop}}{0.1(0.123 h_{crop})} \right]}{k^2 u_z} \quad 3$$

where d is the zero plane displacement, z_m and z_h are heights of the wind and humidity measurements (m), respectively, u_z the wind speed at height z (ms^{-1}) and k is the von Karman constant (0.41). Surface resistance is calculated (r_s) as:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{act}} \quad 4$$

where r_l is the bulk stomatal resistance of the vegetation ($= 100 \text{ ms}^{-1}$), and LAI_{act} the active leaf-area index, which accounts for heat and vapor transfer occurring only in the upper half of the canopy ($LAI_{act} = LAI \cdot 0.5$).

Field Data Collection of LAI

Indirect in-situ LAI measurements were performed in triplicate using the AccuPAR LP-80 Ceptometer (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA). This linear quantum sensor measures the photosynthetically active radiation above and below the canopy and calculates the LAI using models that combine the radiation measurements with canopies-architecture related variables and sun position information (Meter 2018). The field spectrometer HandySpec Field VIS/NIR 1.7 field spectrometer (tec5 AG, Oberursel, Germany) was used to measure hyperspectral canopy reflectance in the range from 400 to 1690 nm. The measurements were carried out between 10 a.m. and 2 p.m. under as constant and cloudless conditions as possible, at four areas within the lysimeter. In addition to spectral reflectance measurements, the average crop height is collected on the plots using ultrasonic sensors. The measurements described above yielded the two independent estimates of the leaf area index LAI_{AP} and LAI_{FS} , respectively.

LAI Retrieval Algorithm

The ESA's Spectral Response Functions were used to convert the hyperspectral signature from the HandySpec into the corresponding S-2 bands (ESA, 2018). Subsequently, the LAI was calculated using a neural network algorithm that was trained with radiative transfer simulations and specifically tailored for Sentinel-2 data (Baret et al. 2010). The missing S-2 band 12 was calculated according to (Klingler et al. 2020). All transformations and calculations were performed using the SpectroAnalyst tool (Schaumberger and Adelwöhrer 2020).

Lysimeter data

Measurements of the COTO high precision weighable lysimeter, representing the untreated reference plot in the Lysi-T-FACE experiment (Herndl et al. 2011), were used for this study. The lysimeter has a surface area of 1 m^2 and a depth of 1.5 m. It is equipped with time-domain reflectometry probes that measure the soil water content at different soil depths. Soil water contents at 30 cm depth were standardized using the Soil Moisture Anomaly Index SMAI as defined by Jiménez-Donaire et al. (2020) and employed to identify severe drought periods, during which actual evapotranspiration is expected to be lower than potential crop evapotranspiration. The raw lysimeter data underwent manual and automated plausibility checks and were post-processed using the adaptive window and threshold filter AWAT (Peters et al. 2017). The actual evapotranspiration ET_a is calculated from the water balance equation on a 10 min resolution following Schrader et al. (2013).

Results

Comparing crop ET with Lysimeter ET

The crop evapotranspiration (ET_c) is according to Allen et al. (1998) „the evapotranspiration from disease-free, well-fertilized crops, grown in large fields, under optimum soil water conditions, and achieving full production under the given climatic conditions“. To compare the lysimeter-obtained evapotranspiration with the estimated ET_c , days with potential water stress were excluded from the analysis. *Figure 1* shows the effect of water stress on ET_a . (An apparent effect of water stress is observed over the summer of 2019, with low SMAI values and a higher (<-1) difference between ET_a , ET_c .) A threshold value of $SMAI < -1.42$ was employed to identify water stress following the drought classification by McKee (1993). Daily SMAI values smaller than 1.42 indicate the occurrence of severe drought events. (The scatter plot in *figure 1* shows a good agreement between the defined threshold and the difference in ET_a , ET_c . In the period over 2016-2019, potential water stress was identified on 42 days).

Comparison of ET_c estimated with LAI measured with AccuPAR vs Field spectrometer

Table 1 summarizes the estimated crop evapotranspiration for the whole vegetation period over 2016-2019 when LAI data was available. Additionally, the mean values, root-mean-square errors and correlations are reported for each cut. Regarding the LAI values, the AccuPAR and FieldSpec values showed a high correlation of 0.87 and 0.91 for the first and second cut. Higher deviances of LAI were observed in the third cut, with a mean LAI of 2.50 and 3.39, for the field-spectrometer and AccuPAR, respectively. Estimated ET_c using LAI_{FS} data showed a better correlation and lower RMSE, compared to the LAI_{AP} . Observing the LAI values on *figure 2* and the RMSE for each cut, the overestimation of LAI_{AP} in the second and third cut seems to affect the estimation of ET_c negatively.

Table 1. Mean values, the correlation coefficient (r) of LAI and root-mean-square Error (RMSE) for the estimated crop evapotranspiration for each cut.

	1 st cut	2 nd cut	3 rd cut	Whole period
LAI_{FS}	3.32	2.19	2.50	2.60
LAI_{AP}	3.32	2.22	3.39	2.99
r (LAI)	0.87	0.91	0.81	0.81
RMSE ET_{FS}	0.62	0.78	0.50	0.62
RMSE ET_{AP}	0.59	0.87	0.54	0.67
RMSE $ET_{c-remote}$	0.68	0.78	0.46	0.62
RMSE ET_o	1.00	1.21	0.69	0.95

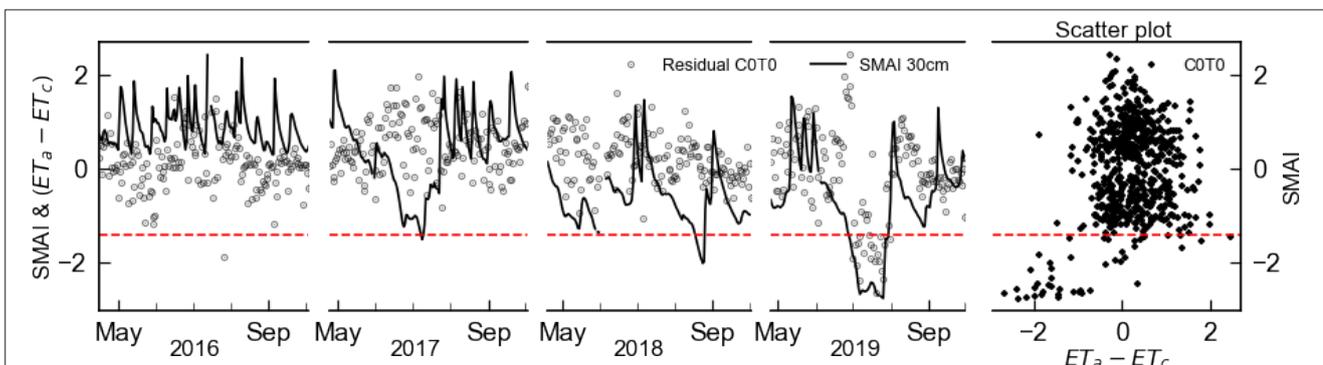


Figure 1: Difference between ET_a and ET_c , the Soil Moisture Anomaly Index and the scatter plot between these two variables for the period 2016-2019.

Estimation of ET_c using an LAI/h_{crop} relationship

A relationship between LAI and h_{crop} was obtained by fitting a simple linear function $y = k \cdot x$ to the ultrasonic crop height data from the lysimeter plot. As the ET_{FS} data showed a better agreement with the lysimeter ET_a , we only used LAI_{FS} data for the fitting process.

$$h_{crop} = 0.12 LAI$$

5

where h_{crop} is obtained crop height in m. Using LAI_{FS} and the above-derived relationship, $ET_{C-remote}$ was estimated. Over the entire observed period results similar to ET_{FS} were obtained, thus showing that $ET_{C-remote}$ of managed grassland can be successfully estimated without the need for crop height data. In Figure 4, which shows the relationship between LAI_{FS} and h_{crop} , we can observe that the derived h_{crop} relationship underestimated higher h_{crop} values in the first cut, which lead to higher RMSE values of ET_C remote in the first cut (Table 1).

Conclusions and outlook

This study used LAI measurements of the AccuPAR indirect optical method and the proximal (field spectrometer) remote sensing approach to estimate crop evapotranspiration observed at a field weighable lysimeter. Estimated ET_c values were compared to lysimeter-obtained ET over the period 2016-2019. Comparing the estimated ET_{AP} and ET_{FS} with ET_a , showed a high agreement with both methods, considering r and RMSE. A high correlation ($r > 0.85$) was observed between the LAI values for the first and second cut, whereas the LAI slightly deviated on the third. No larger deviations of ET_{FS} and ET_a were observed in the first cut, whereas a higher RMSE of the ET_{AP} was observed in the second and third cut. To estimate ET_c independently of in situ measurements, a relationship was established between LAI and h_{crop} . The estimated $ET_{C-remote}$ exhibited similar values to ET_{FS} and outperformed ET_{or} , thus providing an accurate method to estimate ET_c using remotely sensed crop data. Recent studies showed a good agreement between proximal (field-spectrometer) and satellite remote sensing data (Sentinel-2), thus providing an opportunity to expand these findings on a regional scale.

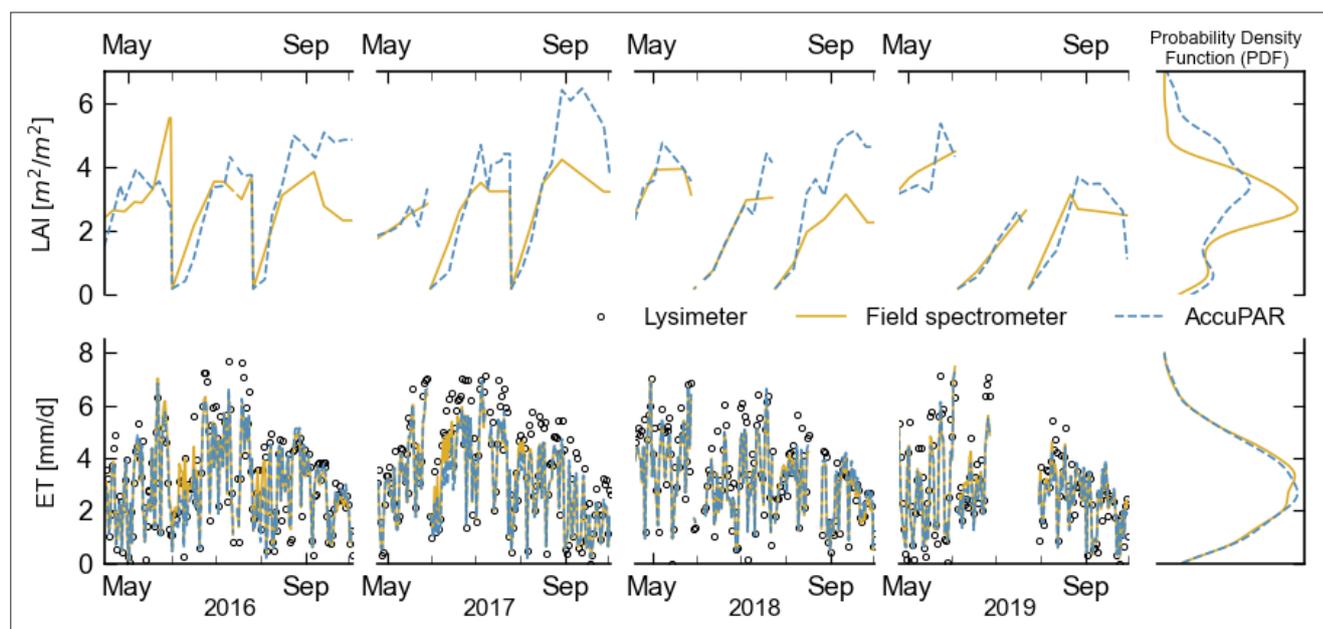


Figure 2: LAI values and estimated crop evapotranspiration with a corresponding probability density function.

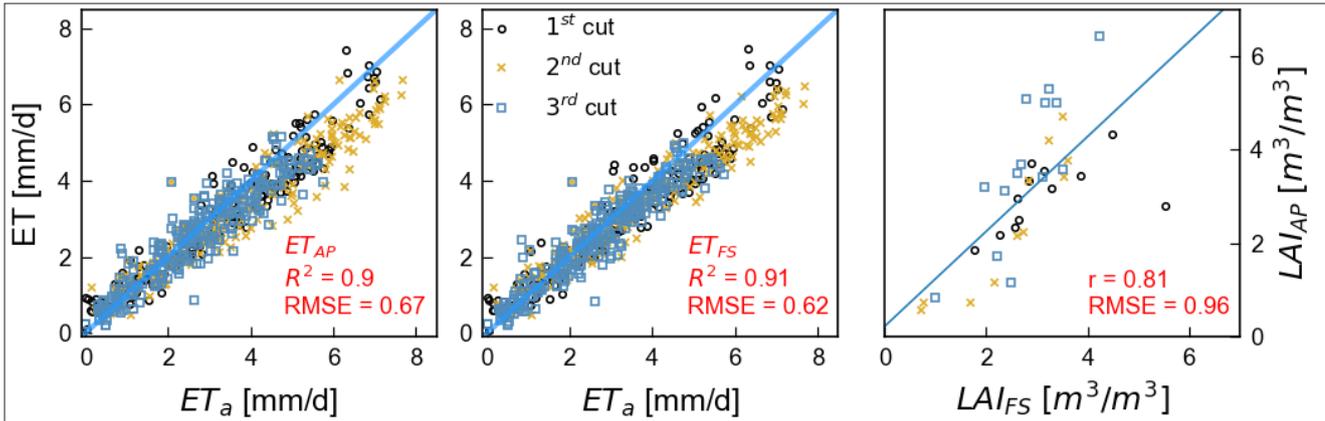


Figure 3: Crop evapotranspiration of ET_{AP} and ET_{FS} compared to lysimeter ET_a and the correlation between LAI_{FS} and LAI_{AP} .

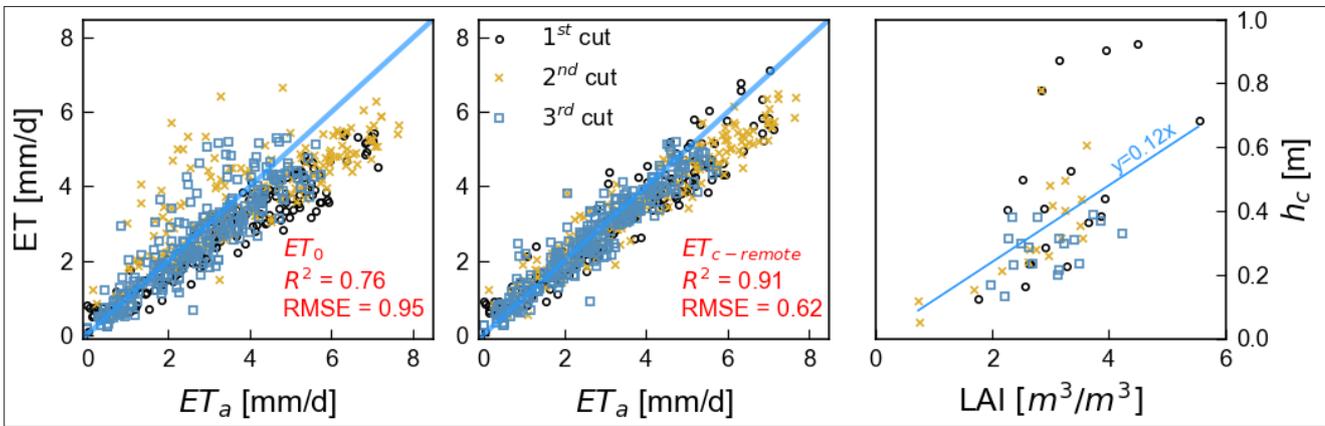


Figure 4: Estimated FAO reference ET_0 or $ET_{c-remote}$ and the relationship between LAI_{FS} and h_{crop} .

Acknowledgements

This work is partly funded by the Earth System Sciences programme of the Austrian Academy of Sciences (project ClimGrassHydro).

References

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., others, (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao Rome 300, D05109.
- Baret F., Weiss M., Bicheron P., Berthelot B. (2010) Sentinel-2 msi products wp1152 algorithm theoretical basis document for product group b. INRA-EMMAH Avignon Fr.
- BMLRT (2020) Grüner Bericht 2020 - Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Bundesminist. Für Nachhalt. Tour. Wien 297 S.
- Darvishzadeh R., Skidmore A., Schlerf M., Atzberger C., Corsi F., Cho M. (2008) LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 63, 409-426.
- ESA (2018) Sentinel-2 spectral response functions (S2-SRF).5 [https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library/-/asset_publisher/WkOTKajilSaR/content/sentinel-2a-spectral-responses] (15.1.2020).

- Herndl M., Pötsch E.M., Böhner A., Kandolf M. (2011) Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur Simulation der Erderwärmung im Grünland.
- Jiménez-Donaire M. del P., Tarquis A., Giráldez J.V. (2020) Evaluation of a combined drought indicator and its potential for agricultural drought prediction in southern Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20.
- Klingler A., Schaumberger A., Vuolo F., Kalmár L.B., Pötsch E.M. (2020) Comparison of Direct and Indirect Determination of Leaf Area Index in Permanent Grassland. *PFG–Journal Photogrammetry Remote Sensing Geoinformation Science* 88 (5), 369-378.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., others, (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston, 179-183.
- Meter (2018) *AccuPAR PAR/LAI Ceptometer model LP-80: operator's manual*. Pullman, WA, 81 S.
- Monteith J.L. (1965) Evaporation and environment, in: *Symposia of the Society for Experimental Biology*. Cambridge University Press (CUP) Cambridge, 205-234.
- Peters A., Groh J., Schrader F., Durner W., Vereecken H., Pütz T. (2017) Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. *J. Hydrol.* 549, 731-740.
- Pötsch E., Herndl M., Bahn M., Schaumberger A., Schweiger M., Kandolf M., Reinthaler D., Schink M., Adelwöhrer M. (2019) Climgrass-ein innovatives Freilandexperiment zur Klimafolgenforschung im Grünland. 21. Alpenländisches Expertenforum „Klimawandel im Alpenraum-Auswirkungen auf Ökosystem Grünl. Dessen Bewirtsch. HBLFA Raumberg-Gumpenstein Irdning-Donnersbachtal.
- Schaumberger A., Adelwöhrer M. (2020) *SpectroAnalyst – Management von Hyperspektraldaten für die Grünlandforschung*. Presented at the 40. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 29, Stuttgart, 184-196.
- Schaumberger A., Eitzinger J., Formayer H. (2008) Räumliche Modellierung der potenziellen Evapotranspiration, in: *Paper Presented at the AGIT-Symposium*, Salzburg.
- 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.

Partitioning evapotranspiration based on lysimeter water balance data and stable isotope profiles

Gunther Liebhard^{1*}, Andreas Klik¹, Christine Stumpp¹ and Reinhard Nolz¹

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde ein wägbares Lysimeter für die Ermittlung von Evaporations- und Transpirationsraten von Sojabohne mittels einer Isotopen-Massenbilanz verwendet. Da die Methode ursprünglich für Laboranwendung konzipiert war, wurden die erforderlichen Änderungen für die Anwendung im Feld getestet und Verbesserungen in der Berechnung diskutiert.

Schlagwörter: Transpiration, Evaporation, Isotopenfraktionierung, Sojabohne, Bodenfeuchte

Summary

In this study a weighing lysimeter was used for a water and isotope mass balance method to determine evaporation and transpiration ratios of a soybean stand. As the method was originally used in a laboratory setup, the applicability of the adapted setup was tested and the results were discussed.

Keywords: transpiration, evaporation, isotopic fractionation, soybean, profile water content

Introduction

Weighing lysimeters are accurate and reliable instruments to measure water fluxes across its system boundaries such as evapotranspiration (ET). Therefore, they are suitable to evaluate and improve agronomic practices in regard to efficient use of water resources. One aspect of efficient water usage in plant production is the promotion of productive water loss (transpiration T) and the reduction of unproductive water loss (evaporation E). Knowledge of the components E and T is thus required to develop, adapt, and evaluate management practices with respect to efficient water use. Well-known approaches to distinguish between E and T refer to isotopic fractionation and mass conservation of isotopes and water.

Isotopic fractionation is based on the mass difference between naturally occurring stable water isotopes and the multitude of other water molecules. A basic principle is that the process of evaporation causes enrichment of heavier stable isotopes in soil water, since lighter isotopes evaporate more likely (Craig et al. 1965). In contrast, crop water uptake (representing T) does not cause accumulation of heavier isotopes. Hence, the isotopic composition of soil water can be determined and – in combination with the other water and isotope mass balance components – used for calculation of ET fractions.

Sutanto et al. (2012) developed a reliable isotope mass balance method establishing a small lysimeter setup in the laboratory. While the lysimeter allowed detailed determination of water balance components, soil water was extracted from within the lysimeter for isotopic analyses. However, the setup was restricted to small crops and well-watered conditions.

¹ Department of Water, Atmosphere and Environment, University of Natural Resources and Life Sciences, Muthgasse 18, A-1190 Vienna

* Ansprechpartner: DI Carl Gunther Liebhard, email: g.liebhard@boku.ac.at

The idea of this study was to adapt the method of Sutanto et al. (2012) for field application and to improve the calculation of balance components. This should allow investigating various commodity crops in combination with different tillage and irrigation practices even under water-scarce conditions. The adaptation to field application was done by determination of isotopic soil water profiles from soil core samples instead of in-situ extraction of water samples, which failed under dry field conditions. Since lysimeters exclude destructive soil sampling, assessment of the isotopic profile was done in the adjacent area where properties and conditions did not deviate from the lysimeter. Therefore, one focus was placed on audit measures to prove the similarity of conditions at and adjacent to the lysimeter. A second focus was placed on the improved calculation of balance components.

Material and Methods

Study site

The adapted method was applied in 2019 to partition ET of a soybean stand in the agricultural area Marchfeld. The lysimeter plot was located in Groß-Enzersdorf, east of Vienna (48°12' N, 16°34' E; 157 m elevation a.s.l.). During the vegetation period (25.04. – 17.09.2019) the mean air temperature was 19.7°C, precipitation was 154 mm, and the lysimeter and its adjacent area were irrigated with 152 mm. Water from precipitation and irrigation was collected for isotopic signature analyses. Weather data was recorded with a local weather station as described in Nolz et al. (2013a). Plant parameters (e.g. plant height, phenological stages, and leaf area index) on the lysimeter and its adjacent area were determined weekly. Leaf area index (LAI) and was measured with an AccuPAR PAR/LAI Ceptometer Model LP-80 (Meter Group Inc., USA).

Lysimeter water balance

Actual ET of the soybean plant stand (66 plants/m²) was determined with a weighing lysimeter (A = 2.9 m²). Soil type was sandy loam (0-140 cm) over gravel (140-250 cm). Percolation at the free drainage outlet was collected and measured with a tipping bucket, stored with weighing data, and converted to mm as described in Nolz et al. (2013b). Furthermore, it was sampled weekly for isotope analysis. Mass changes of the lysimeter and the drainage tank were measured and logged in 10-minute intervals. The lysimeter and its adjacent area (approx. 60 m²) were cultivated alike and were equipped with access tubes for monitoring soil water content (SWC).

Soil water monitoring

SWC was monitored using EnviroSCAN® and DIVINER 2000® soil moisture probes (Sentek Pty Ltd., Stepney, Australia). The probes contained sixteen sensors on a mounting rail measuring SWC from 10 to 160 cm down the soil profile. *SWC monitoring for determining mass balance*: Half-hourly SWC data from EnviroSCAN from the lysimeter were the basis for the water component of the water and isotope mass balance. *SWC monitoring for comparing lysimeter and adjacent area*: Regular Diviner measurements were the basis to check similarity of SWC distribution in and next to the lysimeter. SWC values of each depth were compared to prove the hypothesis of equal water content distribution down the profiles using a two sample t-test with Bonferroni correction for independent samples of each sensor depth.

Isotope analysis and mass balance

Soil cores were sampled weekly with an auger down to 85 cm (composite samples within ± 5 cm of each sensor depth). Isotope ratios were analyzed with a laser-based isotope

analyzer (Picarro L2140-I for water samples and Picarro L2130-I for vapor analysis from soil core pore water samples). Analysis of vapor samples was done with a water-vapor equilibration method based on Wassenaar et al. (2008). Measured values were normalized and reported in delta notation δ referenced to the Vienna Standard Mean Ocean Water-Standard (Craig 1961). The isotope mass balance can be constituted as

$$m_{total} = m_i + m_p = m_e + m_f + m_t + m_l \quad (1)$$

where m is the mass of water. The components are the initial (i) and final (f) soil moisture, precipitation and irrigation (p), evaporation (e), transpiration (t), and percolation (l). Each component can also be described as product of the stable isotope concentration δ (e.g. $\delta^{18}O$) and the fraction of water in that component x (as $x_j = m_j/m_{total}$). The components can be directly measured ($\delta_i, x_i, \delta_p, x_p, \delta_f, x_f$), derived from theoretic assumption ($\delta_e, \delta_t, x_e, x_t$), calculated from atmospheric conditions and fractionation factors (δ_e), and finally determined as a residue of the balance calculation (x_t, x_e). For evaporation, an isotopic fractionation factor was summing equilibrium (ϵ_{eq}) and kinetic (ϵ_k) fractionation.

Improvement of mass balance evaluation

The modifications of the balance component calculation comprised three altered approaches compared to the original evaluation (Sutanto et al. 2012). First, the calculation of δ_e was not derived from averaged atmospheric parameters within the evaluation period, but weighed with high-resolution actual ET values from lysimeter evaluation. Secondly, δ_e was calculated based on the isotopic signature in the surface layer instead considering the whole lysimeter vessel depth. The third modification affected the root water uptake. δ_t was derived from actual root density and water distribution instead of an averaged value across the lysimeter depth.

Results

Comparing lysimeter and adjacent area

Similarity of conditions in and next to the lysimeter were confirmed with several control measurements. *Figure 1a* shows SWCs in and next to the lysimeter for selected dates during the vegetation period, *Figure 1b* displays similarity of plant development for the lysimeter and its adjacent area.

Improvement of mass balance evaluation

The determination of fractionation factors based on 10-minute lysimeter data and 15-minute weather data increased the average of the weekly total isotope fractionation factor ϵ_{total} from 14.0 to 16.2 ‰. For the entire vegetation period this means a higher estimation of the transpiration fraction compared to an averaged calculation of appro-

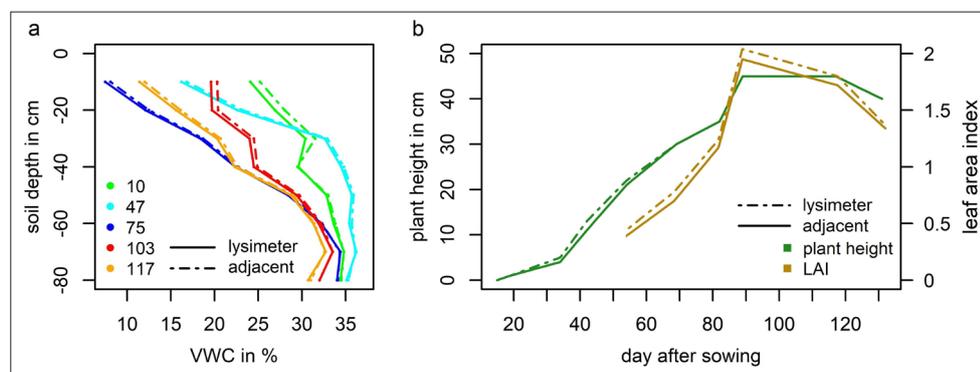


Figure 1: a) Comparison of SWC distributions at the lysimeter and its adjacent area: measurements at different crop development stages for given days after seeding (DAS). Averaged SWC in %. b) Plant height and averaged leaf area index (LAI) values on the lysimeter and its adjacent area. Plant height is given in cm, LAI is dimensionless. Each displayed LAI value constitutes the mean of six single measurements. Dates given as DAS.

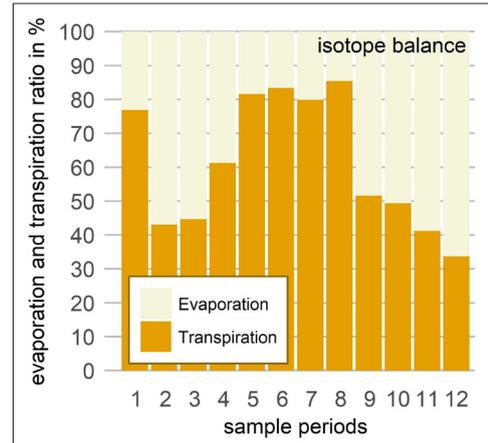


Figure 2. T and E ratios for the sample periods.

ximately 5 %. The calculation of δ_e based on δ_{surface} instead of δ_t showed the opposite effect with a similar extent: It lowered the estimation of the transpiration fraction during the vegetation period by approximately 5 %. For considering root water uptake more accurately, root density distribution was described linearly from its maximum at the surface layer down to the lowest observed root depth. Compared to averaged δ values from the entire surveyed soil column, δ_t values shifted from a range of -8.2 to -5.7 to a range of -4.9 to -2.5.

Determination of E and T ratios

Figure 2 shows E and T fractions determined with the isotope mass balance.

Discussion

Comparing lysimeter and adjacent area

Control measurements proved equal moisture conditions in and next to the lysimeter during the entire measuring period (Figure 1a). Only the comparisons at day 10 after seeding indicated rejection of the hypothesis of similar moisture distributions (for α of 0.05 and Bonferroni adjusted p-values). Also plant heights and LAI values demonstrated concurrent plant development in and next to the lysimeter (comparison of equal means, α of 0.05).

Improvement of mass balance evaluation

The weighted determination of fractionation factors had little influence on equilibrium fractionation, but considerable effect on kinetic fractionation. For this factor, it better weights factors by excluding or reducing phases of low evaporation and transpiration such as night times and rain events. The effect of the weighted determination on δ_e (T fraction + 5 %) is canceled out by the calculation of δ_e based on δ_{surface} instead of δ_t (T fraction - 5 %), though. Therefore, these two improvements merely shifted the E and T ratios between the sampling periods, but had no effect throughout the entire period.

The more precise calculation of the isotopic signature of water taken up by roots (δ_t) based on regularly monitored root length and shape – had a substantial impact on ET fractions. It caused an increase of the evaporation fraction of about 20 %. As the root water uptake potential strongly depends on root length density and root distribution across the soil profile, isotopic composition of transpired water δ_t may in general be determined weighted on actual root density distribution.

Determination of E and T ratios

The remarkably large T fraction of the first period in the isotope mass balance may be attributed to the preceding long dry phase and dry soil surface. With increasingly frequent rain events, surface layer wetness also increased and the evaporation fraction rose. Nonetheless, transpiration was dominant during times of maximum soil coverage. At the end stage of crop development, measured transpiration fraction remained higher than the simulated transpiration fraction. This is accounted to the remaining foliage and ground covering weeds.

Conclusions

The adaptation of the water and stable mass balance for field application showed to be permissible. All considered parameters (water content distribution, LAI, and plant height) suggested similar conditions at the lysimeter and the adjacent area for this particular trial. Therefore, the experimental setup as well as the applied audit measures allow investigation of commodity crops and agronomic practices under the wide range of field conditions.

The results from the water and isotope mass balance show that T and E rates strongly depend on water distribution across the soil profile and its plant availability and that the supposed dependency on canopy cover is overestimated. Consequently, the setup is apparently appropriate for investigation of irrigation strategies.

Literature

Craig H. (1961) Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, 133(3467), 1833-1834.

Craig H., Gordon L.I., & others. (1965) Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere.

Nolz R., Kammerer G., Cepuder P. (2013a) Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. *Agricultural Water Management*, 116, 12-20.

Nolz R., Kammerer G., Cepuder P. (2013b) Interpretation of lysimeter weighing data affected by wind. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(2), 200-208.

Sutanto S.J., Wenninger J., Coenders-Gerrits A.M.J., Uhlenbrook S. (2012) Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: a comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2605-2616.

Wassenaar L.I., Hendry M.J., Chostner V.L., Lis G.P. (2008) High resolution pore water $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ measurements by H_2O (liquid)- H_2O (vapor) equilibration laser spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 42(24), 9262-9267.

Evaluation of evapotranspiration methods by means of weighing lysimeter data in Argentina

Adán M.G. Faraminán^{1,2*}, Facundo Carmona^{1,2}, Raúl Rivas^{1,3},
Florencia Degano^{1,3} and Paula Olivera Rodriguez^{1,2}

Summary

The Instituto de Hidrología de Llanuras -Argentina has been studying evapotranspiration (*ET*) using lysimeters since 2010 with the aim of validating different methods. This work presents the study about direct measurements of actual *ET* by means of a weighing lysimeter in an Argiudol soil from Pampa Plains, Argentina. The information generated was used to evaluate the Penman-Monteith (FAO-56). The methods were tested under different soil moisture conditions. Estimated *ET* values showed a good correlation with actual *ET* when soil moisture was high, moreover greater differences were showed when the soil moisture tends to lower values (<30%). However, the correlation improved significantly when the methods were corrected with evaporative fraction. This study provides necessary information for the validation of local-regional models applied in Argentinian plains, where *ET* is a term of great importance.

Keywords: agrometeorological station, evaporative fraction, soil moisture, surface energy balance

Introduction

The evapotranspiration (*ET*) can be obtained indirectly from information logged in surface energy balance stations or on a regional scale with the use of satellite or reanalysis data. In order to have reliability of the models used, it is important to validate the information generated with direct measures of evapotranspiration. Actually, lysimeters are the most accurate instruments for estimating changes in soil water content. However, in Argentina there are few agrometeorological stations that have these instruments (Lazzari et al. 1984, Andriulo et al. 2004, Requena et al. 2010, Olmedo & Vallone 2011, Caprile et al. 2016).

Against this background, the Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Ussunoff” decided to create two prototypes of weighing lysimeters for monitoring soil water storage. The first was installed in 2010 and its weighing system was manual by means of a hydraulic scale. The second was installed in 2017, and unlike the previous one, this lysimeter had a load cell that recorded the its weight every hour (Faraminán et al. 2021). The information generated by these instruments allowed to validate methods at different spatial scales. For example, Degano et al. (2017) validated MOD16 product with lysimetric information. Recently, Olivera Rodriguez et al. (2020) published a new methodology for calculating the water footprint in soybean crops with weighing lysimeter data as complementary information.

The aforementioned works base their methodology on remote sensing, using a regional scale. In order to generate information useful for validate remote sensing data, this work aims to analyze the performance of plot models. Thus, actual evapotranspiration (*ET_a*) values were correlated with the Penman-Montieth/FAO 56 method (*ET_o*). *ET_a* values were calculated daily and hourly from data measured by the two weighing lysimeters

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras „Dr. Eduardo Ussunoff“ (IHLLA), Gral. Pinto 399, Tandil, 7000, Argentina, ² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ³ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA)

* Ansprechpartner: Adán M.G. Faraminán, email: adanfaraminian@ihlla.org.ar

and ET_0 was calculated on the same time scale based in the information from a surface energy balance station. This last method was corrected applying a stress factor based on soil moisture data ($ET_0 \times EF$).

Materials and Methods

The study was realized in Tandil, Argentina (37° 19' 07" S., 59° 04' 44" W.). The area has a humid-subhumid temperate climate, with a mean annual rainfall (1970-2010) of 925 mm (Aliaga et al. 2017). The soil corresponds to a Typical Argiudol and has an agricultural and livestock aptitude. Three species predominate in the vegetation cover (*Dactylis glomerata*, *Festuca Arundinacea* y *Lolium multiflorum*). The period of study was from 2011 to 2014.

Figure 1 shows the weighing lysimeters design. The instruments construction was based on the guidelines of Aboukhaled et al. (1982). Figure 1a) shows the manual weighing lysimeter and sensors installed inside the tank. It was built by filling the tank with the soil of the place respecting the profile horizons. A second weighing lysimeter was set up with a load cell, which measure the tank weight every hour, and the soil moisture sensors were installed outside the tank. This lysimeter was designed so that the soil inside the tank does not suffer disturbances in the installation (Faramiñán et al. 2021). Both lysimeters are on the same plot.

The ETa is calculated from the lysimeters as follows,

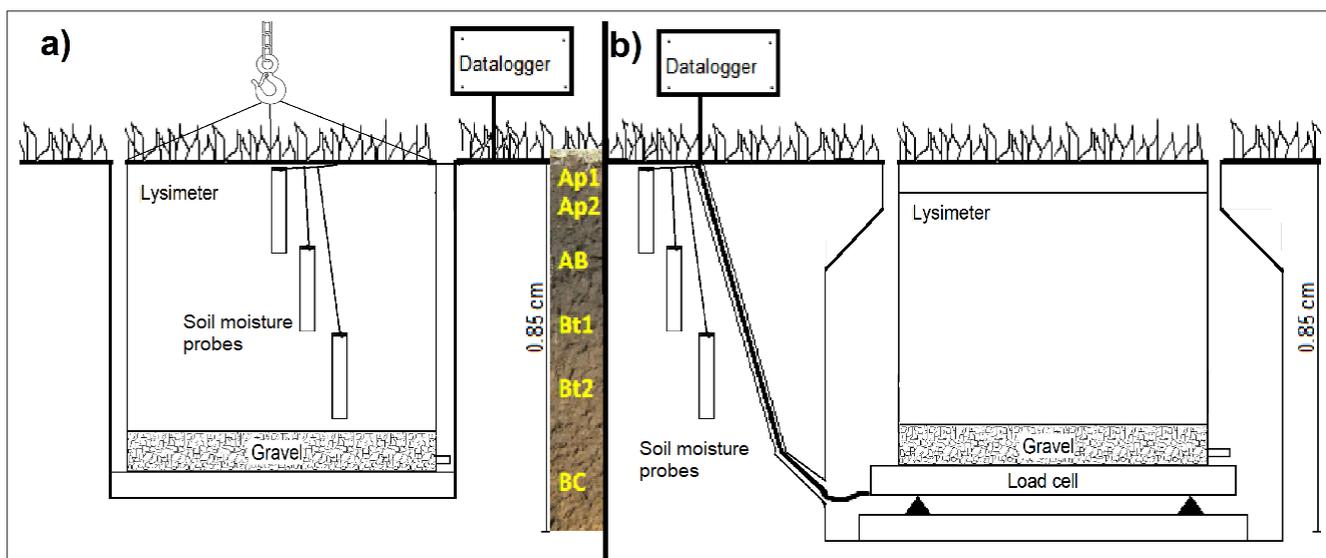
$$ETa = \frac{1}{\rho_w A_{lys}} \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (1)$$

where ETa is the actual evapotranspiration [mm day^{-1} or mm hour^{-1}], ρ_w is the water density, w is the weight lysimeter measurement, $\Delta w/\Delta t$ is the change of water in the lysimeter and A_{lys} is the effective area of evaporating foliage. In this work A_{lys} is equivalent to 15% more than the lysimeter physical area (0.27 m^2).

On the other hand, the Penman-Montieth method was calculated following the FAO-56 manual (Allen et al. 1998),

$$ET_0 = \frac{C_1 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{C_2}{T + C_3} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_4 u_2)} \quad (2)$$

Figure 1. Weighing lysimeters diagrams and CSM used in the test. In a) the manual lysimeter and a profile soil image. In b) the automatic lysimeter.



where ET_0 is the reference evapotranspiration rate, T is the mean air temperature [°C], u_2 is the wind speed [$m\ s^{-1}$], Rn is the net radiation flux into the soil, G is the sensible heat flux [$MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$], e_s is the mean saturation vapour pressure, e_a is the mean ambient vapour pressure [kPa], γ is the psychrometric constant [kPa/°C] and Δ is the saturation pressure at atmospheric temperature slope. The constants $C1$, $C2$, $C3$ and $C4$ were used to obtain the ET_0 in [$mm\ day^{-1}$] or [$mm\ hour^{-1}$].

To obtain actual values of ET it is necessary to multiply the Eq. 2 by a factor that containing soil-vegetation information. For this reason, in this work the Evaporative Fraction (EF) was used as a correction factor. The EF has a strong link with water soil available, which is the limiting factor of latent heat flux (Nutini et al. 2014). This flux is associated directly with ET .

Figure 2 shows the behavior between the ETa/ET_0 ratio and the EF . A range of values of this relationship presents a linear behavior and, considering the soil moisture, it can be expressed as follows,

$$EF_L = \frac{SM_i - SM_{\min}}{SM_{\max} - SM_{\min}} \quad (3)$$

where SM is the soil moisture measurement by means of capacitive probes.

However, it is observed in Figure 2 that this relationship is not completely linear (Gentine et al. 2007). Thus, a new equation was proposed for a better fit,

$$EF = \frac{1}{1 + \exp\left[0.5 - \frac{SM_i - SM_{\min}}{SM_{\max} - SM_{\min}}\right] \times 10} \quad (4)$$

Finally, in order to observe the performance of ET_0 and ET_0 multiplied for EF ($ET_0 \times EF$) against ETa , the follows metrics were used,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ETa^i - ET_{\text{mod}}^i)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ETa - ET_{\text{mod}}| \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ETa^i - ET_{\text{mod}}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (ETa^i - ET_{\text{mean}}^i)^2} \quad (7)$$

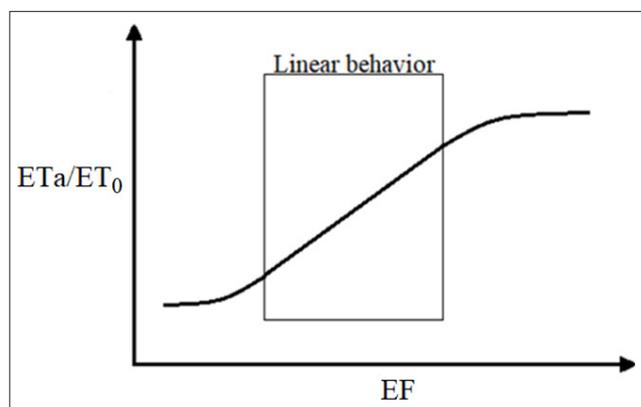


Figure 2. Relationship between ETa / ET_0 and EF . The square represents the value range with linear behavior.

where ET_{mod} is ET_0 or $ET_0 \times EF$, ET_{mean} is the mean value of ETa , N is the number of measurements, $RMSE$ is the root mean square error, MAE is mean absolute error and NSE is Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient. The NSE efficiency factor is useful and effective in hydrological studies (McCuen et al. 2006, Ritter and Muñoz-Carpena 2013).

Results and Discussion

Figure 3 shows the relationships between ET_0 and ETa , and $ET_0 \times EF$ with ETa . The overestimation of ET_0 respect to ETa was observed on a daily scale (Figure 3a). However, applying the EF as a soil-vegetation factor, a considerable improvement in the relationship was obtained (Figure 3c). The same can be seen on an hourly scale (Figures 3b, 3d).

Table 1 shows the statistics relationships of Figure 3. Considering EF as a correction factor improved the results. In one hand, the $RMSE$ was reduced by 57% on a daily scale, while on an hourly scale by 47%. On the other hand, NSE values close to 1 indicate that the estimated or predicted values are correct. In our case, the NSE indicates a better performance in $ET_0 \times EF$ than in ET_0 .

In the two time scales, it was observed that the models overestimated when the soil humidity values were lower than $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, due to the high atmospheric demand of water vapor which exceeds the rate that the vegetation or the soil can provide. In some cases, the estimated values of ET_0 were 4 times higher than the ETa .

These results show the need for a correction factor that contains information about the vegetation or the soil that allows to obtain actual ET values. Many authors have approached the subject from different perspectives. For example, Pereira 2004, used the decoupling factor multiplied by the Preatsley-Taylor method. This factor is mainly defined by the aerodynamic vegetation resistance. Other authors relate the correction

Table 1. Statistical indices of the relationship between estimated (ET_0 and $ET_0 \times EF$) and observed (ETa) data.

Model	Units	R2	RMSE	MAE	NSE
ET_0	mm day ⁻¹	0.72	1.12	0.77	0.07
	mm hour ⁻¹	0.50	0.15	0.11	-0.51
$ET_0 \times EF$	mm day ⁻¹	0.83	0.48	0.35	0.83
	mm hour ⁻¹	0.73	0.08	0.07	0.49

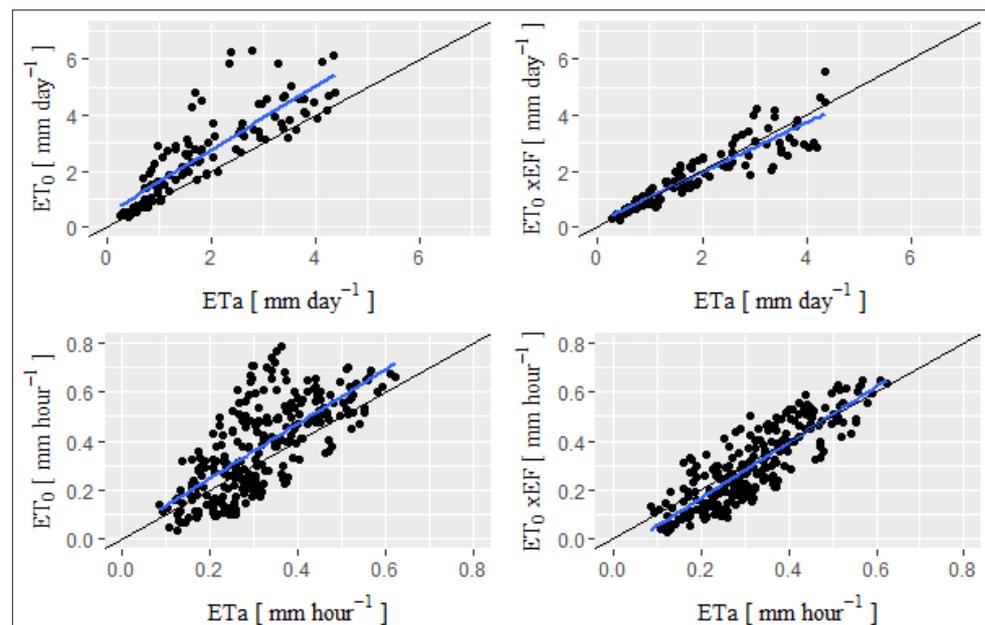


Figure 3. Correlation graphs between ET_0 - $ET_0 \times EF$ and ETa for daily (a and b) and hourly scales (c and d). The blue line is the trend and the black line is the line 1:1.

factor with the sensitive and latent heat flux (Gentine et al. 2007). However, there are few studies that consider soil moisture as a correction factor. Besides, as it can be observed in this work, precise information is obtained on the water storage changes in the unsaturated zone if the factor is adjusted with the relationship between the ET_a and ET_o values.

Conclusions

In this work, the Penman-Montieth model (FAO56) was evaluated by means of a weighing lysimeters. Hourly and daily data from a meteorological station located in the city of Tandil, Argentina, were used. The ET_o model overestimates the ET_a values obtained by the lysimeters, for this reason the evaporative fraction is proposed as a correction factor. Considering this factor, it was observed that the model improved significantly, with a reduction in RMSE values to 50% approximately, while the NSE values indicated a better performance. This technique can be extrapolated to monitor actual evapotranspiration at a larger spatial scale through a set of sampling sites. With the results of this work, it is expected to contribute to scientific knowledge about the evapotranspiration process, to the development of scientific-technical applications and decision-making in the management of water resources in plains areas of Argentina.

Literature

- Aboukhaled A., Alfaro A., Smith M. (1982) Lysimeters. Irrigation and Drainage Paper, 39, 68.
- Aliaga V., Ferrelli F., Piccolo M.C. (2017) Regionalization of climate over the Argentine Pampas. International journal of climatology, 37 (S1), 1237-1247. <https://doi.org/10.1002/joc.5079>
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Andriulo A., Hang S., Sasal M.C., Nassetta M., Portela S.I., Cañas A. (2004) Efecto del tipo de suelo sobre el transporte de solutos en lisímetro. II. Atrazina. In XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas: p (Vol. 418).
- Caprile A.C., Aparicio V.C., Portela S.I., Sasal M.C., Andriulo A.E. (2017) Drenaje y transporte vertical de herbicidas en dos molisoles de la pampa ondulada Argentina. Ciencia del suelo, 35(1), 147-159.
- Carmona F., Rivas R., Ocampo D., Schirmbeck J., Holzman M. (2011) Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. Aqua-LAC. 3 (1), 26 - 36.
- Degano M.F. (2017) Evaluación del producto de evapotranspiración global MOD16 con medidas in situ en la región de la Pampa Húmeda, Argentina. Doctoral dissertation, Universidad de Valencia.
- Faramián A.M.G, Carmona F., Rivas R., Degano M.F., Olivera Rodriguez P. (2021) Monitoreo de la evapotranspiración real horaria por medio del balance energético y un lisímetro de pesada. Boletín Geológico y Minero. Madrid, España. In press.

- Gentine P, Entekhabi D., Chehbouni A., Boulet G., Duchemin B. (2007) Analysis of evaporative fraction diurnal behaviour. *Agricultural and forest meteorology*, 143(1-2), 13-29. ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.11.002>.
- Lázzari M., Laurent G., Victoria R. (1984) Uso del nitrógeno del fertilizante por el cultivo de trigo en la región semiarida pampeana, Argentina. In *Proceedings of the Regional Workshop on Nuclear Techniques in Crop Production (Piracicaba, 1984)*(CERRI, CC, ATHIÉ, D., Eds), Comissão Interamericana de Energia Nuclear and Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba (pp. 173-181).
- McCuen R.H., Knight Z., Cutter A.G. (2006) Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, 597-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597)).
- Nolz R., Cepuder P., Eitzinger J. (2016) Comparison of lysimeter based and calculated ASCE reference evapotranspiration in a subhumid climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 124, 315-324. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1417-y>
- Nutini F., Boschetti M., Candiani G., Bocchi S., Brivio P.A. (2014) Evaporative fraction as an indicator of moisture condition and water stress status in semi-arid rangeland ecosystems. *Remote Sensing*, 6(7), 6300-6323.
- Olmedo G., Vallone R. (2011) Diseño y construcción de un lisímetro de pesada para la medición de evapotranspiración real en vid en Mendoza, Argentina. In *Simposio Argentino de Viticultura y Enología*. 9-11 noviembre 2011. Mendoza. Argentina.
- Pereira A.R. (2004) The Priestley–Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 125, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.04.002>
- Requena A., Nordenström G., Castillo E. (2010) Coeficientes de cultivo de manzano en período de formación, obtenidos en lisímetros de drenaje. *EEA INTA Alto Valle*, 1, 1-7.
- Ritter A., Muñoz-Carpena R. (2013) Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of the Hydrology*. 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Rodríguez P.O., Holzman M.E., Degano M.F., Faramiñán A.M.G., Rivas R.E., Bayala M.I. (2020) Spatial variability of the green water footprint using a medium-resolution remote sensing technique: The case of soybean production in the Southeast Argentine Pampas. *Science of The Total Environment*, 142963. ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142963>.

Multi-source characterisation of non-rainfall water inputs to a semi-arid ecosystem

Sinikka Paulus^{1*}, Tarek S. El-Madany¹, René Orth¹, Anke Hildebrandt²
and Mirco Migliavacca¹

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Langzeitstudie mit wägbaren Präzisionslysimetern konzentrieren wir uns auf die Unterscheidung und Quantifizierung unterschiedlicher Wasserflüsse aus der Atmosphäre in den Boden: Neben Regen zählen dazu Taubildung, Nebelniederschlag und Bodenwasseradsorption, wobei die drei letzteren als nicht-Regen Wassereintrag (NRWI) zusammengefasst werden. Um diese Prozesse in den Gewichtsänderungen der Lysimeter zu unterscheiden, wurden meteorologische, bodenhydrologische und radiometrische Daten genutzt. Unsere Ergebnisse zeigen, dass im Zeitraum 2018 - 2020 in 72.8 % der Nächte Wasser als NRWI auf der Oberfläche und im Boden kondensiert ist. Der Gesamteintrag beträgt im Mittel 43.5 mm, was 8.1% des mittleren jährlichen Inputs darstellt. Während zwischen Oktober und April Wasser hauptsächlich als Tau kondensiert, ist Bodenwasseradsorption im mediterranen Hochsommer zwischen Juli und September der einzige NRWI Wassereintrag.

Schlagwörter: Lysimeter, Savanne, NRWI, Kondensation - Evaporation, Tau

Summary

As part of a long-term study with weighable precision lysimeters, we focus on distinguishing and quantifying the different water fluxes. These were classified as evapotranspiration, rainfall, and non-rainfall precipitation (NRWI): dew formation, fog precipitation, and soil water adsorption. Meteorological, soil hydrological and radiometric data were used to partition the underlying lysimeter weight changes. Our results show that in 2018 - 2020, water condensed as NRWI on the surface and in the soil in 72.8 % of the nights. The total input amounts to 43.5 mm, which represents 8.1 % of the mean annual input. While water condenses mainly as dew between October and April, soil water adsorption is the only NRWI water input during the Mediterranean midsummer between July and September.

Keywords: lysimeter, savannah, NRWI, condensation-evaporation, dew

Introduction

Climate predictions project changes in frequency of precipitation, causing prolonged periods without rainfall. Therefore, there is a rising interest in the role of non-rainfall water input (NRWI) for semi-arid ecosystems. The term NRWI summarizes processes of condensation deposition from the near-surface atmosphere, that are distinguished by different meteorological and soil hydraulic conditions involved (Agam and Berliner 2004). Fog is defined as aerosols of water droplets that are suspended in the air near the Earth's surface, which adhere after contact. Dew forms on surfaces when their temperature decreases below the saturation point of the adjacent air. Under the influence of capillarity and mineral surface charge, soil water interface phenomena deviate from

¹ Max Planck Institute for Biogeochemistry, Hans-Knöll-Str. 10, D-07745 Jena, ² Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Permoserstr. 15, D-04318 Leipzig

* Ansprechpartner: Sinikka Paulus, email: spaulus@bgc-jena.mpg.de

free water, provoking condensation of vapor already at values of relative humidity (rH) < 100% if soil water potential is low. The most widely used term in the lysimeter literature for this mechanism is soil vapor adsorption (SVA).

These processes have all been observed in arid and Mediterranean ecosystems (Agam and Berliner 2004, Verhoef et al. 2006). However, most studies were focused on individual NRWI processes and short observational records. New technical developments of large weighing lysimeters with controlled lower boundary conditions facilitate to measure water fluxes at high precision and temporal resolution. Particularly, in combination with additional measurements they enable to trace NRWI over time periods of several years. Such data allows to study intra- and inter-annual contributions of NRWI to local water balances and to reveal if they support vegetation or microbial activity during water limited periods.

In this study we i) characterize the different types of NRWI from a time series of lysimeter weight in a Mediterranean tree-grass ecosystem and ii) analyze the contribution of the different components to the water balance over a time period of three years.

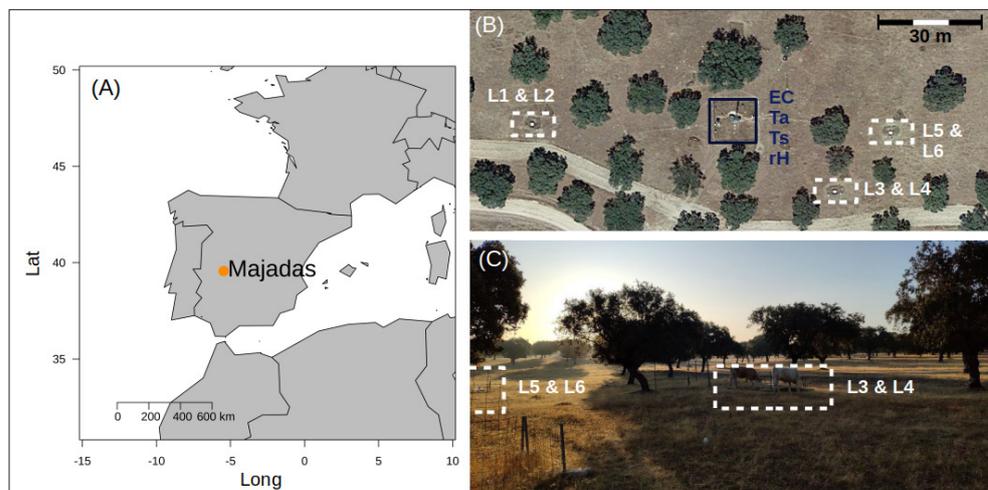
Material and Methods

Field site and instrumentation

The field site is a Mediterranean savannah type tree-grass ecosystem close to Majadas de Tietar in central Spain (Figure 1). Mean annual air temperature (T_a) is 16.7 °C and annual precipitation is ca. 650 mm. The herbaceous layer consists of native annual species with seasonally varying fractional cover, that is mainly driven by moisture availability. The site is extensively grazed by cows. The soil is formed of alluvial deposits and classified as Abruptic Luvisol (IUSS Working Group WRB 2015) with a sandy topsoil of 80 % sand, 11 % silt and 9 % clay (Perez-Priego et al. 2017). The site is equipped with three high precision weighing lysimeter stations (UGT) installed in the open areas, each containing two soil cylinders of 1 m² surface area and 1.20 m length. All lysimeters (L1-L6) were equipped with soil moisture and temperature probes (UMP-1, Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg, Germany) at 10, 20, 40 cm depth. More details can be found in Perez-Priego et al. (2017).

T_a and relative humidity (rH) are measured at 1 m height above the surface (CPK1–5, MELA Sensortechnik, Germany). Short- and longwave incoming and outgoing radiation is observed with a net radiometer (CNR4, Kipp and Zonen, Delft, Netherlands) at ~3 m height above the surface. Surface temperature (T_s) is calculated from the longwave outgoing radiation using the Stefan-Boltzmann's law.

Figure 1: (A) Location and (B) aerial view of Majadas de Tietar field site with lysimeter (L1:L6) and atmospheric measurement locations (adapted from Google (nd)) and (C) L5 & L6 and L3 & L4 on 26.09.2019 at 8:30 during scattered light conditions and grazing.



An eddy covariance (EC) system is operated at 1.8 m height. A detailed description of the system and data processing can be found in Perez-Priego et al. (2017). The time series considered in this study is 01.01.2018 – 31.12.2020.

Lysimeter data processing

Lysimeter weights are determined every minute. We analyze the resulting changes (ΔW_{lys}) as a time series. Outlier value and maintenance periods are filtered out. Then, data smoothing was done by using the adaptive window and adaptive threshold (AWAT) filter routine described by Peters et al. (2014, 2017). Changes of the water tank at the lower boundary were accounted for. ΔW_{lys} were further compared across all six lysimeter columns in order to filter ΔW_{lys} caused by animals: we calculated the mean ΔW_{lys} for one minute interval (i). This value was then subtracted from the individual ΔW_{lys} at i . In a second step, the average standard deviation (sd) from $i - 3$ to $i + 3$ minutes was calculated. Any value $> 1.5 \sigma$ was not accounted for. All remaining weight changes ΔW were associated to the exchange of water at the soil-atmosphere boundary.

ΔW was classified based on the assumption that only one flux is dominant each minute. We differentiated between **evapotranspiration** (ΔET when $\Delta W < 0$) versus water input of different origin (when $\Delta W > 0$). The latter was separated based on prevailing atmospheric, surface and soil hydraulic conditions. **Rainfall** was attributed when the rain gauge registered a rain event ($\Delta W > 0$ and $\text{rain}_{\text{gauge}} > 0$). **Fog** was defined for rH at saturation ($\Delta W > 0$ and $\text{rH} = 100$). When T_s fell below atmospheric dewpoint temperature we assigned **dew** ($\Delta W > 0$ and $T_s \geq T_d$). For the remaining $\Delta W > 0$, we modeled SVA of atmospheric humidity based on LE fluxes from EC measurements with equations (2), (3) and (4) in Verhoef et al. (2006). We used modeled SVA, and measured SWC and rH data to build a plot scale adsorption isotherm (Paulus et al. 2021 *manuscript in preparation*). Based on this equation we defined **SVA from the atmosphere** at ($\Delta W > 0$ and $\text{SWC} \leq \text{SWC}_{\text{ads thres}}$). When ($\Delta W > 0$ and $\text{SWC} \geq \text{SWC}_{\text{ads thres}}$) we labeled $\Delta W > 0$ as **transient SVA** assuming it to be rather related to interrupted vapor transport from deeper layers. Positive fluxes in this study indicate fluxes from the atmosphere to the soil, while negative fluxes describe the opposite.

Results

Generally, we find lysimeter weight losses during daytime and increases at night-time (exemplary shown with L6 in Figure 2 A). Disentangling the multiple water exchange processes in Figure 2 B we find similar seasonal variations across years. ET patterns

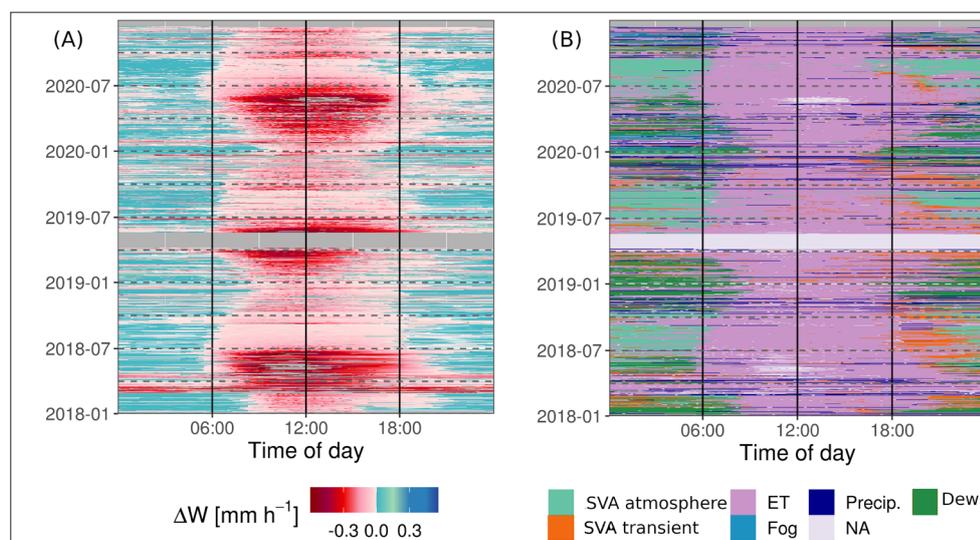


Figure 2: Intra- and inter-annual patterns of daily (A) lysimeter 6 weight changes ΔW (A) and (B) decomposed water fluxes (atmospheric - and transient adsorption, evapotranspiration (ET), precipitation, dew and fog) based on meteorological and soil hydraulic conditions between 2018 - 2020.

Table 1. Yearly mean sums and standard deviation (in brackets) of water fluxes in Majadas. All values are reported in mm.

Year	ET	Precipitation	Dew	Fog	SVA (atm)	total Σ in
2018	- 531.1 (72)	665.4 (63.6)	13.1 (0.9)	0.04 (0.1)	10.1 (7.5)	688,6
2019	- 479.6 (37.6)	441.4 (17.8)	33.7 (8.0)	0.2 (0.1)	25.5 (6.4)	500,5
2020	- 580.4 (31.4)	672.4 (161.4)	15.8 (11.8)	5.3 (3.2)	16 (9.6)	709,1

clearly follow the annual cycle of solar radiation. Between January and March nights and mornings are dominated by dew. Rain and fog events are also frequent in this period. From March onwards, ET is higher in absolute amount and daily occurrence duration, with daily mean fluxes of $-2.8 \pm 1.08 \text{ mm d}^{-1}$ (max -6.5 mm d^{-1}). In this period, dew still develops during the second half of the night and rain events occur until May. In summer, evaporation during the day is reduced to a seasonal mean of $-0.9 \pm 0.6 \text{ mm d}^{-1}$. Between midnight and sunrise, SVA of water from the atmosphere is the dominant water flux with mean $0.16 \pm 0.2 \text{ mm d}^{-1}$. Before midnight, SVA weight gains stem likely from deeper layers. Both fluxes reduce the daily losses by $26 \pm 24 \%$ (atmospheric SVA 22 %, transient SVA 6 %). The beginning of atmospheric SVA starts earlier in the evening along the dry season. Around October, these conditions end abruptly with the onset of rain.

The mean annual contribution of NRW to the local water balance is 43.5 mm, which is 8.1 % of incoming water (see Table 1). Thereby, dew accounts for 22.1 mm, SVA contributes 17.6 mm and fog amounts to 3.9 mm. All fluxes vary largely between lysimeters and years. The fraction of nights with detected NRW is 73 %, equalling 273 days per year.

The mean diurnal cycles of T_s , T_a , and rH in January and July are shown in Figure 3 A and B. T_s amplitudes in summer are $19.0 \text{ }^\circ\text{C}$ in early morning and peaking at $49 \text{ }^\circ\text{C}$ at midday. T_a is warmer in the morning ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) and has a daily maximum of $40 \text{ }^\circ\text{C}$. In winter, the amplitude is between 2 and $14 \text{ }^\circ\text{C}$ for T_a and T_s , respectively. rH is inversely following T_a with wider ranges in July (18 - 65 %) and slightly smaller ranges in January (60 - 95 %). Mean ΔW of L1 and L3 (Figure 3 C) show marked differences in the diurnal cycles. In summer, midday ET and night-time SVA are stronger in L1. In winter, the ΔW deviations are persistent although less pronounced.

Discussion

The detected frequent occurrence of dew at our site is in line with findings from Ritter et al. (2019), who have shown that dew frequency across grasslands in the US is linearly related to rH when $rH > 70\%$. Their data implies that grasslands like the Majadas site, with mean night-time rH close to saturation have a dew occurrence in $> 90\%$ of the nights. A recent study from another Spanish site by Saaltink et al. (2020) also measured frequent nightly inward fluxes in summer due to SVA and were also able to simulate their observations with a thermo-hydraulic numerical model for unsaturated flow. The model showed that large sub-diurnal temperature gradients were driving SVA. Under such conditions, several authors reported SVA occurrence during afternoons and early mornings (Kosmas et al. 2001, Agam and Berliner 2004, Verhoef et al. 2006).

The different components of NRW feature a high spatial and inter-annual variability. For dew, this aspect has been addressed in the literature. A study from a continental grassland in Mexico, reports reports annual dewfall varying between 16-69 mm mm year^{-1} (Aguirre-Gutiérrez et al. 2019). But to our knowledge, there are no studies yet assessing the inter-annual variability of SVA. Studies focusing on shorter time periods reported contrasting SVA magnitudes. Kosmas et al. (2001) measured over a surface cover gradient 46.8 mm at the vegetated spot and 88.7 mm below bare soil during the same time period. Verhoef et al. (2006) reported flux differences from 0.2 mm d^{-1} , at an area below trees, to 0.7 mm d^{-1} , at the most exposed lysimeter side in a Spanish Olive Orchard. Their results illustrate the small-scale heterogeneity of water and energy fluxes created by the non-homogeneous partial canopy cover in Savannah ecosystems. In this context, probably spatial heterogeneities and the resulting differences in micro-climates

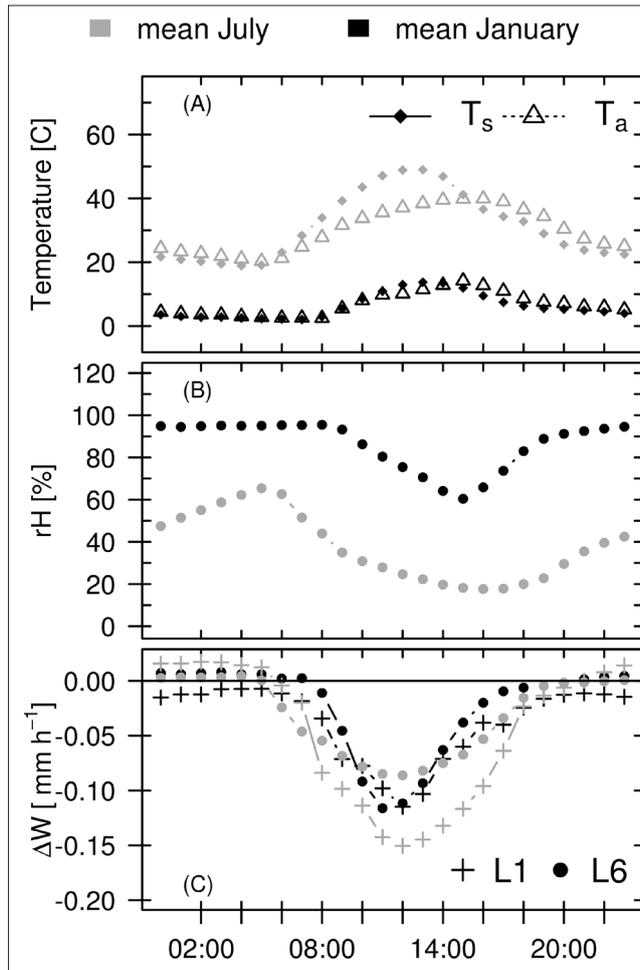


Figure 3: Mean diurnal cycles in July (grey) and January (black) of (A) surface (T_s) and air temperature (T_a) (B) relative humidity and (C) mean diurnal weight changes (ΔW) of lysimeter 1 (L1) and lysimeter 3 (L3).

can explain the deviations between the mean diurnal cycles of ΔW between lysimeters (Figure 3C).

Conclusions

Our results show that nighttime water fluxes in a semi-arid tree-grass ecosystem are dominated by NRWI. These findings are consistent across years, reflecting the strong seasonality of the ecosystem. Fog and dew events happen predominantly in winter and atmospheric SVA occurs exclusively in summer. NRWI contribute 8.1 % to the yearly water input. Our approach to distinguish and quantify NRWI fluxes can contribute to further analyses investigating the role of NRWI for vegetation functioning and soil characteristics.

Acknowledgements

The authors acknowledge Markus Reichstein, Arnaud Carrara and Gerardo Moreno, for their substantial contributions to this research. The authors acknowledge for funding from the IMPRS-gBGC Doctoral School for SP, the Alexander von Humboldt Foundation with the Max Planck Prize to Markus Reichstein. MM and TEM acknowledge funding from D-A-CH-DFG project "Verbesserte Abschätzung der Bruttoprimärproduktion". RO acknowledges support by the German Research Foundation (Emmy Noether grant 391059971). We also thank Martin Hertel (MPI BGC-Jena), and Ramon Lopez-Jimenez (CEAM) for technical assistance in the field.

Literature

Agam N., Berliner P. (2004) Diurnal Water Content Changes in the Bare Soil of a Coastal Desert. *Journal of Hydrometeorology*, 5:12.

Aguirre-Gutiérrez C.A., Holwerda F., Goldsmith G.R., Delgado J., Yopez E., Carbajal N., Escoto-Rodríguez M., Arredondo J.T. (2019) The importance of dew in the water balance of a continental semiarid grassland. *Journal of Arid Environments*, 168:26-35.

Google (n.d.) <https://earth.google.com/web/@39.94036275,-5.77465798,265.05683513a,203.58303987d,30y,0h,0t,0r>. [Accessed: 2021-01-21].

IUSS Working Group WRB (2015) Working group wrb (2015) world reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports*, (106).

Kosmas C., Marathianou M., Gerontidis S., Detsis V., Tsara M., Poesen J. (2001) Parameters affecting water vapor adsorption by the soil under semi-arid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, page 18.

Perez-Priego O., El-Madany T.S., Migliavacca M., Kowalski A.S., Jung M., Carrara A., Kolle O., Martín M.P., Pacheco-Labrador J., Moreno G., Reichstein M. (2017) Evaluation of eddy covariance latent heat fluxes with independent lysimeter and sapflow estimates in a Mediterranean savannah ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 236:87-99.

Peters A., Groh J., Schrader F., Durner W., Vereecken H., Pütz T. (2017) Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. *Journal of Hydrology*, 549:731-740.

Peters A., Nehls T., Schonsky H., Wessolek G. (2014) Separating precipitation and evapotranspiration from noise - a new filter routine for high-resolution lysimeter data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(3):1189-1198.

Ritter F., Berkelhammer M., Beysens D. (2019) Dew frequency across the US from a network of in situ radiometers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2):1179-1197.

Saaltink M.W., Kohfahl C., Molano-Leno L. (2020) Analysis of water vapor adsorption in soils by means of a lysimeter and numerical modeling. *Vadose Zone Journal*, 19(1).

Verhoef A., Diaz-Espejo A., Knight J.R., Villagarcía L., Fernández J.E. (2006) Adsorption of Water Vapor by Bare Soil in an Olive Grove in Southern Spain. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5):1011-1027.

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	Stoppengras
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.

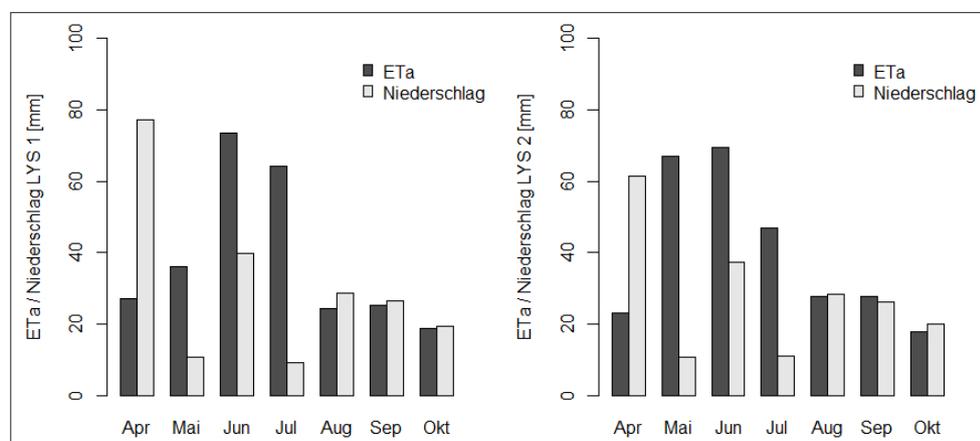


Abbildung 1: Monatliche ETa- und Niederschlagsraten gemessen bei LYS 1 (links) und LYS 2 (rechts) im Beobachtungszeitraum April – Oktober 2019. Das Wasseräquivalent vom Schnee wurde hinzugerechnet.

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.

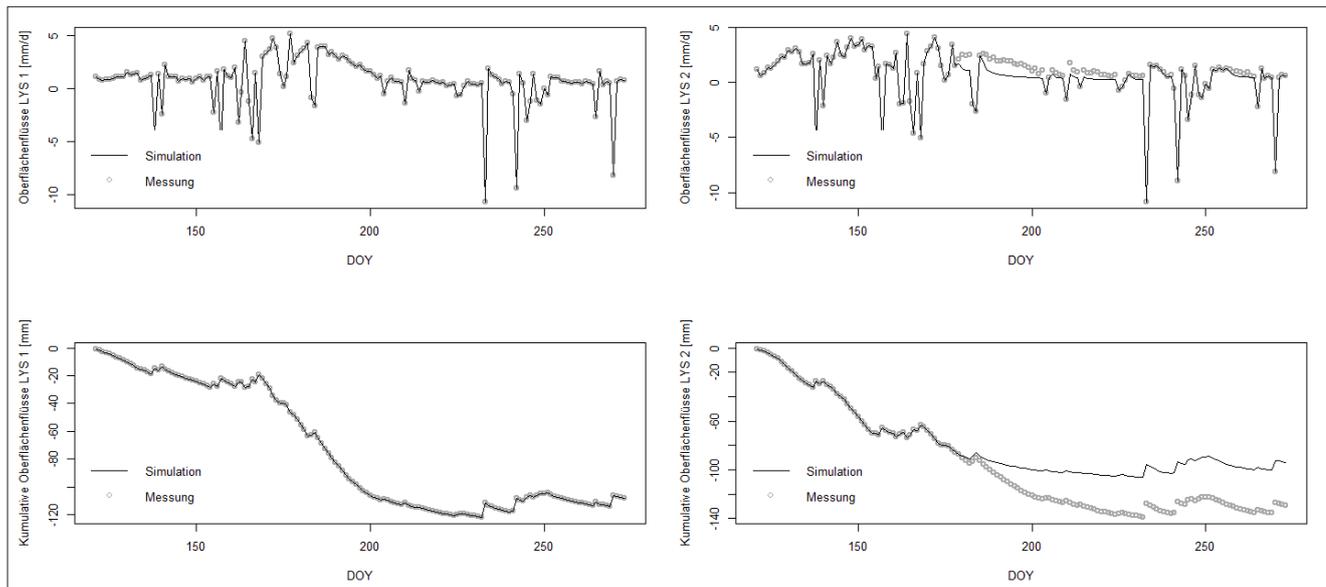
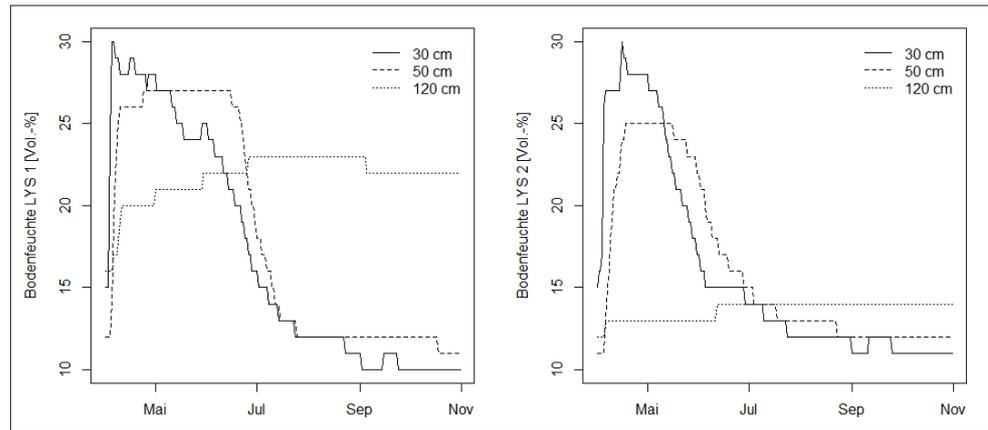


Abbildung 3: Gemessene
und simulierte (kumulative)
Oberflächenflüsse für LYS 1
(links) und LYS 2 (rechts) im
Beobachtungszeitraum Mai –
September 2019.

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.

Investigating shrub-encroached mountain grassland using high precision lysimeters

Georg Leitinger^{1*}, Bello Mouhamadou², Ulrike Tappeiner^{1,3},
Ursula Peintner⁴ and Sandra Lavorel²

Zusammenfassung

Die Brachlegung von wenig produktivem Grasland in europäischen Gebirgen führt zu einer Besiedelung durch Sträucher, die durch den Klimawandel voraussichtlich weiter begünstigt wird. Diese Veränderungen der pflanzlichen Diversität und der assoziierten Biota verändern die biogeochemische Funktion von Grasland und die Ökosystemleistungen (ES). Im internationalen Forschungsprojekt LUCSES wird ein besseres Verständnis für Stickstoff- (N) und Wasserkreislaufprozesse in verstrauchtem alpinen Grasland entwickelt. An französischen und österreichischen LTSER-Standorten wird die Variation entlang der Gradienten von Verstrauchung und die Mechanismen, die mit einer Mykorrhizierung verbunden sind, analysiert. Es werden Kleinlysimeter verwendet, um den vollständigen Wasserhaushalt zu analysieren und so die Wissenslücke zu überwinden, wie Veränderungen von funktionalen Merkmalen mit Wasser-Ökosystemfunktionen zusammenhängen.

Schlagwörter: Smart-Field-Lysimeter (SFL), Alpen, Ökosystemleistung, Mykorrhiza

Summary

Fallowing of low-productivity grasslands in European mountains is leading to colonization by shrubs, which is expected to be further favored by climate change. These changes in plant diversity and associated biota are altering grassland biogeochemical function and ecosystem services (ES). The international research project LUCSES is developing a better understanding of nitrogen (N) and water cycling processes in encroached alpine grasslands. At French and Austrian LTSER sites, variation along gradients of encroachment and mechanisms associated with mycorrhization are analyzed. Small-scale lysimeters will be used to analyze the full water balance, overcoming the knowledge gap on how changes in functional traits are related to water-related ecosystem processes and functions.

Keywords: Smart-Field-Lysimeter (SFL), Alps, ecosystem service, mycorrhizal assoziation

Introduction

Across the European mountains, changes in livestock production systems since the 1950s have led to a gradual segregation between more accessible, flatter, and more productive grasslands with intensified forage production through fertilization and sometimes irrigation, and more remote, steeper, and less productive grasslands used for extensive grazing, some of which are being abandoned (Gartzia et al. 2014, Lavorel et al. 2017). These trends are expected to continue to varying degrees under most future scenarios (Kohler et al. 2017b, Lavorel et al. 2019). After grazing ceases in subalpine grasslands, secondary succession is initiated and species- and function-rich herbaceous communities

¹ University of Innsbruck, Department of Ecology, Sternwartestr. 15, A-6020 Innsbruck; ² Laboratoire d'écologie alpine (LECA), F-38058 Grenoble Cedex 9; ³ Eurac Research, Institute for Alpine Environment, Drususallee 1, I-39100 Bolzano/Bozen; ⁴ University of Innsbruck, Department of Microbiology, Technikerstr. 25d, A-6020 Innsbruck

* Ansprechpartner: Dr. Georg Leitinger, email: georg.leitinger@uibk.ac.at

are gradually colonized by shrubs (Anthelme et al. 2007). In addition, recent observations and experimental studies have shown that climate warming, sometimes combined with increasing drought, favors shrub expansion (Harte et al. 2015). In addition to resulting changes in plant and associated biota biodiversity, shrub expansion is expected to profoundly alter the biogeochemical functioning of subalpine grasslands and thus the diverse ecosystem services (ES) they provide to local and distant beneficiaries. While previous studies have built mechanistic ES models for alpine grasslands based on plant traits (Lavorel et al. 2011, Grigulis et al. 2013, Kohler et al. 2017a), abandoned grasslands with significant shrub cover may be outside their scope (Schirpke et al. 2017).

Despite the spatial extent of already abandoned grasslands, with, for example, an average of -20% of agricultural land between 1980 and 2000 in Austria-Tyrol (Tappeiner et al. 2008) or -25% in the Spanish Pyrenees (Gartzia et al. 2014), and continuing trends under expected future global changes (Tasser et al. 2017), the functional consequences of scrub encroachment are poorly understood and previous studies have largely targeted the more obvious changes in carbon cycling processes (Tappeiner et al. 2008). In addition to lignification and associated biochemical changes, shrubs have qualitatively different mycorrhizal partners compared to herbaceous plants. These characteristics are expected to affect carbon cycling processes, as well as nitrogen and phosphorus recycling and water balance.

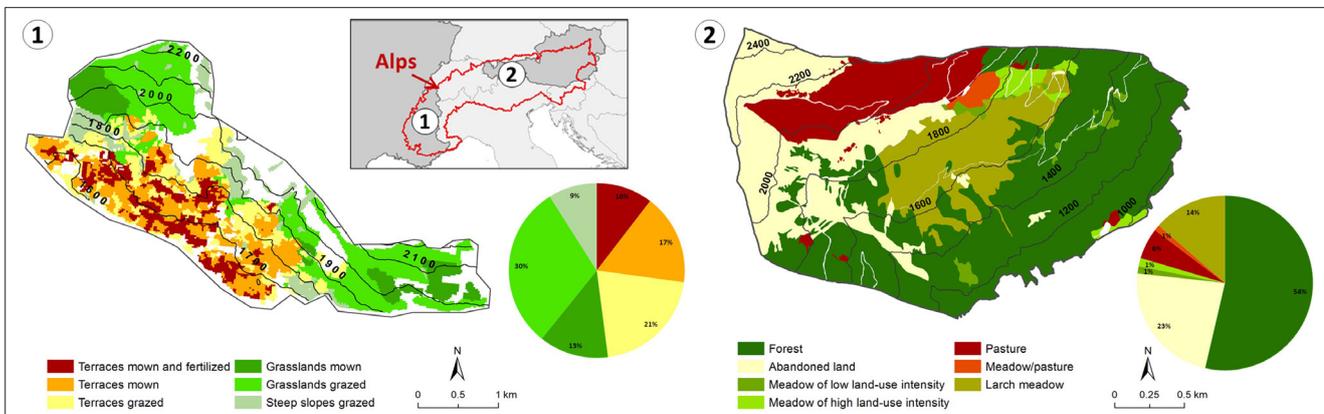
We hypothesize that the functional pathways of traits to nitrogen- and water-related processes will differ qualitatively between herbaceous and shrub communities. This is being investigated in an international collaborative research project called LUCSES. LUCSES is led by the University of Innsbruck, Austria (funded by the Austrian Science Fund - FWF) and the Laboratoire d'écologie alpine (LECA), France (funded by the Agence nationale de la recherche - ANR).

Materials and Methods

Study areas

The two study sites were previously extensively studied for soil properties, plant composition, plant functional properties, and indicators of ecosystem functions and ecosystem services at the plot level (Figure 1). The 'Lautaret' site within the Long-Term Socio-Ecological Research (LTSER) platform of the Central French Alps is located on the south-facing slopes of the headwaters of the Romanche and Guisane valleys (45.03°N, 6.24°E). Field research is supported by laboratory and garden facilities on the Lautaret Pass (2100 m a.s.l.). The area, between 1552 and 2442 m a.s.l., covers 53 km² and consists almost entirely of grasslands on the west side of Lautaret Pass (Romanche), while the east side (Guisane) has a significant amount of woody plants due to heavy

Figure 1. LUCSES study sites: 'Lautaret' in the Upper Romanche Valley, FRA (1); 'Stubai Valley' in the Tyrol, AUT (2). Modified after Leitinger et al. (2015).



agricultural extensification associated with the development of the Serre Chevalier ski area. Lautaret illustrates dynamics representative of higher elevation areas in the southern French Alps. The lower part of the site (1552-1800 m) was used for terraced agriculture from the fifteenth century onward and is now hayfields and pastures, while mowing originally occurred above this arable belt and up to a maximum elevation of 2000 m, with the upper slopes devoted to summer grazing. On the Guisane side, 7% of the terraced area and 32% of the summer grassland are currently colonized by woody plants, although some of them are grazed. The 'Stubai Valley' site is part of the LTSER platform 'Tyrolean Alps' in the Central Alps, Tyrol, Austria (47.15°N, 11.25°E) (Leitinger et al. 2015, Frenck et al. 2018). At an altitude of 900 to 2600 m a.s.l. and covering an area of 80 km², a long tradition of management systems has resulted in different grassland types, including fertilized meadows in the valley bottom, grasslands with low management intensity and gradients of secondary succession after abandonment above 1500 m a.s.l., and permanent grasslands above 1500 m a.s.l., and permanent grassland above 2000 m a.s.l. In addition, the 'Stubai Valley' has a unique lysimeter facility with up to 24 high-precision lysimeters (Smart Field Lysimeter-SFL[®], Meter Group AG, Munich) (970 m a.s.l.). This facility, maintained by the University of Innsbruck, Department of Ecology, has been used in national and international research projects dealing with climate experiments for herbaceous flora.

Experimental Smart-Field-Lysimeter design in LUCSES

To better understand the nitrogen and water cycling processes of shrubs under expected increasing drought and advanced snowmelt, high-precision lysimeters (SFL[®], Meter Group AG, Munich, Germany) are used to analyze the effects and mechanisms of climate change effects on shrub species. For this purpose, two congeneric shrubs exhibiting deciduous (*Vaccinium myrtillus*) and evergreen (*V. vitis-idea*) habit are individually planted in the lysimeters filled with in situ sieved (5 mm) and homogenized soil from original sites. The lysimeters will be used for the analysis of the effects of climate change on shrubs. In a split-plot design of 3.5 m x 3.5 m each, two plots will be subjected to either (1) control, (2) earlier snowmelt, or (3) earlier snowmelt and summer drought. A total of 18-24 lysimeters will be installed, meaning that each of the six resulting treatments (two shrub species * three climate treatments) will be replicated three to four times. The control follows ambient irrigation conditions and snowmelt. Earlier snowmelt refers to snow removal (SR) by shoveling 4 weeks earlier than the end of natural snowmelt. For earlier snowmelt and summer drought, an eight-week dry period during the growing season is added. Natural precipitation will be intercepted for all plots by greenhouse foils (Lumisol Clear AF[®], Folitec) installed after snowmelt and removed after the growing season. An irrigation system is used to simulate rainfall. A microclimate station will be installed in the center of each of the six plots to measure relevant micrometeorological factors for ET₀ calculation.

Impact and benefits

LUCSES bridges research areas in functional ecology (vegetation science, soil science, microbiology, biogeochemistry) and social-ecological systems science by extending trait-based ES modeling to bridge the biophysical reality gap in ES models. In the short term, LUCSES will contribute to trait-based ecology by providing missing baseline knowledge and publicly available data (eLTER, TRY) on plant and soil properties and their interactions along gradients from herbaceous to shrub grassland, and their role in nitrogen cycling and the soil-plant-atmosphere continuum (SPAC).

Acknowledgment

The research is funded by the Austrian Science Fund (FWF) and the Agence nationale de la recherche (ANR): I 4969-B.

References

- Anthelme F., Villaret J.C., Brun J.J. (2007) Shrub encroachment in the Alps gives rise to the convergence of sub-alpine communities on a regional scale. *Journal of Vegetation Science* 18:355-362.
- Díaz S., Kattge J., Cornelissen J.H.C., Wright I.J., Lavorel S., Dray S., Reu B., Kleyer M., Wirth C., Prentice I.C., Garnier E., Bönsch G., Westoby M., Poorter H., Reich P.B., Moles A.T., Dickie J., Gillison A.N., Zanne A.E., Chave J., Wright S.J., Sheremet'ev S.N., Jactel H., Baraloto C., Cerabolini B., Pierce S., Shipley B., Kirkup D., Casanoves F., Joswig J.S., Günther A., Falczuk V., Rüger N., Mahecha M.D., Gorné L.D. (2016) The global spectrum of plant form and function. *Nature* 529:167-171.
- Frenck G., Leitinger G., Obojes N., Hofmann M., Newesely C., Deutschmann M., Tappeiner U., Tasser E. (2018) Community-specific hydraulic conductance potential of soil water decomposed for two Alpine grasslands by small-scale lysimetry. *Biogeosciences* 15:1065-1078.
- Gartzia M., Alados C.L., Pérez-Cabello F. (2014) Assessment of the effects of biophysical and anthropogenic factors on woody plant encroachment in dense and sparse mountain grasslands based on remote sensing data. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 38:201-217.
- Grigulis K., Lavorel S., Krainer U., Legay N., Baxendale C., Dumont M., Kastl E., Arnoldi C., Bardgett R., Poly F., Pommier T., Schloter M., Tappeiner U., Bahn M., Clément J.-C. (2013) Combined influence of plant and microbial functional traits on ecosystem processes in mountain grasslands *Journal of Ecology* 101:47-57.
- Harte J., Saleska S.R., Levy C. (2015) Convergent ecosystem responses to 23-year ambient and manipulated warming link advancing snowmelt and shrub encroachment to transient and long-term climate-soil carbon feedback. *Global Change Biology* 21:2349-2356.
- Kohler M., Devaux C., Grigulis K., Leitinger G., Lavorel S., Tappeiner U. (2017a) Using the realised and potential ranges of ecosystem services as indicators of resistance and resilience. *Ecological Indicators* 73:118-127.
- Kohler M., Stotten R., Steinbacher M., Leitinger G., Tasser E., Schirpke U., Tappeiner U., Schermer M. (2017b) Participative Spatial Scenario Analysis for Alpine Ecosystems. *Environmental Management* 60:679-692.
- Lavorel S., Colloff M.J., Locatelli B., Gorrard R., Prober S.M., Gabillet M., Devaux C., Laforgue D., Peyrache-Gadeau, V. (2019) Mustering the power of ecosystems for adaptation to climate change. *Environmental Science & Policy* 92:87-97.
- Lavorel S., Grigulis K., Lamarque P., Colace M.-P., Garden D., Girel J., Douzet R., Pellet G. (2011) Using plant functional traits to understand the landscape-scale distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology* 99:135-147.
- Lavorel S., Grigulis K., Leitinger G., Schirpke U., Kohler M., Tappeiner U. (2017) Historical trajectories in land use pattern and grassland ecosystem services in two contrasted alpine landscapes. *Regional Environmental Change* 17:2251-2264.

Leitinger G., Ruggenthaler R., Hammerle A., Lavorel S., Lamarque P., Schirpke U., Clément J.C., Obojes N., Tappeiner U. (2015) Drought impact on water provision of managed alpine grasslands in two climatically different regions of the Alps. *Ecohydrology* 8:1600-1613.

Schirpke U., Kohler M., Leitinger G., Fontana V., Tasser E., Tappeiner U. (2017) Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services and resilience of mountain grassland. *Ecosystem Services* 26:79-94.

Tappeiner U., Tasser E., Leitinger G., Cernusca A., Tappeiner G. (2008) Effects of Historical and Likely Future Scenarios of Land Use on Above- and Belowground Vegetation Carbon Stocks of an Alpine Valley. *Ecosystems* 11:1383-1400.

Tasser E., Leitinger G., Tappeiner U. (2017) Climate change versus land-use change - What affects the mountain landscapes more? *Land Use Policy* 60:60-72.

Vergleich der Bodenfeuchteausschöpfung eines Lößbodens im Lysimeter und im Feld unter Ackerkulturen

Steffi Knoblauch^{1*}

Zusammenfassung

Im Beitrag werden langjährige Bodenfeuchte-Messreihen des Bodens der Lysimeter und der Herkunftsfläche der Lysimeter gegenübergestellt. Die festgestellten Unterschiede hängen im Wesentlichen mit Unterschieden in der Bodenwassercharakteristik zusammen. Der Anbau einer Sommer-Zwischenfrucht auf den Lysimetern beeinflusste die Bodenwasseraufnahme in den zwei folgenden trockenen Jahren stark. Parallele Messungen der Bodenfeuchte auf der Herkunftsfläche der Lysimeter können hilfreich sein, um die Auswirkung zunehmender Trockenheit auf den Bodenwasserhaushalt besser beurteilen zu können. Lysimeter haben aber den entscheidenden Vorteil, den Effekt von Bewuchs und Maßnahmen der Bewirtschaftung auf den Bodenwasservorrat genau quantifizieren zu können.

Schlagwörter: Bodenwasserentzug, Lysimeter, Feld, Bodenwassercharakteristik, Klimawandel

Summary

In the article, long-term measurement series of the soil moisture of the soil of the lysimeters and the area of origin of the lysimeters are compared. The determined differences are mostly caused by differences in soil water characteristic. The cultivation of a summer catch crop on the field lysimeters strongly influenced the soil water uptake in the following two years. Parallel measurements of the soil moisture of the soil in the field can be helpful in assessing the effect of increasing drought on the soil water balance. Lysimeters, however, have the decisive advantage of being able to precisely quantify the effects of vegetation and management measures on the soil water supply.

Keywords: soil water uptake, lysimeter, field, soil water characteristic, climate change

Einleitung

Langjährige Messungen des Bodenwasserhaushaltes sind wichtig, um die Auswirkung veränderter klimatischer Verhältnisse, des pflanzlichen Bewuchses oder der Intensität der Bewirtschaftung darauf erkennen zu können. Lysimeter sind nach unten und seitlich abgeschlossene Behälter. Bei nicht ausreichender Tiefe wird der Einfluss zunehmender Trockenheit auf den Bodenwasservorrat des Standortes nicht richtig wiedergespiegelt. Um herauszufinden, inwieweit die Bodenwasserdynamik des Lysimeterbodens mit der des Bodens der Herkunftsfläche des Lysimeters übereinstimmt, wurde die Bodenfeuchte beider Böden parallel ermittelt. Im folgenden Beitrag erfolgt eine Auswertung dieser Messreihen für den Zeitraum von 2010 bis 2019.

¹ Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Naumburger Straße 98, D-09943 Jena

* Ansprechpartner: Dr. agr. Steffi Knoblauch, email: steffi.knoblauch@tlllr.thueringen.de

Material und Methoden

Die Lysimeteranlage Butteltstedt befindet sich im Thüringer Becken, einem Teil des mitteldeutschen Trockengebietes. Das vieljährige Niederschlagsmittel beträgt 535 mm und das vieljährige Temperaturmittel 9,0 °C (1981...2010).

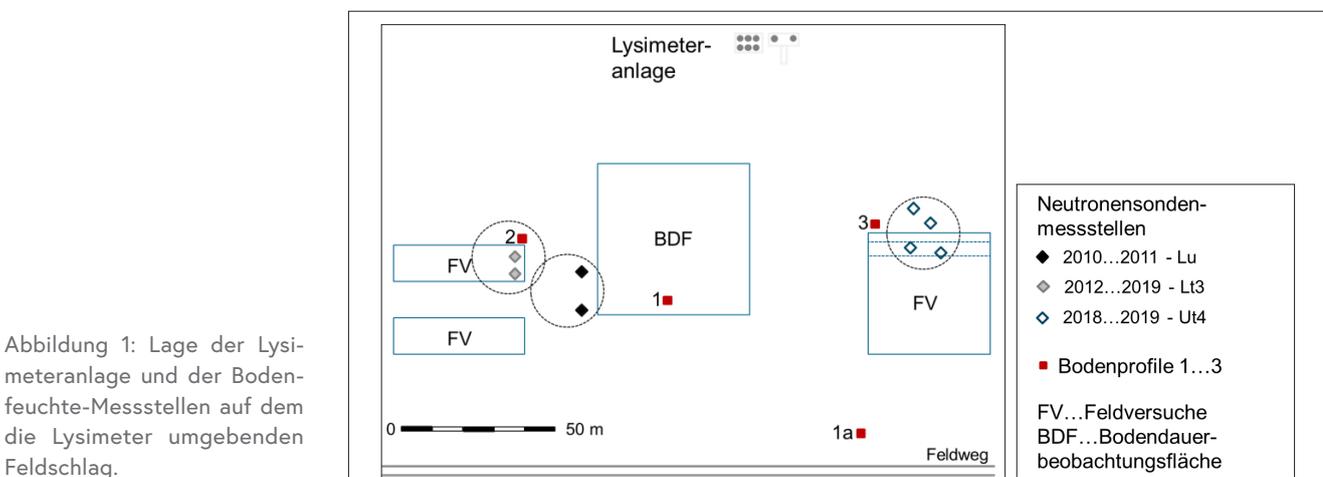
Beim Boden handelt es sich um einen tiefgründigen Braunerde-Tschernosem aus Löß. Unter einem in etwa 40 cm mächtigen Humushorizont folgt bis in etwa 68 cm Tiefe der Ah-Bv-Horizont (Tabelle 1). Die schwache Ausprägung von Ton-Humus-Tapeten deutet auf den Ablauf der Tonverlagerung, was die erhöhten Werte des Permanenten Welkepunktes (PWP) und der Feldkapazität (FK) in diesem Horizont erklärt. Im daran anschließenden Ckc-Horizont offenbaren sich verschiedene Lößablagerungen, die sich in der Korngrößenzusammensetzung teils stark unterscheiden und in der Fläche mit unterschiedlicher Mächtigkeit vorkommen. Als Ursache dafür kommen periglaziale Umlagerungen (solifluidal, deluvial, kryoturbat) in Frage.

Für die Vergleichsmessungen der Bodenfeuchte wurden auf der Umgebungsfläche der Lysimeter, bei der es sich gleichzeitig um die Herkunftsfläche der Lysimeterböden handelt, im Verlauf der Jahre im Umkreis von etwa 120 m mehrere Bodenfeuchte-Messstellen eingerichtet und daneben jeweils eine Bodenprofilansprache durchgeführt (Abbildung 1).

Tabelle 1: Ausgewählte Bodeneigenschaften des Braunerde-Tschernosem aus Löß.

Horizont	Tiefe	Probenahmetiefe	Tongehalt	Bodenart	PWP pF 4,2	FK pF 2,5	Tongehalt	Bodenart	PWP pF 4,2	Tongehalt	Bodenart	PWP pF 4,2
			Profil – Lu (1)			Profil – Lt3 (2)			Profil – Ut4 (3)			
Ap	25	10-20	26,6	Lu	18,3	29,8	30,9	Tu3	24,9	25,6	Tu4	18,0
Ah	43	27-33			21,3	31,9	36,9	Tu3	29,4	25,2	Tu4	26,0
Ah-Bv	68	45-55	29,4	Lu	27,0	34,2	38,5	Tu3	29,6	32,6	Tu3	27,5
Ckc ₁ ¹	110	70-85	20,3	Lu	19,9	29,4	42,6	Tu3	31,3	21,6	Ut4	22,0
		100-115					38,5	Lt3	28,1	25,7	Tu4	24,0
Ckc ₂ ¹	160	120-130	19,2	Lu	20,8	31,0	37,6	Lt3	25,0	22,7	Lu	22,8
		130-140			20,7	30,8						
		140-150			21,1	32,1	39,4	Lt3	25,6	23,7	Lu	16,3
Ckc ₃ ¹	195	160-175	19,9	Lu			37,0	Lt3	29,8			
		175-180								22,7	Ut4	15,8
		185-200	24,6	Lu	24,0	34,2	44,0	Lt3	30,8	22,7	Ut4	15,5
		210-220								23,0	Ut4	16,1

¹ Bezeichnung und Tiefe der C-Horizonte gilt nur für Profil- Lu (1)



Das Bodenprofil (1) charakterisiert die auf dem Umgebungsschlag der Lysimeter eingerichtete Bodendauerbeobachtungsfläche. Von diesem wurde angenommen, dass es in etwa die Eigenschaften des Bodens der Lysimeter und der Feld-Messstelle (1) beschreibt. Im Vergleich hierzu zeigen die Bodenprofile der beiden anderen Messstellen einen deutlich höheren Tonanteil (2) sowie einen höheren Schluff- und Tonanteil (3), was bodenartlich beim C-Horizont zur Einstufung eines mittel tonigen Lehmes beim Profil (2) und eines stark tonigen Schluffes beim Profil (3) führte. Die andersartige Korngrößenzusammensetzung der alle aus Löß hervorgegangenen Böden zog deutliche Unterschiede in den pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalten nach sich, sichtbar an den in *Tabelle 1* angegebenen Wassergehalten beim PWP.

Für die Bestimmung des Bodenwassergehaltes dient eine Am/Be-Neutronensonde (Troxler). Die Messung wird in 20cm-Tiefenabstufungen bis in 2,3 m Tiefe und mit zwei Wiederholungen durchgeführt. Beim Boden der Lysimeter handelt es sich um ortsfeste Messstellen, im Feld werden die Messrohre nach der Aussaat jeweils neu gesetzt. Der Messrhythmus ist während der Vegetationszeit wöchentlich und danach bis Ende November monatlich.

Die Lysimeter weisen eine Oberfläche von 2 m² und eine Tiefe von 2,5 m auf. Sie sind monolithisch befüllt und befinden sich zur Vermeidung von Oaseneffekten inmitten eines 30ha großen Feldschlages, der mit der gleichen Kultur bewachsen ist. Das Sickerwasser wird mittels keramischer Saugkerzen unter Einwirkung eines Unterdruckes gewonnen. Die Lysimeter sind wägbare mit einer Genauigkeit von 100 g, was einer Verdunstungs- bzw. Niederschlagshöhe von 0,05 mm entspricht.

Ein Vergleich der mit Hilfe der Neutronensonde gemessenen Wassergehaltsänderung des Lysimeterbodens mit der über die Gewichtsänderung bestimmten Bodenwasserbilanz ergab im Mittel der Jahre 2010 bis 2019, dass die Änderung des Bodenwasservorrates mit der Neutronensonde im Winterhalbjahr in geringem Maß um -0,07 mm/d unterschätzt und während der Vegetationszeit um +/- 0,15 mm/d über- oder unterschätzt wird.

Im Versuchszeitraum von 2010 bis 2019 gelangten auf die Lysimeter und dem umgebenden Feldschlag in der Fruchtfolge Sommergerste, Winterraps, Sudangras, Winterweizen und Wintergerste zum Anbau. Im Jahr 2017 wurde auf die Lysimeter nach Ernte von Winterraps Tagetes etabliert zur ökologischen Bekämpfung von Wurzelnematoden. Dies geschah auf dem Feldschlag nicht. Düngung und Pflanzenschutz erfolgten nach den Regeln der guten fachlichen Praxis.

Die Niederschläge der Versuchsjahre vermittelt *Tabelle 2*. Nach einem überdurchschnittlich feuchten Jahr 2010 war es daraufhin in zwei Jahren etwas zu feucht und in sieben Jahren zu trocken. Als sehr trocken mit weniger als 80 % des normalen Wertes erwiesen sich die Jahre 2011, 2018 und 2019. Die Jahresdurchschnittstemperaturen lagen in 2011, 2012 und 2013 unter dem Normalwert, in den übrigen Jahren darüber.

Ergebnisse

Sickerwassermenge und Bodenfeuchtedefizit

Überdurchschnittliche Niederschläge im Jahr 2010 führten zu einer vollständigen Auffüllung des Bodenwasservorrates und ergiebiger Sickerwasserbildung ab Ende des Jahres (*Tabelle 3*). Die Sickerwasserperiode setzte sich bis in den Mai des Folgejahres fort mit dem Ergebnis einer Sickerwasserspense von 103 mm im Jahr 2011. In den folgenden

Tabelle 2: Niederschlag der Versuchsjahre im Vergleich zum vieljährigen Mittel.

Jahr		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Niederschlag	mm/a	611	415	483	561	503	458	499	573	383	435
Abweichung vom vieljährigen Mittel	%	114	78	90	105	94	86	93	107	72	81

Jahr		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Sickerwassermenge	mm/a	20	103	0	0	0	0	0	0	0	0
Bodenfeuchtedefizit Vegetationsbeginn	mm	-67	-30	-174	-90	-176	-180	-197	-207	-184	-264

Tabelle 3: Sickerwassermenge und Bodenfeuchtedefizit zu Vegetationsbeginn.

acht Jahren kam es nicht mehr zu einer vollständigen Auffüllung des Bodenwasservorrates und blieb eine Sickerwasserbildung aus. Nachdem sich die Bodenfeuchtedefizite im Frühjahr meist zwischen -100 und -200 mm bewegten, stellte sich im Frühjahr 2019 nach einer sehr trockenen und warmen Witterung in 2018 ein Maximalwert von -264 mm ein (Tabelle 3).

Vergleich der Inanspruchnahme des Bodenwassers im Lysimeter und im umgebenden Feldschlag

Die Abbildungen 2 und 4 zeigen die mit der Neutronensonde gemessene Bodenfeuchteänderung auf dem Lysimeter und dem umgebenden Feldschlag für den Zeitabschnitt „Vegetationsbeginn bis Ernte der Kultur“ von 2010 bis 2019. Jeweils zwischen diesen Wertepaaren ist die mit der Neutronensonde ermittelte Zunahme des Wasservorrates des Lysimeterbodens für den Zeitabschnitt „nach Ernte bis Vegetationsbeginn des Folgejahres“ erkennbar.

In den Jahren 2010 bis 2014 war beim Lysimeterboden eine stärkere Inanspruchnahme des Bodenwassers im Vergleich zum Boden des Feldes zu beobachten verbunden mit jeweils höheren Erträgen.

Besonders ausgeprägt offenbarte sich dieser Unterschied in 2011 beim Anbau von Winterraps. Zu Vegetationsbeginn wiesen beide Böden im Wurzelraum Feldkapazität auf (Abbildung 3). Beim Lysimeter wurde der Bodenwasservorrat unter dem Einfluss einer sehr trockenen Witterung um -273 mm gesenkt und der Bodenwassergehalt bis in 240 cm Tiefe bis in den Bereich des PWP. An der Feldmessstelle (Lu, 1) war bis in 240 cm Tiefe ein Bodenwasserentzug von nur -174 mm nachweisbar.

Bei den schichtweisen Werten des PWP und der FK in den Abbildungen 3, 5 und 6 handelt es sich beim Lysimeterboden um die Mittelwerte der mit der Neutronensonde ermittelten niedrigsten und höchsten Werte des Bodenwassergehaltes (nur bei ergiebiger Sickerwasserbildung) und bei den Böden der Feldmessstellen um die mittels Druck-Methode für das jeweilige Bodenprofil bestimmten Werte.

Wenngleich angenommen wurde, dass das Profil (1) die θ - Ψ -Charakteristik des Lysimeterbodens beschreibt, weist die in unmittelbarer Nähe dieses Profiles im Feld erfasste Änderung des Bodenwassergehaltes daraufhin, dass die Pflanzenverfügbarkeit des

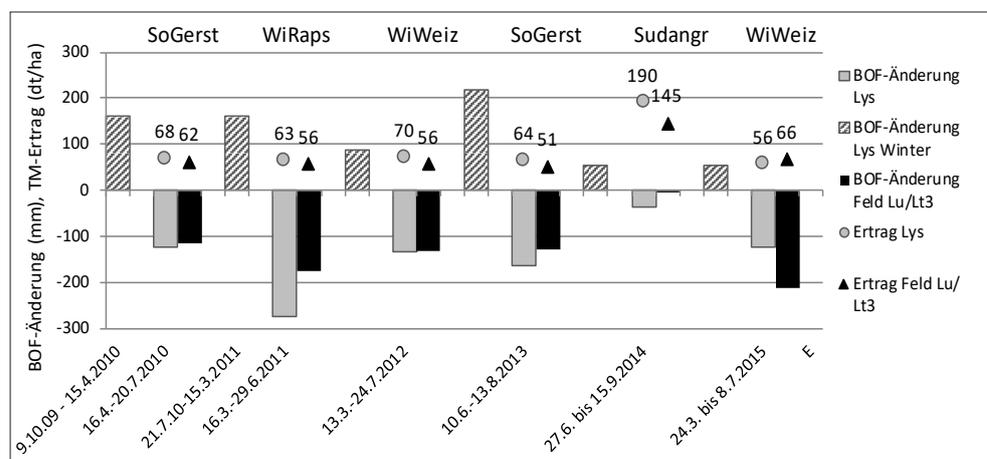


Abbildung 2: Änderung der Bodenfeuchte während der Vegetationszeit (Lysimeter, Feld) und während des Winterhalbjahres (nur Lysimeter) sowie die erzielten Erträge der Hauptprodukte.

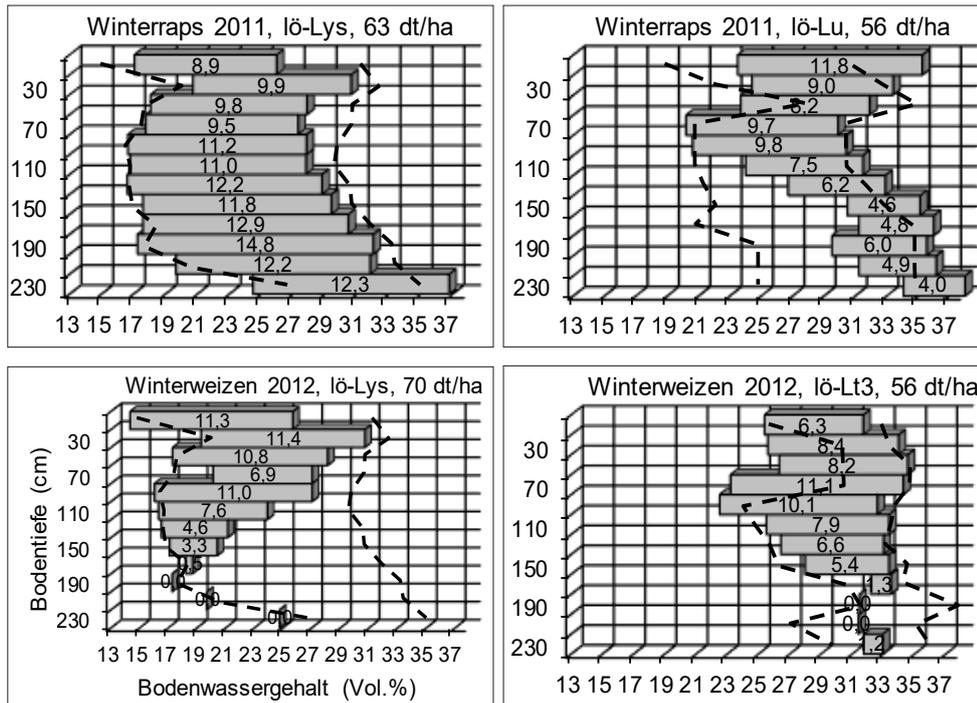


Abbildung 3: Schichtweiser Bodenfeuchteentzug auf dem Lysimeter und den umgebenden Feld-Messstellen Lu (2011) und Lt3 (2012) (gestrichelte Linien kennzeichnen links den PWP und rechts die FK, die Säulen rechts den Anfangs- und links den Endwassergehalt).

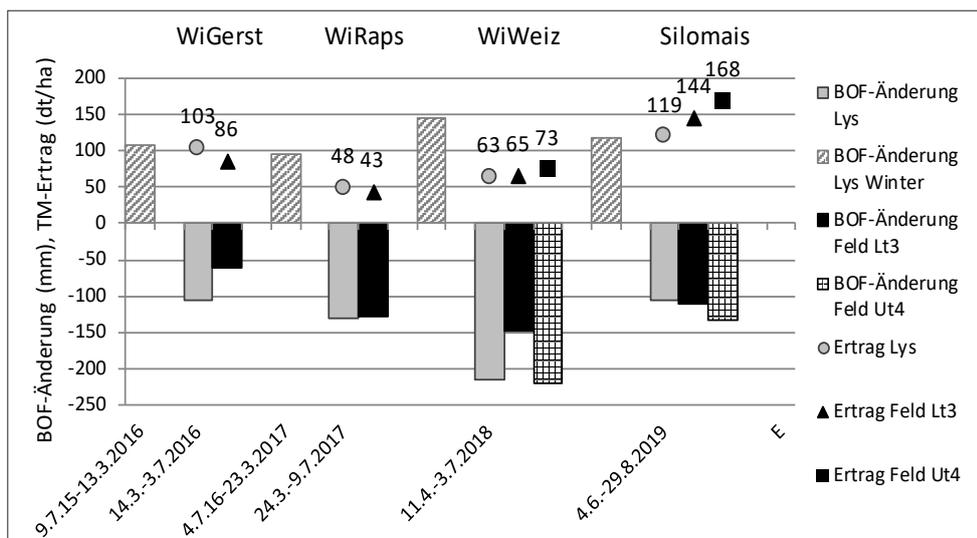


Abbildung 4: Änderung der Bodenfeuchte während der Vegetationszeit (Lysimeter, Feld) und während des Winterhalbjahres (nur Lysimeter) sowie die erzielten Erträge der Hauptprodukte.

Bodenwassers geringer sein muss als diejenige des Lysimeterbodens. Offenbar handelt es sich beim Lysimeterboden um andersartige Lößablagerungen mit der Folge andersartiger Korngrößenzusammensetzungen und Porengrößenverteilungen. Erkennbar wird an beiden Entnahme-Dichte-Profilen, dass der Bodenwasserentzug von Wintereraps tiefer als 2,4 m reichen kann. Möglicherweise hat Wintereraps im Feld auch Bodenwasser unterhalb 2,4 m Tiefe erschlossen. Dennoch war der Ertrag der Feldparzelle niedriger, was die vermutete geringere Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers bestätigt (Abbildung 3).

In 2012 vollzieht sich ein vergleichbarer Bodenfeuchteentzug von -132 mm. Ab diesem Jahr finden die Messungen im Feld an der Messstelle Lt3 statt, einer stark tonig-lehmigen Ausprägungsform des Lösses (2). Im Vergleich zum Profil (1) ist die nutzbare Feldkapazität (nFK) geringer und liegen die Bodenwassergehalte in diesem pF-Bereich höher. Sowohl beim Lysimeter als auch beim Boden des Feldes war keine vollständige Auffüllung des Bodenwasservorrates festzustellen, wobei das Defizit des Lysimeterbodens aufgrund

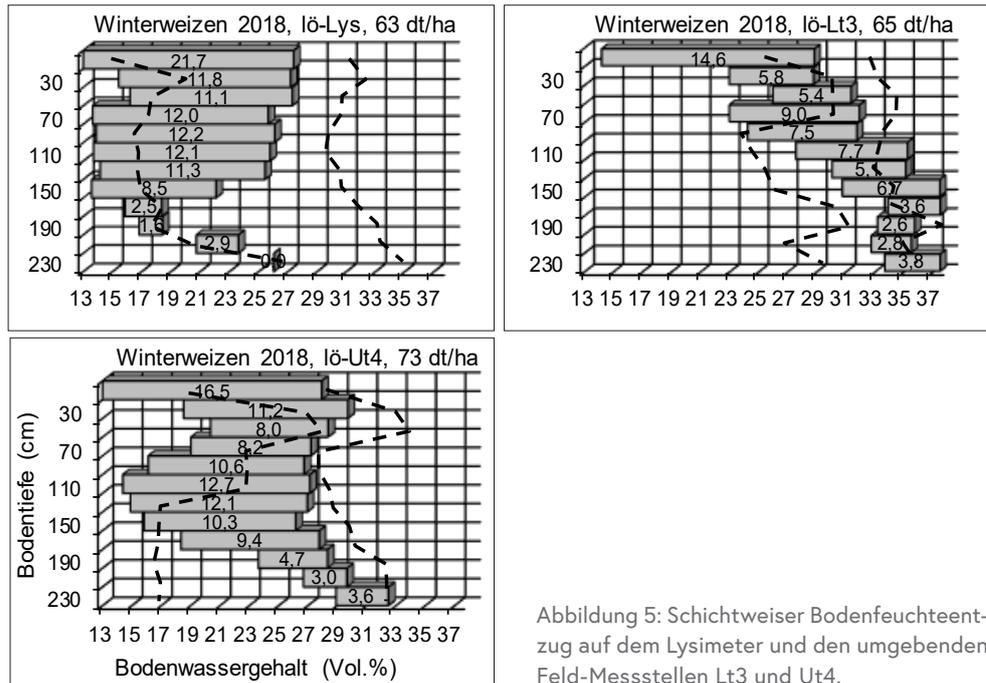


Abbildung 5: Schichtweiser Bodenfeuchteentzug auf dem Lysimeter und den umgebenden Feld-Messstellen Lt3 und Ut4.

höherer Werte der nFK deutlich größer ausfiel. Dass trotz gleichen Bodenwasserentzuges und Senkung der Bodenwassergehalte bis zum PWP unterschiedliche Erträge erfasst wurden, ist auf einem im Feld verstärkten Ertragsverlust durch Mäusefraß zurückzuführen.

Im Jahr 2015 blieb der Ertrag von Winterweizen auf dem Lysimeter aus agrotechnischen Gründen hinter dem Wert der Feld-Messstelle zurück. Dementsprechend geringer fiel auch die Bodenfeuchteausschöpfung aus. Im darauffolgenden Jahr 2016 zeichnete sich auf dem Lysimeterboden erneut eine höhere Bodenwasseraufnahme ab und erzielte Wintergerste einen höheren Ertrag als auf der Messparzelle Lt3 im Feld (Abbildung 4).

Diese Tendenz höherer Erträge und höherer Bodenwasserentzüge auf dem Lysimeter im Vergleich zum Feld setzt sich auch im Jahr 2017 mit Anbau von Winterraps fort.

Ab dem Jahr 2018 werden die Messungen im Feld erweitert um die Messstelle Ut4. Das in der Nähe aufgenommene Bodenprofil (3) lässt eine im Vergleich zum Messplatz Lt3 höhere nutzbare Feldkapazität erkennen. Unter dem Einfluss einer sehr trockenen Witterung entwickelt Winterweizen auf dem Lysimeter einen Bodenwasserentzug von -200 mm. Auf der Feldmessstelle Ut4 liegt dieser Wert in der gleichen Größenordnung, während er auf der Messstelle Lt3 geringer ausfällt, dem niedrigeren nFK-Wert dieses Bodens entsprechend. Der Ertrag des Winterweizens ist auf der Messstelle Ut4 am höchsten, gefolgt von den Werten der Messstelle Lt3 und des Lysimeters.

Im trockenen Jahr 2019 verstärkt sich diese Tendenz, wobei auf dem Lysimeter sowohl der Bodenwasserentzug als auch der Ertrag am geringsten ausfällt. Anhand der Abbildung 5 wird deutlich, dass der Boden des Lysimeters zu Vegetationsbeginn 2018 ein sehr viel höheres Bodenfeuchtedefizit aufwies als die Böden der Feld-Messstellen, bei denen nahezu Feldkapazität erreicht worden war. Im Unterschied zum Feld kam auf die Lysimeter im Juli 2017 ein Bewuchs mit Tagetes. Im Juli und August dieses Jahres regnete es mit 186 % des Normalwertes überdurchschnittlich. Tagetes erreichte einen Ertrag von 57 dt Trockenmasse/ha und verdunstete zwischen Aufgang und Ernte 200 mm, was im Mittel der Wachstumszeit 3,3 mm/d entsprach. Der ergiebige Niederschlag im Juli und August in Höhe von 3,5 mm/d wurde dadurch nahezu verbraucht. Ein flach bearbeiteter Boden wies im gleichen Zeitraum im Jahr zuvor eine Evaporation von 1,4 mm/d auf. Daraus ergibt sich für den Bewuchs mit Tagetes gegenüber einer Brache ein Mehrverbrauch von 1,9 mm/d. Multipliziert mit 60 d Wachstumszeit sind somit dem Boden des Lysimeters

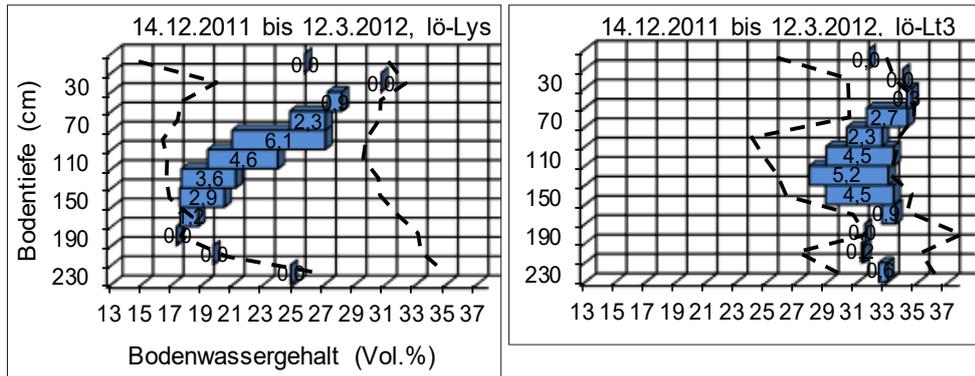


Abbildung 6: Schichtweise Bodenwasserauffüllung auf dem Lysimeter und der umgebenden Feld-Messstelle Lt3.

etwa 114 mm für die Auffüllung des Bodenwasservorrates und die Wasserversorgung der Folgefrucht verloren gegangen.

Obwohl Winterweizen im Jahr 2018 beim Lysimeter ebenso viel Bodenwasser aufnahm wie an der Messstelle Ut4 sank der Bodenwassergehalt des Lysimeterbodens deutlich stärker in den Bereich um den PWP (*Abbildung 5*). Dieser Entzug des stärker gebundenen Bodenwassers ist als Ursache für den geringeren Ertrag auf dem Lysimeter zu sehen und erklärt auch die Ertragsunterschiede beim Silomais im Jahr 2019 trotz gleichen Betrags der Wiederauffüllung des Bodenwasservorrates beim Lysimeter und den Messstellen im Feld im Winter 2018/19.

Abbildung 6 zeigt die Zunahme des Bodenwassergehaltes im Winterhalbjahr 2011/2012. Die Niederschläge in diesem Winterhalbjahr waren nicht ausreichend, um den Boden des Lysimeters und den der Feld-Messstelle Lt3 bis zur Feldkapazität aufzufüllen. Der ermittelte Auffüllungsbetrag von +40 und +38 mm bis in 180 cm Tiefe war vergleichbar. Ein im Feld möglicher Beitrag des kapillaren Aufstieges an der Wiederauffüllung des Bodenwasservorrates scheint mit einer Zunahme des Bodenwassergehaltes um 0,6 Vol.% in 220 bis 240 cm Tiefe in geringem Umfang abgelaufen zu sein.

Diskussion

Nach einer vollständigen Auffüllung des Bodenwasservorrates Anfang des Jahres 2011 und einer daraufhin bis in 240 cm Tiefe durch Winterraps erfolgten Ausschöpfung des Bodenwasservorrates bis zum PWP kam es beim Lysimeterboden in den folgenden neun Jahren nicht wieder zu einer erneuten Auffüllung. Im Vergleich zur Bodenfeuchtemessung im Feld zeigte sich über die Jahre eine intensivere Beanspruchung des Bodenwasservorrates, wobei zumeist auch die Erträge höher ausfielen. Eine detaillierte Betrachtung der Bodenwassercharakteristik der Böden im Feld brachte die Erkenntnis, dass von der Annahme einer homogenen Ausprägung des Lößbodens in der Fläche nicht ausgegangen werden kann. Vielmehr zeigten die bodenphysikalischen Untersuchungen differenzierte Verhältnisse der Korngrößenzusammensetzung und der sich daraus ableitenden pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalte. Die anfangs unterschiedlichen Werte des Bodenwasserentzuges auf dem Lysimeter und den Feld-Messstellen konnten somit auf Unterschiede in der Korngrößenzusammensetzung verschiedener Lößablagerungen zurückgeführt werden. Inwieweit die im Lysimeter ab 2,5 m Tiefe unterbrochene Verbindung zum darunter anstehenden Boden einen Verlust an kapillarem Aufstieg bedeutet, ließ sich noch nicht abschließend klären. Anhand von Messungen vor und nach dem Winterhalbjahr 2011/2012 war nur ein geringer Beitrag des kapillaren Aufstieges an der Wiederauffüllung des Bodenwasservorrates nachweisbar. Ab dem Versuchsjahr 2017 kam ein weiterer Messplatz im Feld hinzu, dessen Boden eine tonig-schluffige Ausprägungsform des Lösses darstellte. Die hier gefundene Bodenwassergehaltsänderung zeigt Ähnlichkeiten zum Boden des Lysimeters. Dennoch war im Frühjahr 2018 ein deutlicher Unterschied im Auffüllungsgrad des Bodenwasservorrates zwischen diesen

beiden Messplätzen zu erkennen. Einen wesentlichen Anteil daran hat der im Juli des Vorjahres nur auf die Lysimeter etablierte Pflanzenbestand mit Tagetes, durch den etwa 114 mm dem Bodenwasservorrat im Folgejahr verloren gegangen sind. Dieser Betrag dem im Frühjahr 2018 ermittelten Bodenfeuchtedefizit hinzugerechnet, hätte der Boden des Lysimeters nur ein Defizit von -66 mm aufgewiesen. Damit wäre man in die Nähe des für die tonig-schluffige Ausprägungsform im Feld bestimmten Bodenwasservorrates gekommen, der in etwa bei Feldkapazität lag.

Schlussfolgerungen

Die Vergleichsmessungen der Inanspruchnahme des Bodenwassers im Lysimeter und der Herkunftsfläche der Lysimeter zeigen, dass für eine Vergleichbarkeit die Matrixpotenzialkurven beider Böden genau bekannt sein müssen. Vor dem Hintergrund geringer werdender Niederschläge kann die Betrachtung der Bodenwasserinanspruchnahme im Feld nützlich sein, wenn die Tiefe der Lysimeter nicht mehr ausreicht, um die Auswirkung einer tiefergehenden Durchwurzelung des Bodens auf den Bodenwasserhaushalt erkennen zu lassen. Lysimeter haben aber den entscheidenden Vorteil einer genauen Bilanzierung des Bodenwasservorrates in Abhängigkeit vom Bewuchs und der Bewirtschaftung des Bodens in den Zeitabschnitten zwischen der Etablierung der Kulturpflanzen.

Modellbasierte Bewertung von Bewässerungsmaßnahmen auf Grundwassermenge und -qualität

Johann Fank^{1*} und Gernot Klammmler¹

Zusammenfassung

Eine optimierte Steuerung der Bewässerung ist komplex und wird in erster Linie durch die Kulturführung, die bodenphysikalischen Standortfaktoren und die Witterung beeinflusst. Ziel ist es, den Pflanzen für deren optimale Entwicklung ergänzend zu den natürlichen Niederschlägen die erforderliche Wassermenge zum richtigen Zeitpunkt zuzuführen. Um die langfristige Auswirkung von Saatmais-Bewässerung aus dem Grundwasser auf die Grundwasserneubildung und die Nitratkonzentration im Grundwasser zu bewerten wurde eine Langzeit-Modellierung des Bodenwasser- und Stickstoffhaushaltes der ungesättigten Zone mit einem Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodell gekoppelt. Im untersuchten Grundwassergebiet würde eine Optimierung der Bewässerungsgaben – weniger und dafür öfter unter Berücksichtigung der bodenphysikalischen Erfordernisse – eine Verringerung der notwendigen Bewässerungsmenge um 31 % bedeuten. Der Stickstoffaustrag aus der ungesättigten Zone könnte um 12 % reduziert werden.

Schlagwörter: Numerische Modellierung, Saatmaispbewässerung, Bewässerungsstrategien, Grundwasserentnahmen, Grundwasserqualität

Summary

Optimized irrigation control is complex and is primarily influenced by crop management, soil-physical location factors and weather conditions. The aim is to supply the plants with the necessary amount of water at the right time for their optimal development - in humid climates - in addition to natural precipitation, taking into account the water stored in the soil. To evaluate the long-term effects of seed maize irrigation from shallow groundwater on groundwater recharge and nitrate concentration in groundwater, a long-term modelling of the soil water and nitrogen balance in the unsaturated zone was coupled with a groundwater flow and nitrate transport model in a section of the „Lower Mur Valley“. An optimization of the irrigation strategy – taking into account the soil physical parameters – would lead to a reduction of irrigation water amount by 31 %. Nitrogen leaching from the unsaturated zone to the groundwater could be reduced by 12 %.

Keywords: Numerical modeling, seed maize irrigation, irrigation strategy, groundwater quantity, groundwater quality

Einleitung

Die Versorgung von landwirtschaftlichen Kulturen mit Wasser ist ein wesentliches Kriterium für die Pflanzenentwicklung und den -ertrag. Dabei ist neben der Niederschlagsmenge auch die Niederschlagsverteilung über die Zeit von entscheidender Bedeutung, da die Kulturen in unterschiedlichen Pflanzenentwicklungsstadien unterschiedlich viel Wasser benötigen. Außerdem ist der Wasserbedarf auch von Kultur zu Kultur unterschiedlich. Reichen die natürlichen Niederschlagsmengen bzw. die vorherrschenden

¹ JR-AquaConSol, Steyrergasse 21, A-8010 Graz

* Ansprechpartner: Univ. Doz. Dr. Johann Fank, email: johann.fank@jr-aquaconsol.at

Niederschlagsverhältnisse nicht aus, den Wasserbedarf der Pflanzen abzudecken, so kann dem Boden über künstliche Bewässerung zusätzliches Wasser zugeführt werden. Durch Bewässerung mit lokalen Grundwasserressourcen wird der Grundwasserkörper in zweierlei Hinsicht beeinflusst. Einerseits stammt das Wasser für die Bewässerungen zu einem großen Anteil aus dem Grundwasser vor Ort, was eine zusätzliche Wasserentnahme aus dem Aquifer darstellt. Andererseits kann das zusätzlich zugeführte Bewässerungswasser das natürliche Verhalten des Sickerwassers sowie das Auswaschungsverhalten von Nitrat aus dem Boden verändern.

In der vorliegenden Untersuchung werden unterschiedliche Bewässerungsszenarien mit Hilfe von numerischen Simulationsmodellen abgebildet und damit die Auswirkungen von landwirtschaftlichen Bewässerungen auf das Grundwasser interpretiert und bewertet. Die Modellierung wird für ein ausgewähltes Gebiet im Unteren Murtal, in dem die Bewässerung von landwirtschaftlichen Spezialkulturen (hauptsächlich Saatmais, aber auch Feldgemüse, Käferbohnen, Kren, Trockenreis, Soja, Äpfel) eine Rolle spielt, exemplarisch durchgeführt.

Material und Methoden

Wetterdaten der Jahre 2012 bis 2018 im Untersuchungsgebiet weisen eine mittlere Jahresniederschlagssumme von 956 mm auf, die mittlere Jahreslufttemperatur liegt bei 11.6 °C. Es lässt sich trotz der kurzen Beobachtungsdauer in groben Zügen daraus ableiten, dass zwischen September und Februar/März die Wasserbilanz positiv und zwischen März/April und August eher negativ ist. Für den Modellberechnungszeitraum 1993 bis 2018 wurden die benötigten Wetterdaten vor 2012 von der Wetterstation Wagna nach Grünwald (2013) abgeleitet.

Basis für die modellhafte Charakterisierung der Böden bildet die Österreichische Bodenkartierung (ÖBK; eBod, 2004) und eine Sonderkartierung Auwald (Otto 1992). Der Großteil des Untersuchungsgebietes ist aus Braunem Auboden (41%), Lockersediment-Braunerde (16%), Augley (13%) und Grauem Auboden (9%) aufgebaut. Die dominante Landnutzungsart im gesamten Modellgebiet ist Landwirtschaft, welche 62% der Fläche einnimmt. Wald – und in diesem Fall vor allem Auwald – kommt auf ca. einem Drittel der untersuchten Fläche vor. Siedlungsgebiete und vor allem Gewässer sind im Projektgebiet flächenmäßig untergeordnet.

Bewässerungsflächen, Bewässerungsbrunnen, bewässerte Kulturen und Bewässerungszeiten wurden aus wasserrechtlichen Bewilligungsbescheiden bzw. wasserrechtlichen Einreichprojekten abgeleitet. Das für die Bewässerung notwendige Wasser wird aus insgesamt 39 in der Untersuchungsregion verteilt gelegenen Grundwasserbrunnen entnommen, wobei es – aufgrund einer möglichen gegenseitigen Beeinflussung – zusätzliche Betriebsvorschriften neben der Festlegung der Bewässerungszeit zwischen 18:00 und 09:00 gibt.

Der methodische Ansatz zur Bewertung der Auswirkungen einer Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen auf das Grundwasser basiert generell auf einer sequentiellen Modellkopplung eines Modells für die ungesättigte Zone mit einem Modell für die gesättigte Zone. Dabei wird zur Simulation der Grundwasserneubildung, des Stickstoffaustrages aus der ungesättigten Zone, der Nitratkonzentration im Sickerwasser sowie des Bewässerungsbedarfs das Modell SIMWASER/STOTRASIM (Stenitzer 1988, Stenitzer & Murer 2003; Feichtinger 1998) in Kombination mit STOTRAPGEN (Klammler et al. 2012) verwendet. Darauf aufbauend wird mit FEFLOW (Diersch 2009) die Grundwasserströmung und die Nitratverteilung im Grundwasser berechnet.

Die Ausgangsbasis bildet das Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodell von Kupfersberger et al. (2019), welches in seiner flächenmäßigen Ausdehnung an das Untersuchungsgebiet angepasst wurde. Des Weiteren wurden dem Modell an den entsprechenden Standorten Entnahmebrunnen hinzugefügt, aus denen das Wasser für die

Bewässerung stammt. Die Netzgeometrie wurde an diesen Entnahmebrunnen insofern verfeinert, als der Knotenabstand zwischen Brunnen und benachbarten Modellknoten ca. 10 m beträgt.

Die bodenhydraulischen Grundlagen für die Modellierung des Bodenwasserhaushaltes wurden nach dem methodischen Ansatz von Murer (1998) abgeleitet. Für die nicht bewässerten landwirtschaftlich genutzten Flächen im Untersuchungsgebiet wurden die Leitfruchtfolgen

- Körnermais-Kürbis-Körnermais-Winterweizen-Körnermais
- Körnermais-Kürbis-Körnermais-Wintergerste-Körnermais
- Körnermais-Körnermais-Sommergetreide-Winterraps
- Körnermais-Körnermais-Sojabohne-Silomais
- Grünland

nach deren Vorkommen in der Invekos –Datenbank verrechnet und nach Ertragslage hoch 1 (BMLFUW 2017) gedüngt. Für die bewässerten Flächen wurde der Schwerpunkt auf die flächenmäßig dominanteste Kultur „Saatmais“ gelegt und in der Fruchtfolge Saatmais – Saatmais – Kürbis abgebildet und dabei das Fruchtfolgeglied Kürbis nicht bewässert. Die bewässerten Flächen wurden mit einer Stickstoffmenge von $156 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ jahreswirksam zu Saatmais und von $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ jahreswirksam zu Kürbis gedüngt.

Die Bewässerungsmenge zu Saatmais wurde entsprechend den Vorgaben in den wasserrechtlichen Einreichprojekten mit 120 mm zu maximal 4 Gaben à 30 mm pro Jahr begrenzt. Die Bewässerung wird nur durchgeführt, wenn im Simulationsmodell für das jeweilige Bodenprofil in einer Tiefe von 20 cm eine kritische Saugspannung von -300 hPa unterschritten wird. Die Definition der Brunnenentnahmen der einzelnen Brunnen für das Grundwassermodell (FEFLOW) basiert auf den Ergebnissen des Bewässerungsbedarfs aus SIMWASER/STOTRASIM, wobei auf sonstige Einschränkungen der Entnahme aufgrund der Lage der Brunnen zueinander (gegenseitige Beeinflussung) oder das Unterschreiten eines zulässigen Grundwasserstandes Rücksicht genommen wird. Ist die erforderliche Bewässerungsmenge größer als die entnehmbare Grundwassermenge, so wird in dieser Modellanwendung davon ausgegangen, dass der Bewässerungsbedarf nicht mehr durch Grundwasser, sondern durch andere Wasserquellen abgedeckt wird.

Das gesamte Modellgebiet deckt eine Fläche von ca. 2.100 ha ab, davon werden maximal ca. 400 ha bewässert. Die maximale Entnahmemenge aus den Bewässerungsbrunnen innerhalb des betrachteten Modellgebietes beläuft sich auf ca. $500.000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$.

Ergebnisse

Mit dem gekoppelten Modellkomplex wurden folgende Szenarien zur Bewässerung der Saatmaisflächen berechnet:

- V1 ohne Bewässerung
- V2a Praxisübliche Bewässerung (30 mm je Gabe)
- V2b optimierte Bewässerung (5 mm je Gabe).

Die Ergebnisse der Berechnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der durchschnittliche Bewässerungszeitraum für Saatmais unter den gegebenen Boden- und Wetterbedingungen im Untersuchungsgebiet liegt zwischen 23.5. und 17.7. Die früheste simulierte Bewässerungsgabe lag am 10.5. im Jahr 2000; die späteste simulierte Bewässerungsgabe am 5.8. im Jahr 2004.
- Unter Berücksichtigung der Einschränkung, dass die Grundwasserspiegel in den Bewässerungsbrunnen nur maximal bis zu NGW(GIS)+30cm (Niedrigste Grundwasserspiegel aus GIS Steiermark erhöht um 30 cm) abgesenkt werden dürfen, kann der für die Saatmaisfruchtfolge „Saatmais-Saatmais-Kürbis“ rechnerisch ermittelte Bedarf an Bewässerungswasser nur zu 75% aus dem Grundwasser abgedeckt werden.

- Die Grundwasserneubildung erhöht sich im gesamten Modellgebiet durch Bewässerung der Saatmaisfruchtfolge (V2a-V1) um 6%
- Die Stickstoffausträge im gesamten Modellgebiet aus der ungesättigten Zone erhöhen sich durch Bewässerung der Saatmaisfruchtfolge (V2a-V1) um 12%.
- Die Nitratkonzentrationen im Grundwasser erhöhen sich im gesamten Modellgebiet durch Bewässerung der Saatmaisfruchtfolge (V2a-V1) um 9% - von 34 auf 37 mg L⁻¹.
- Durch eine Optimierung der Bewässerungsgaben zu Saatmais (regelmäßigere Bewässerung mit geringeren Teilmengen V2b – V2a) würde sich ein Einsparungspotential der Bewässerungsmenge von 31 % ergeben – es müsste um nahezu 1/3 weniger Grundwasser gefördert werden. Der Stickstoffaustrag aus der ungesättigten Zone – ein Verlust für die Landwirtschaft - würde sich für die Bewässerungsflächen um 12 % reduzieren. Dieser Stickstoffanteil würde den Pflanzen bei optimierter, anstelle von der derzeit praktizierten Bewässerung, mehr zur Verfügung stehen.
- Die Auswirkungen einer optimierten Bewässerung (V2b – V2a) - ausgewertet über alle Landnutzungsarten - auf die Grundwasserneubildung (-3%) und auf den Stickstoffaustrag (5%) ist sehr gering. Auf das Grundwasser (sowohl Grundwasserspiegel, als auch Nitratkonzentration im Grundwasser) hat eine solche Optimierung der Bewässerungsgaben keinen signifikanten Einfluss (Verringerung der Nitratkonzentration um ca. 2 mg L⁻¹).

Literatur

BMLFUW (2017) Richtlinien für die Sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland-Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft. 7. Auflage, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 115 S.

Diersch H.J.G. (2009) FEFLOW Reference Manual, DHI-WASY GmbH, Berlin.

eBod (2004) Österreichische Bodenkartierung. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien.

Feichtinger F. (1998) STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, 7, 14-41.

Grünwald C. (2013) Die Bedeutung von detailliert bekannten Wetterdaten für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts und des Stickstoffaustrags auf der regionalen Skala. Masterarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, 93 S.

Klammler G., Rock G., Fank J., Kupfersberger H. (2012) Generating land use information to derive diffuse water and nitrate transfer as input for groundwater modelling at the aquifer scale. In: Oswald SE, Kolditz O, Attinger S (eds) Models - repositories of knowledge, ModelCARE2011, Leipzig/Germany, IAHS Publ 355, 237-242.

Kupfersberger H., Mach J., Rock G., Draxler J., Klammler G., Fank J. (2019) Gekoppelte Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodelle in den Grundwasserkörpern Leibnitzer Feld und Unteres Murtal. Unveröffentlichter Bericht der JR-AquaConSol im Auftrag der Abteilung 14 – Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 166 S.

Murer E. (1998) Die Ableitung der Parameter eines Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodelles aus den Ergebnissen der Bodenkartierung. Modelle für die gesättigte und ungesättigte Bodenzone. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Band 7, 89-103.

Otto B. (1992) Bodenkartierung im Aubereich der Mur zwischen Spielfeld und Radkersburg. – Unveröff. Kartierungsunterlagen, Graz.

Stenitzer E. (1988) SIMWASER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitteilung Nr. 31, Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, 3252 Petzenkirchen, 203 S.

Stenitzer E., Murer E. (2003) Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by the SIMWASER model. Soil Till. Res. 73. 43-56.

Identification of mechanisms controlling nitrogen export from agricultural lysimeters

Stefan Werisch^{1*} and Diana Burghardt²

Zusammenfassung

In der Lysimeterstation Brandis werden seit 1981 Wasser- und Stoffflüsse unter repräsentativer landwirtschaftlicher Nutzung beobachtet. Trotz substantieller Anstrengungen in der Regulierung von Stickstoffüberschüssen in Richtung bedarfsorientierter Düngung zeigen die Sickerwasseranalysen ansteigende oder stagnierende Nitratkonzentrationen in der Grundwasserneubildung auf einer ganzen Bandbreite von Böden. Dieses Paradox wurde mit state-of-the-art Methoden untersucht um herauszufinden aus welcher Quelle das Nitrat im Sickerwasser hauptsächlich stammt. Analysen von Boden- und Sickerwasserproben, in Kombination mit historischen Tracerexperimenten, zeigen deutlich den dominierenden Einfluss der bodenorganischen Substanz auf den Stickstoffhaushalt, dessen Dynamiken und die Nitratkonzentrationen des Sickerwassers. Die Ergebnisse können somit erklären warum die Regulierungsbemühungen bisher nicht zu den gewünschten Reduktionen in den Nitratkonzentrationen der Sickerwasserflüsse geführt haben.

Schlagwörter: Stabilisotope, ¹⁵N, ¹⁸O, Nitrat, Sickerwasser

Summary

The lysimeter station Brandis provides observations of water and solute fluxes under representative agricultural landuse since 1981. Despite substantial efforts and success in regulation and assessment of fertilizer needs and the reduction of fertilization excess, the seepage water analysis reveals increasing or stagnating levels of nitrate concentration in groundwater recharge in a broad range of soil types. We investigated this paradox with current state-of-the-art methods to identify the relevant nitrogen sources of the seepage water. Analysis of current soil and seepage water samples, in combination with historic tracer experiments, highlight the substantial role of the soil organic nitrogen pool on nitrogen dynamics and recharge concentrations in all relevant soils. Thus, the results hold an explanation why the current regulation efforts have not yet led to the desired reductions in nitrogen loadings of seepage water fluxes.

Keywords: Stabilisotope, ¹⁵N, ¹⁸O, Nitrat, Sickerwasser

Introduction

The lysimeter station Brandis provides observations of water and solute fluxes under representative agricultural landuse since November 1980. Since the beginning of the lysimeter studies seepage water analyses showed high levels of nitrate concentration in groundwater recharge in a broad range of the investigated soil types. Despite substantial efforts in regulation of fertilizer applications since the 90s and some success in the reduction of fertilization excess, no significant change in seepage water nitrate concentrations is observed yet. Furthermore, the long-term N-balances show that only a fraction of the fertilizer excess nitrogen is exported with the seepage water. To gain

¹ Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft - FB31 Lysimeterstation Brandis, Lysimeterweg 1-3, D-04821 Brandis, ² Technische Universität Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft, Bergstraße 66, D-01069 Dresden

* Ansprechpartner: Dipl. Hydrol. Stefan Werisch, email: stefan.werisch@smul.sachsen.de

a better understanding of the reasons for these observations the following questions are important:

- Does excess fertilizer leach through the root zone after the vegetation period and is exported with the seepage water?
- Which part of the soil N-cycle contributes to the seepage water nitrate export?
- Can residence times of mineral fertilizers be estimated?
- Which processes control the nitrogen export in agricultural soils?

Three potential sources for nitrate in seepage water are relevant in agricultural systems: (1) nitrogen from atmospheric deposition, (2) nitrogen from fertilization and (3) nitrogen from soil-microbial processes such as nitrification of soil organic matter. Nitrate consists of two elements, nitrogen (N) and oxygen (O), which both have stable isotopes. Nitrogen is mostly ^{14}N (~99.6%), nitrogen containing an additional neutron is referred to as ^{15}N (0.3%). Similar ratios are observed for the very common oxygen isotope ^{16}O (99.7%) and the heavier ^{18}O (0.2%). Isotope ratios for oxygen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) and nitrogen ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) are usually reported as δ -values (‰), which is the isotope ratio of the analyzed substance relative to a standard of known composition (Kendall & Caldwell 1998). The common reference for nitrogen is air and the reference for oxygen is Vienna mean standard ocean water (VSMOW).

Fortunately, the three main sources for nitrate differ significantly in terms of their isotope ratios, in the following referred to as $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ (delta-Notation). The differences between the potential nitrogen sources are shown for both isotope ratios in *Figure 1*. While all three sources overlap significantly in their $\delta^{15}\text{N}$ -values, they can clearly be discriminated by their $\delta^{18}\text{O}$ -values. Consequently, assessing the isotope ratios of nitrate contained in the seepage water is a powerful tool to identify its sources and shed some light on the controlling processes (Clark & Fritz 1997, Xue et al. 2009).

Aim of this study is to analyze the isotope signatures of the various potential sources of the seepage water nitrate in selected lysimeters in Brandis in order to shed some light on the potential origin of the seepage water nitrate and gain a better understanding of the underlying mechanisms controlling the nitrogen storage and nitrate export from those soils. Furthermore, we want to assess if and in which way the seepage-water nitrate in lysimeter is related to agricultural management practices and fertilization strategies.

Material and Methods

Soil

The following analysis will focus on a single lysimeter, although the analysis have been performed on eight lysimeters from eight different soil types. A short description and

Figure 1: Ranges of typical nitrate sources in agricultural systems. Modified from Kendall (1998), with data from Xue et al. (2009). The lower three boxes further differentiate the basic substrate from which the nitrogen is produced by soil microbial processes, such as nitrification.

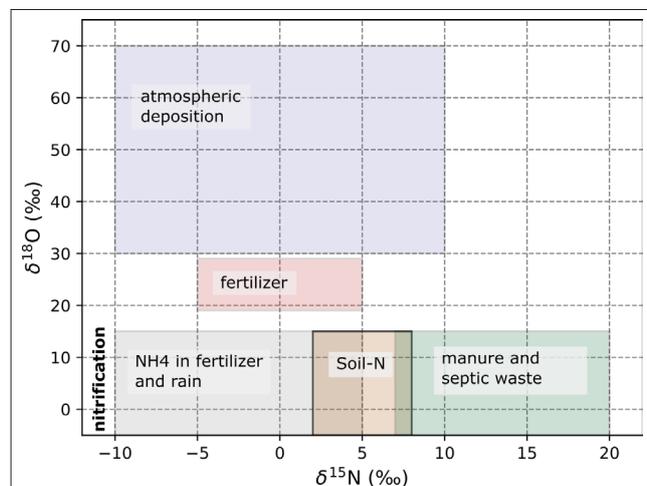


Table 1. Soil description of the investigated lysimeters along with observed values for the field capacity (FC), the maximum field capacity (FC_{max}), the average annual seepage water amount (SW_{RP}) in the reference period 1981 – 2010 and in the last Decade (SW_{LD}). Also the displacement risk (DR) and the average nitrogen concentration $C_{LD}(NO_3)$ in the last decade as well as the average nitrogen excess (NE_{LD}) are given, the latter includes the atmospheric deposition.

Lysimeter	Soil description	FC (FC_{max}) (mm/a)	SW_{RP} (mm/a)	SW_{LD} (mm/a)	DR (-)	$C_{LD}(NO_3)$ (mg/l)	NE_{LD}^* (kg/ha)
1/7	Lessivated stagnic Cambisol	114 (180)	96	134,4	low	126	38

* includes measured atmospheric BULK-deposition

some of the most important hydrological properties as well as some information for nitrogen export are given in Table 1. Lysimeter 1/7 contains a soil with an average effective field capacity of 114mm, with observed maxima around 180mm for crops with deep root systems. Within the last decade, the average annual seepage water volume was 134 mm and the average nitrate concentration was 126mg/l. The average annual nitrogen excess, the difference between input at the surface and nitrogen withdrawn with the harvest, was 38kg/ha.

Long-term Management

A brief overview about the long-term nitrogen balance with its components is given in Table 2. Three distinct changes occurred in the agricultural management in the past 40 years. In the first period from 1980 to 1992, nitrogen supply was based on a mixture of mineral and organic fertilizers. From 1993 to 1998 a period of ecological farming followed, fertilization was based on legumes and a single application of organic fertilizer and the overall nitrogen balance was negative. Intensive agricultural management was reestablished in 1999, the fertilization was mainly based on mineral fertilizers and fertilization was conducted according to the respective guidelines and regulations. The decadal nitrogen excess (N_E) in Table 2 clearly shows, that increasing regulation efforts led to a reduction of the fertilization excess on this lysimeter, unfortunately this is not the case for all lysimeters. However, the table also shows that the nitrogen export with the seepage water (N_{SW}) over this long period is only a fraction of the nitrogen excess. In the past 40 years, only 45% of the nitrogen fertilization excess was lost with the seepage water. The nitrogen balance, which is the difference of N_E and N_{SW} indicates an accumulation of 1.4 t-N/ha in the soil over the past 40 years.

Sampling scheme

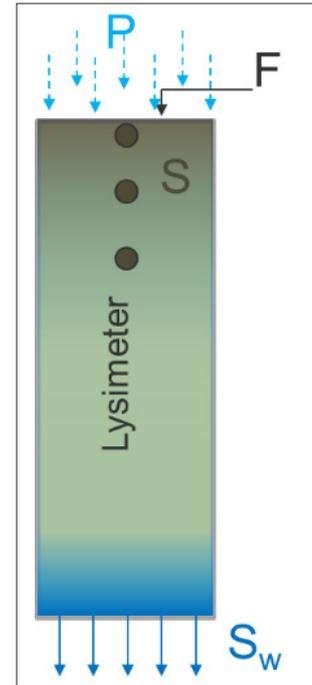
As noted earlier, detailed knowledge about the isotope ratios of the potential nitrogen sources is necessary to be able to relate the nitrate in the seepage water to one, or a mixture of these sources. To verify the literature sources for the atmospheric deposition and the fertilizers on one hand and to gain a more detailed insight on the ^{15}N

	N_{Fer} (kg/ha)	N_E^* (kg/ha)	N_{SW} (kg/ha)	N_{SW}/N_E (%)	$N_B = N_E - N_{SW}$ (kg/ha)
1980 - 1989	2377	1627	279	17	1384
1990 – 1999 ^A	670	151	113	75	38
2000 – 2009	1391	501	395	79	106
2010 – 2019	1493	381	429	112	-48
1980 – 2019	5931	2660	1216	46	1444

^A decade contains a period of ecological farming from 1993 – 1998; * includes measured atmospheric deposition

Table 2. Overview about the N-fertilization (N_{Fer}), the nitrogen excess (N_E^*), the nitrogen exported with the seepage water (N_{SW}), the ratio of the excess and the seepage water loss and the nitrogen balance (N_B) for the past 4 decades.

Figure 2. Sampling scheme for the isotope analyses, consisting of precipitation samples (P), samples of the fertilizer (F), and 4 different seepage water samples (S_w) per year. To gain a better insight about the ^{15}N background in the soil organic and potential depth profiles, three soil probes (S) were taken per lysimeter for analysis.



distribution within the soils on the other hand the sampling scheme given in *Figure 2* was applied. Precipitation samples were collected with BULK collectors and combined to monthly samples. Fertilizers applied in 2019 and 2020 were analyzed as well as soil samples from the upper three soil horizons, taken in autumn of 2019. Most importantly, four monthly seepage water samples for each seepage water period in 2019 and 2020 were analyzed for the isotope ratios of the contained nitrate. Seepage water samples were selected to include: (1) the beginning of the seepage water period, (2) two months with the highest seepage water amounts and (3) a sample in the recession of the seepage water occurrence.

Isotope analysis

All water samples were filtered by a $0,2\mu\text{m}$ screen before filling in 50ml polyethylene containers and stored frozen until analysis. A modified denitrifier method developed by Stock et al. (2020) was applied for sample preparation (transformation of d^{18}O and ^{15}N from NO_3 to gaseous N_2O) before the isotope analysis of the samples. The simultaneous analysis of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ was conducted by a stable isotope mass spectrometer MAT253 with Gas-bench II and a denitrification kit (all Thermo-Fisher Scientific). The solid samples (soils and fertilizer), were grinded after freeze-drying and burned to N_2 in an elemental analyzer (EA 3000, Eurovector). The resulting gas was analyzed in the MAT253 stable isotope mass spectrometer. Calibration was achieved with the IAEA isotope standard NO_3 (+4.7‰ d^{15}N , +25.6‰ d^{18}O), USGS34 (-1.8‰ d^{15}N , -27.9‰ d^{18}O) und USGS32 (+180‰ d^{15}N , +25.7‰ d^{18}O).

Results

Atmospheric Deposition

The nitrate contained in five selected bulk precipitation samples collected between 2019 and 2020 have been analyzed and showed expected variations in $\delta^{15}\text{N}$ -values between -3.3‰ and 15‰. Contrastingly, measured $\delta^{18}\text{O}$ -values showed a larger variation between 57.7‰ and 83.1

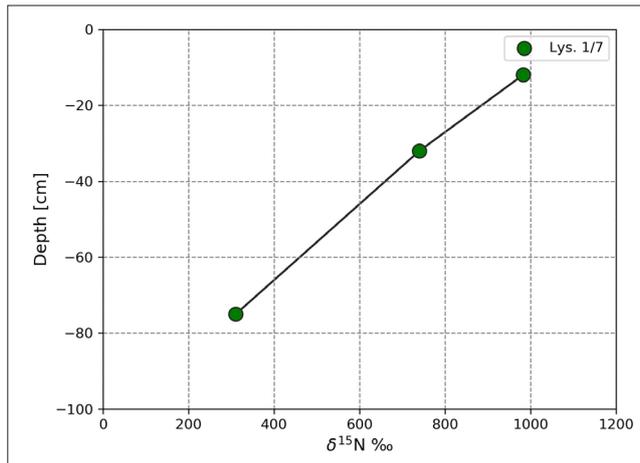


Figure 3. Depth profiles of the $\delta^{15}\text{N}$ values for lysimeter 1/7. Note that the high $\delta^{15}\text{N}$ values for lysimeter 1/7 are due to the application of artificially ^{15}N enriched fertilizers in the past.

Fertilizer

Lysimeter 1/7 received a classical sulfur enriched mineral nitrogen fertilizer (InnoFert Star). The fertilizer has a $\delta^{15}\text{N}$ ratio close to zero, which is expected as air is used as nitrogen source during production. The $\delta^{18}\text{O}$ -value of 25.4‰ also fits into the expected range for mineral fertilizers.

Soil Profile

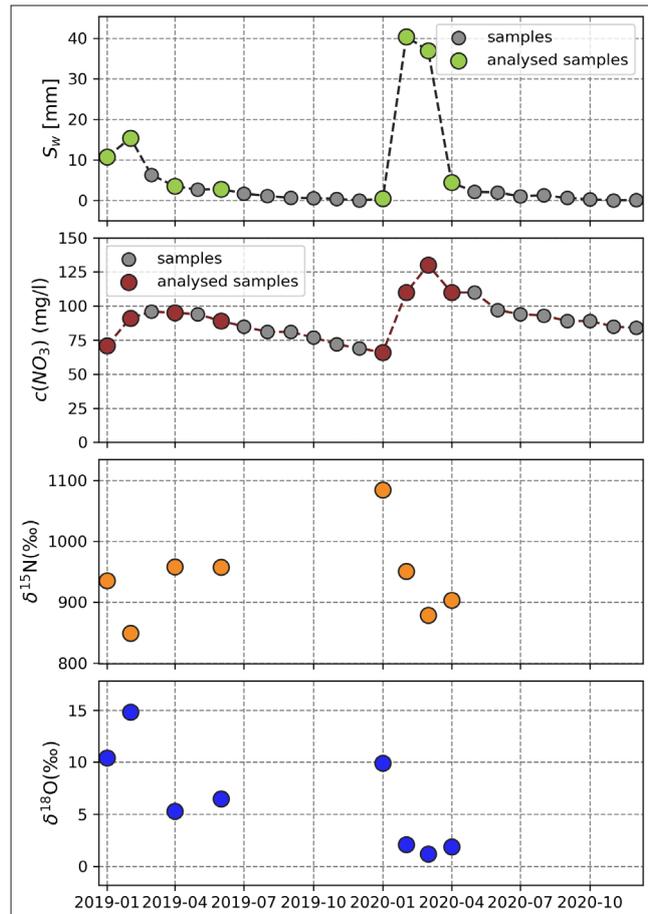
The nitrogen contained in the soil of lysimeter 1/7 has unusually high $\delta^{15}\text{N}$ values in all three depths, as is shown in *Figure 3*. This profile is explained by the application of artificially enriched ^{15}N fertilizer as tracer in the 1970s and 1980s. Although the documentation of these experiments is incomplete, it is known that lysimeter 1/7 was fertilized at least 8 times with ^{15}N enriched fertilizer. The experiments were initiated to estimate the N-use efficiency of different crops. However, significant parts of the fertilizer were incorporated into the soil organic N-pool (Russow et al. 1996) and caused substantial enrichments. Although only a fraction of the historic enrichment is still measurable, it causes a clearly labeled soil organic N-pool. Lysimeter 1/7 exhibits the highest $\delta^{15}\text{N}$ values ($\delta^{15}\text{N} \sim 970\text{‰}$) close to the surface in the soil layer with the highest N-content. The $\delta^{15}\text{N}$ -values decrease with increasing soil depth and decreasing total N-content of the soil. Absolute values for $\delta^{15}\text{N}$ in the second and third soil layer are 740‰ and 310‰, respectively.

Seepage water nitrate

Monthly seepage water volumes observed for both years on lysimeter 1/7 are shown in *Figure 4*. The seepage water period 2019 was rather short and driven by the heavy drought of 2018 resulting in seepage water volumes well below average. The following vegetation period of 2019 can also be characterized as dry with low precipitation volumes and high evapotranspiration demand. Average precipitation amounts in autumn of 2019 caused a slow refill of the soil water deficit, but the first seepage water was observed in January 2020. A very wet February caused above average seepage water flows, which were able to compensate the late beginning (compared to the average of 1981-2010) of the seepage water period.

Nitrate concentrations in the seepage water of lysimeter 1/7 exceed the drinking water threshold in all months during the isotope measurement campaign. Concentrations increase with the beginning, and tend to decrease with the recession of the seepage water period and varied between 66mg/l and 130mg/l. Eight monthly seepage water samples have been selected for the isotope analysis. The resulting $\delta^{15}\text{N}$ -values varied between 849‰ and 1085‰, which shows that the seepage water nitrate is heavily enriched in ^{15}N in all samples. The observed $\delta^{18}\text{O}$ -values lie between 1.2‰ and 14.8‰.

Figure 4: Time series of the monthly seepage water volumes (top), nitrate concentration (middle-top) the $\delta^{15}\text{N}$ -values of the seepage water nitrate (middle-bottom) and its $\delta^{18}\text{O}$ -values (bottom) of Lysimeter 1/7.



To allow an easier source attribution of the nitrate transported in the seepage water, the data is shown in a dual isotope plot (after Kendall 1998) in Figure 5. According to the very high $\delta^{15}\text{N}$ -values in all seepage water samples, nitrification from soil organic matter seems to be the major nitrate source. This hypothesis is further supported by the $\delta^{18}\text{O}$ -values, which are also in the typical range for nitrate from soil organic-N (Kendall, 1998). It should also be noted, that no simple relationship between $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ -values and nitrate concentration is observed. Having the advantage of a soil organic nitrogen pool heavily enriched in ^{15}N with a distinct $\delta^{15}\text{N}$ -profile, the $\delta^{15}\text{N}$ -values might give an indication of the soil depth in which the nitrate was derived by nitrification. Following this hypothesis, the nitrate in most of the samples was derived within the first 30cm of the soil. Following the common assumption that nitrate produced by nitrification contains two oxygen atoms from soil water and one from soil O_2 (Hollocher 1984), variations in $\delta^{18}\text{O}$ values of the sample would then mainly depend on moisture state and if evaporation or transpiration dominated the soil water reduction process (Hsieh et al. 1998). Water reduction by transpiration causes an enrichment of $\delta^{18}\text{O}$ in the remaining soil water, thus it could further be speculated that some samples contain nitrate from nitrification in the upper soil horizons under rather dry conditions. Especially the samples from 01/2019, 02/2019 and 01/2020 show high $\delta^{18}\text{O}$ -values ($\delta^{18}\text{O} > 10\text{‰}$) and the massively enriched $\delta^{15}\text{N}$ -values of the soil organic matter pool.

Summary and Discussion

Isotope analysis of the nitrate contained in the seepage water of lysimeters under agricultural land use were initiated to gain a better understanding of the nitrogen dynamics and identify the relevant nitrogen sources. This contribution presented detailed

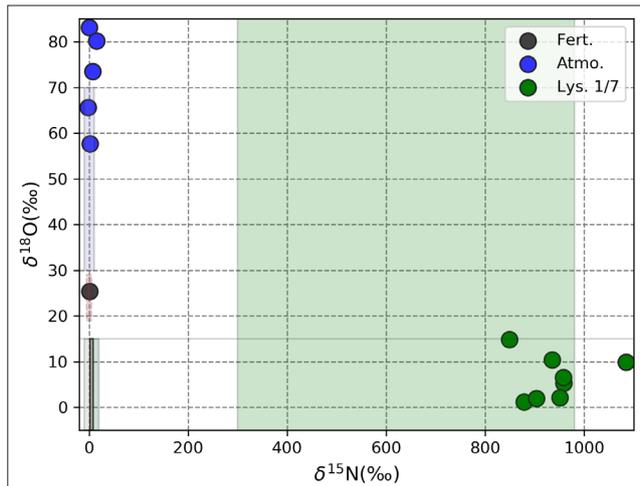


Figure 5. Dual isotope ratio plot for the monthly seepage water nitrate samples of lysimeter 1/7, the fertilizer sample and the nitrate in the atmospheric deposition. Boxes on the left show the most likely ranges of nitrate from different sources (deposition, fertilizer, soil), the green box covering the range $310‰ < \delta^{15}\text{N} < 970‰$ is the range of values observed in the soil profile.

information on the results of these analyses for one specific lysimeter. The results clearly show, that the nitrate contained in the seepage water of the last two years, originates with very high probability from the soil organic N-pool. No indications for a direct percolation of fertilizer nitrogen are found in the data. The soil profile analysis revealed a highly in ^{15}N enriched soil nitrogen pool, which was caused by applications of artificially enriched fertilizers as tracers in the 1970s and 1980s. The results further indicate that not only the source can be identified, but potentially also space and time of the nitrification process. If this holds to be true must be examined with more detailed analyses and ongoing measurement campaigns.

The findings from the long-term observations of the nitrogen balances and the isotope analyses lead to some important conclusions, which need to be considered when utilizing lysimeters for investigations in nitrogen dynamics in agricultural settings:

- The soil organic N-pool is an important buffer and driver of the nitrogen dynamics and distribution in soils.
- The nitrogen export by seepage water nitrate might not directly depend on the agricultural nitrogen balance, but rather on the conditions for nitrification after harvest.
- Nitrogen residence times in the lysimeters might be longer than water residence times.

Based on the results, we strongly recommend considering isotope analyses as a valuable tool for lysimeter-based investigations into nitrogen dynamics. They can reveal the relationship between agricultural management and nitrate based nitrogen loss with the seepage water, which appears in our case to be more complex than a simple displacement of fertilizer excess.

Literature

Clark I., Fritz P. (1997) Chapter 6: Groundwater Quality, in: Environmental Isotopes in Hydrogeology, CRC Press LLC.

Deutsch B., Liskow I., Kahle P., Voss M. (2005) Variations in the $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of nitrate in drainage water of two fertilized fields in Mecklenburg-Vorpommern (Germany), Aquatic Science, 67, 156-165.

Hollocher T.C. (1984) Source of the oxygen atoms of nitrate in the oxidation of nitrite by *Nitrobacter agilis* and evidence against a P-O-N anhydride mechanism in oxidative phosphorylation. Arch. Biochem. Biophys., 233, 721-727.

- Hsieh J.C.C., Chadwick O.A., Kelly E.F., Savin S.M. (1998) Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying Evaporation and Transpiration, *Geoderma* (82), 269 - 293.
- Kendall C. (1998) Tracing Nitrogen Sources and Cycling in Catchments, in: Kendall, C. and McDonnell, JJ (eds): *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Elsevier, Amsterdam, 519-576.
- Kendall C., Caldwell E.A. (1998) Fundamentals of Isotope Geochemistry, in: Kendall, C. and McDonnell, JJ (eds): *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Elsevier, Amsterdam, 51-86.
- Mongelli G., Paternoster M., Sinisi R. (2013) Assessing nitrate in a volcanic aquifer using a dual isotope approach, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* (10), 1149-1156, doi: 10.1007/S13762-012-0169-9.
- Russow R., Segschneider H.-J., Förstel H. (1996) Vergleich der Wasser- und Anionenbewegung in agrarisch genutzten Sandlöss- und Löss-Schwarzerde-Böden an Hand von Multitracer-Untersuchungen, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 40(6), 453-472.
- Stock P., Roder S., Burghardt D. (2020) Further optimization of the denitrifier method for rapid ^{15}N and ^{18}O analysis of nitrate in natural water samples, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 35:e8931 <https://doi.org/10.1002/rcm.8931>.
- Xue D., Botte J., De Baets B., Accoe F., Nestler A., Taylor P., Van Cleemput O., Berglund M., Boeckx P. (2009) Present limitation and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface and groundwater, *Water Research*, 43, 1159–1170.

Die Wirkungen von Austrocknung und Wiederbefeuchtung auf die Stickstoffauswaschung

Holger Rupp^{1*} und Ralph Meißner¹

Zusammenfassung

Infolge des globalen Klimawandels treten auch in Deutschland vermehrt Starkregenereignisse und Trockenperioden mit Folgewirkungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Böden auf. Die Effekte des Klimawandels wurden anhand von 20 nicht wägbaren manuell befüllten Lysimetern der UFZ-Lysimeteranlage Falkenberg, die seit 1991 integriert bzw. ökologisch bewirtschaftet werden, untersucht. Basierend auf einem 29-jährigen Datensatz (Niederschlag, Evaporation und Sickerwassermenge und -qualität) wurden die Lysimeterjahre 1995/96 und 2018/19 als extrem trocken identifiziert. Unter den klimatischen Bedingungen in Nordostdeutschland kam die Sickerwasserbildung in Trockenjahren zum Erliegen. Die erneute Abflussbildung war mit außerordentlich hohen Nitratkonzentrationen verbunden, die die geltenden Trinkwassergrenzwerte um ein Vielfaches überstiegen, woraus ein erhebliches Risiko für die Grundwasserqualität resultieren kann.

Schlagwörter: Klimawandel, Lysimeter, Trockenjahre, klimatische Wasserbilanz, Nitrat

Summary

As a result of global climate change, heavy rainfall events and dry periods are increasingly occurring in Germany, with consequences for the water and solute balance of soils to be expected. The effects of climate change were investigated using 20 non-weighable manually filled lysimeters of the UFZ lysimeter facility Falkenberg, which have been managed since 1991 according to the principles of integrated and organic farming. Based on a 29-year dataset (precipitation, evaporation, leachate, nitrate concentrations), the lysimeter years 1995/96 and 2018/19 were identified as extremely dry years. Under the climatic conditions in northeastern Germany, seepage fluxes came to a standstill in these dry years. The reoccurrence of seepage was associated with exceptionally high nitrate concentrations, which exceeded the current drinking water limits by many times, which may result in a significant risk to groundwater quality.

Keywords: climate change, lysimeter, dry years, climatic water balance, nitrate

Einleitung

Die Auswirkungen des globalen Klimawandels wurden in der jüngsten Vergangenheit immer deutlicher. So führte der beobachtete Anstieg der Niederschlagsvariabilität nach Schwinning et al. (2005) zu einer Zunahme der Häufigkeit von extremen Niederschlags- und Dürreereignissen. Auch Deutschland gehört zu den Ländern, die in jüngster Vergangenheit stark von extremen Witterungsereignissen betroffen waren. In den Jahren 2002 und 2013 verursachten ergiebige Niederschlagsereignisse im Einzugsgebiet der Elbe erheblich Hochwasserschäden. Die Jahre 2003, 2018 und 2019 waren dagegen

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Department Bodensystemforschung, Dorfstraße 55, D-39615 Altmärkische Wische

* Ansprechpartner: Dr. Holger Rupp, email: holger.rupp@ufz.de

von außerordentlich hohen Temperaturen und Niederschlagsarmut geprägt. Wie bereits vom IPCC (2013) prognostiziert, führte eine erhöhte Verdunstung in Kombination mit geringeren Sommerniederschlägen zu niedrigeren Grundwasserspiegeln. Nach Porporato et al. (2004) und Senevirante et al. (2012) beeinflussen extreme Witterungsereignisse den Bodenwasserhaushalt und die sickerwassergebundenen Stoffflüsse im Boden. Detaillierte Kenntnisse des Wasser- und Stoffhaushalts von Böden unter sich ändernden klimatischen Bedingungen werden nach Rippel (2002) als Entscheidungsgrundlage für zentrale Fragen einer möglichst nachhaltigen Landbewirtschaftung dringend benötigt. Die Quantifizierung der zu erwartenden Effekte des globalen Klimawandels auf den Bodenwasser- und Stoffhaushalt ist daher für die Beurteilung der Resilienz landwirtschaftlich genutzter Böden gegenüber extremen Witterungsereignissen von besonderer Bedeutung.

Wasser- und Stoffflüsse in Böden können mit Hilfe von Lysimetern bei definierten Randbedingungen untersucht werden (Gee et al. 2009 und Meissner et al. 2010). Für Untersuchungen zu den von klimatischen Veränderungen verursachten Effekten werden möglichst langjährige Messreihen bei vergleichbaren Randbedingungen benötigt. Die Lysimeteranlage des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ in Falkenberg (Nordostdeutschland) bietet hierfür günstige Voraussetzungen, da dort seit 1991 Versuchsvarianten geprüft werden, die sowohl konventionell nach den Prinzipien des integrierten Landbaus als auch ökologisch bewirtschaftet werden.

Eine 30-jährige Reihe von Daten der UFZ-Lysimeteranlage Falkenberg wurde ausgewertet, um (i) Versuchsjahre mit extrem trockener Witterung (Trockenjahre) zu identifizieren, (ii) den Einfluss von extremer Austrocknung auf die Abflussbildung zu charakterisieren und (iii) um die damit im Zusammenhang stehenden Effekte auf die gemessenen Stickstoff(N)-Konzentrationen im Sickerwasser und deren Gefährdungspotenziale bezüglich der Gewässerqualität aufzuzeigen.

Material und Methoden

Die UFZ- Lysimeterstation wurde 1981 in Falkenberg (52.85920 N; 11.81230 O) errichtet. Folgende Klimaparameter wurden vom Deutschen Wetterdienst für diesen Standort der Grundlage der Zeitreihe 1981 - 2010 bestimmt. Die langjährige mittlere Lufttemperatur und der langjährige mittlere Jahresniederschlag betragen 9,2 °C bzw. 562 mm.

Für den Standort Falkenberg liegen für den gesamten Untersuchungszeitraum Messwerte des Niederschlags auf Erdbodenniveau vor (Standardniederschlagsmesser). Darüber hinaus wird vor Ort in den Monaten April bis Oktober die Evaporation mit Hilfe eines Standardverdunstungskessels (Durchmesser 1,95 m, Wassertiefe 0,55 cm) gemessen. Zur Errechnung von Jahreswerten der Evaporation wurde ein pauschalisierter Zuschlag von 61 mm für die Evaporation in den Monaten ohne direkte Messung (November, Dezember, Januar, Februar und März) berücksichtigt (DWD, 2015).

Die in Falkenberg verwendeten Lysimeter haben eine quadratische Oberfläche (1 m²) und eine Gesamttiefe von 1,25 m. Alle Gefäße sind nicht wägbare und wurden mit einer 25 cm mächtigen Filterschicht (Sand über Kies über Schotter) versehen. In der tiefsten Filterschicht (Schotter) wurde zur Sickerwassersammlung ein Drainagerohr verlegt, das mit dem Lysimeterkeller verbunden ist. Detaillierte Informationen zum Aufbau der Lysimeter sind Meissner et al. (2010) und Bednorz et al. (2016) zu entnehmen.

Die Lysimetergefäße wurden 1981 manuell mit gestörtem Bodenmaterial gefüllt, das zuvor am Gewinnungsstandort in zwei Schichten getrennt nach Oberboden (0–30 cm) und Unterboden (31–100 cm) von einem landwirtschaftlichen Schlag bei Bretsch (52.84291 N; 11.63165 O) entnommen wurde. Der Boden wurde anschließend zur Lysimeterstation Falkenberg transportiert und dort lagenweise bei manueller Verdichtung wieder eingebaut. Wesentliche bodenphysikalische und bodenchemische Kennwerte des Lysimeterbodens sind *Tabelle 1* zu entnehmen.

Bodentextur Schicht	Sandiger Lehm (SL)	
	Oberboden	Unterboden
Sand (%)	73,6	75,2
Schluff (%)	14,3	17,4
Ton (%)	12,1	7,4
ζd (g cm ⁻³)	1,48	1,84
KS (cm d ⁻¹)	21	43
pH _{KCl} ²⁾	4,8	5,6
TOC (%)	1,13	0,17

Tabelle 1: Wesentliche bodenphysikalische-chemische Kennwerte der Lysimeterböden.

Landbewirtschaftung	Versuchsdesign	Lysimeter Anzahl	Bodenart	Fruchtfolge	Mineralische N-Düngung (kg ha ⁻¹)	Organische N-Düngung (kg ha ⁻¹)
Ackernutzung Landbau (ÖB)	Ökologischer	10	LS	W. Weizen & Zwfr.	0	80 ¹⁾
				Erbsen & Zwfr.	0	-
				W. Weizen & Zwfr.	0	80 ¹⁾
				Hafer & Untersaat	0	-
				Kleegrass	0	-
				Kartoffeln	0	300 ²⁾
				Ackernutzung Landbau (IL)	Integrierter	10
Kartoffeln	120	300 ²⁾				
W. Gerste & Zwfr.	145	-				
Mais	180	-				
Zuckerrüben	120	250 ²⁾				

Tabelle 2: Versuchsvarianten und Bewirtschaftung der Lysimeter (W. - Winter).

¹⁾ 2 x Jauche 40 kg N ha⁻¹, ²⁾ Stalldung in dt/ha

Im Jahr 1991 wurden auf den Lysimetern jeweils eine konventionell nach den Prinzipien des integrierten Landbaus (IL) gemanagte Versuchsvariante und eine weitere ökologisch bewirtschaftete Variante (ÖB) etabliert (Tabelle 2).

Die anfallende Sickerwassermenge wurde monatlich durch Wägung der Sickerwasserauffangbehälter bestimmt. Das Sickerwasser wurde monatlich aliquot beprobt und anschließend im Labor der Lysimeterstation Falkenberg analysiert.

Die Nährstoffe Nitrit, Nitrat (NO₃-N) und Ammonium (NH₄-N) wurden nach deutschen Industriestandards (DIN 38405-38406) unter Verwendung photometrischer Techniken (Libra S11, Biochrom, Holliston, USA) analysiert.

Anhand der Sickerwasseranalysen und der gemessenen Sickerwassermengen wurden gewichtete Mittelwerte der N-Konzentrationen errechnet. Die weitere Interpretation erfolgte auf dieser Grundlage.

Box-Whisker-Plots wurden mit dem Softwarepaket OrginPro berechnet. Anhand der vorliegenden Datenreihen von Niederschlag, Evaporation und der daraus resultierenden klimatischen Wasserbilanz (kWB) wurden Ausreißer (Versuchsjahre, die entscheidend vom Trend der Datenreihe abweichen) identifiziert. Versuchsjahre wurden dementsprechend als extrem trocken angesehen, wenn die kWB den Interquartilbereich (IQR) unterschritt.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 1 gibt die in den Jahren 1991 bis 2020 für den Standort Falkenberg berechnete kWB wider. Die Berechnung der kWB stellt neben anderen Indizes nach Döring et al. (2011) ein geeignetes Verfahren zur Quantifizierung von Jahren mit extremer Trockenheit dar. Die Lysimeterjahre 1993/94, 2007/08 und 2017/18 waren bei Jahresniederschlägen von 927,3 mm, 993,6 mm und 753,3 mm durch einen deutlichen Bilanzüberschuss gekennzeichnet. Dagegen wies die kWB in 18 von 29 betrachteten Lysimeterjahren ein Defizit auf. Im Box-Plot der kWB wurden die Versuchsjahre 1995/96 und 2018/19 als Trockenjahre identifiziert, da bei ihnen die kWB den Wert von -250,7 mm (1 IQR) unterschritt (Abbildung 2).

In den Trockenjahren 1995/96 und 2018/19 kam die Abflussbildung in den Lysimetern der Bewirtschaftungsvarianten IL und ÖB trotz der zur Ertrags- bzw. Bestandssicherung verabreichten Zusatzwasserversorgung (1995/96: IL 123 mm und ÖB 45mm; 2018/19: IL 75 mm und ÖB 87 mm) weitgehend zum Erliegen (Abbildung 3). Auch im Folgejahr 1996/97 trat kaum eine Abflussbildung auf, da die kWB ein Defizit aufwies, das durch die Niederschläge (und durch die Zusatzwassergaben) nicht ausgeglichen werden konnte.

Infolge der eingetretenen Austrocknung des Bodenprofils und des Fehlens von freiem Bodenwasser fanden in den Trockenjahren keine sickerwassergebundenen Stofftransportprozesse statt. Es ist daher davon auszugehen, dass vorhandene Nährstoffüberhänge infolge der Bewirtschaftungsmaßnahmen zunächst im Bodenspeicher verblieben und erst nach einsetzender Wiederbefeuchtung mobilisiert werden konnten. Aus eigenen Untersuchungen mit konservativen Tracern (Cl, Br, ¹⁵N oder Deuterium), ergibt sich bei einer mittleren jährlichen Sickerwasserbildung von 100 mm eine Verlagerungstiefe von ca. 50 cm (Aust et al. 2009). Eine Nähr- oder Schadstofffront benötigt damit ca. 2 Jahre für das Durchfließen des Lysimeterbodens mit 1 m Mächtigkeit (bei Piston-Flow). Zahlreiche Autoren weisen auf die große Bedeutung präferenziellen Fließprozessen für den raschen Stofftransport in den Böden hin (Zhang et al. 2016). Daher waren anhand der Nährstoffkonzentrationen des Sickerwassers messbare Folgewirkungen einer Nährstoffakkumulation im Bodenprofil des Lysimeters infolge einer Austrocknung erst im Folgejahr oder mit einer zeitlichen Verzögerung von 2 Jahren zu erwarten.

Ein Box-Plot der mittleren N-Konzentrationen (Abbildung 4) weist mit 111,6 mg/l deutlich erhöhte mittlere N-Konzentrationen (Ausreißer) bei der Versuchsvariante IL im Versuchsjahr 2019/20 aus. Diese erhöhten N-Konzentrationen traten als unmittel-

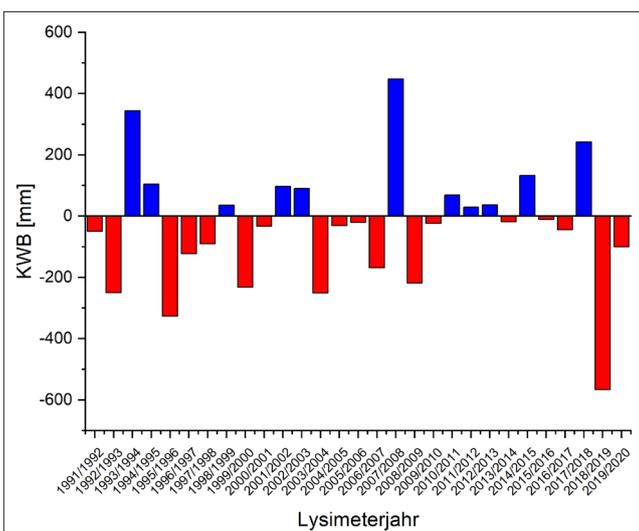


Abbildung 1: Klimatische Wasserbilanz (KWB) in den Lysimeterjahren 1991/92 – 2019/20.

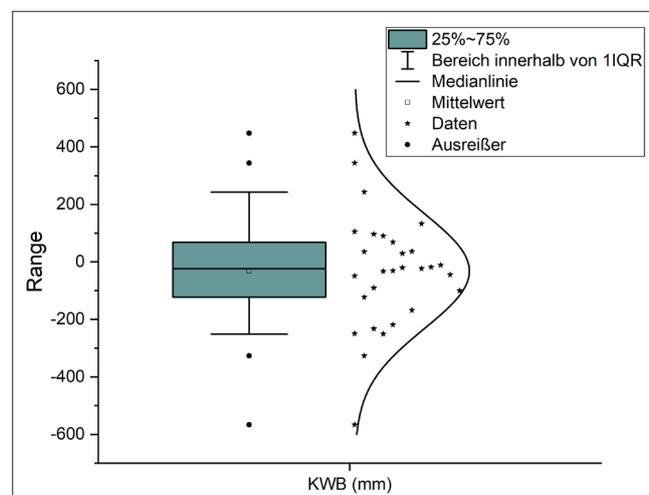


Abbildung 2: Box-Plot der kWB für den Zeitraum 1991 -2020.

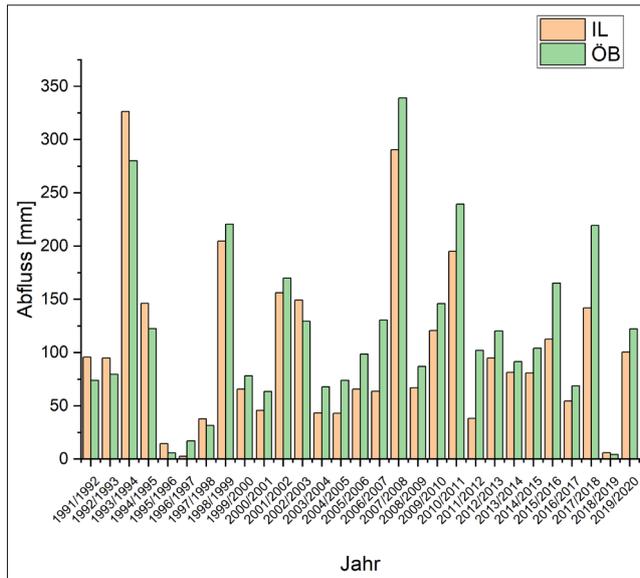


Abbildung 3: Mittlere Raten der jährlichen Sickerwasserbildung der Bewirtschaftungsvarianten IL und ÖB im Zeitraum 1991 -2020.

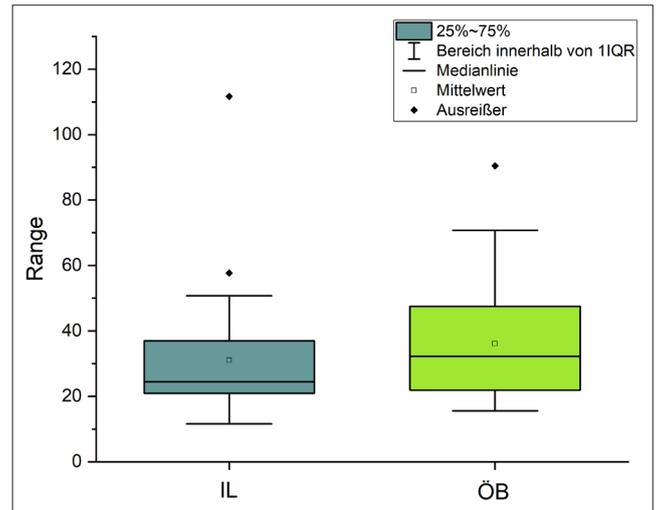


Abbildung 4: Box-Plot der mittleren jährlichen N-Konzentration 1991 – 2020.

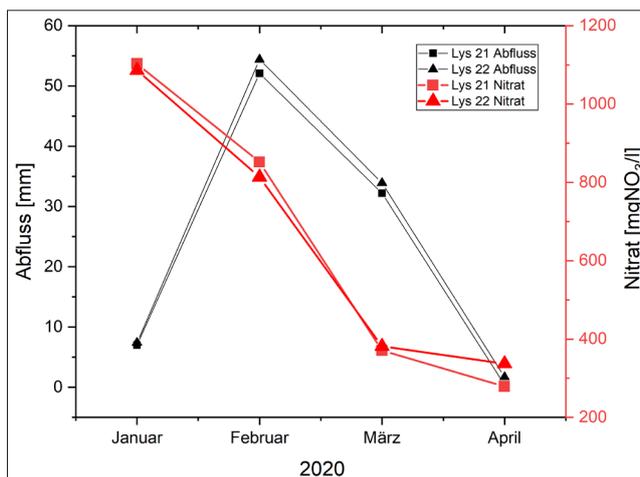


Abbildung 5: Nitratkonzentration und Abfluss der Lysimeter 21 und 22 (IL) im Zeitraum Januar – April 2020.

bare Folge des Trockenjahres 2018/19 mit einer negativen kWB von 566,6 mm auf. Im Lysimeterjahr 2012/13 wurde mit 57,7 mg/l die zweithöchste mittlere N-Konzentration gemessen. Hier trat eine intensive Stickstoffverlagerung aufgrund von vergleichsweise hohen Niederschlägen im Lysimeterjahr 2010/11 (705 mm) auf. Bei ÖB war unmittelbar nach der Versuchsumstellung im Lysimeterjahr 1991/92 mit 86,6 mg/l die höchste N-Konzentration zu verzeichnen, die den IQR überschritt und damit als Ausreißer zu charakterisieren war. Insgesamt fällt aber das deutlich höhere Niveau der mittleren N-Konzentrationen bei ÖB im Vergleich zu IB auf. Mit hoher Wahrscheinlichkeit war aufgrund der geringeren Nährstoffversorgung bei ÖB der Nährstoffentzug durch die angebauten Kulturpflanzen reduziert. Daraus resultierten Stickstoffüberhänge, die bei schlechten (lückigen) Pflanzenbeständen zur Auswaschung gelangten. Insgesamt war das Niveau der mittleren N-Konzentrationen in beiden Bewirtschaftungsvarianten vergleichsweise hoch. Der Trinkwassergrenzwert für Nitrat von 50 mg NO₃ pro Liter (11,3 mgN/l) wurde häufig überschritten.

In *Abbildung 5* sind exemplarisch die nach dem Wiedereinsetzen der Abflussbildung im Sickerwasser von Lysimeter 21 und 22 ab Januar bis April 2020 gemessenen Nitratkonzentrationen dargestellt. Besonders auffällig waren im Januar 2020 mit > 1000

mg/l sehr hohe Nitratkonzentrationen. Das Maximum wurde mit den ersten Abflüssen erreicht. In den Folgemonaten wiesen die Konzentrationen einen rückläufigen Trend auf. Die höchste Abflussbildung war im Februar 2020 zu verzeichnen. Zwischen den Maxima der Nitratkonzentration und des Abflusses bestand damit eine zeitliche Verschiebung von einem Monat.

Schlussfolgerungen

Für die Identifikation von extremen Trockenjahren unter den Klimabedingungen des nord-ostdeutschen Tieflands stellte die Berechnung der kWB mit anschließender statistischer Prüfung auf Ausreißer einen geeigneten Ansatz dar. Jahre mit extremer Witterung wurden dabei als Ausreißer einer 30-jährigen Reihe gekennzeichnet. In den Versuchsjahren mit extremer Witterung (Trockenheit) kam die Abflussbildung in den Lysimetern unabhängig von der Form der Landbewirtschaftung nahezu vollständig zum Erliegen. Kommt es im Anschluss an eine Trockenphase durch Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers zu einer erneuten Abflussbildung, so muss mit außerordentlich hohen Nitratkonzentrationen gerechnet werden. Die nach dem Trockenjahr 2018/19 gemessenen mittleren abflussgewichteten Konzentrationen überschritten den zulässigen Nitratgehalt des Trinkwassers um ein Vielfaches. Dem Grundwasser im Anschluss an Trockenjahre zufließendes Sickerwasser besitzt damit ein Gefährdungspotenzial für die Qualität dieser Ressourcen.

Literatur

Bohner A., Habeler H., Starlinger F., Suanjak M. (2010) Avalanches keep habitats open and species rich in the montane and subalpine belt. *eco.mont* Vol 2, 53-57.

Aust M.-O., Thiele-Bruhn S., Seeger J., Godlinski F., Meissner R., Leinweber P. (2009) Sulfonamides Leach from Sandy Loam Soils Under Common Agricultural Practice. *Water, Air, & Soil Pollution* 211(1-4), 143-156.

Bednorz D., Tauchnitz N., Christen O., Rupp H., Meissner R. (2016) Evaluating the transferability of measurements from simple constructed non weighable gravitation lysimeters to predict the water regime on field scale-a case study. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179(6), 809-820.

Döring S., Döring J., Borg H., Böttcher F. (2011) Vergleich von Trockenheitsindizes zur Nutzung in der Landwirtschaft unter den klimatischen Bedingungen Mitteldeutschlands. *Hercynia* 44, 145-168.

Gee G.W., Newman B.D., Green S.R., Meissner R., Rupp H., Zhang Z.F., Keller J.M., Waugh W.J., van der Velde M., Salazar J. (2009) Passive wick fluxmeters: Design considerations and field applications. *Water Resources Research* 45, 1-18.

IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from Geneva, Switzerland.

Meissner R., Rupp H., Seeger J., Ollesch G., Gee G.W. (2010) A comparison of water flux measurements: passive wick-samplers versus drainage lysimeters. *European Journal of Soil Science* 61(4), 609-621. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01255.x

Porporato A., Daly E., Rodriguez-Iturbe I. (2004) Soil Water Balance and Ecosystem Response to Climate Change. *The American Naturalist* 165(5), 625-632.

Rippel R., Brandhuber R., Schwamm D. (2002) Bodenwasserhaushalt unterfränkischer Ackerstandorte 1980-2000: Soil water balance of arable locations in Lower Frankonia (Bavaria) 1980-2000. Bayerische Landesanst. für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP).

Schwinning S., Starr B.I., Ehleringer J.R. (2005) Summer and winter drought in a cold desert ecosystem (Colorado Plateau) part I: effects on soil water and plant water uptake. *Journal of Arid Environments* 60(4), 547-566.

Seneviratne S.I., Lehner I., Gurtz J., Teuling A.J., Lang H., Moser U., Grebner D., Menzel L., Schrott K., Vitvar T., Zappa M. (2012) Swiss prealpine Rietholzbach research catchment and lysimeter: 32 year time series and 2003 drought event. *Water Resources Research* 48.

Zhang Y., Zhang M., Niu J., Zheng H. (2016) The preferential flow of soil: A widespread phenomenon in pedological perspectives. *Eurasian Soil Science* 49(6), 661-672.

Nitratauswaschung unter Gemüse bei unterschiedlichem Ernterückstandsmanagement

Ernst Spiess^{1*}, Clay Humphrys¹, Frank Liebisch¹, Volker Prasuhn¹ und Reto Neuweiler²

Zusammenfassung

In einem dreijährigen Lysimeterversuch wurde untersucht, wie viel Nitrat unter einer Gemüsefruchtfolge ausgewaschen wird und welche die Auswirkungen sind, wenn die Ernterückstände abgeführt und nicht auf dem Feld belassen werden. Im Mittel über alle Lysimeter und Jahre lag die Nitratkonzentration des Sickerwassers mit $110 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ weit über dem Anforderungswert für Gewässer, die der Trinkwassernutzung dienen. Die Abfuhr der Ernterückstände hatte keinen Einfluss auf den marktfähigen Ertrag und die Sickerwassermenge; die Auswaschung konnte jedoch dank der niedrigeren Nitratkonzentrationen um $20\text{-}30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ reduziert werden.

Schlagwörter: Düngung, Lysimeter, Sickerwasser

Summary

In a three-year lysimeter trial, the amount of nitrate leached from a vegetable crop rotation and the effects of crop residues being removed or left in the field were investigated. On average of all lysimeters and years, the nitrate concentration of seepage water was $110 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$, far above the limit for drinking water. The removal of crop residues had no effect on marketable yields and seepage volumes, but leaching could be reduced by $20\text{-}30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ due to lower nitrate concentrations.

Keywords: fertilization, lysimeter, seepage water

Einleitung

Im Einzugsgebiet von Trinkwasserfassungen mit hohen Nitratkonzentrationen wird oftmals auch Feldgemüse angebaut. Im Gemüsebau wird in der Regel mehr Nitrat ausgewaschen als unter Ackerkulturen oder Grasland, weil aufgrund der hohen Erträge und zur Erzielung einer einwandfreien äußeren Qualität häufig ein hohes Angebot an Stickstoff (N) notwendig ist, welches zu erheblichen Reststickstoffmengen nach der Ernte führen kann. Zudem liegt im Gemüsebau der Boden oftmals über Winter brach, was das Risiko der Nitratauswaschung zusätzlich erhöht. Durch den Anbau von mehreren Gemüsekulturen pro Jahr fallen neben der marktfähigen Ware auch beachtliche Mengen an Ernterückständen an. Diese können große N-Mengen enthalten und verbleiben meist auf dem Feld (Zemek et al. 2020). Je nach Witterung, Bewirtschaftung sowie Art des Pflanzenmaterials wird dieser organische Stickstoff unterschiedlich schnell mineralisiert und kann dann von den folgenden Kulturen aufgenommen werden, in gasförmiger Form verloren gehen oder ausgewaschen werden. In einem dreijährigen Lysimeterversuch wurde deshalb untersucht, wie viel Nitrat unter einer Gemüsefruchtfolge ausgewaschen wird und wie sich der Umgang mit den Ernterückständen auf die Auswaschung auswirkt.

¹ Agroscope, Reckenholzstraße 191, CH-8046 Zürich, ² Agroscope, Müller-Thurgau-Straße 29, CH-8820 Wädenswil

* Ansprechpartner: DI Ernst Spiess, email: ernst.spiess@agroscope.admin.ch

Material und Methoden

Lysimeter und Boden

Der Versuch wurde während drei Jahren auf zwölf wägbaren Lysimetern in Zürich-Reckenholz (47°25'40"N, 8°31'02"E; 443 m ü.M.) durchgeführt. Die Gefäße weisen eine Oberfläche von 3,14 m² und eine nutzbare Tiefe von 2,0 m auf (sowie eine zusätzliche Schicht von 0,5 m mit Fein- und Grobkies über dem Auslass, die als Sickerhilfe dient). Sechs Lysimeter wurden 1979 schichtweise mit einer sandig-lehmigen Braunerde auf Schotter gefüllt, die anderen sechs mit einer lehmigen Braunerde auf Moränelehm (Tabelle 1). Beide Bodentypen sind typische Ackerböden der Schweiz.

Fruchtfolge und Verfahren

Nach Inbetriebnahme der Lysimeteranlage im Jahr 1980 wurden vorwiegend Ackerkulturen angebaut. Im April 2017 startete der Gemüseversuch mit einer dreijährigen Fruchtfolge ohne Winterbegrünung:

1. Jahr: Brokkoli + Kopfsalat 1 + Kopfsalat 2
2. Jahr: Chinakohl + Lauch
3. Jahr: Kopfkohl + Zuckerhut

Die Fruchtfolge wurde auf den beiden Böden um ein Jahr versetzt angebaut (Abbildung 1). Auf dem Schotterboden war Brokkoli die erste Kultur, auf dem Moräneboden Chinakohl. Um den Einfluss des Ernterückstandsmanagements auf die Nitratauswaschung zu untersuchen, wurden die Ernterückstände bei jedem Boden auf drei Lysimetern abgeführt und auf den drei anderen belassen und eingearbeitet. Die Bewirtschaftung erfolgte möglichst praxisüblich, wegen der geringen Bewirtschaftungsfläche mussten jedoch alle Arbeiten von Hand ausgeführt werden. Der Boden wurde vor der Pflanzung der Setzlinge jeweils 20 cm tief bearbeitet. Die N-Düngung erfolgte in Form von Ammoniumnitrat und gemäß den Empfehlungen von Agroscope (GRUD 2017). Bei Bedarf wurden die Lysimeter bewässert.

Tabelle 1: Körnung und Gehalt an organischer Substanz (OS) der beiden Böden.

	Ton (%)	Schluff (%)	Sand (%)	OS (%)
Schotterboden				
0-30 cm	16	24	60	2,6
30-60 cm	15	23	62	1,7
60-80 cm	17	22	61	1,6
Moräneboden				
0-30 cm	18	35	47	3,2
30-60 cm	16	42	42	0,3
60-80 cm	26	37	37	0,4

Abbildung 1: Anbau von Kopfkohl und Chinakohl im Juni 2018 (links) und Kopfsalat im Oktober 2017 (rechts).



Messung der Wasserflüsse und der Nitratauswaschung

Die Niederschlagsdaten stammten von der 40 m entfernten Station von MeteoSchweiz. Die Sickerwassermenge wurde mit 100 ml-Kippwaagen erfasst. Bei jeder Kippung floßen 1-2 ml Wasser in eine Probenflasche, was eine abflussproportionale Entnahme einer kleinen Probe erlaubte. Die Wasserproben wurden 14-täglich entnommen und mittels segmentierter Fließinjektionsanalyse (s FIA) kolorimetrisch auf Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) untersucht, wobei Ammonium aufgrund der geringen Konzentrationen ($< 0.4 \text{ mg N L}^{-1}$) vernachlässigt werden konnte. Die Nitratkonzentrationen wurden als abflussgewichtete Mittelwerte angegeben. Die Wasserflüsse und die Nitratauswaschung wurden für den Zeitraum von April 2017 bis März 2020 ausgewertet.

Witterung

In den drei Versuchsjahren übertraf die Jahrestemperatur mit Werten von 10,2 bis 11,4°C jeweils deutlich das langjährige Mittel (1981-2010) von 9,4°C. Dagegen fielen die Niederschläge mit 826 bis 981 mm Jahr^{-1} bedeutend geringer aus als das langjährige Mittel von 1054 mm Jahr^{-1} . Das Niederschlagsdefizit war in den Monaten April bis Juli, d.h. in der Wachstumszeit der ersten Gemüsekultur, besonders groß. Die Gemüsekulturen wurden mit 135 bis 200 mm Jahr^{-1} bewässert. Somit betrug die gesamte Wasserzufuhr durchschnittlich 1092 mm Jahr^{-1} .

Resultate und Diskussion

Ertrag der Kulturen

Die marktfähigen Erträge lagen im Mittel über alle Gemüsekulturen und beide Böden in der gleichen Größenordnung wie im gewerbsmäßigen Freilandanbau. Detaillierter betrachtet ergaben sich jedoch deutliche Unterschiede. Während bei Zuckerhut sehr hohe Erträge erreicht wurden, schnitt Kopfsalat stark unterdurchschnittlich ab. Das Ernterückstandsmanagement hatte auf beiden Böden keinen Einfluss auf die Ertragshöhe (Tabelle 2).

Nährstoffbilanz

Die Nährstoffbilanz als Gegenüberstellung von Düngung und Entzug durch die weggeführten Pflanzenprodukte zeigt, dass der N-Umsatz im Feldgemüsebau viel höher ist als bei Ackerkulturen. Die Düngung und die Aufnahme durch die Pflanzen (Marktware und Ernterückstände) lagen im Bereich von 300 bis 500 kg N $\text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ (Tabelle 3). Auf den Lysimetern mit Abfuhr der Ernterückstände wurden durchschnittlich 417 kg N $\text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ ausgebracht. Bei den Lysimetern mit Einarbeitung der Rückstände wurde der Kulturbedarf jeweils um 20% der in den Ernterückständen der Vorkultur enthaltenen N-Menge

	Schotter			Moräne		
	Jahr	Abfuhr	Belassen	Jahr	Abfuhr	Belassen
Brokkoli	2017	143	146	2019	112	90
Kopfsalat 1	2017	445	508	2019	229	277
Kopfsalat 2	2017	267	323	2019	107	134
Chinakohl	2018	639	611	2017	338	344
Lauch	2018	536	537	2017	464	519
Kopfkohl	2019	515	407	2018	872	909
Zuckerhut	2019	802	867	2018	712	750

Tabelle 2: Marktfähige Erträge bei Abfuhr und Belassen der Ernterückstände bei den verschiedenen Kulturen und beiden Böden (in dt ha^{-1} ; durchschnittlicher Variationskoeffizient: 15%).

Tabelle 3: N-Bilanz (= N-Düngung minus N-Entzug durch die weggeführten Produkte) bei Abfuhr und bei Belassen sowie N-Menge in den Ernterückständen bei Belassen (Mittel beider Böden; in kg N ha⁻¹).

	N-Bilanz			Belassen			N-Menge der Ernte- rückstände
	Abfuhr Düngung	Entzug	Bilanz	Düngung	Entzug	Bilanz	
Brokkoli	250	230	20	245	71	174	156
Kopfsalat 1	120	96	24	90	74	16	28
Kopfsalat 2	120	65	55	110	48	62	19
<i>Total 1. Jahr</i>	<i>490</i>	<i>390</i>	<i>100</i>	<i>445</i>	<i>193</i>	<i>252</i>	<i>203</i>
Chinakohl	180	268	-88	175	125	50	135
Lauch	220	226	-6	200	178	22	73
<i>Total 2. Jahr</i>	<i>400</i>	<i>495</i>	<i>-95</i>	<i>375</i>	<i>302</i>	<i>73</i>	<i>208</i>
Kopfkohl	220	217	3	200	130	70	80
Zuckerhut	140	226	-86	110	145	-35	95
<i>Total 3. Jahr</i>	<i>360</i>	<i>443</i>	<i>-83</i>	<i>310</i>	<i>275</i>	<i>35</i>	<i>175</i>
3-Jahresmittel	417	443	-26	377	257	120	195

reduziert (minus 40 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹), so dass bei diesem Verfahren im Mittel noch 377 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ ausgebracht wurden. Vom Stickstoff in den Ernterückständen kann nur ein kleiner Teil von den Folgekulturen aufgenommen werden, weil insbesondere während der Vegetationsruhe größere N-Verluste eintreten (Grud 2017)

Der N-Entzug betrug bei Belassen der Ernterückstände und im Mittel beider Böden 257 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ und bei Abfuhr sogar 443 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ (Tabelle 3). Die Bilanz über die drei Jahre zeigt, dass der Entzug bei Abfuhr der Ernterückstände 26 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ höher ausfiel als die Düngung, was einem Defizit entspricht. Chinakohl und Zuckerhut haben am meisten zu diesem Defizit beigetragen, aber auch Brokkoli mit hoher N-Düngung wies nur einen geringen Überschuss auf. Bei Belassen der Ernterückstände auf den Lysimetern wies die Bilanz im Durchschnitt einen Überschuss von 120 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ auf. Dies sind 146 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ mehr als beim Verfahren mit Abfuhr. Zwar war die Düngung infolge der 20%igen Anrechnung des Stickstoffs in den Ernterückständen der Vorkultur 40 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ niedriger als bei Abfuhr, aber der Entzug fiel um 186 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ geringer aus, weil er nur die marktfähige Ware umfasste, nicht aber die auf den Lysimetern belassenen Ernterückstände. Bei beiden Verfahren fällt auf, dass der zweite Satz Kopfsalat einen erstaunlich hohen Überschuss aufwies. Dies ist auf den späten Anbau im Jahr zurückzuführen, der mit geringeren Erträgen verbunden war. Die verschiedenen Gemüsekulturen variierten stark in der N-Menge der Ernterückstände (Tabelle 3). Während diese bei Kopfsalat gering ausfiel, war sie bei Brokkoli und Chinakohl hoch und trug damit im Verfahren „Belassen“ viel zur Erhöhung des Bilanzsaldos bei.

Sickerwassermenge

Die Sickerwassermenge betrug im Mittel der drei Jahre und beider Böden rund 500 mm (Tabelle 4) und war damit fast halb so hoch wie die Wasserzufuhr über den Niederschlag und die Bewässerung. Das unterschiedliche Ernterückstandsmanagement beeinflusste die Sickerwassermenge auf beiden Böden nur minimal. Im dritten Versuchsjahr (2019/20) wurde mehr Sickerwasser gebildet als in den beiden Vorjahren. Die Sickerwassermenge war in den Wintermonaten Dezember bis Februar wegen den gesättigten Böden praktisch gleich hoch wie der Niederschlag (Abbildung 2). Im Sommerhalbjahr fiel dagegen trotz hoher Wasserzufuhr über Niederschlag und Bewässerung nur wenig Sickerwasser an. Die Evapotranspiration war in dieser Periode infolge der höheren Temperaturen und des Pflanzenwachstums hoch.

	Schotterboden		Moräneboden	
	Abfuhr	Belassen	Abfuhr	Belassen
Sickerwassermenge (mm):				
2017/18	489	491	450	443
2018/19	469	479	478	462
2019/20	582	593	605	571
Mittel	513	521	511	492
Nitratkonzentration (mg NO ₃ ⁻ L ⁻¹):				
2017/18	99	132	116	85
2018/19	56	71	43	56
2019/20	77	108	200	236
Mittel	78	104	126	134
Ausgewaschene N-Fracht (kg N ha ⁻¹):				
2017/18	109	146	118	85
2018/19	60	77	46	58
2019/20	101	144	273	305
Mittel	90	123	145	149

Tabelle 4: Sickerwassermenge, Nitratkonzentration des Sickerwassers und ausgewaschene N-Fracht in den verschiedenen Verfahren, Böden und Versuchsjahren.

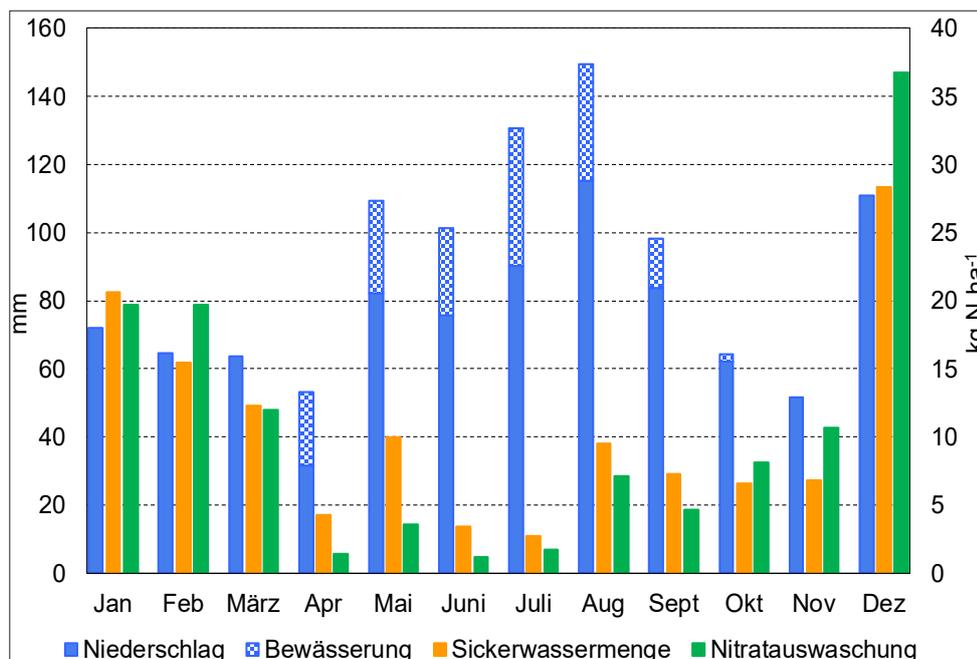
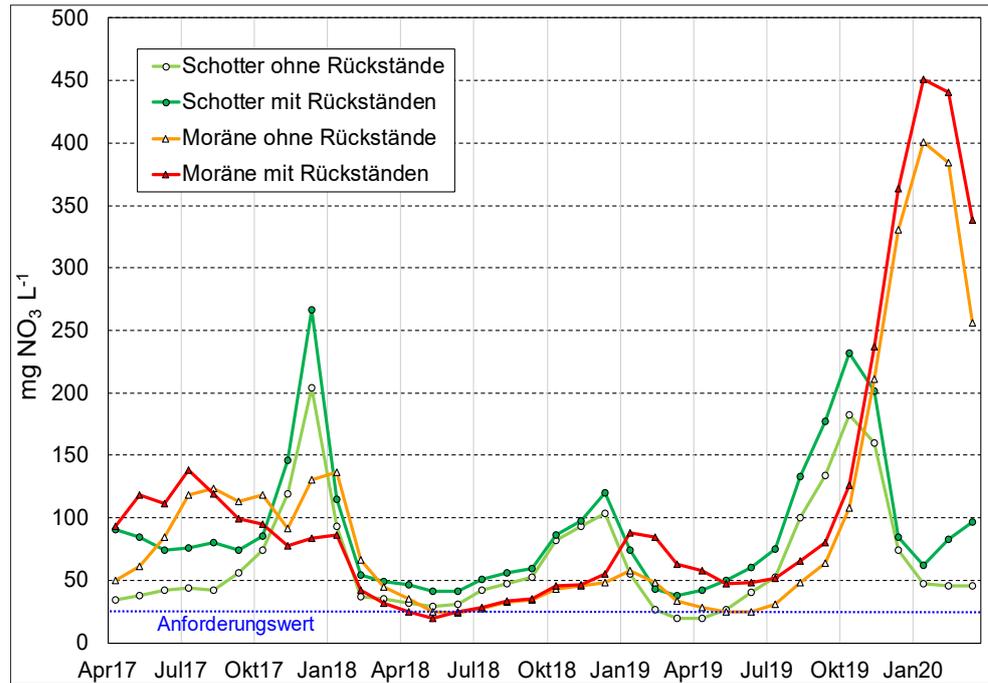


Abbildung 2: Monatswerte für Niederschlag und Bewässerung, Sickerwassermenge (mm) sowie die ausgewaschene N-Fracht (kg N ha⁻¹) im Mittel der drei Jahre und der zwölf Lysimeter.

Nitratkonzentration des Sickerwassers

Die Verlaufskurven der Nitratkonzentration des Sickerwassers lagen in beiden Verfahren und Böden größtenteils über dem schweizerischen Anforderungswert von 25 mg NO₃⁻ L⁻¹ für Gewässer, die der Trinkwassernutzung dienen (Abbildung 3). Im Januar 2020 erreichte die Nitratkonzentration beim Moräneboden Werte von über 400 mg NO₃⁻ L⁻¹. Auf dem Schotterboden trat die maximale Nitratkonzentration im Winterhalbjahr jeweils etwas früher auf als auf dem Moräneboden. Mit Ausnahme des Moränebodens zwischen August 2017 und Mai 2018 waren die Nitratkonzentrationen bei Belassen der Ernterückstände jeweils höher als bei Abfuhr. Im Mittel über alle Lysimeter und die drei Jahre betrug die Nitratkonzentration 110 mg NO₃⁻ L⁻¹.

Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der abflussgewichteten Nitratkonzentrationen im Sickerwasser in beiden Verfahren und beiden Böden.



Ausgewaschene N-Menge

Im Durchschnitt aller Lysimeter und Versuchsjahre wurden 127 kg N ha^{-1} ausgewaschen. Die jährlichen Schwankungen waren insbesondere auf dem Moräneboden sehr groß, wo die maximale N-Fracht 305 kg N ha^{-1} betrug (Tabelle 4). Da sowohl die Sickerwassermengen als auch die Nitratkonzentrationen des Sickerwassers im Winterhalbjahr mehr als doppelt so hoch waren als im Sommer, erfolgte die Nitratauswaschung vorwiegend im Winter (Abbildung 2).

Auf dem Schotterboden wurde in allen Jahren mehr Nitrat nach Belassen der Ernterückstände auf den Lysimetern ausgewaschen als bei Abfuhr. Beim Moräneboden war dies in zwei Versuchsjahren der Fall; im ersten Jahr wurde die umgekehrte Tendenz beobachtet. Tracerversuche mit Bromid im vorhergehenden Versuch zeigen, dass auf dem Moräneboden um die 500 mm Sickerwasser nötig sind zur Auswaschung von 80% der insgesamt im Wasser wiedergefundenen Tracermenge. Nitrat dürfte im Boden eine ähnliche Verlagerungsgeschwindigkeit aufweisen wie Bromid. Da der mittlere Sickerwasseranfall in unserem Versuch 500 mm Jahr^{-1} beträgt, dauert es etwa ein Jahr, bis der größte Teil des Nitrats aus dem Oberboden durch den Lysimeter gesickert ist. Dies bedeutet, dass im ersten Versuchsjahr vorwiegend Nitrat aus dem Moräneboden ausgewaschen worden ist, das sich zu Versuchsbeginn unterhalb des bearbeiteten Oberbodens befand und daher aus dem vorhergehenden Versuch stammte. Beim Schotterboden wurde der Tracer etwas schneller verlagert. Deshalb dürfte die Verweilzeit in diesem Boden einige Monate kürzer sein. Aufgrund dieser Erkenntnisse kann das erste Versuchsjahr bei der Nitratauswaschung nicht für den Vergleich der beiden Verfahren herangezogen werden. Auch ist es nicht möglich, eine bestimmte Nitratfracht einer einzelnen Gemüsekultur zuzuordnen. Im zweiten und im dritten Jahr wurden bei Abfuhr der Ernterückstände und im Mittel beider Böden 26 kg N ha^{-1} weniger ausgewaschen als bei Belassen auf den Lysimetern.

Schlussfolgerungen

Der Lysimeterversuch zeigte, dass unter Feldgemüse große N-Mengen als Folge der hohen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser ausgewaschen werden können. Bei der heute gängigen Bewirtschaftungspraxis, dem Belassen der Ernterückstände auf dem

Feld, betrug der Überschuss $120 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ und der Saldo der Nährstoffbilanz fiel $146 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ höher aus als bei der Abfuhr. Die zusätzliche Nitratauswaschung von $26 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ bei Belassen erklärt jedoch nur einen kleinen Teil der Differenz im Bilanzsaldo. Offen bleibt, welche N Menge im Humus angereichert wurde, in gasförmiger Form verloren ging oder in den nächsten Jahren noch ausgewaschen wird. Wegen der großen Verweilzeit des Nitrats im Boden wird der Versuch um zwei Jahre verlängert.

Dank

Das Forschungsprojekt NitroGäu wurde finanziell und inhaltlich durch das Bundesamt für Landwirtschaft und den Kanton Solothurn unterstützt.

Literatur

GRUD (2017) Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz. Agrarforschung Schweiz 8(6), Spezialpublikation.

Zemek O., Neuweiler R., Spiess E., Stüssi M., Richner W. (2020) Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau – eine Literaturstudie. Agroscope Science Nr. 95, 117 pp. <https://doi.org/10.34776/as95g> [30.11.2020].

Auswaschung von Pflanzenschutzmittelwirkstoffen auf sandigen Lehmböden

Nadine Tauchnitz^{1*}, Holger Rupp², Kurzius Florian³, Christian Wolff¹ und Ralph Meissner²

Zusammenfassung

Einträge von Pflanzenschutzmitteln (PSM) können natürliche Gewässer erheblich belasten. Schwerpunkt des vorliegenden Projektes war die Durchführung von PSM-Reduzierungsmaßnahmen auf sandigen Lehmböden in Norddeutschland in Lysimeter- und Parzellenversuchen. In den Versuchen wurden drei Versuchsvarianten 1) ohne PSM, 2) reduzierter und 3) konventioneller PSM-Einsatz auf relevante Parameter untersucht. Begleitend wurden Batchversuche im Labor durchgeführt, um Aussagen zum Abbau und zur Sorption der applizierten PSM bei den standortspezifischen Bodeneigenschaften zu erhalten. Bisherige Ergebnisse zeigten keine Auswaschung der im Versuch applizierten PSM. Demgegenüber wurde der Wirkstoff Tebuconazol im Sickerwasser aller Varianten nachgewiesen. Diese Positivbefunde sind vermutlich auf die Saatgutbehandlung aus vorhergehenden Versuchen zurückzuführen. Die Batchversuche ergaben für die meisten der applizierten PSM einen raschen Abbau im Oberboden. Im Unterboden wurde ein langsamerer Abbau ermittelt.

Schlagwörter: Abbau, Halbwertszeiten, Sorption, Persistenz, Wasserqualität

Summary

Pesticide inputs in natural waters may cause harmful effects on aquatic life communities. The present study focused on the implementation of reduction measures for pesticide application in lysimeter and field trials with sandy loam soils in northern Germany. Three different treatments were considered: 1) without pesticides, 2) reduced pesticide application and 3) conventional pesticide application. The treatments were analyzed for relevant parameters. Additionally, batch tests were performed to study sorption and degradation of applied pesticides at sitespecific soil properties. Previous results showed no leaching of actual applied pesticides in the trials. In contrast, tebuconazole was found in leachate of all treatments presumably associated with the seed treatment in previous lysimeter trials. Batch tests showed fast degradation for most of the applied pesticide substances in the topsoil. For the subsoil a slower degradation was determined.

Keywords: degradation, half-lives, sorption, persistence, water quality

Einleitung

Einträge von Pflanzenschutzmittel (PSM)-Wirkstoffen in die Gewässer können aus punktuellen sowie diffusen Quellen stammen (Munz et al. 2017) und die Gewässerqualität erheblich beeinträchtigen. Daher sind gezielt Maßnahmen zur Reduktion von PSM-Einträgen umzusetzen. Eine Identifizierung der Eintragsquellen ist oft problematisch, da

¹ State Institute for Agriculture and Horticulture Saxony-Anhalt, Centre for Agronomy and Crop Production, Strenzfelder Allee 22, D-06406 Bernburg; ² Helmholtz Centre for Environmental Research-UFZ, Dept. of Soil System Science, Lysimeter Station, Falkenberg 55, D-39615 Altmärkische Wische; ³ BGD ECOSAX GmbH, Tiergartenstraße 48, D-01219 Dresden

* Ansprechpartner: Dr. Nadine Tauchnitz, email: nadine.tauchnitz@ilg.mule.sachsen-anhalt.de

viele Wirkstoffe sowohl in der Landwirtschaft als auch in Siedlungsbereichen eingesetzt werden (Mutzner et al. 2019).

Mit dem Ziel, nähere Informationen zu möglichen PSM-Einträgen aus der Landwirtschaft über den Sickerwasserpfad zu erhalten und gezielt Reduzierungsmaßnahmen abzuleiten, wurden auf einem sandigen Lehmboden in der Altmark (Nordostdeutsches Tiefland) Lysimeter- und Parzellenversuche angelegt. Schwerpunkt der Versuche war die Quantifizierung der sickerwassergebundenen Verlagerung von PSM-Wirkstoffen. Dabei wurden die Versuchsvarianten 1) Null ohne PSM-Einsatz, 2) Reduzierter PSM-Einsatz und 3) Konventioneller PSM-Einsatz auf folgende Parameter untersucht: PSM- und Nährstoff-Austräge mit dem Sickerwasser, PSM-Konzentrationen im Boden und im Erntegut, Erträge sowie Unkrautbesatz, Schädlings- und Krankheitsbefall und Wirksamkeit chemischer und mechanischer Pflanzenschutzmaßnahmen. Begleitend zu den Lysimeter- und Parzellenversuchen wurden Batchversuche zur Ermittlung von Abbau und Sorption der in den Versuchen applizierten PSM bei den standorttypischen Bodeneigenschaften durchgeführt.

Material und Methoden

Die Versuche wurden im September 2018 in der nördlichen Altmark an der Lysimeterstation Falkenberg des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung-UFZ (Lysimeterversuch) und in Lückstedt (ca. 20 km entfernt) (Parzellenversuch) angelegt. Die klimatischen Bedingungen der Versuchsstandorte sind durch langjährige (1961-90) Jahresmitteltemperaturen von 8,5 °C und langjährige (1961-90) Niederschläge von 539 mm (DWD-Station, Seehausen) geprägt. Der Boden ist eine Pseudogley-Parabraunerde mit der Bodenart lehmiger Sand (0-30 cm: SI4, 30-100 cm: SI2) (Meißner et al. 2010). In den Versuchen wurden die in *Tabelle 1* aufgeführten Versuchsvarianten in dreifacher (Lysimeterversuch) bzw. vierfacher Wiederholung (Parzellenversuch) untersucht.

- Parzellenversuch

Der Parzellenversuch (randomisiert) wurde in Lückstedt auf einem Praxis Schlag der Agrargenossenschaft Altmärkische Höhe e.G. angelegt (*Abbildung 1*).

Die Fruchtfolge auf den Parzellen war Winterweizen (2019), Wintergerste (2020) und Winterraps (2021). Im Versuch wurden bisher 6 PSM-Maßnahmen durchgeführt (vgl. *Abbildung 2*). Folgende Parameter wurden untersucht: Konzentrationen applizierter PSM-Wirkstoffe im Boden, Erträge und Konzentrationen applizierter PSM-Wirkstoffe im Erntegut, Bestandesdichte, Unkrautbesatz, Schädlings- und Krankheitsbefall und Wirksamkeit chemischer und mechanischer Pflanzenschutzmaßnahmen.

Tabelle 1: Versuchsvarianten.

Variante	Null	Reduziert	Konventionell
Beschreibung	kein PSM-Einsatz,	Reduzierter PSM-Aufwand	Orts- bzw. betriebsüblicher PSM-Einsatz
	mechanische Unkrautbekämpfung		
PSM-Einsatz			
Herbizide	-	25 % Reduktion zur konventionellen Variante	Praxisbetrieb (100 % PSM-Aufwand)
Fungizide	-	33 % Reduktion zur konventionellen Variante	Praxisbetrieb (100 % PSM-Aufwand)
Insektizide	-	nur Einsatz bei deutlicher Überschreitung der Richtwerte – dann 100 %	Praxisbetrieb (100 % PSM-Aufwand)
Wachstumsregulatoren	-	25 % Reduktion zur konventionellen Variante	Praxisbetrieb (100 % PSM-Aufwand)

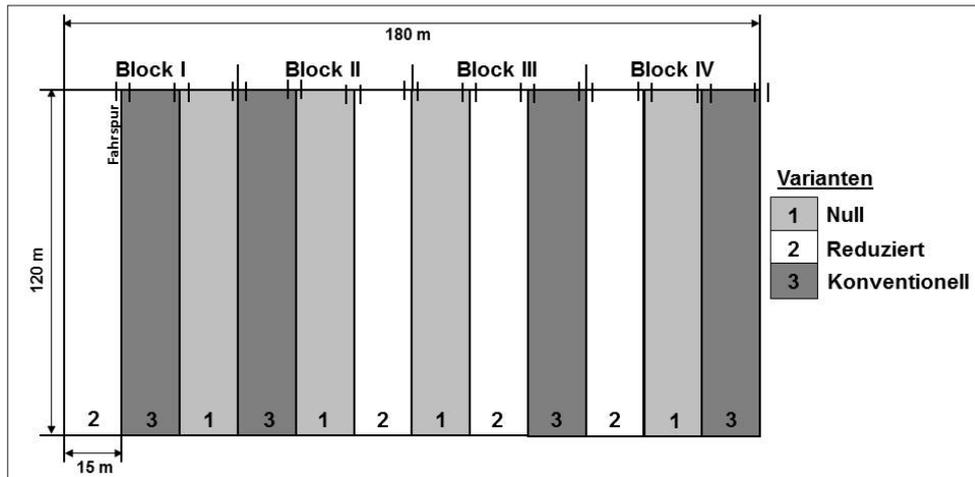


Abbildung 1: Versuchsaufbau Parzellenversuch.

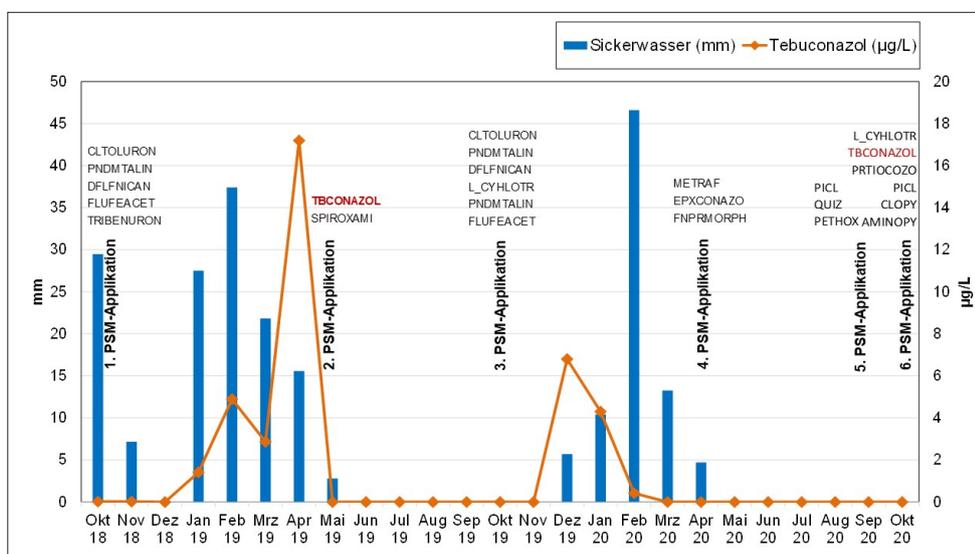


Abbildung 2: Sickerwassermengen und Tebuconalkonzentrationen im Sickerwasser der konventionellen Variante im Untersuchungszeitraum sowie Pflanzenschutzmittel(PSM)-Applikationen.

- Lysimeterversuch

Für den Lysimeterversuch wurden nicht wägbare Gravitationslysimeter mit einer quadratischen Oberfläche von 1 m² und einer Tiefe von 1,25 m genutzt. Vor Beginn des Versuches wurde ein PSM-Screening des Sickerwassers aller 9 Lysimeter auf insgesamt 54 Wirkstoffe mittels GC-MS (Gas Chromatography-Massenspektrometer), LC-MS (Liquid Chromatography-Massenspektrometer) bzw. HPLC (High Pressure Liquid Chromatography) nach DIN 38407-35, DIN 38407-6, DIN 38407 F22 mod. und EN 12918 mod. durchgeführt, um eine eventuelle Grundbelastung festzustellen. Für die regelmäßigen Sickerwasseranalysen nach Versuchsbeginn wurden Monatsmischproben gewonnen und auf alle im Versuch applizierten PSM-Wirkstoffe (inklusive Saatgutbehandlungsmittel) untersucht. Zudem wurden in den Sickerwasserproben Stickstoff(N) (NO₃⁻, NH₄⁺, NO₂⁻, N_t)- und Kohlenstoff(C_t, DOC)-Konzentrationen bestimmt. Die Fruchtfolge und PSM-Anwendung gestaltete sich analog zum Parzellenversuch. Die PSM-Applikation auf den Lysimetern wurde mittels Handspritze realisiert.

- Batchversuche

Im Labor der BGD-Ecosax GmbH wurden klassische Batchversuche durchgeführt, um die mikrobiellen Abbauraten der im Versuch applizierten PSM-Wirkstoffe unter kontrollierten Bedingungen sowie die Sorption der Wirkstoffe an die Bodenmatrix zu ermitteln. Für

die Versuche wurden im Juli 2020 Bodenproben in 0-30 cm und 30-90 cm Tiefe vom Füllboden der verwendeten Lysimeter in gasdichten Probebeuteln entnommen.

Ergebnisse und Diskussion

PSM-Wirkstoffe im Sickerwasser (Lysimeterversuch)

Im bisherigen Versuchszeitraum wurden keine Positivbefunde der im Versuch applizierten PSM-Wirkstoffe im Sickerwasser ermittelt (Tabelle 2). Unabhängig von der PSM-Applikation zeigten demgegenüber alle Versuchsvarianten Positivbefunde des fungiziden Wirkstoffes Tebuconazol mit zum Teil sehr hohen Konzentrationen bis maximal 17,2 µg/l (konventionelle Variante (Abbildung 2)). Es wird vermutet, dass diese Positivbefunde auf den Einsatz von gebeiztem Saatgut aus vergangenen Lysimeterversuchen zurückzuführen ist. Mit Ausnahme von Beizmitteln wurden in den Lysimetern im Vorfeld der Versuche keine PSM-Wirkstoffe eingesetzt. Eine Grundbelastung mit Tebuconazol wurde bereits im PSM-Screening des Sickerwassers vor Versuchsbeginn festgestellt. Tebuconazol ist derzeit in 6 fungiziden Saatgutbehandlungsmitteln zur Bekämpfung von diversen Pilzkrankheiten in Getreide zugelassen (BVL 2021). Die Sickerwassermengen im bisherigen Versuchszeitraum (10/2018 bis 10/2020) lagen im Bereich von 176 bis 213 mm bei einer Niederschlagsmenge von 1047 mm (Tabelle 2). Die konventionelle Variante wies die höchsten Sickerwassermengen auf. In den Monaten Mai 2019 bis Dezember 2019 sowie Mai 2020 bis Oktober 2020 wurde bei allen Lysimetern kein Sickerwasser registriert.

Batchversuche

Auf Grundlage der Batchversuche kann für die meisten PSM-Wirkstoffe ein schneller Abbau im Oberboden (0-30 cm) abgeleitet werden (Tabelle 3). Die ermittelten Halbwertszeiten lagen in einem Bereich von 9 (Diflufenican) bis 49 Tage (Spiroxamin). Im Vergleich zum Oberboden zeigten die meisten Wirkstoffe im Unterboden einen langsameren Abbau insbesondere bei den Wirkstoffen Fenpropimorph (95 Tage) und Tebuconazol (73 Tage) (Tabelle 3).

Die in den Batchversuchen ermittelten Halbwertszeiten stimmen überwiegend sehr gut mit den Angaben aus der Literatur (PPDB 2021) überein. Für die Wirkstoffe lambda-Cyhalothrin, Diflufenican und Pendimethalin werden allerdings deutlich längere Halbwertszeiten in der Literatur dokumentiert. Als Ursache hierfür werden die standortspezifischen

Tabelle 2: Sickerwasser(SW)-Mengen und Niederschläge, Pflanzenschutzmittel(PSM)-Wirkstoff- sowie Stickstoff(N)- und Kohlenstoff(C)-Konzentrationen im Sickerwasser [Mittelwert (±Standardabweichung)] im bisherigen Versuchszeitraum (10/2018 bis 10/2020).

Parameter	Varianten		
	Null	Reduziert	Konventionell
Niederschlag (mm)	1047	1047	1047
SW-Menge (mm)	176 (±17)	185 (±6)	213 (±26)
nachgewiesene PSM-Wirkstoffe im SW	Tebuconazol	Tebuconazol	Tebuconazol
Konzentration PSM (µg L ⁻¹)	2,5 (±2,1)	3,0 (±3,0)	3,2 (±2,4)
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	132,0 (±13)	162,6 (±21)	145,0 (±27)
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	0,01 (±0,00)	0,01 (±0,00)	0,01 (±0,00)
NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹)	0,03 (±0,02)	0,09 (±0,06)	0,10 (±0,08)
TN (mg L ⁻¹)	37,2 (±4)	44,8 (±6)	37,6 (±7)
TC (mg L ⁻¹)	65,4 (±3)	61,1 (±5)	51,8 (±4)
DOC (mg L ⁻¹)	17,6 (±2)	18,8 (±1)	15,8 (±0,4)

Wirkstoffe	Halbwertszeiten (Tage) Batchversuche		Halbwertszeiten (Tage) Literatur (PPDB, 2021)	
	0-30 cm	30-90 cm	Min-Max (lab/field studies)	Einschätzung nach PPDB (2021)
Cyhalothrin, lambda	17	12	43-1000	persistent
Diflufenican	9	10	41-318	mäßig persistent
Epoxiconazol	20	31	127-1000	persistent
Fenpropimorph	22	95	10-124	nicht persistent
Flufenacet	21	29	7-37	nicht persistent
Glyphosat	27	39	1-68	nicht persistent
Pendimethalin	25	11	97-270	persistent
Spiroxamin	49	n.b.	20-145	mäßig persistent
Tebuconazol	32	73	26-92	mäßig persistent
Tribenuronmethyl	n.b.	n.b.	3-23	nicht persistent

n.b.: im bisherigen Versuchszeitraum nicht bestimmbar

Bodeneigenschaften gesehen. Es kann vermutet werden, dass der untersuchte sandige Boden aufgrund einer guten Durchlüftung einen rascheren Abbau aufweist. Der in den Batchversuchen ermittelte schnelle Abbau bestätigt die Sickerwasseruntersuchungen des Lysimeterversuches, bei denen keine Positivbefunde der applizierten Wirkstoffe nachgewiesen wurden. Allerdings kann die im Lysimeterversuch beobachtete Persistenz des Wirkstoffes Tebuconazol nicht anhand der Ergebnisse des Batchversuches nachvollzogen werden. Hier können eventuell die aktuell noch nicht abgeschlossenen Sorptionsversuche weitere Hinweise geben. Es ist aus der Literatur bekannt, dass die Sorption von PSM-Wirkstoffen an Ton, organische Substanz bzw. Ton-Humus-Komplexe und die Bildung von nicht extrahierbaren Rückständen im Boden den mikrobiellen Abbau einschränken (Al-Rajab et al. 2008). Hierdurch können PSM-Rückstände über längere Zeit im Boden akkumulieren und zu zeitlich verzögerten Austrägen führen, wie bereits in vorhergehenden Untersuchungen ermittelt (Tauchnitz et al. 2020).

Schlussfolgerungen

Im bisherigen zweijährigen Versuchszeitraum wurde keine Auswaschung der im Versuch applizierten PSM nachgewiesen. Diese Ergebnisse werden durch den in den Batchversuchen ermittelten schnellen Abbau der berücksichtigten PSM bestätigt. Allerdings weisen die Positivbefunde von Tebuconazol im Sickerwasser aller Varianten unabhängig von der Applikation auf eine ausgesprochene Persistenz des zur Saatgutbehandlung vor Versuchsbeginn eingesetzten Wirkstoffes hin, die anhand der Ergebnisse des Batchversuches nicht bestätigt wird. Es wird angenommen, dass aufgrund von Sorption und Bildung nicht extrahierbarer Rückstände der Wirkstoff im Boden akkumulierte und zu zeitlich verzögerten Austrägen führte. Diese Vermutung sollte in fortsetzenden Untersuchungen berücksichtigt werden, um gezielt Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität abzuleiten.

Literatur

Al-Rajab A.J., Amellal S., Schiavon M. (2008) Sorption and leaching of ¹⁴C-glyphosate in agricultural soils. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 419-428.

BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) (2021) Zugelassene Pflanzenschutzmittel. Stand 22.01.2021: <https://app2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp>.

Tabelle 3: Ermittelte Halbwertszeiten für die berücksichtigten Wirkstoffe in den Batchversuchen (=vorläufige Ergebnisse) sowie Literaturvergleich (PPDB, 2021).

Meissner R., Rupp H., Seeger J., Ollesch G., Gee G.W. (2010) A comparison of water flux measurements: passive wick-samplers versus drainage lysimeters. *British Society of Soil Science: European Journal of Soil Science* 61, 609-621.

Munz N.A., Burdon F.J., de Zwart D., Junghans M., Melo L., Reyes M., Schönenberger U., Singer H.P., Spycher B., Hollender J., Stamm C. (2017) Pesticides drive risk of micropollutants in wastewater-impacted streams during low flow conditions. *Water Research* 110, 366-377.

Mutzner L., Mangold S., Dicht S., Bohren C., Vermeirssen E.L.M., Scheidegger A., Singer H., Ort C. (2019) Mikroverunreinigungen aus Siedlungen. Messungen mit 20 Mischwasserentlastungen mit Passivsammlern. *Aqua & Gas* 10, 28-35.

PPDB (Pesticide Properties DataBase), University of Hertfordshire (2021) <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/> (letzter Zugriff am 27.01.2021).

Tauchnitz N., Kurzius F., Rupp H., Schmidt G., Hauser B., Schrödter M., Meissner R. (2020) Assessment of pesticide inputs into surface waters by agricultural and urban sources – A case study in the Querne/Weida catchment, central Germany. *Environmental Pollution* Vol. 267, 115186.

Transport von organischen Umweltchemikalien in Lössböden

Thomas Demmel^{1*}, Thomas R. Rüde¹, Jan Schwarzbauer² und Uwe Boester¹

Zusammenfassung

Diese Studie untersucht an zwei Lysimetern der hydrologischen Station Rheindahlen das Transportverhalten von fünf verbreiteten organischen Umweltchemikalien (TMDD, DEET, NBBS, HHBC und Bisphenol A) mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften in Löss-Parabraunerden über einen Zeitraum von vier Jahren und einem Transportweg von 2 m. Die beiden Lysimeter unterscheiden sich in der Bedeutung präferentieller Fließwege gegenüber dem Matrixfluss. Der Stoffdurchgang der Umweltchemikalien korreliert im Wesentlichen mit den spezifischen Stoffeigenschaften. Der Einfluss der präferentiellen Fließwege wirkt sich in Form zahlreicher durch Niederschläge induzierter Einzelpeaks und einem daraus resultierenden größeren Wiedererhalt im Vergleich zum Matrix dominierten Vergleichslysimeter aus. Auch im Matrix dominierten Lysimeter treten immer wieder Einzelpeaks als Folge der Dynamik zwischen stoffspezifischer Interaktion mit der Bodenmatrix und durch Niederschlag getriebener Sickerwasserbewegung auf.

Schlagwörter: Matrixfluss, Stoffeigenschaften, konservative Tracer, Wiedererhalt

Summary

This study examines the transport behavior of organic environmental chemicals in loess luvisols over a period of four years and a transport distance of 2 m using two lysimeters at the Rheindahlen hydrological site. We selected five anthropogenic often-used trace substances (TMDD, DEET, NBBS, HHBC and Bisphenol A) from different areas of application with different material properties. The two lysimeters differ in the importance of preferential flow compared to the matrix flow. The transport behavior of the environmental chemicals correlates with the specific substance properties. The influence of the preferential flow paths leads to numerous individual peaks induced by precipitation and resulting in a greater recovery compared to the lysimeter dominated by matrix flow. Even in the matrix flow dominated lysimeters, single peaks occur because of the dynamics between substance-specific interaction with the soil matrix and seepage water movement driven by precipitation.

Keywords: matrix flow, substance properties, conservative tracer, recovery

Einleitung

Diese Studie untersucht in Kooperation mit der NEW NiederrheinWasser GmbH an zwei Lysimetern der hydrologischen Station Rheindahlen das Transportverhalten von organischen Umweltchemikalien in Löss-Parabraunerden über einen Zeitraum von vier Jahren. Die Lysimeterstation wurde 1982 in Betrieb genommen und dient primär als Prognoseinstrument und für wasserwirtschaftliche Entscheidungen im Großraum Mönchengladbach (NEW AG 2012). Vor dem Hintergrund der intensiven Grundwasser-

¹ RWTH Aachen University, Hydrogeologie, Lochnerstraße 4-20, D-52064 Aachen; ² RWTH Aachen University, Labor für organisch-geochemische Analytik, Lochnerstraße 4-20, D-52064 Aachen

* Ansprechpartner: Dr. Thomas Demmel, email: demmel@hydro.rwth-aachen.de

bewirtschaftung dieser Region und dem Einfluss der Sumpfung der Braunkohlentagebaue des Rheinischen Reviers liefert die Lysimeterstation Rheindahlen wertvolle Grundlagendaten für Wasserwirtschaft und Wissenschaft.

Als Umweltchemikalien werden Chemikalien beschrieben, die durch menschliches Zutun in die Umwelt gelangen. Viele davon sind geeignet, Mensch und Natur zu schädigen. Für den hier vorgestellten Lysimeterversuch wurden fünf Stoffe (TMDD, DEET, NBBS, HHBC und Bisphenol A) aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften ausgewählt, die aufgrund ihrer verbreiteten Nutzung häufig in Bodensickerwasser und Grundwasser anzutreffen sind. Als konservative Tracer kamen Bromid und Uranin zum Einsatz. Die beiden Lysimeter unterscheiden sich in der Bedeutung präferentieller Fließwege gegenüber dem Matrixfluss.

Material und Methoden

Die vier wägbaren, monolithischen Lysimeter besitzen eine kreisrunde Fläche von 1 m², zwei davon mit 2 m und zwei mit 3 m Mächtigkeit. Für die Untersuchung verwendet wurden die Lysimeter 3 (L3) und Lysimeter 4 (L4) mit 2 m Mächtigkeit. Die ortsnah gewonnenen Bodenmonolithen beinhalten für die Region typische Löss-Parabraunerden, die die am häufigsten auftretende Bodenvergesellschaftung darstellen. Die Lysimeter sind mit Gras bewachsen (Abbildung 1). Im Umfeld der Lysimeter werden zudem meteorologische Messgrößen erhoben.

Zur Stoffaufgabe wurden die Organika und Tracer in 5 L Wasser gelöst und mit einer Gießkanne gleichmäßig auf die Kreisfläche aufgebracht. Anschließend wurde die eingesickerte Lösung mit weiteren 5 L Wasser eingespült.

Während des rund 4-jährigen Versuchszeitraums (Juli 2016 - August 2020) erfolgte die Probenahme automatisiert mit Probennehmern. Mit einem 2-tägigen Beprobungsintervall



Abbildung 1: links: Lysimeter mit Einrichtung zur Probenahme und Bromidmessung im Durchfluss; rechts oben: Lysimeter mit Grasbewuchs; rechts unten: Durchflusszelle zur automatischen Probenahme nach Versuchsumbau.

Tabelle 1: Übersicht über die aufgebrauchten Umweltchemikalien und Tracer.

Stoff	Aufgabemasse	Nutzungsbereich	Stoffeigenschaften
TMDD (2,4,7,9-Tetramethyl-5-decin-4,7-diol)	100 mg	Tensid, Anwendung in Drucker-tinten, Entschäumungsmittel, Dispersionsmittel	in Wasser löslicher Stoff, gewässer-gefährdend, geringe bis mäßige akute Toxizität
DEET (Diethyltoluamid)	2,4 mg	häufig verwendetes Insektenabwehr-mittel, Gebrauch als Flüssigkeiten, Spray, Imprägnierungen etc.	flüssig, in Wasser sehr gering löslich, in hohen Konzentrationen gewässergefährdend
NBBS (N-Butylbenzolsulfonamid)	100 mg	Additiv in Polyamidharzen, Weich-macher, Nutzung z.B. in Druckertinten, Oberflächenbeschichtungen und Klebstoffen	viskose, in Wasser praktisch unlösliche Flüssigkeit, schwerer als Wasser, ge-wässergefährdend, akute und chronische Gesundheitsgefährdung
HHCB (1,3,4,6,7,8-Hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethyl-cyclopenta[g]-2-benzopyran)	2,4 mg	synthetischer Duftstoff (Moschus), An-wendung in Kosmetika, Körperpflege-mittel u.ä., sehr weit verbreitet	viskose Flüssigkeit, gewässergefährdend, wasserlöslich
Bisphenol A	100 mg	Ausgangsstoff für Kunststoffe, Weichmacher, Ausgangsstoff für Flammenschutzmittel	gering in Wasser löslicher Stoff, gewässer-gefährdend, akute und chronische Gesund-heitsgefährdung, rascher Abbau unter aeroben Bedingungen
Natriumbromid	40 g	Konservativer Salztracer	
Uranin	10 g	Konservativer Fluoreszenztracer	

wurde die Erfassung von dem in Lysimeter 4 erwarteten schnellen Stoffdurchgang über präferentielle Fließwege sichergestellt. Parallel dazu wurde Bromid mit ionenselektiven Messsonden im Durchfluss gemessen. Im November 2016 wurde die Beprobung auf ein 7-tägiges Intervall umgestellt und zudem ein Probenahmebehälter mit minimiertem Totvolumen installiert sowie von kontinuierlicher Bromidmessung auf Intervallmessung umgestellt (*Abbildung 1*).

Die Analysen der Tracer erfolgten für Bromid mit ionenselektiven Messsonden bzw. mit Ionenchromatographie (IC), für Uranin mit Fluoreszenzspektrometrie und für die Umweltchemikalien mit Gaschromatographie (GC) und Gaschromatographie-Massen-spektrometrie (GC/MS).

Ergebnisse

Charakteristika des Sickerwasseranfalls

Die mittlere Jahresniederschlagshöhe bezogen auf Wasserwirtschaftsjahre in den vergangenen zehn Jahren beträgt rund 645 mm/a (Daten: Hydrologische Station Rheindahlen, NEW AG), die mittlere Jahressickerwasserhöhe von L3 251 und von L4 241 mm/a (*Abbildung 2*). In 2018 ist eine deutlich unter dem Mittelwert liegende Jahresniederschlagshöhe von 538 mm/a zu verzeichnen. Dies resultiert in einem späten ersten Sickerwasseranfall Mitte bis Ende Januar 2019, wohingegen in den übrigen Jahren ein erstes Sickerwasser bereits im November oder Dezember zu verzeichnen ist. Während der Versuchszeit fiel an 51 von 1417 Versuchstagen mehr als 10 mm/d und davon an 6 Tagen mehr als 20 mm/d Niederschlag an.

Bei vergleichender Betrachtung der Histogramme der Tageswerte der Sickerwasserhöhen beider Lysimeter ist in Lysimeter 3 eine deutliche Mehrzahl an Tagen ohne Sickerwasseranfall zu beobachten (*Abbildung 3*). Die in Lysimeter 4 häufiger auftretenden Tage mit Sickerwasseranfall spiegeln das Vorhandensein von präferentiellen Fließwegen wider. Dies betrifft im Wesentlichen tägliche Sickerwasserhöhen bis 2 mm/d und weniger

Abbildung 2: links: Niederschlags- und Sickerwasserhöhen Wasserwirtschaftsjahre 2011/12 - 2019/20, Histogramm der Tagesniederschläge während der Versuchslaufzeit (07/2016 - 08/2020) (Daten: Hydrologische Station Rheindahlen, NEW AG).

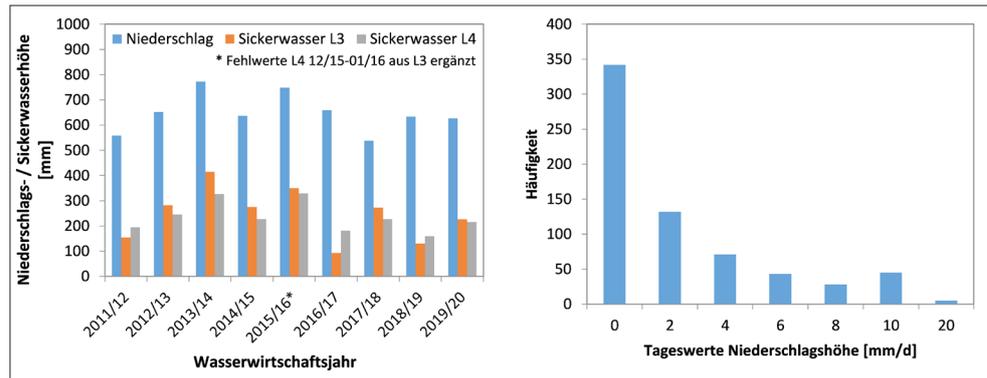
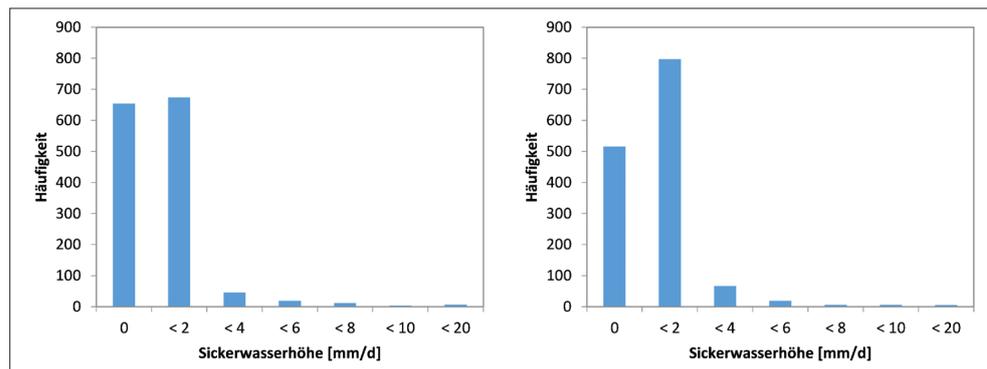


Abbildung 3: Histogramm der Sickerwasserraten von L3 (links) und L4 (rechts) während der Versuchslaufzeit.



deutlich bis 4 mm/d. Ein größerer Sickerwasseranfall tritt in beiden Lysimetern selten auf und nicht häufiger in Lysimeter 4.

In der langjährigen Betrachtung der Sickerwasserhöhe seit Inbetriebnahme im Jahr 1982 zeigt Lysimeter 4 i.d.R. 10-20% höhere Spitzenwerte. Bis 1990 springt Lysimeter 3 häufig rascher an, ab 1990 häufiger Lysimeter 4. Dies ist ein Indiz für eine allmähliche Entwicklung einer Randumläufigkeit in Lysimeter 4. Im Versuchszeitraum ergeben sich leicht unterschiedliche Sickerwasserhöhen von 732 mm (L3) bzw. 808 mm (L4).

Stoffdurchgang

Der Durchgang von Bromid als konservativer Tracer verläuft im matrixbetonten Lysimeter 3 gleichmäßig als eine im Wesentlichen unimodale Durchgangskurve. Der Bromiddurchgang in Lysimeter 4 zeigt insbesondere im 2. und 3. Jahr nach anfänglich hohen Konzentrationen abfallende Werte gegen Ende der Sickerperioden, die auf Wechselwirkungen zwischen Matrix und präferentiellen Fließwegen hinweisen. Uranin als Tracer (nicht dargestellt) wurde im Matrixfluss dominierten Lysimeter 3 nur vereinzelt in Konzentrationen oberhalb der Nachweisgrenze detektiert. In Lysimeter 4 mit dominierendem präferentiellen Fließen war zu Beginn ein ähnliches Verhalten wie bei Bromid zu beobachten, aber bereits ab dem 2. Versuchsjahr bis Versuchsende zeigten sich nur noch geringe Konzentrationen ohne interpretierbare Kurvenfunktion.

Der langanhaltende Austrag von Uranin in Lysimeter 4 lässt einen Verbleib in größeren Poren oder Hohlräumen entlang des Lysimeterrandes ohne große Reaktionsoberflächen wie im Matrixfluss in L3 vermuten. Diese Hohlräume sind jedoch nicht durchgängig verbunden, so dass nur ein allmählicher Austrag stattfindet. Diese These wird zudem gestützt durch nur selten auftretende höhere Sickerwasserhöhen > 4 mm/d, die zudem ähnlich häufig ausfallen wie in Lysimeter 3 (Abbildung 3).

Die Durchgangskurven der Umweltchemikalien zeigen ein differenzierteres Bild, das je Lysimeter im Wesentlichen mit den spezifischen Stoffeigenschaften korreliert (Abbildung 4). HHCb und Bisphenol A (nicht dargestellt) konnten im Sickerwasser nur in sehr geringen

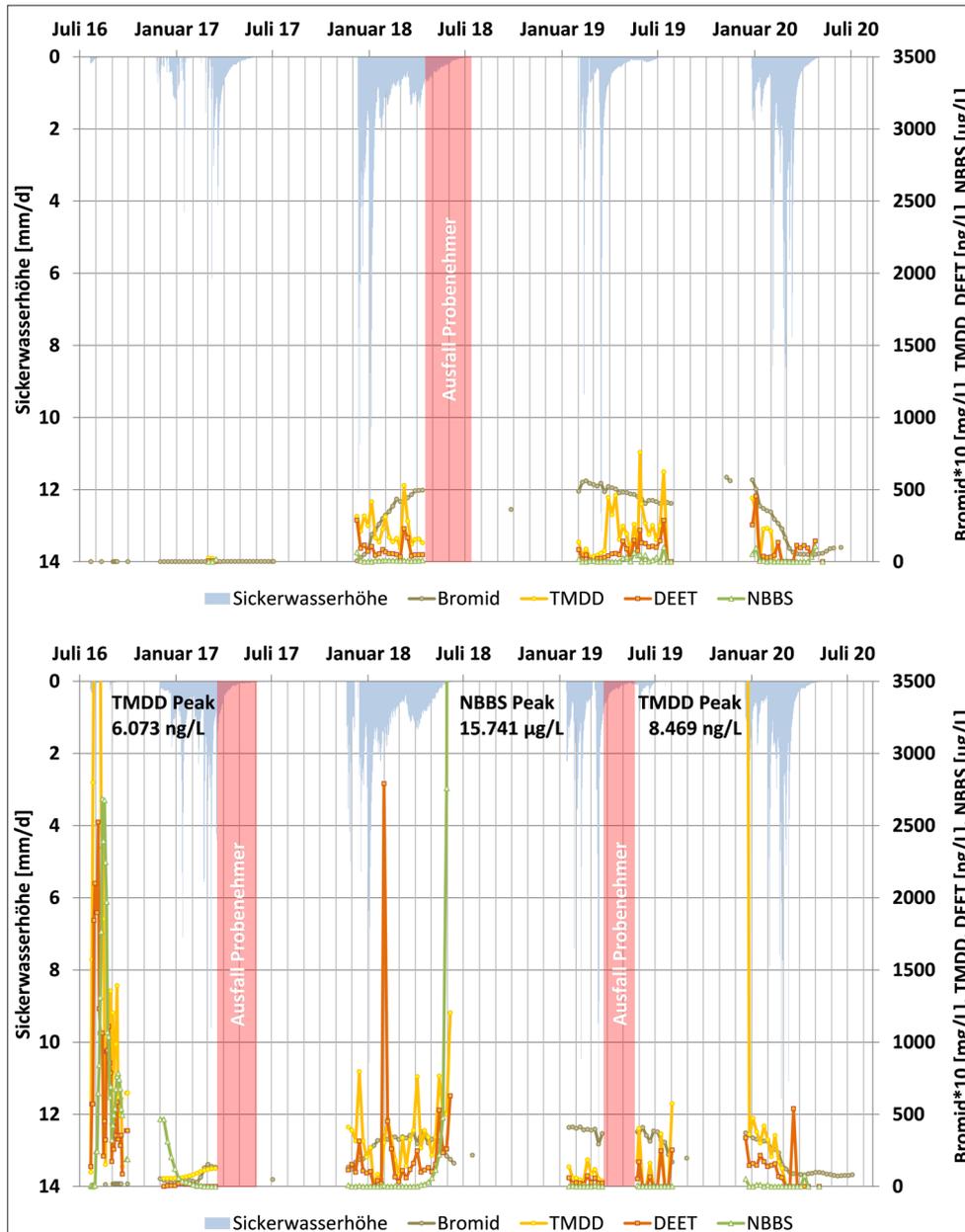


Abbildung 4: Durchgangskurven von Bromid, TMDD, DEET und NBBS an Lysimeter 3 (oben) und 4 (unten). Bei geringen Probenvolumina ist eine Messung der Umweltchemikalien im Gegensatz zu Bromid nicht möglich.

gen Konzentrationen vereinzelt nachgewiesen werden. Dies zeigt einen Rückhalt oder Abbau in der Bodensäule an.

Die mobilere Organika TMDD, DEET und NBBS konnten durchgängig detektiert werden. In Lysimeter 4 ist ein Durchbruch bereits in der ersten Probe (48h nach Aufgabe) zu beobachten, wohingegen der Durchbruch in Lysimeter 3 erst im Dezember 2017 erfolgt. In Lysimeter 4 fallen häufige Spitzenwerte auf, die auf ein Auswaschen in die präferentiellen Fließwege hindeuten. Die Durchgangskurven unterscheiden sich in ihrer Form deutlich vom Bromidtracer.

NBBS zeigt eine deutlich größere Konzentrationsspanne mit Maximalwerten bis in den mg/L-Bereich in Lysimeter 4. Hier sind häufig Perioden mit sehr niedrigen Konzentrationen, teilweise unter der Nachweisgrenze zu beobachten.

DEET und TMDD verlaufen im Wesentlichen ähnlich. Nach dem trockenen Sommer 2018 liegen die Konzentrationen deutlich niedriger und erreichen erst gegen Ende der Sickerwasserperiode 2018/19 annähernd Konzentrationen wie zum Ende der vorangegangenen

Periode. In der Sickerwasserperiode 2019/20 zeichnen beide Stoffe den abfallenden Kurvenverlauf des Bromidtracers nach.

Ab Ende Februar 2020 überwiegen in beiden Lysimetern Sickerwässer mit Konzentrationen der Umweltchemikalien unterhalb der Nachweisgrenze.

Wiedererhalt

Der Wiedererhalt des verwendeten Bromidtracers beträgt in beiden Lysimetern rund 40 - 45% (Tabelle 2). Lysimeter 4 ist im konservativen Transport in der Anfangsphase deutlich schneller, gleicht sich dann von Jahr zu Jahr an Lysimeter 3 an (Abbildung 5). Im nicht konservativen Transport bei DEET und NBBS zeigt sich das noch ausgeprägter (Verhältnis 1:2 bzw. 1:4). Der Wiedererhalt von TMDD, HHCB und Bisphenol A liegt deutlich unter 1%. Der Wiedererhalt wird hier etwas unterschätzt, da für mehrere Wochen mit vergleichsweise geringem Sickerwasseranfall nach Ausfall der Probennehmer keine Proben vorliegen (siehe Abbildung 4).

Diskussion und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen deutlich den Einfluss präferentieller Fließwege als Eintragspfad für mobile organische Spurenstoffe in das Grundwasser. Beim Matrix dominierten Fließen wird dagegen deutlich mehr zurückgehalten oder abgebaut. Der Einfluss der präferentiellen Fließwege wirkt sich in Form zahlreicher durch Niederschläge induzierter Einzelpeaks und einem daraus resultierenden größeren Wiedererhalt im Vergleich zum Matrixfluss dominierten Vergleichslysimeter aus. Auch im Matrixfluss dominierten Lysimeter treten immer wieder Einzelpeaks als Folge der Dynamik zwischen stoffspezifischer Interaktion mit der Bodenmatrix und durch Niederschlag getriebener Sickerwasserbewegung auf.

Tabelle 2: Wiedererhalt der auf-gebrachten Umweltchemikalien und Tracer im Versuchszeitraum.

Lysimeter	Bromid, Eingabe 40 g	Uranin, Eingabe 10 g	NBBS, Eingabe 100 mg	TMDD, Eingabe 100 mg	DEET, Eingabe 2,4 mg	Bisphenol A, Eingabe 100 mg	HHCB, Eingabe 2,4 mg
3	41,7 %	< 0,01 %	3,3 %	0,1 %	1,5 %	< 0,01 %	0,2 %
4	44,5 %	0,01 %	13,6 %	0,1 %	3,3 %	< 0,01 %	0,1 %

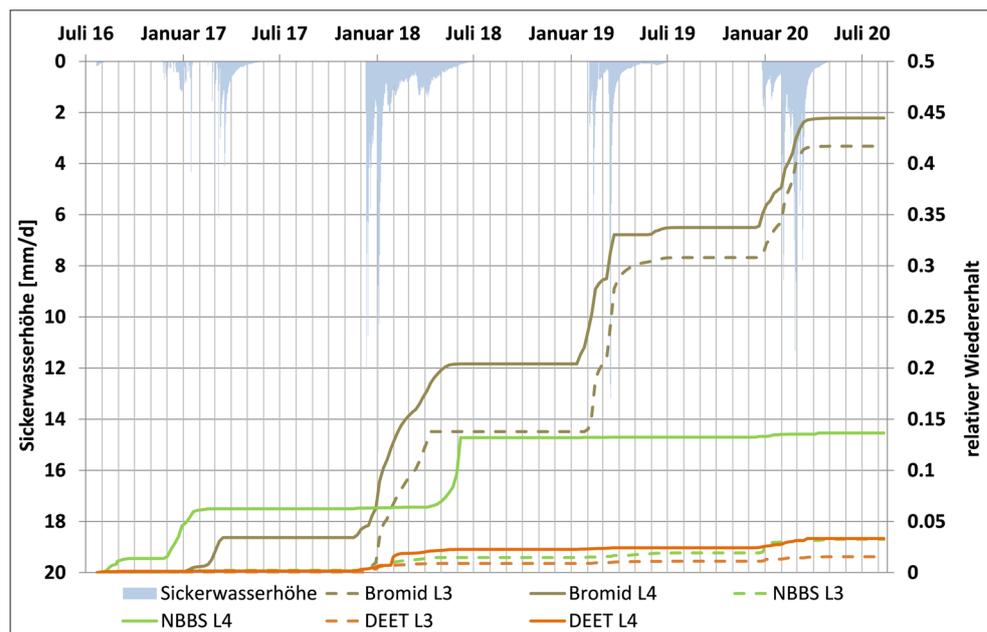


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung des Wiedererhalts von Bromid, NBBS und DEET an Lysimeter 3 und 4.

Danksagung

Die Nutzung der Lysimeterstation Rheindahlen erfolgt im Rahmen eines Kooperationsvertrages der NEW Niederrheinwasser GmbH mit der RWTH Aachen. Wir danken Herrn Schumacher und Herrn Schindler für diese Möglichkeit und Herrn Schroers für die Unterstützung bei der Einrichtung und Betreuung der Beprobungsautomaten. Wir danken den Labormitarbeiterinnen für die zahlreichen Analysen.

Literatur

NEW AG 2012. Wetter und Wasser – Wasserhaushalt in Mönchengladbach. NEW AG. Mönchengladbach.

Wasserverbrauch und Wachstumsdynamik von *Quercus frainetto* und *Tilia cordata*

Martin Schreiner^{1*}, Barbara Jäckel¹, Jürgen Müller², Alexander Block³
und Falk Böttcher⁴

Zusammenfassung

Für den Erhalt und das Pflanzen von Stadtbäumen sind neue Strategien zur Anpassung an die veränderten Bedingungen erforderlich, die auf Einzelbaumebene Anwendung finden müssen. Mit Lysimetern wurden Wasserhaushaltsuntersuchungen von Ungarischer Eiche (*Quercus frainetto*) und Winterlinde (*Tilia cordata*) durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigten Unterschiede in der Dynamik und im Gesamtwasserverbrauch beider Baumarten sowie auf Trockenheit. Die Ergebnisse finden bei der Erweiterung des zukünftigen Stadtgrüns ihre Anwendung.

Schlagwörter: Stadtbäume, Lysimeter, Transpiration, Wasserhaushalt, Radialzuwachs

Summary

The processes of planning, planting, and maintenance of urban trees require new strategies adapted to the changing conditions, applied on the individual tree level. Water balance studies of Hungarian oak (*Quercus frainetto*) and lime tree (*Tilia cordata*) were carried out with lysimeters. First results showed the differences in the dynamics and total amount of annually consumed water and in the reaction of drought. The results are now being used in the renewal of future urban green spaces.

Keywords: City trees, Lysimeter, transpiration, water balance, radial growth

Einleitung

Im Zuge veränderter Klimabedingungen wird seit geraumer Zeit nach Baumarten gesucht, die diesen Klimaveränderungen trotzen. Zudem potenzieren sich diese Umwelteinflüsse im urbanen Raum auf die dortigen Vegetationsbestände – und insbesondere auf Bäume. Daher ist es von großem Interesse, geeignete Baumarten zu finden, die einerseits zukünftig mit diesen Umwelteinflüssen im umbauten Raum zurechtkommen und andererseits wichtige stadtoökologische Funktionen optimal erfüllen. Als eine dieser Zukunftsbaumarten gilt *Q. frainetto* (Roloff et al. 2008, Schönfeld 2018). Der Wasserhaushalt dieser Baumart wurde mit der in Berlin mit Abstand am häufigsten im Stadtgrün eingesetzten *T. cordata* untersucht.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich im Wesentlichen auf die erste Vegetationsperiode der Untersuchung 2019 und wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit erarbeitet. Sie sind Bestandteil eines dreijährigen Projekts des Pflanzenschutzamtes Berlin, des Deutschen Wetterdienstes sowie des Naturwissenschaftlichen Vereins Eberswalde e.V. zur „Wasserhaushaltsmodellierung zur Erhöhung der Resilienz von Straßebäumen in Berlin“, finanziert durch das Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm 2030 des Berliner Senats.

¹ Pflanzenschutzamt Berlin, Mohriner Allee 137, D- 12347 Berlin, ² Naturwissenschaftlicher Verein Eberswalde e.V., Eberswalder Str. 17 A, D-16244 Schorfheide, ³ Wilsnacker Str. 38a, D-10559 Berlin, ⁴ Deutscher Wetterdienst, Außenstelle Leipzig, Kärnerstraße 68, D-04282 Leipzig

* Ansprechpartner: M. Eng. Martin Schreiner, email: martin.schreiner@senuvk.berlin.de

Material und Methoden

Im Frühjahr 2019 wurden auf der Lysimeterstation in Eberswalde *T. cordata* und *Q. frainetto* in je drei Lysimeter gepflanzt (Block 2020). Diese waren mit Finowtaler Sand-Braunerde (Bodenart sS nach KA5) befüllt. Die Bepflanzung der Lysimeter mit den Versuchsgehölzen erfolgte doppelt, also 2 Pflanzen je Lysimeter (Abbildung 1). Die Lysimeteroberfläche wurde mit Holzhackschnitzel abgedeckt. Zur Pflanzung erfolgte eine Wassergabe, eine weitere im Frühsommer.

Als Messtechnik zum Wasserhaushalt und Zuwachs kamen neben den Lysimetern und Bodenfeuchte (Senteksonde) je Baumart ein Saftflussmessgerät des Typs ICT-SFM1 (HRM) zum Einsatz sowie je Baum ein Durchmesserdendrometer des Typs DDS-1 in 15 cm Höhe am Stamm angebracht. Die klimatischen Parameter wurden mittels einer in unmittelbarer Nähe zur Lysimeteranlage befindlichen meteorologischen Station erfasst.

Die Bodenfeuchte in fünf Bodentiefen, der Stammdurchmesser und die meteorologischen Parameter wurden stündlich, der Saftfluss in einem Intervall von 15 Minuten gemessen und auf einem Datenlogger gespeichert.

Die ermittelte Evapotranspiration der Lysimeterbäume sind Wochenwerte. Sie wurde nach der Wasserhaushaltsgleichung berechnet:

$$V = -Dw + (N100 * A) - D$$

V = Evapotranspiration [l]

Dw = Bodenwasservorratsänderung [kg]

N100 = Niederschlagsmenge in 100 cm Höhe [mm]

A = Lysimeter-Grundfläche [m²]

D = Durchflussmenge (Sickerwasser) [l]

Ergebnisse

Klimatische Bedingungen im Versuchszeitraum

Am Versuchsstandort betrug die Niederschlagsmenge 370 mm im Zeitraum vom 24.03.2019 bis 17.11.2019. Während dieser Zeit gab es drei trockene Perioden mit nur wenig Niederschlag: Ende April bis Mitte Mai, Mitte Juni bis Anfang Juli und Mitte August bis Mitte September. Drei Nächte in der 1. Maihälfte wiesen leichte Fröste auf. Insgesamt gab es 27 Hitzetage, wovon 7 Tage eine T_{max} von $> 35^{\circ}C$ erreichten. Ende Juni gab es die heißesten Tage mit den höchsten Werten an Globalstrahlung (Wochenmittel $293,8 W/m^2$) (Abbildung 2).

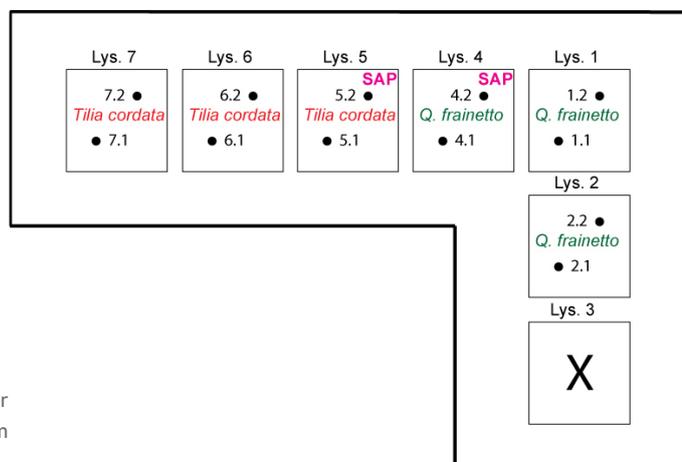


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Versuchs auf dem Drachenkopf in Eberswalde.

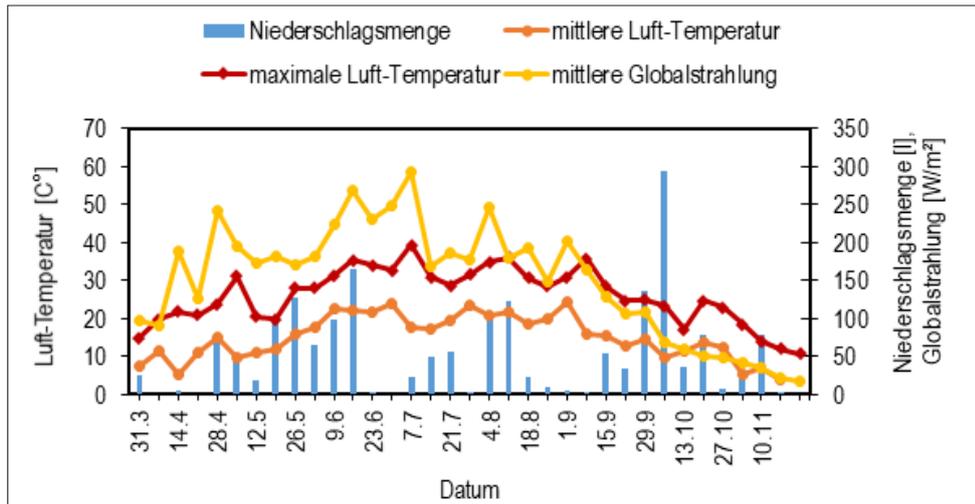


Abbildung 2: Wochenwerte der klimatischen Bedingungen am Versuchsstandort Eberswalde Drachenkopf im Beobachtungszeitraum vom 20.03.2019 bis 17.11.2019.

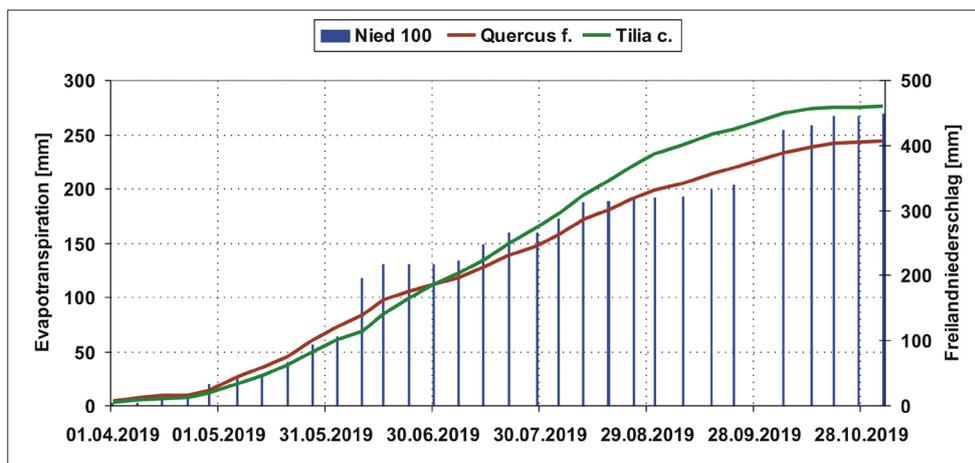


Abbildung 3: Kumulierte wöchentliche Evapotranspirationen der Lysimeter im Zeitraum vom 01.04.2019 bis 17.11.2019. Alle Lysimeter sind jeweils doppelt bepflanzt.

Wasserbilanzmessung mit Lysimeter

Lysimeter-Evapotranspiration

Die mit *T. cordata* bepflanzten Lysimeter wiesen bis zum Vegetationsende höhere Evapotranspirationen auf, als die mit *Q. frainetto* bepflanzten Lysimeter. Durch die frühere und intensivere Blattentwicklung von *Q. frainetto* im Mai/Juni ist die Verdunstung größer als die von *T. cordata*. Ab Mitte Juli unterscheiden sich diese mit *T. cordata* bepflanzten Lysimeter zu denen mit *Q. frainetto* bepflanzten zunehmend (Abbildung 3). Tabelle 1 beinhaltet die Werte der kumulierten Evapotranspirationen der Lysimeter 2, 4, 5, 6, 7 im Zeitraum vom 25.03.2019 bis 17.11.2019.

Zu Beginn des Julis 2019 zeigten alle *Q. frainetto* leichte Welkeerscheinungen. Bei *T. cordata* waren diese Erscheinungen nicht zu beobachten. Bei den wöchentlichen Evapotranspirationen ist der starke Rückgang der Verdunstung bei *Q. frainetto* zwischen dem 23.06. und 14.07. auffällig. Unterschiede zeigen sich im Vergleich der beiden Baumarten zudem in der Dynamik der Verdunstungsmengen. Die mit *T. cordata* bepflanzten Lysimeter steigern sich ab Messbeginn wöchentlich und erreichen ihren Höhepunkt gegen Ende August (gemittelt 17,6l/Woche). Zudem war ab diesem Zeitpunkt ihr Wachstum weitestgehend abgeschlossen. Danach sinken die Werte stetig bis Ende Oktober auf 1l/Woche ab. Die mit *Q. frainetto* bepflanzten Lysimeter hingegen weisen verhältnismäßig hohe Verdunstungsmengen schon zu Beginn der Vegetationsperiode ab Ende April auf. Hier wird Ende Mai der höchste Wert mit 15,7l/Woche gemessen.

Tabelle 1: Evapotranspirationsmengen (gerundet) vom 25.03.2019 bis 17.11.2019.

Baumart	Q. frainetto		T. cordata		
Lysimeter Nr.	2	4	5	6	7
Verdunstungsmenge [l]	244	245	261	272	297

Abbildung 4: Gemittelte wöchentliche Evaptranspirationsmengen der Lysimeter 2, 4 (Q. frainetto), und der Lysimeter 5, 6, 7 (T. cordata) im Verlauf vom 01.04.2019 bis 17.11.2019.

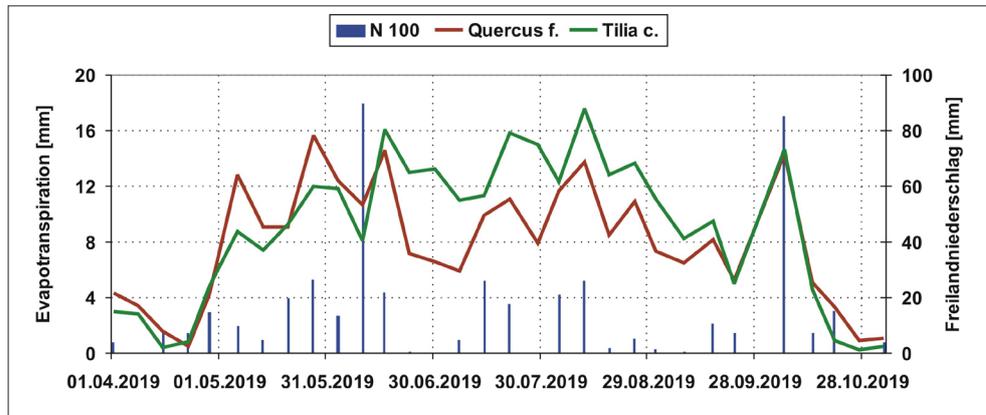
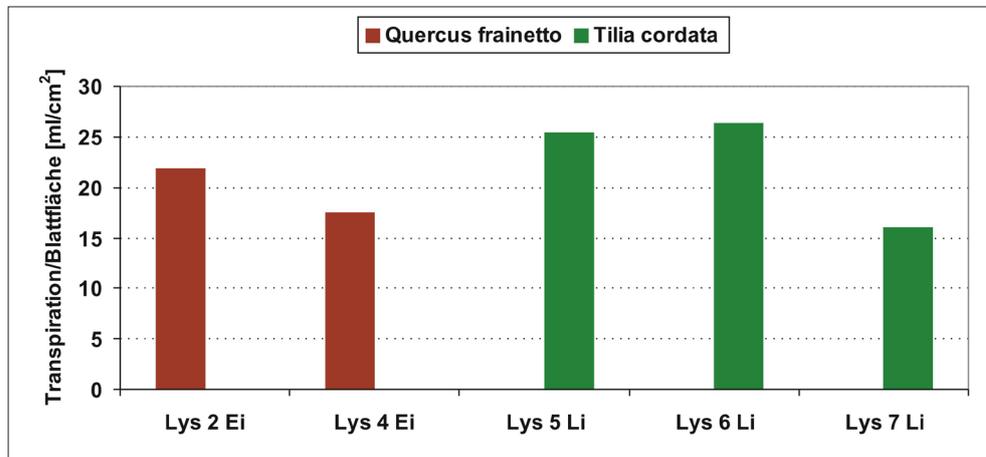


Abbildung 5: Transpirationsmenge pro Blattfläche von Q. frainetto und T. cordata vom 25.03.2019 bis 17.11.2019.



Nach dem 25.08. gehen auch hier die wöchentlichen Evapotranspirationsmengen zurück, jedoch weniger stark abfallend als bei *T. cordata* (Abbildung 4).

Transpiration

Bezogen auf die Blattfläche beträgt die durchschnittliche Transpirationsmenge im Beobachtungszeitraum vom 25.03. bis 17.11. bei *Q. frainetto* 22,67 ml/cm², bei *T. cordata* 24,71 ml/cm². Die Blattfläche der im Juli vorzeitig abgeernteten, nekrotischen Blätter von *Q. frainetto* wurde hierbei nicht berücksichtigt. *Abbildung 5* zeigt das Verhältnis von Transpirationsmenge [ml] zu Blattfläche [cm²] für alle Lysimeter.

Bei den täglichen Saftflussmengen im Verlauf des Beobachtungszeitraums war bei beiden Baumarten ein deutliches Profil feststellbar, mit Spitzenwerten Mitte Juni und Mitte August und einer Reduzierung in den niederschlagsarmen Zeiträumen zwischen dem 17.06. und 07.07.– letztere lag bei *T. cordata* um 80 % und bei *Q. frainetto* um gut 65 % der maximal gemessenen täglichen Saftflussmenge. Differenzierungen zeigen sich hingegen während der Trockenphase ab Mitte August. Während *T. cordata* die Transpiration stark zurückfährt, hält *Q. frainetto* hohe Werte aufrecht und kann zudem bis zum Beobachtungsende am 27.10. die täglichen Saftflussmengen im Gegensatz zu *T. cordata* weiterhin auf relativ hohem Niveau stabil halten.

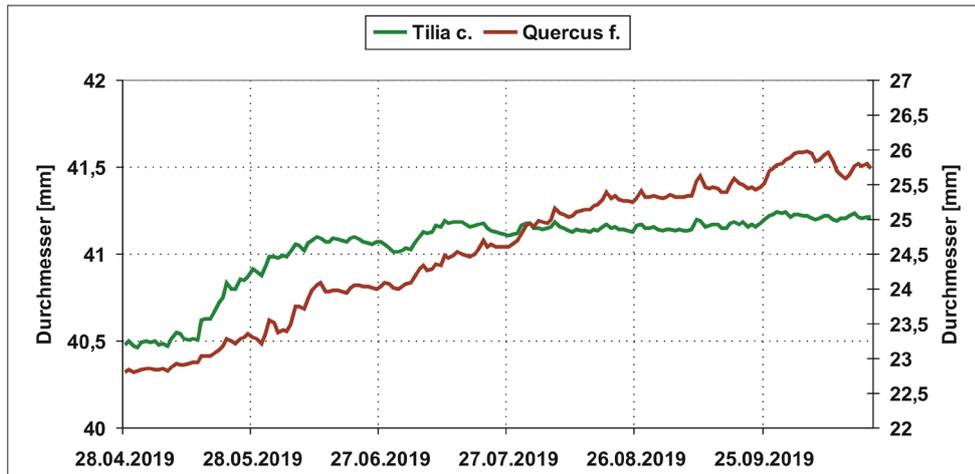


Abbildung 6: Gemittelte Tagesdurchschnittswerte der Stammdurchmesser von *Q. frainetto* und *T. cordata* im Verlauf vom 28.04.2019 bis zum 27.10.2019, n = 6.

Radialzuwachs

Beim Radialzuwachs zeigen sich deutliche Unterschiede beider Baumarten im Verlauf der Vegetationsperiode. *T. cordata* hat ihre höchste Zuwachsrate nach voller Blattentwicklung von Anfang Mai bis Ende Juni. Danach nimmt der Zuwachs ab. Während der Trockenphasen, vor allem ab Mitte August werden Schrumpfungen des Stammes registriert. Der Baum reagiert auf die zunehmende Bodenaustrocknung mit Reduktion des Radialzuwachses. Nach einsetzenden Niederschlägen werden wieder annähernd die Durchmesser von vor Beginn der Schrumpfphase erreicht (Abbildung 6).

Der Stammzuwachs der *Q. frainetto* ist während der Vegetationsperiode im Gegensatz dazu stetig steigend. Die Zuwachsphase erstreckt sich bis Anfang Oktober. Der Verlauf des Zuwachses ist wie bei der *T. cordata* geprägt von Schrumpfung und Quellung des Stammes in Abhängigkeit von Bodenaustrocknung und Niederschlag. Welcher der beiden Baumarten sensitiver auf längere Trockenphasen reagiert, ist nach dem ersten Versuchsjahr noch nicht abschließend zu beantworten.

Diskussion

Die Unterschiede in der Transpirationsmenge pro Blattfläche zwischen den beiden Baumarten sind relativ gering, mit leicht höheren Werten bei *T. cordata*. Der vorzeitige Blattverlust bei *Q. frainetto* zu Anfang Juli wurde hierbei nicht berücksichtigt.

Durch fortschreitende Bodenaustrocknung, aber vor allem durch hohe Temperaturen (bis zu 39°C) und hohe Strahlungswerte reduzieren sich aufgrund physiologischer Reaktionen die täglichen Saftflussmengen bei beiden Baumarten ab Mitte Juni erheblich (Larcher 2001).

Während der Trockenperiode ab Mitte August zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten beim Saftfluss beider Baumarten. Während *T. cordata* sehr stark auf ausbleibende Niederschläge und Zunahme der Bodenaustrocknung reagiert, hält *Q. frainetto* ihren Saftfluss relativ stabil. Hier zeigt sich die vielfach beschriebene Trockenheitstoleranz dieser Baumart (Roloff et al. 2008, Sanders et al. 2014).

Der Radialzuwachs der Stämme reagiert sehr sensitiv auf Änderungen von Witterungsbedingungen. Trockenperioden während der Vegetationsperiode können hierbei zu einem zeitweisen Schrumpfen des Stammes führen (Hinckley & Bruckerhoff 1974, Hsiao 1974, Zweifel 2016).

Diese Schrumpfung des Stammes ist während der Trockenphase zwischen den Kalenderwochen 34 und 39 an den Versuchsbäumen am stärksten zu beobachten. Bei der zerstreutporigen *T. cordata* sind negative Wachstumsraten zu beobachten, die sich jedoch mit einsetzenden Niederschlägen fast vollständig umkehren, wodurch der Stammumfang

vor Beginn der Trockenperiode annähernd erreicht wird. Bei der ringporigen Baumart *Q. frainetto* sind die durch Bodentrockenheit bedingten Stammschrumpfungen geringer. Der starke Rückgang des Stammdurchmessers von *Q. frainetto* gegen Mitte Juni ist nicht auf den Bodenwasserhaushalt zurückzuführen. Der Boden ist zu dieser Zeit noch ausreichend gesättigt. Zudem bestätigen Ergebnisse aus England die Trockentoleranz der Baumart. Diese zeigen, dass das Radialwachstum von *Q. frainetto* erst abnimmt, wenn der Niederschlag unter 242 mm in der gesamten Vegetationsperiode sinkt (Sanders et al. 2014). Zum selben Zeitpunkt der Schrumpfungen zeigen zudem alle *Q. frainetto* leichte Welkeerscheinungen und nekrotische Blätter. Bei *T. cordata* zeigt sich diese äußerliche Reaktion nicht. Dies dürfte als Reaktionen auf die zu dieser Zeit sehr hohen Temperaturen (39°C) verstanden werden – was keinen Widerspruch zu den beschriebenen Eigenschaften (wärmeliebend, hitzetolerant) des Baumes darstellt, sondern um eine Anpassungsreaktion handelt, wodurch *Q. frainetto* ihre Verdunstungsfläche verkleinert um sich somit vor Austrocknung zu schützen. Auch bei *T. cordata* zeigen sich zu diesem Zeitpunkt Reaktionen im radialen Zuwachs. Hier geht der Stammzuwachs vollständig zurück und wird nach dieser Periode nicht wieder fortgesetzt. Die Ergebnisse des radialen Zuwachses während der gesamten Vegetationsperiode bestätigen die in der Literatur beschriebene Schnellwüchsigkeit von *Q. frainetto* (Glatzer & Schramm 2010). Während *T. cordata* den größten Zuwachs zwischen Anfang Mai und Mitte Juli hat, ist der Stammzuwachs von *Q. frainetto* bis Ende Oktober stetig steigend, gleichwohl wie bei *T. cordata* von Schrumpfung und Quellung des Stammes in Abhängigkeit von Boden-austrocknung und Niederschlag begleitet.

Generell lässt sich sagen, dass neben genetischen und hormonellen Faktoren der Bodenwasserhaushalt einen hohen Einfluss auf das Wachstum von Bäumen hat (Matyssek et al. 2010). Eine große Bedeutung hat dabei der Zeitpunkt der auftretenden Trockenheit (Etzold & Zweifel 2018). Ein trockener Frühling führt bei *T. cordata* zu einer starken Wachstumsreduktion, da sie zu dieser Jahreszeit die höchsten Zuwachsraten hat. Die vorliegenden Ergebnisse legen für *Q. frainetto* mit ihrem sehr linearen Radialzuwachs während der gesamten Vegetationsperiode nahe, dass sie solche Phasen besser kompensieren kann. Der Blattaustrieb setzte bei *Q. frainetto* (14. KW) gut zwei Wochen eher ein als bei *T. cordata* (16. KW).

Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass es zum Teil Unterschiede im Wasserhaushalt der untersuchten Baumarten gibt. So unterscheidet sich der Gesamtwasserverbrauch sowohl in Höhe als auch in der innerjährlichen Dynamik im Untersuchungszeitraum deutlich. Gerade unter Trockenphasen mit abnehmenden Bodenwassermengen reagiert *T. cordata* stärker mit einer Reduzierung der Transpirationsraten als *Q. frainetto*. Hinsichtlich der Zuwachsraten nach einem sommerlichen Trockenereignis steigt das Stammwachstum von *Q. frainetto* bis zum Ende der Vegetationsperiode stetig an, während *T. cordata* ab diesem Zeitpunkt nur noch ein geringes Stammwachstum aufweist. Dies lässt den Schluss zu, dass *Q. frainetto* als Zukunftsbaumart für innerstädtische Standorte unter prognostizierten veränderten Klimabedingungen Vorteile im Wachstumsverhalten hinsichtlich Trockenheitstoleranz, Wachstum und Kohlenstofffixierung gegenüber *T. cordata* aufweist.

Um dies weiter zu validieren, werden die Untersuchungen zur Erweiterung der Datengrundlage bis Ende 2021 fortgeführt.

Literatur

Block A. (2020) Vergleichende Untersuchung zum Wasserhaushalt von Stadtbäumen anhand verschiedener Messtechniken, Bachelorarbeit an der Beuth Hochschule für Technik Berlin, Studiengang Gartenbauliche Phytotechnik, 50 S.

- Ehlers W. (1996) Wasser in Boden und Pflanze, Eugen Ulmer KG, Stuttgart (Hohenheim).
- Etzold S., Zweifel R. (2018) TreeNet: Daten und Analysen der ersten fünf Messjahre. WSL-Berichte, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf CH, 5, 72, 60-63.
- Glatzer K., Schramm E. (2010) Klimabezogener Umbau der Eichenwälder mit mediterranen Eichen – Eine vorläufige Wirkungs- und Folgenabschätzung. BiKF Knowledge Flow Paper. 6, 17, 14.
- Granier A. (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *TreePhysiol.*, 3(4), 309-319.
- Hinckley T.M., Bruckerhoff D.N. (1974) The effects of drought on water relations and stem shrinkage of *Quercus alba*. *Canadian Journal of Botany* 46, 53, 62-72.
- Hsiao T.C., Acevedo E. (1974) Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. *Agricultural Meteorology*, 10, 14, 59-84.
- Larcher W. (2001) Ökophysiologie der Pflanzen. 6. 2teAufl., Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 408 S.
- Matyssek R., Fromm J., Rennenberg H., Roloff A. (2010) Biologie der Bäume. Eugen Ulmer KG, Stuttgart (Hohenheim), 349 S.
- Roloff A., Gillner S., Bonn S. (2008) Vorstellung der KLimaArtenMatrix für Stadtbaumarten (KLAM-Stadt) Gehölzartenwahl im urbanen Raum unter dem Aspekt des Klimawandels, In: Bund deutscher Baumschulen (Hrsg.) Forschungsstudien: Klimawandel und Gehölze, 30-42.
- Sanders T.G., Pitman R., Broadmeadow M.S. (2014) Species specific climate response of oaks (*Quercus* spp.) under identical environmental conditions. *iForest-Biogeosciences and Forestry*. 44, 7(2), 61-69.
- Schönfeld P. (2018) Klimabäume: welche Arten sind zukunftsträchtig?, *ProBaum* 03/2018, 2-7.
- Zweifel R. (2016) Radial stem variations – a source of tree physiological information not fully exploited yet. *Plant, Cell & Environment*, 47, 39, 231–232.

Poster

Ein Vergleich von Gesamtdeposition und nasser Deposition am Almstandort Stoderzinken

Martina Schink^{1*}, Markus Herndl¹ und Matthias Kandolf¹

Zusammenfassung

Atmosphärische Deposition trägt vor allem in vergleichsweise unbeeinflussten Ökosystemen wie Almstandorten zur Chemie von Pflanzen, Böden und Oberflächengewässern sowie zum Nährstoffkreislauf bei. Daher ist die genaue Quantifizierung vor allem der nassen Deposition für eine Vielzahl von ökologischen Fragestellungen wichtig. In dieser Studie wurden über einen Zeitraum von 6 Jahren die monatlichen Gesamtdepositionen und nassen Depositionen am Almstandort Stoderzinken, Steiermark (Österreich), verglichen. Während die gemessene Niederschlagsmenge für beide Sammlertypen annähernd gleich war, war die Gesamtdeposition bei allen Ionen außer NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} und NH_4^+ signifikant höher als die nasse Deposition. Im Durchschnitt aller Jahre war die Gesamtdeposition um 121% (K^+), 36% (Ca^{2+}), 41% (Cl^-) und 39% (Na^+) höher als die reine nasse Deposition.

Schlagwörter: Atmosphärische Deposition; Trockene Deposition; Niederschlagschemie; Nasse Deposition

Summary

Atmospheric deposition contributes to plant, soil, and surface water chemistry and nutrient cycling primarily in comparatively unaffected ecosystems such as alpine pasture sites. Therefore, accurate quantification of wet deposition in particular is important for a variety of ecological issues. In this study, during 6 years the monthly bulk and wet-only precipitation depositions were compared at the mountain pasture site Stoderzinken, Styria (Austria). While the amount of rainfall measured was almost the same for both collector types, bulk deposition was significantly higher than the wet deposition of all ions other than NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} and NH_4^+ . Averaged for all years, bulk deposition was 121% (K^+), 36% (Ca^{2+}), 41% (Cl^-), 39% (Na^+), higher than wet-only deposition.

Keywords: Atmospheric deposition; Dry deposition; Precipitation chemistry; Wet deposition

Einleitung

Atmosphärische Deposition ist vor allem in wenig anthropogen beeinflussten Gebieten wie etwa Almstandorten ein wesentlicher Bestandteil des Kreislaufs von Nährstoffen (Rogora et al. 2006). An solchen Standorten ist daher für eine Vielzahl von ökologischen Fragestellungen eine genaue Bestimmung der Nährstoffdeposition über die Atmosphäre wichtig. Grundsätzlich kann die atmosphärische Deposition in zwei Formen erfolgen, der nassen (wet-only) und der trockenen Deposition (dry-only), die zusammen als Gesamtdeposition (bulk) bezeichnet wird. Nasse Deposition ist definiert als Prozess, bei dem atmosphärische Verbindungen an Wolken- und Niederschlagströpfchen gebunden sind, darin gelöst werden und durch Regen, Hagel oder Schnee auf die Erdoberfläche gelangen

¹ Institut für Pflanzen- und Kulturlandschaft, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irnding-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: Martina Schink, email: martina.schink@raumberg-gumpenstein.at

(Draaijers et al. 1998). Nasse Deposition lässt sich am besten mit einem Wet-only-Sammler ermitteln, der einen Auffangbehälter abdeckt, um trockene Deposition auszuschließen und sich erst dann öffnet, wenn Niederschlag durch einen Niederschlagssensor erkannt wird (Plaisane et al. 1998). Da ein Wet-only-Sammler Stromversorgung und Sensoren benötigt, ist die Verwendung von Gesamtdepositionssammler zum Sammeln von Nassniederschlag vor allem in großen Netzwerken eine kosteneffektive Alternative (Dämmgen et al. 2005). Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des Niederschlags von Wet-only- und Bulk-Sammlern wurden in einer Reihe von vergleichenden Studien bewertet (Akkoyunlu und Tayanc 2003) und durchschnittliche Korrekturfaktoren für den Beitrag der trockenen Deposition aus parallelen Messungen abgeleitet. Allerdings hängt die Menge der trockenen Deposition auf den Wet-only-Sammlern oft von lokalen Gas- und Aerosolkonzentrationen, Turbulenzintensitäten und der Sammeleffizienz der Sammler ab (Draaijers et al. 1998). Das Ziel dieser Studie ist, der Vergleich der chemischen Zusammensetzungen in Niederschlägen, die aus einem Bulk-Sammler und einem Wet-only-Sammler auf einem Almstandort über mehrere Jahre ermittelt wurden.

Material und Methoden

Standort

Der Vergleich von Gesamtdeposition und nasser Deposition an einem Almstandort, wurde an der Forschungsstation Stoderzinken an der Westseite des Stoderzinkens (1830 m), Steiermark durchgeführt. Diese Station wurde im Jahr 2005 errichtet, um einen Einblick zu Wasser- und Stoffbilanzen auf einem Almstandort erhalten zu können (Abbildung 1; Bohner et al. 2007). Der durchschnittliche Jahresniederschlag am Standort lag zwischen 2007 und 2019 bei 2591 mm und die mittlere Jahrestemperatur bei 3,17 °C. Die höchste Niederschlagsmenge während der Versuchsperiode (Mai-Oktober 2014-2019) zeigte sich im Jahr 2014 mit einer Menge von 1972 mm, wobei die geringste Niederschlagsmenge mit 811 mm im Jahr 2015 verzeichnet wurde. Die höchste Durchschnittstemperatur mit 9,3°C wurde 2015 gemessen, die geringste im Jahr 2016 mit 7,9°C (Abbildung 3).

Messtechnik

Die Gesamtdeposition wurde während der schneefreien Periode (Mai-Oktober) über den Bulk-Sammler RS200 (Fa. METER Group AG) bestehend aus Sammeltrichter, schraubbarer Sammelflasche und einem Filtertrichter mit einer Auffangfläche von 314 cm² gesammelt. Ein Nylondrahtgeflecht im Trichter verhindert die Verunreinigung durch grobe Partikel,



Abbildung 1: Messtechnik an der Forschungsstation Stoderzinken.



Abbildung 2: RS200 Bulk-Sammler und Wet-And Dry-only-Sammler zur Erfassung von Gesamtdeposition und nasser Deposition.

der Niederschlag wird in Polyethylenflaschen gesammelt welche in einem Ständerrohr geschützt lagern, um eine Veränderung der Proben durch Licht, chemische oder biologische Vorgänge zu vermeiden (Abbildung 2).

Die nasse Deposition wird vom Messsystem WADOS (Wet-And Dry-Only precipitation Sampler), welches nasse und trockene Deposition trennen kann, erfasst (Abbildung 2). Die Auffangfläche beträgt ebenfalls 314 cm² und die flüssige Probe wird in einem integrierten Kühlschrank bis zu Probenahme gelagert. Wird über den integrierten Regensensor ein Niederschlagsereignis gemeldet, wechselt die Abdeckhaube (Deckel) vom Sammelgefäß für nasse Deposition auf das Sammelgefäß für trockene Deposition. Somit schließt der WADOS die trockene Deposition von Gasen und Partikeln aus. Das Probenahmesystem WADOS kann ganzjährig, trotz hoher Schneemengen betrieben werden, wobei der Niederschlagssammler nur während der schneefreien Zeit (Mai-Oktober) beprobt werden kann. Die beiden Probenahmestellen liegen an der Forschungsstation ca. 2 Meter voneinander entfernt (Abbildung 1). Das Beprobungsintervall ist in der Regel mindestens einmal pro Monat. Die Niederschlagsproben vom Gesamtdepositions- und nasser Depositions-sammlern wurden während der Versuchsperiode 2014-2019 immer termingleich erfasst.

Analytik

Die Wasseranalytik der Niederschläge umfasst die Bestimmung von pH-Wert sowie von Anionen und Kationen. Anionen (Cl⁻, NO₃⁻ und SO₄²⁻) und Kationen (Na⁺, NH₄⁺, K⁺ und

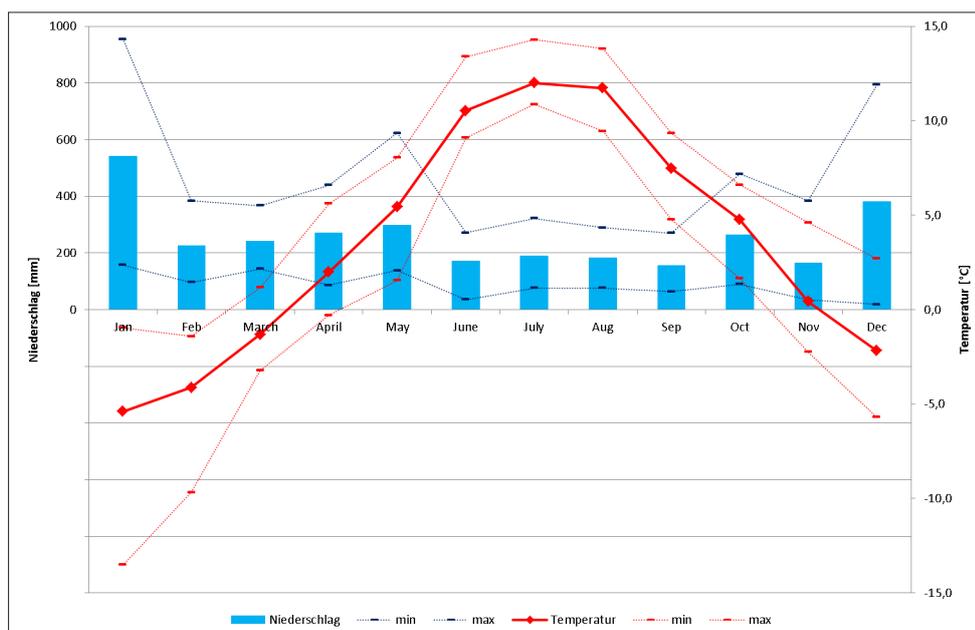


Abbildung 3: Mittlerer (Minimum und Maximum) Monatsniederschlag (mm) und -Lufttemperatur (°C) am Versuchsstandort Stoderzinken im Zeitraum von 2014-2019.

Tabelle 1: Mittlere Konzentrationen (mg l⁻¹) der Niederschläge aus dem Bulk- und Wet-only-Sammler in der Versuchsperiode Mai - Oktober im Zeitraum 2014 - 2019. Signifikanzniveau wurde mittels Wilcoxon Signed-Rank Test geprüft.

	Wet-only	Bulk	Ratio	Sign.
NO ₃ ⁻	0,82	0,58	0,71	0,0147
SO ₄ ²⁻	0,49	0,37	0,75	0,0015
Cl ⁻	0,33	0,49	1,47	0,0658
Na ⁺	0,26	0,30	1,14	0,1738
K ⁺	0,22	0,40	1,77	0,0155
Ca ²⁺	0,64	0,72	1,13	0,0021
NH ₄ ⁺	0,27	0,24	0,88	0,0536

Ca₂⁺) werden mittels Ionenchromatographie (MagIC Net – Fa. Metrohm) nach ÖNORM EN ISO 10304-1 und ÖNORM EN ISO 14911 bestimmt. Die Deposition (kg Ion ha⁻¹) wurde aus den mengengewichteten Konzentrationen und den Niederschlagsmengen berechnet.

Ergebnisse

Vergleich der Gesamtdeposition und der nassen Deposition

Konzentrationen in den Niederschlägen

Vergleicht man die Konzentrationen in den Niederschlägen der beiden Sammler über die Jahre, zeigt sich für einige Kationen und Anionen ein signifikanter (p=0,05) Unterschied (Tabelle 1). Während die durchschnittliche Konzentration von Cl⁻, K⁺, Na⁺ und Ca²⁺ beim Bulk-Sammler höher war (Ratio >1), zeigte sich bei NO₃⁻, SO₄²⁻ und NH₄⁺ eine geringere durchschnittliche Konzentration (Ratio <1) im Vergleich zum Wet-only-Sammler. Ähnliche Ergebnisse konnten für Na⁺, Ca²⁺ und NH₄⁺ von Stedman et. al. (1990) gefunden werden. Ein Ratio <1 bei NO₃⁻ konnte auch von Richter und Lindberg (1988) gefunden werden, was vor allem mit einer höheren Abbaurrate von Nitrat durch die monatliche Sammlung im ungekühlten Bulk-Sammler zu tun hat. Diese Tatsache zeigt sich auch beim monatlichen Vergleich der mittleren NO₃⁻-Konzentration über die schneefreie Versuchsperiode (Abbildung 4). Dass die Überschätzung in der Konzentration im Bulk-Sammler oft auch von Jahreseffekten bestimmt ist, zeigt die Abbildung 5a. Hier trägt vor allem das Jahr 2019 und 2018 dazu bei, dass die Konzentrationen im Bulk-Sammler im Durchschnitt höher sind

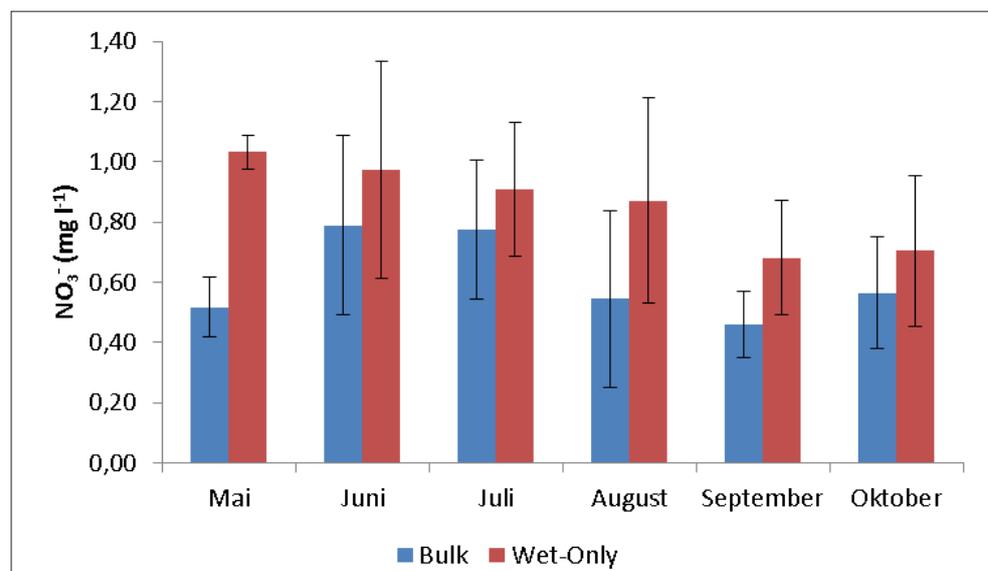


Abbildung 4: Mittlere monatliche NO₃⁻-Konzentration (mg l⁻¹) der Niederschläge im Bulk- und Wet-only-Sammler über die Versuchsjahre 2014-2019.

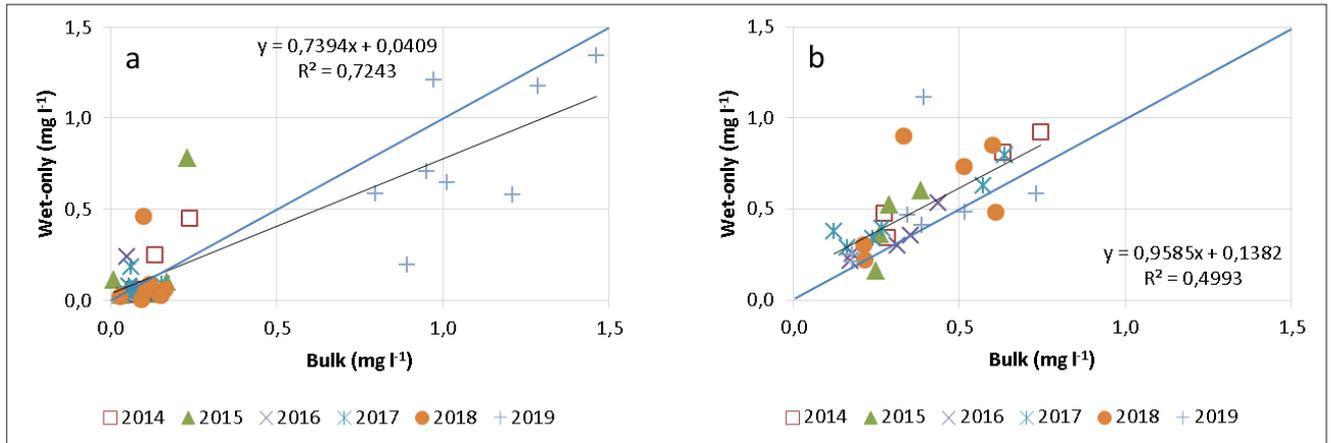


Abbildung 5: Mittlere Konzentrationen (mg l^{-1}) von Na^+ a) und SO_4^{2-} b) der Niederschläge zu den einzelnen Probenahmeterminen aus dem Bulk- und Wet-only-Sammler in der Versuchsperiode Mai - Oktober im Zeitraum 2014 - 2019.

	Wet-only	Bulk	Ratio	Sign.
Wasser	504,49	562,10	1,11	0,0316
pH	7,27	6,77	0,93	0,6101
NO_3^-	3,44	2,91	0,85	0,0434
SO_4^{2-}	1,83	1,61	0,88	0,7795
Cl^-	1,37	1,93	1,41	0,0232
Na^+	1,07	1,49	1,39	0,0083
K^+	0,60	1,32	2,21	0,0042
Ca^{2+}	2,14	2,92	1,36	0,1527
NH_4^+	1,15	1,11	0,97	0,1936

Tabelle 2: Mittlere Frachten (kg ha^{-1}) der Niederschläge aus dem Bulk- und Wet-only-Sammler in der Versuchsperiode Mai - Oktober im Zeitraum 2014 - 2019. Signifikanzniveau wurde mittels Wilcoxon Signed-Rank Test geprüft.

als im Wet-only-Sammler. Bei der SO_4^{2-} -Konzentration zeigt sich hingegen ein geringer Einfluss des Beprobungszeitpunktes (Abbildung 5b).

Frachten in den Niederschlägen

Betrachtet man die Niederschlagsfrachten der Kationen und Anionen aus den beiden Sammlern über den Versuchszeitraum, erweisen sich die durchschnittlichen Frachten für K^+ , Na^+ , Ca^{2+} und NO_3^- als signifikant ($p=0,05$) unterschiedlich (Tabelle 2). Dabei stellten sich wie bei den Konzentrationen die Frachten der Kationen K^+ , Na^+ und Ca^{2+} und des Anions Cl^- als höher im Bulk-Sammler als im Wet-only Sammler dar (Ratio >1) und jene des Kations NH_4^+ und der Anionen NO_3^- und SO_4^{2-} als niedriger. Gleichartige Ergebnisse konnten bis auf NO_3^- und SO_4^{2-} auch von Staelsen et al. 2005 gefunden werden, was wiederum mit dem Abbau dieser Anionen durch die lange Lagerung (1 Monat) im Bulk-Sammler zurückzuführen ist.

Schlussfolgerungen

Aus der Studie über den Vergleich von Gesamtd deposition und nasser Deposition am Almsandort Stoderzinken kann zusammengefasst festgestellt werden, dass es für jene Kationen und Anionen die innerhalb eines Monats nicht wesentlich abgebaut werden zu einer mehr oder weniger hohen Überschätzung der nassen Deposition im Bulk-Sammler im Vergleich zum Wet-only-Sammler kommt. Will man den Einfluss der durch den Regen eingetragenen Nährstoffe auf das Ökosystem quantifizieren sollte man einen Wet-only-Sammler nehmen, vor allem dann, wenn der Beprobungsintervall über 1 Woche hinaus-

geht da vor allem bei Nitrat und Sulfat Abbauprozesse einsetzen. Kennt man jedoch den Anteil der Überschätzung des Bulk-Sammlers im Vergleich zum Wet-only-Sammler welcher durch diese Studie relativ robust für den Standort Stoderzinken quantifiziert wurde, kann man Korrekturfaktoren auf die Bulk-Konzentrationen/-Frachten anbringen die auch die Bulk-Sammler zur Beprobung der nassen Deposition interessant machen kann.

Literatur

Akkoyunlu B.O., Tayanc M. (2003) Analyses of wet and bulk deposition in four regions of Istanbul, Turkey. *Atmospheric Environment* 37, 3571-3579.

Bohner A., Schink M., Eder G. (2007) Eine Gebirgs-Lysimeterstation am Stoderzinken (Österreich, Steirisches Ennstal) in 1830 m Seehöhe -Messeinrichtung und Forschungsziele.- 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 17.-18.4.2007, 173-175.

Dämmgen U., Erisman J.W., Cape J.N., Grünhage L., Fowler D. (2005) Practical considerations for addressing uncertainties in monitoring bulk deposition. *Environmental Pollution* 134, 535-548.

Draaijers G., Erisman J., Lövblad G., Spranger T., Vel E. (1998) Quality and uncertainty aspects of orest deposition estimation using throughfall, stemflow and precipitation measurements. TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation. TNO-MEP Report 98/003.

Plaisane H., Sauvage S., Coddeville P., Guillermo R. (1998) A comparison of precipitation sensors used on the wet-only collectors. *Environmental Monitoring Assessment* 51, 657-671.

Richter D.D., Lindberg S.E. (1988) Wet deposition estimates from long-term bulk and event wet-only samples of incident precipitation and throughfall. *Journal of Environmental Quality* 17, 619-622.

Rogora M., Mosello R., Arisci S., Brizzio M.C., Barbieri A., Balestrini R., Probst, A. (2006) An overview of atmospheric deposition chemistry over the Alps: present status and long-term trends. *Hydrobiologia*, 562(1), 17-40. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1803-z>

Stedman J.R., Heyes C.J., Irwin J.G. (1990) A comparison of bulk and wet-only precipitation collectors at rural sites in the United Kingdom. *Water, Air, and Soil Pollution* 52, 377-395.

Drought and heat cause a shift in vegetation composition in an intensive grassland

Elena Tello-García^{1*}, Lisa Huber¹, Georg Leitinger¹, Andre Peters² and Erich Tasser^{1,3}

Zusammenfassung

Der Klimawandel macht es notwendig, dass das landwirtschaftlich genutzte Grünland in Zukunft resistenter gegenüber Trockenheit und Hitze ist und die Wassernutzung durch artspezifische Strategien und Interaktionen zwischen den vorhandenen Arten optimiert. Um die Folgen dieser Veränderungen zu untersuchen, wurde eine kommerzielle Grünlandmischung in Kleinlysimetern angesät und unterschiedlichen Trockenheits- und Hitzebedingungen (Kontrolle: Normalbedingungen; Trocken: zwei trockene und warme Perioden) ausgesetzt. Die Biomasseproduktivität und die Wassernutzungseffizienz (WUE) der Grünlandmischung nahmen bei starker Trockenheit ab. Bereits eine erste Dürreperiode verursachte eine Verschiebung der funktionellen Gruppen von Leguminosen zu Gräsern, die sich bei einer zweiten Periode nochmals verstärkte. Die WUE der Gemeinschaft wurde dadurch verbessert.

Schlagwörter: Lysimeter, Wassernutzungseffizienz, Biomasseproduktivität, Evapotranspiration

Summary

Grasslands are expected to adjust to drought and heat, optimising water use through individual strategies and competitive interactions between the present species. A commercial seed mixture used for intensively cultivated hay meadows was cultivated in small-scale lysimeters and subjected to varying drought and heat conditions (control: normal conditions, drought: two dry and warm periods). The biomass productivity and water use efficiency (WUE) of the grassland community decreased when drought was severe. Already a first drought period caused a shift in functional groups from legumes to grasses, which intensified again during a second period. The WUE of the community was thus improved.

Keywords: lysimeter, water use efficiency, biomass productivity, evapotranspiration

Introduction

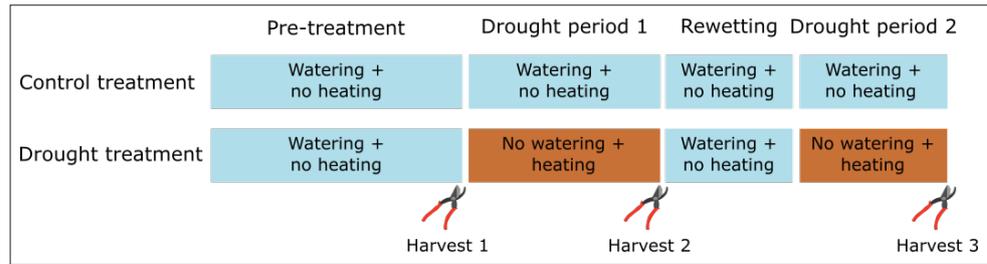
Besides the effects of climate change, water balance of grasslands is influenced by plant species composition and competitive interactions between them (Van den Berge et al. 2014). Grassland communities adjust according to individual strategies (Kardol et al. 2010), e.g. legumes and herbs use water acquisitively and resist mild drought (Hofer et al. 2017), and grasses are more conservative and extremely drought-resistant. After a drought period, the community enhances a fast recovery in terms of biomass production, even at cost of biodiversity (Stampfli et al. 2018).

Here, we hypothesize that under drought and heat conditions, water use efficiency (WUE) and biomass productivity of an intensive mountain grassland are affected when drought

¹ Department of Ecology, University of Innsbruck, Sternwartestraße 15, A-6020 Innsbruck, ² Institute for Geoecology, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 19c, D-38106 Braunschweig, ³ Institute for Alpine Environment, Eurac research, Drususallee 1, I-39100 Bozen

* Ansprechpartner: Elena Tello-García, email: elena.tello-garcia@uibk.ac.at

Figure 1. Schedule of the control and drought treatments throughout the experiment. Watering includes irrigation and groundwater supply.



is severe, and, after rewetting, they recover fast by a shift in functional composition, where grasses show a better performance than legumes.

Material and Methods

Six small-scale lysimeters (Smart-Field-Lysimeter, UMS/Meter Group Munich, Germany) with a depth and diameter of 0.3 m installed in a meadow were sheltered. They were filled with a horticultural standard and sterilised soil, and planted with a commercial seed mixture used for intensively cultivated hay meadows.

The experiment was divided in four phases: pre-treatment, drought period 1, rewetting, and drought period 2; and in two irrigation schemes (*Figure 1*): one providing water on a regular basis by sprinklers (Newesely et al. 2015) and a bidirectional pumping system acting as groundwater supplier (control); and one suffering drought and warm periods (drought). During drought periods, irrigation and groundwater supply were interrupted, and the plant surface temperature increased 2 K by ceramic infrared heat plates.

After each harvest (*Figure 1*), biomass was separated into functional groups (legumes and grasses), dried at 80 °C and weighed. Changes in lysimeter weights were continuously measured to estimate evapotranspiration (ET), with data being processed and smoothed (Peters et al. 2017). The integrated WUE was calculated after each harvest by dividing the total increase of dry biomass by the accumulated ET.

Results

After the first drought period (harvest 2, H2), biomass was lower in drought than in control lysimeters, contrastingly, at the end of the experiment (harvest 3, H3), it was similar. The functional groups showed differences in productivity (*Figure 2*). Legumes biomass decreased over time and a difference between control and drought treatments

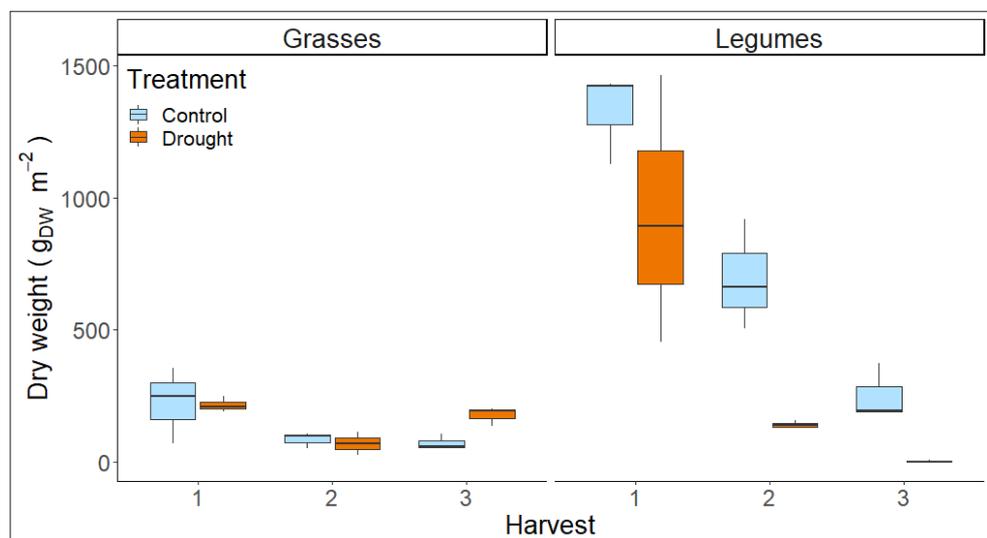


Figure 2. Dry weight biomass of legumes and grasses after each harvest for vegetation subjected to control and drought treatments.

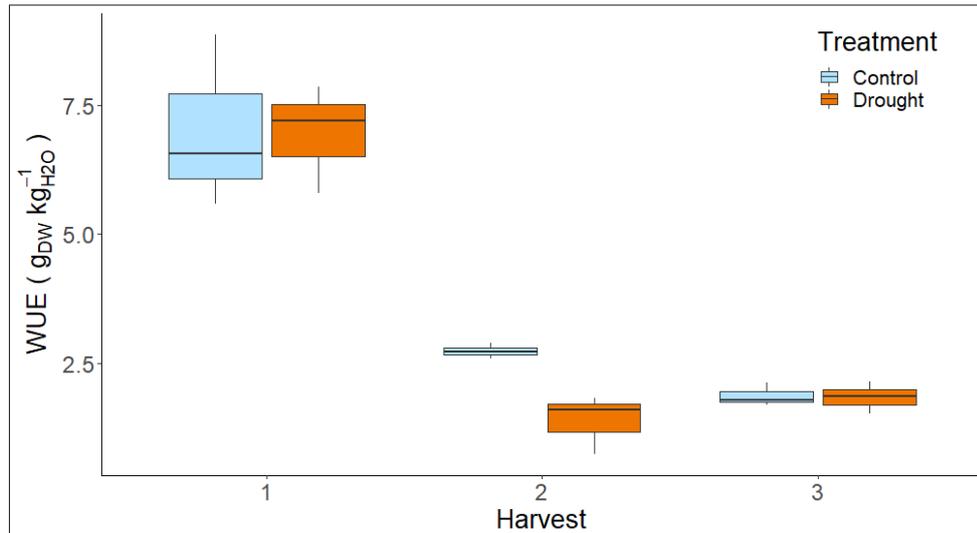


Figure 3. Water use efficiency (WUE) at each harvest period for lysimeters subjected to drought and control treatments.

started after the first drought (H2). Nevertheless, grasses biomass was similar until H3, where it was higher in drought lysimeters.

Control and drought lysimeters had similar WUE at the pre-treatment (harvest 1), and differed in H2, when it was lower in drought lysimeters (Figure 3). After the rewetting and the second drought (H3), WUE was again similar between control and drought.

Discussion

The WUE of the grassland was lower in lysimeters affected by the first drought. More water was needed to produce biomass, although the amount of it was lower. The community was not optimised to save water and may be more strongly and earlier affected by drought than communities with conservative strategies (Frenck et al. 2018). Afterwards, they showed a recovery on WUE and biomass productivity.

Behind these processes, we found that grasses were slightly affected by drought and heat, while legumes decreased drastically. The higher resistance of grasses may be explained by their physiological strategies and the canopy structure of the community. Legumes have long stems and horizontal big sun-exposed leaves on the highest levels of the community, whereas grasses are below protected from the sun-light (Tappeiner and Cernusca 1996). Grasses may not respond directly to drought, but to a change on competitive interactions (Kardol et al. 2010) by a decrease of legumes, combined with an increase of nutrients availability in the soil after drought (Borken and Matzner 2009).

Conclusions

Drought and heat induced a re-assemblage of the grassland community, which was beneficial because WUE and biomass productivity increased. However, it is unclear if the new composition will be resistant and resilient in the future. Besides, the decrease of legumes affects the soil nutrient availability and the forage quality.

Literature

Borken W., Matzner E. (2009) Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. *Glob. Change Biol* 15:808-824.

Frenck G., Leitinger G., Obojes N., Hofmann M., Newesely C., Deutschmann M., Tappeiner U., Tasser E. (2018) Community-specific hydraulic conductance potential of soil

water decomposed for two Alpine grasslands by small-scale lysimetry. *Biogeosciences* 15:1065-1078.

Hofer D., Suter M., Buchmann N., Lüscher A. (2017) Nitrogen status of functionally different forage species explains resistance to severe drought and post-drought overcompensation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 236:312-322.

Kardol P., Company C.E., Souza L., Norby R.J., Weltzin J.F., Classen A.T. (2010) Climate change effects on plant biomass alter dominance patterns and community evenness in an experimental old-field ecosystem. *Glob. Change Biol* 16:2676-2687.

Newesely C., Leitinger G., Zimmerhofer W., Kohl B., Markart G., Tasser E., Tappeiner U. (2015) Rain simulation in patchy landscapes: Insights from a case study in the Central Alps. *Catena* 127:1-8.

Peters A., Groh J., Schrader F., Durner W., Vereecken H., Pütz T. (2017) Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. *J. Hydrol.* 549:731-740.

Stampfli A., Bloor J.M.G., Fischer M., Zeiter M. (2018) High land-use intensity exacerbates shifts in grassland vegetation composition after severe experimental drought. *Glob. Chang Biol* 24:2021-2034.

Tappeiner U., Cernusca A. (1996) Microclimate and fluxes of water vapour, sensible heat and carbon dioxide in structurally differing subalpine plant communities in the Central Caucasus. *Plant Cell Environ.* 19(4), 403-417.

Van den Berge J., Naudts K., De Boeck H.J., Ceulemans R., Nijs I. (2014) Do interactions with neighbours modify the above-ground productivity response to drought? A test with two grassland species. *Environ. Exp. Bot.* 105:18-24.

Water use of lawns determined in weighing lysimeters

József Zsembeli^{1*}, Lúcia Sinka^{1,2}, Géza Tuba¹, Arzu Rivera-García^{1,2} and Györgyi Kovács¹

Summary

The main goal of the research was to determine the water balance and water use efficiency of lawn in the case of different water inputs in weighing lysimeters. Two grass-covered lysimeters were irrigated with different doses of water representing deficit and sufficient irrigation. Irrigation was applied only when the soil moisture contents decreased down to these lower thresholds. Therefore, the irrigation frequency was determined by the natural conditions influencing the actual soil moisture content of the topsoil of the lawns. Soil moisture contents were measured on a daily basis. The biomass of the lawns were cut when exceeded the height of 10 cm. Beyond the water balance and its components, the water use efficiency index was calculated from the rate of total water input and the biomass for each treatment. The lawns, with different water supplies, transpired almost the same amount of water, but the water utilization of the more intensively irrigated lawn was more favourable.

Keywords: weighing lysimeters, water balance, evapotranspiration, lawn, irrigation

Introduction

Lawns provide numerous aesthetic and functional benefits to various environmental setups, creating opportunities for recreation; essential component of urban vegetation (De 2017, Haydu et al. 2008, Ignatieva et al. 2017) and they are regularly irrigated (Milesi et al. 2005). Lawns are mainly established from the grassland species and comprise of a relatively high percentage of natural environment of the local vegetation within the vicinity (Pal et al. 2013). Weighing lysimeters are suitable tools to understand the water balance (WB) of a lawn system measuring the actual evapotranspiration (ET) directly through the changes in mass and quantify over a short period of time interval (Beeson 2011). Weighing lysimeters are the most valuable instruments used for accurate monitoring of the crop ET, water seepage and WB studies as they give reliable data in terms of quantity and quality over short intervals (Jancsó et al. 2019). Hence, water inflow and outflow are measured based on the changes in weight of the lysimeter; ET is depicted from the decrease in weight due to water loss while an increase in weight is realised in the case of precipitation or irrigation (water input) (Zsembeli et al. 2018). The main goal of the research was to determine the WB and water use efficiency of lawn in the case of different water inputs in weighing lysimeters.

Material and Methods

The experiment was carried out in 3 weighing lysimeters at the lysimeter station of the Research Institute of Karcag (Czellér et al. 2019). Seepage water was weekly collected at a bottom outlet and quantified. The amount of precipitation was measured by a rain gauge at a meteorological station close to the lysimeters. Two lysimeters were grass-covered and one was with bare soil without irrigation. The two grass-covered

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

² FAFSEM University of Debrecen, Kisújszállási út 166, H-5300 Karcag

* Ansprechpartner: Dr. József Zsembeli, email: zsembeli@gmail.com

lysimeters were irrigated with different doses of water. In lysimeter Lawn 1 (L1) the soil moisture content of the upper 10 cm soil layer was maintained above 15 v/v% representing sufficient irrigation, while in lysimeter Lawn 2 (L2) above 10 v/v% representing deficit irrigation, respectively. The soil moisture content was regularly measured with an SMT-100 probe. Irrigation of 10 mm dose was applied only when the soil moisture contents decreased down to these lower thresholds. Therefore, the irrigation frequency was determined by the natural conditions influencing the actual soil moisture content of the topsoil of the lawns. From May to September in 2020, L1 received 310 mm, L2 210 mm water by irrigation. The investigation period lasted from May to December of 2020, when 504.6 mm precipitation was detected, which corresponds to an average annual quantity in Karcag.

The biomass of the lawns were cut when the grass exceeded the height of 10 cm. Beyond the WB and its components, indexes characterizing the water use efficiency were calculated. Total Water Input (TWI) includes the amount of precipitation and irrigation water; Daily Biomass Production (DBP) describes how much plant biomass (B) was generated each day; Water Use Efficiency Index (WUEI) was calculated from the rate of Total Water Input (TWI) and ET according to $ET/TWI \cdot 100$ (%). The total lawn biomass production in the function of ET describes how much plant biomass was built up using 1 mm of water through ET during the investigated period (Zsembeli et al. 2011).

Results and Discussion

We determined the elements of the WB for 3 lysimeters for the period of May-December, 2020 (Figure 1). L1 received 854.3 mm water input, L2 754.3 mm, while the bare soil 544.3 mm. On the output side, the ET was 581.4 mm from L1, 568.7 mm from L2, and the evaporation of the bare soil was 348.3 mm. The amount of seepage waters were 212.7 mm (L1), 131.5 mm (L2), while 121 mm for bare soil. The WB for the 2 grass-covered units was nearly the same, 52.6 mm and 46.9 mm, while the bare soil had the most positive (73.5 mm).

Figures 2-3 show the monthly WB and ET values calculated for the 3 lysimeters. May was dry, the bare surface evaporated the total water supply, and its WB was zero. In the case of L1, in addition to the higher ET, there was only little seepage water, so

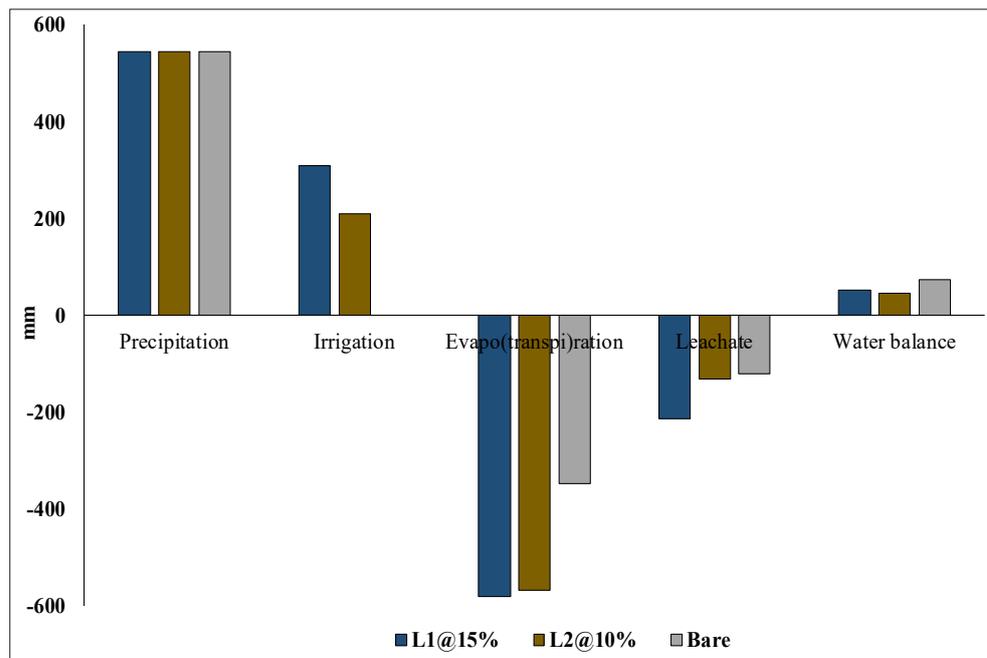


Figure 1: Components of the water balance in the treatments in the investigated period.

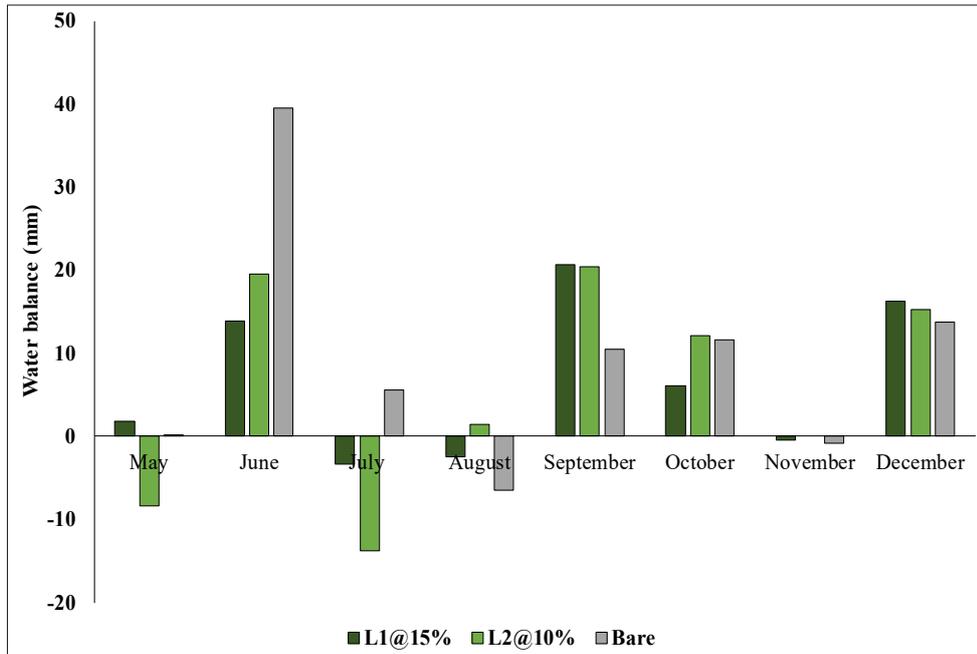


Figure 2: The monthly water balances in the lysimeters.

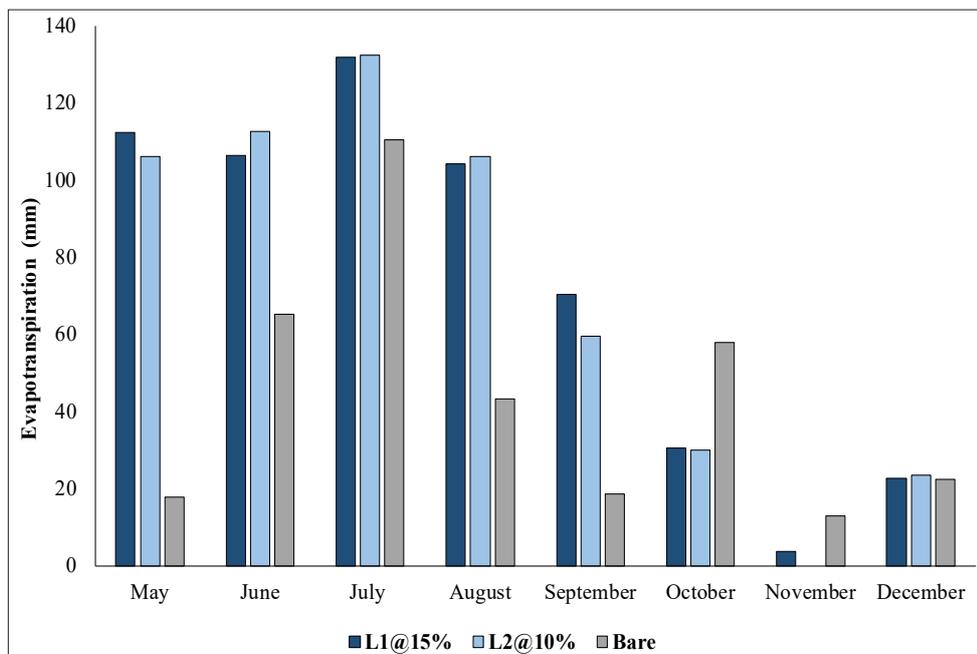


Figure 3: The monthly evapotranspirations in the lysimeters.

its WB was slightly positive. 20 mm less irrigation resulted in less ET and a negative WB for L2. The 3 summer months were rainy, so less irrigation water was needed to maintain the desired moisture content of the topsoil. In June, all the three units closed with a positive WB. Due to the warm July, ET was higher, so the WB of the 2 lawns was negative. In September, the weather was warm with little rainfall, so the more intensively irrigated lawn transpired more with a positive WB. We stopped irrigation in October, because the soil moisture content was always above the desired value due to the natural precipitation. In October and December, the WB of all the three units was positive, but in November, it was around zero due to the low amount of precipitation.

In 2020, 218 days elapsed from the sowing of the lawn to the last cut, during this time, there were 7 cuts (Table 1), so the investigated period was divided into seven grass growing stages. During the whole season, there was 100 mm difference in the TWI. The

	Duration day	TWI mm		WUEI %		DBP g/day		B/ET g/mm	
		Lawn 1	Lawn 2	Lawn 1	Lawn 2	Lawn 1	Lawn 2	Lawn 1	Lawn 2
1 st cut	29	80.9	70.9	94.8	112.0	1.0	0.8	0.4	0.3
2 nd cut	19	77.5	57.5	100.0	100.1	4.0	4.3	1.0	1.4
3 rd cut	14	78.1	78.1	50.1	67.1	3.4	3.7	1.2	1.0
4 th cut	21	128.6	118.6	64.8	67.0	7.2	6.2	1.8	1.7
5 th cut	34	184.0	144.0	64.0	85.2	3.4	3.5	1.0	1.0
6 th cut	36	108.3	88.3	88.1	96.2	8.8	6.5	3.3	2.8
7 th cut	65	157.2	157.2	27.6	25.3	0.4	0.5	0.5	0.9
Total or average:	218	814.6	714.6	65.4	72.2	3.5	3.1	1.4	1.3

Table 1. Water use efficiency indexes in terms of the rate of total water input and the biomass.

WUEI shows whether the water supply was sufficient or the cultivated crop decreased the moisture stocks of the soil. During the first two grass growing stages, the water consumed by ET in L2 was not appropriately replaced by irrigation, but L1 was more effective in the whole investigated period. DBP was higher on average in L1 which evaporated more water resulting in higher biomass production, so its efficiency (B/ET) proved to be more favourable.

Conclusions

We found that even in a rainy season, it is necessary to irrigate to achieve a nice lawn. Partly because to ensure surviving the dry periods, and partly to achieve a higher biomass production. We figured out that 32% more irrigation water resulted in a 12.5% increase in biomass production comparing sufficient to deficit irrigation. The lawns, with different water supplies, transpired almost the same amount of water, but the water utilization of the more intensively irrigated lawn was more favourable. The bare soil had 40% lower ET, but only slightly more positive WB compared to the lawns.

Literature

Beeson Jr., R.C. (2011) Weighing lysimeter systems for quantifying water use and studies of controlled water stress for crops grown in low bulk density substrates. *Agricultural Water Management*, 98(6), 967-976. pp.

Czellér K., Tuba G., Kovács Gy., Sinka L., Zsembeli J., Percze A. (2019) Water use efficiency of *Miscanthus giganteus* under different irrigation doses. 18. Gumpensteiner Lysimeter-tagung, Austria; 175-178. pp.

De, L. (2017) Lawn grasses-a review. *International Journal of Horticulture*, 7.

Haydu J.J., Hodges A.W., Hall C.R. (2008) Estimating the economic impact of the US golf course industry: challenges and solutions. *HortScience* 43, 759–763. pp.

Ignatieva M., Eriksson F., Eriksson T., Berg P., Hedblom M. (2017) The lawn as a social and cultural phenomenon in Sweden. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 213-223. pp.

Jancsó M., Kun Á., Székely Á., Szalóki T., Ibadzade M., Bozán Cs. (2019) New developments at the Lysimeter Station in Szarvas. 18. Gumpensteiner Lysimeter-tagung, Austria, 155 – 156. pp.

Milesi C., Elvidge C.D., Dietz J.B., Tuttle B.T., Nemani R.R., Running S.W. (2005) A strategy for mapping and modeling the ecological effects of US lawns. *J. Turfgrass Manage*, 1(1), 83-97. pp.

Pal R.W., Csete S., Botta-Dukát Z., Pinke, G. (2013) Composition and diversity of lawn flora in differently managed village yards—a case study from southwestern Hungary. *Folia Geobotanica*, 48(2), 209-227.

Zsembeli J., Kovács Gy., Mándoki A. (2011) Water use efficiency of maize and different sorghum hybrids under lysimeter conditions. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung, Austria, 227-229. pp.

Zsembeli J., Czeller K., Sinka L., Kovács G., Tuba G. (2018) Application of lysimeters in agricultural water management. *Creating A Platform To Address The Techniques Used In Creation And Protection Of Environment And In Economic Management Of Water In The Soil.*, 5.

Impact of crop residues on soil water evaporation in weighing lysimeters

Mihály Jancsó^{1*}, István Balla¹, Noémi Valkovszki¹, Csaba Bozán¹ and János Pauk²

Zusammenfassung

Verdunstung ist eine signifikante Form des Wasserverlustes von abgeernteten Äckern. Pflanzenreste können als Mulch die Bodenfeuchte schützen indem sie den Boden bedecken und dadurch die Verdunstung reduzieren. Wir untersuchten den Effekt vom Stroh des Winterweizens (*Triticum aestivum* L.) auf die Verdunstung und das Auflaufen von Unkräutern. Fünf präzisionswiegende Lysimeter wurden an der NAIK ÖVKI Lysimeter-Station (Szarvas, Ungarn) verwendet. Wir haben Wasserspeicherung in verschiedenen Menge ausgebrachten Weizenstrohs ($0.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) gemessen. Unsere Ergebnisse zeigten, dass Ernterückstände die Verdunstung aus dem Boden um 62.12-81.92% reduzieren können, im Vergleich zur ET von unbedeckten Stoppelfeldern nach der Ernte. Die Ergebnisse liefern ergänzende Informationen zu den Resultaten der Kollegen des Forschungsinstituts Karcag, in denen die Wirkung verschiedener Bodenoberflächenformationen und -bedeckungen auf die Wasserbalance des Bodens untersucht wurden.

Schlagwörter: präzisionswiegende Lysimeter, Evapotranspiration, Ernterückstände, Mulch, Winterweizen

Summary

Evaporation is a major form of water loss from agricultural soils after harvest. Crop residues as mulches can protect soil moisture by covering soil surface and thus reducing evaporation. We studied the effect of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) straw on the soil water evaporation and on the emergence of weed plants. Five precision weighing lysimeters were used at the NAIK ÖVKI Lysimeter Station Szarvas, Hungary. We have measured retention of water by the winter wheat residue after the application of $0.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $0.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ wheat straw, respectively. Our results demonstrated that crop residues can reduce the evaporation from soil to 62.12-81.92% compared to the ET of bare field of stubble. These results provide complementary information to those gained by the colleagues at the Research Institute of Karcag where the effect of different soil surface formations and coverings on the water balance of the soil was determined.

Keywords: weighing lysimeters, evapotranspiration, crop residue, mulch, winter wheat

Introduction

Evaporation is a major form of water loss from agricultural soils after harvest. According to Knoblauch (2019) rape and winter wheat fields after the harvest are able to evaporate as much water, as much precipitation is characteristic in that period. Crop residues as mulches can protect soil moisture by covering soil surface and thus reducing evaporation (Klocke et al. 2009). Another positive effect of soil covering is the suppression of weed

¹ Research Institute of Irrigation and Water Management, National Agricultural Research and Innovation Centre, Anna-liget 35, Szarvas, ² Cereal Research Non-Profit Company, Alsó kikötő sor 9, Szeged

* Ansprechpartner: Mihály Jancsó, email: jancso.mihaly@ovki.naik.hu

germination and emergence, which leads to a reduced water loss through the reduced transpiration of weedy plant populations. The daily evaporation of straw covered stubble can be reduced 0.4 mm/day compared to the non-covered and untreated field (Knoblauch 2019). But without precipitation, the effect of wheat straw or any mulch material on evaporation is small during long drought periods (Wuest 2019).

The water preserver effect of natural materials (wheat straw, sorghum or corn stem by-products, grass clippings, and leaf debris etc.) or artificial materials (paper, plastic film etc.) are used in a horticultural cultivation for a long time (Ranjan et al. 2017). McMillen (2013) tested the effect of mulch type (wheat straw, grass clippings and leaf debris) and thickness (5, 10, 15 cm) on the soil surface evaporation rate, where the evaporation was reduced even with the 5 cm mulch as 40%. However, there was no significant difference between the materials used as mulch. Among artificial materials, plastic mulch cover is widely used and according to Qin et al. (2018) the evaporation is only 4.04-7.07% compared to E value of a bare soil surface in a corn field.

The soil moisture saved after the harvest by surface covering will be more and more important in the crop production because the tillage process can be more cost-efficient, we can protect the soil structure and soil life for the preparation of optimal seed beds. Based on that, mulching suppress the evaporation losses and improves the water use efficiency and land productivity in wheat and rice growing systems (Batt és Kukal 2017). In our study, the effect of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) straw on the evaporation was measured in large weighing lysimeters.

Material and methods

Our experiment was conducted to study the effect of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) residues on the soil water evaporation and on the emergence of weed plants in two consecutive years. Five precision weighing lysimeters were used at the NAIK ÖVKI Lysimeter Station (46°51'44.7"N 20°31'35.5"E, 81 m elevation above sea level), Szarvas, Hungary (Jancsó et al. 2019). Lysimeters of 2.7 m² surface and 1.2 m depth were applied. The soil type of the experiment was clay loam. During the trial periods, the average temperatures were 23.1 °C and 23.7 °C, while the total precipitation were 66.5 mm and 54.4 mm between 17.07-17.08.2019 and 19.07-20.08.2020, respectively. In 2019, crop residues were applied as 100% (0.78 kg*m⁻²) of the harvested wheat straw for all the lysimeters. In 2020, four different treatments were set on the stubble as Ø control, 0.41 kg*m⁻², 0.63 kg*m⁻² and 0.84 kg*m⁻². Additionally, we maintained a lysimeter with bare soil surface in both years.

Results

In the first year, cumulative soil water evaporation was measured as 46.0±2.25 mm at the end of the experimental period. The average daily evaporation was 1.44 mm. This was 55.8% of the evaporation measured for the bare soil surface. In 2020, highest cumulative evaporation and evapotranspiration (104.0 mm) were calculated in the control lysimeter (Figure 1). After the harvest on 6th of July, first weeds were observed without the covering in the fifth day of the trial period. In case of thinnest mulching, weed emergence was started after 30th of July and cumulative evapotranspiration was measured as 85.2 mm. With the application of 0.63 kg*m⁻² wheat residues, the evapotranspiration remained 73.1 mm and the weeds started to develop after 10th of August. In the second year, the smallest evaporation was measured as 64.6 mm for the 0.84 kg*m⁻² mulch treatment. In that lysimeter, there was not found any weeds. The daily average values of evapotranspiration were 3.15 mm, 2.58 mm, 2.22 mm and 1.96 as a result of control, 0.41 kg*m⁻², 0.63 kg*m⁻² and 0.84 kg*m⁻² treatments, respectively.

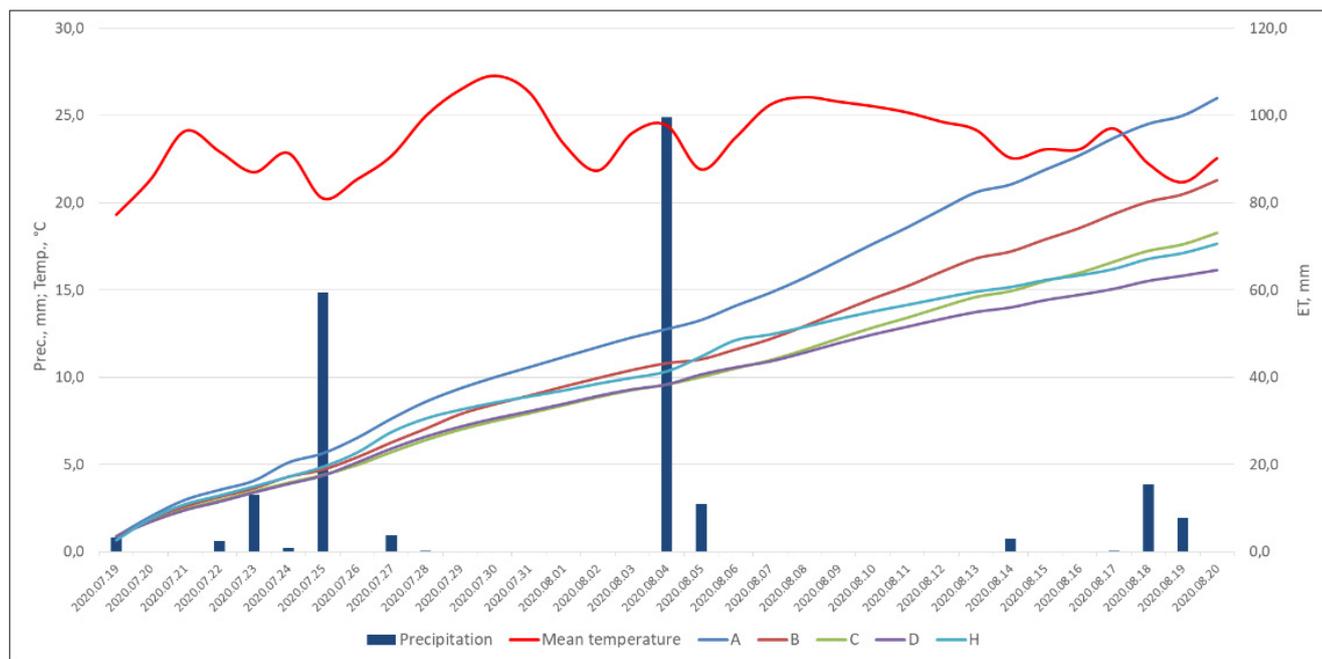


Figure 1. Cumulative soil water evaporation and evapotranspiration measured in lysimeters covered with \emptyset (A), $0.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (B), $0.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (C) and $0.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (D) of wheat straw after the harvest. Cumulative evaporation of bare soil surface (H), precipitation and daily mean temperature during the experimental period in 2020.

Discussion

We have found the same effects as Klocke et al. (2009), crop residues as mulches can significantly reduce evaporation. Moreover, weed suppression improve the positive effect of mulches on soil moisture conservation. In case of $0.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ treatment, we have measured the evaporation as 62.12% of the uncovered stubble. Even the smallest mulch layer ($0.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) had positive effects on water retention, what was further improved by 24.19% with the application of two-times higher amount of crop residues ($0.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). According to Knoblauch (2019) the daily evaporation of straw covered stubble can be reduced by 0.4 mm/day compared to the uncovered field. In our experiment, daily average values of evapotranspiration were reduced by 0.57 mm, 0.93 mm and 1.19 mm, respectively.

Conclusion

Crop residues can be applied as natural mulches in order to protect the soil moisture via reduction of evaporation. Moreover, different amount of crop residues have different effect on the weed emergence on the field. In our experiment, with the application of $0.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ wheat straw, weeds were completely suppressed during the investigated period. With the application of the wheat residues as mulching, evaporation and evapotranspiration was decreased by 62.12-81.92% compared to the bare soil of stubble. These results provide complementary information to those gained by the colleagues at the Research Institute of Karcag where the effect of different soil surface formations and coverings on the water balance of the soil was determined by means of similar weighing lysimeters. Improving management of crop residues after harvest can help us to save more water in the soil and improve soil properties and thus biological activities.

Acknowledgement

This work was supported by the Hungarian Ministry of Agriculture under Project no. 15500 and by the National Research, Development and Innovation Office (GINOP-2.3.3-15-2016-00042 project). We gratefully acknowledge the staff of NAIK ÖVKI Lysimeter Station.

Literature

Bhatt R., Kukul S.S. (2017) Soil evaporation studies using mini-lysimeters under differently established rice-wheat cropping sequence in Punjab, India. *J. Appl. Nat. Sci.* Vol. 9(1): 222-229.

Jancsó M., Kun Á., Székely Á., Szalóki T., Ibadzade M., Bozán Cs. (2019) New developments at the Lysimeter Station in Szarvas. In: 18. Gumpensteiner Lysimetertagung, 155-156.

Klocke N.L., Currie R.S., Aiken R.M. (2009) Soil water evaporation and crop residues. *Transactions of the ASABE.* Vol. 52(1): 103-110.

Knoblauch S. (2019): Einfluss unterschiedlicher Formen der Bewirtschaftung der Brache auf die Verdunstung ackerbaulich genutzter Böden im mitteldeutschen Trockengebiet. In: 18. Gumpensteiner Lysimetertagung, 59-66.

McMillen M. (2013) The Effect of Mulch Type and Thickness on the Soil Surface Evaporation Rate. California Polytechnic State University, 11.

Qin S., Li S., Yang K., Hu K. (2018) Can plastic mulch save water at night in irrigated croplands? *J. Hydrology* Vol 564: 667-681.

Ranjan P., Pate G.T., Prem M., Solanke K.R. (2017) Organic Mulching - A Water Saving Technique to Increase the Production of Fruits and Vegetables. *Cur. Agri. Res. J.* Vol 5(3): 371-380.

Wuest S. (2018) Surface effects on water storage under dryland summer fallow: A lysimeter study. *Vadose Zone J.* Vol 17(1):160078.

Predicting bare soil evaporation by numerical modeling - the role of hydraulic functions

Deep C. Joshi^{1*}, Andre Peters¹, Sascha C. Iden¹, Beate Zimmermann²
and Wolfgang Durner¹

Zusammenfassung

Die Parametrisierung der bodenhydraulischen Eigenschaften (SHP) spielt eine große Rolle für die zuverlässige Vorhersage der Verdunstung. Insbesondere werden Unterschiede zwischen traditionellen Funktionen (hier: van Genuchten/Mualem, VGM), die nur den kapillaren Wasserfluss berücksichtigen, und Funktionen, die zusätzlich nicht-kapillare Prozesse berücksichtigen (hier: Peters-Durner-Iden, PDI), erwartet. Ziel dieser Studie war es, den Einfluss von (i) dem Modelltyp für hydraulische Funktionen und (ii) der Methode zur Bestimmung dieser Funktionen auf die Vorhersage der tatsächlichen Verdunstung zu untersuchen. Die Daten wurden von einem vegetationsfreien wägbaren Großlysimeter gewonnen. Alle Modellvorhersagen unterschätzten die tatsächliche Verdunstung. Die PDI-Modelle sagten jedoch systematisch höhere Verdunstungsraten als die VGM-Modelle voraus. Interessanterweise hatte die Wahl des Modelltyps einen wesentlich größeren Einfluss als die Methode zur Bestimmung der Funktionen.

Schlagwörter: Hydraulische Leitfähigkeit, Verdunstung, Filmfluss

Summary

The parametrization of the soil hydraulic properties (SHP) plays a crucial role in reliable prediction of evaporation. In particular, differences are expected between traditional functions (here: van Genuchten/Mualem, VGM) that consider capillary water flow and functions that additionally consider non-capillary processes (here: Peters-Durner-Iden, PDI). The purpose of this study was to investigate how the prediction of the actual evaporation under water-limited conditions depends on (i) the model type for soil hydraulic functions and (ii) the method for determining these functions. Data (lysimeter mass and outflow) were obtained from a bare-soil field lysimeter. All model predictions underestimated real evaporation under dry conditions. However, the PDI model predicted systematically higher evaporation rates than the VGM model. Interestingly, the choice of model type for the hydraulic functions had more influence than the method for determining these functions.

Keywords: Soil hydraulic conductivity, surface evaporation, film flow

Introduction

Evaporation from the soil surface is one of the key components of water and energy balance. The dynamics of evaporation is influenced by atmospheric conditions, such as radiation, humidity, temperature, and wind speed. In addition to that, hydraulic properties of soils are also decisive to control the evaporation, especially under limited water supply. Predicting evaporation from drying soils under these conditions is challenging. The parametrization of soil hydraulic properties (SHP) plays a crucial role in reliable predictions of evaporation.

¹ Division of Soil Science and Soil Physics, Institute of Geoecology, Technical University of Braunschweig, Langer Kamp 19C, D-38106 Braunschweig, ² Research Institute for Post-Mining Landscapes e.V., Brauhausweg 2, D-03238 Finsterwalde

* Ansprechpartner: Deep C. Joshi, email: d.joshi@tu-braunschweig.de

Basic parametrizations of different SHP functions differ in accounting for capillary and non-capillary processes, i.e., water storage and film flow on particle surfaces and in corners and channels of pores. Traditional models consider water flow only in capillaries (e.g. van Genuchten 1980), whereas more recent models account for both liquid flow components (e.g. Lebeau and Konrad 2010, Peters 2013). Neglecting the non-capillary flow may be a major source for the discrepancies in the predicted evaporation in the dry zone.

There exists a variety of methods to determine the parameters of the soil hydraulic functions. These range from usage of simple pedotransfer functions (Schaap et al. 2000) to time demanding measurements in the laboratory or in-situ with subsequent parameter estimation (Peters et al. 2015).

The objective of this study was to investigate how different soil hydraulic function types and different methods for determining function parameters lead to differences in predicting actual evaporation under water-limited conditions.

Material and methods

We used data from a large field lysimeter (2.5 m height; 1 m² surface area), located at the lysimeter station Grünewalde and operated by the Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften (FIB) e.V in Germany (Figure 1). The lysimeter had a bare soil surface and was exposed to natural atmospheric conditions with a rather dry climate. Pressure heads and water contents were measured at three depths. Lysimeter mass and outflow were measured in hourly time intervals with a precision of 0.1 mm for 5 years (2015-2019). Precipitation and actual evaporation, E_a , were calculated from the mass changes of the lysimeter, using a simplified version of the AWAT filter approach of Peters et al. (2017). Data gaps of precipitation were filled by the measured rainfall at the experimental site.

Meteorological parameters to calculate the potential evaporation were taken from 4 nearby weather stations of the national German Weather Service (DWD), depicted in Figure 1. Grass reference potential evaporation rates, E_{Tp} , were obtained by using the FAO-56 version of the Penman-Monteith equation (Allen et al. 1998). To calculate E_{Tp} at the lysimeter site, the average of the four stations was taken. Since the potential bare soil evaporation, E_p , will differ from the grass reference potential evapotranspiration we scaled the E_p by comparing measured evaporation with the calculated E_{Tp} (Synder et al. 2000). For this, the actual lysimeter evaporation, E_a , that was observed after heavy precipitation

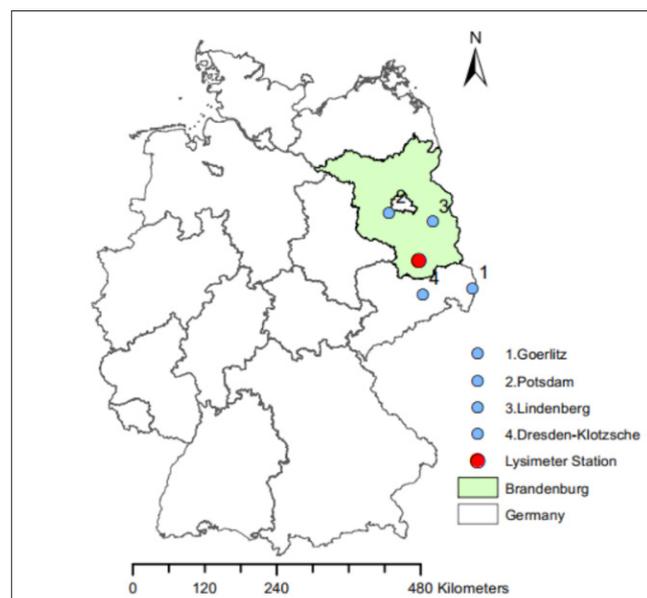


Figure 1. Location of the experimental site and national German Weather Service (DWD) stations.

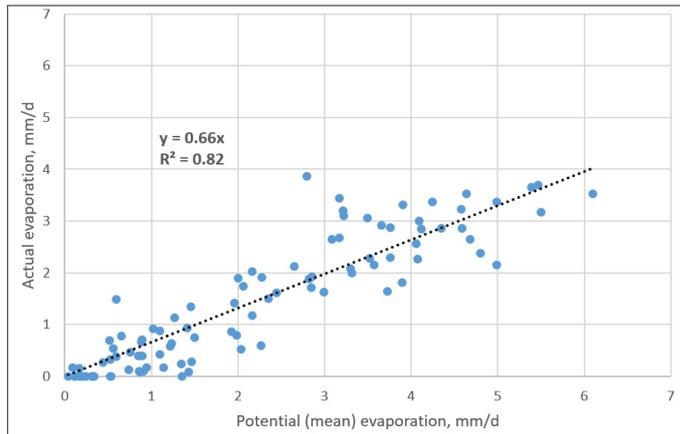


Figure 2. Correlation between mean potential evaporation rates observed from the DWD stations and actual evaporation measured with the lysimeters just after rainfall events for the experimental period.

events was related to calculated ETp. A linear relationship was found with a factor of $E_a/ET_p = 0.66$, which was used to calculate the bare soil potential evaporation (Figure 2).

Modelling

Two different soil hydraulic model types (Figure 3) were used to predict the evaporation.

- van Genuchten/Mualem (VGM) model (Mualem 1976, van Genuchten 1980): only capillary storage and conductivity, and
- Peters-Durner-Iden (PDI) model (Peters 2013,2014; Iden and Durner 2014): additionally accounting for non-capillary storage and conductivity.

For each model type, three different methods were considered to estimate retention parameters:

- pedotransfer function using soil texture and bulk density (Schaap et al. 2000) (PTF)
- fitting lab measured data (lab)
- fitting in-situ measured data (field).

These variations make a total of 6 combinations of soil hydraulic functions. The Hydrus 1-D software (Šimůnek et al. 2008) was used to model the water dynamics in the soil. Isothermal water transport in the vapour phase was included in all models. Atmospheric conditions (measured precipitation and scaled potential evaporation) were used as upper boundary conditions. A seepage face was applied at the bottom. Measured pressure heads at different depths were used as the initial conditions.

Results and discussion

The measured E_p and the simulated cumulative evaporation for the six models and the whole 5-year period is depicted in Figure 4. The results show that evaporation predicted

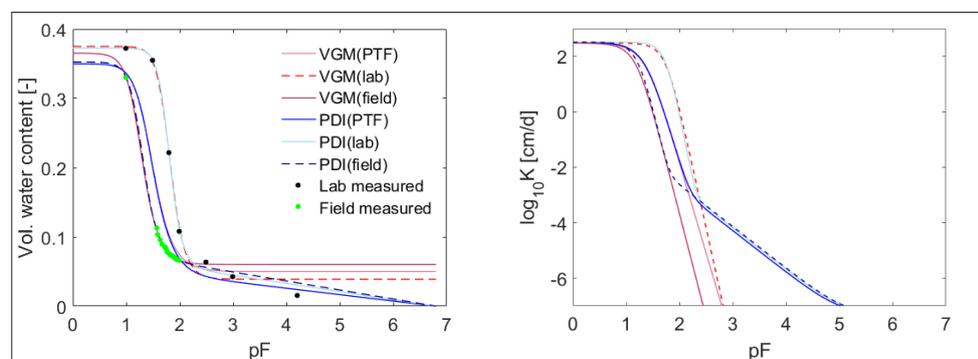


Figure 3. Soil hydraulic properties used for different modelling approaches. Left. Water retention function, right. Hydraulic conductivity function. Blue lines represent PDI parametrizations, red lines the classic VGM parametrizations.

Figure 4. Measured and simulated cumulative evaporation (cm) for the VGM and PDI models for years 2015-2019. Grey line shows the scaled potential evaporation.

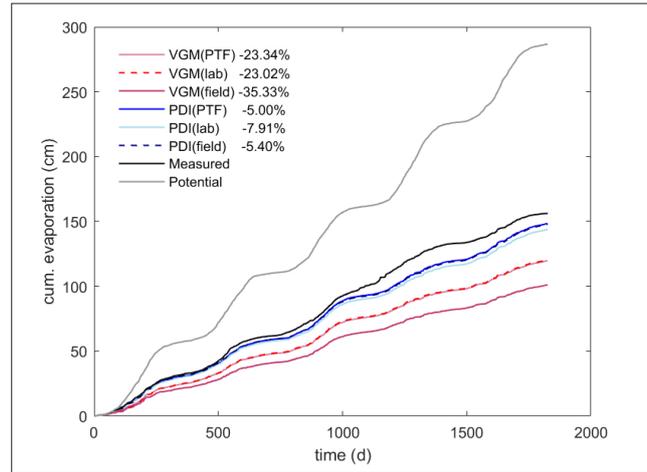


Table 1. Relative differences of measured and simulated evaporation for different years. Values are shown in percentage.

Model/ Year	2015	2016	2017	2018	2019
Measured E	00.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VGM (PTF)	-23.10	-27.39	-21.12	-28.60	-16.43
VGM (lab)	-22.75	-26.87	-20.10	-27.76	-15.32
VGM (field)	-33.80	-39.25	-34.23	-42.51	-31.98
PDI (PTF)	-3.71	-7.62	-2.04	-4.92	8.96
PDI (lab)	-6.58	-10.69	-5.88	-8.43	5.03
PDI (field)	-3.75	-8.44	-5.33	-4.96	7.70

with any model underestimated the measured evaporation (black line). The PDI model predictions (blue lines) were closer to the measured evaporation as compared to the VGM model predictions (red lines). The relative differences from the measured evaporation are quantified and shown in the legend insert of *Figure 4*. PDI predictions of E_a underestimated the observations by 5 % to 8 %, whereas using VGM functions lead to an underestimation of 23 % to 35 %. This underestimation builds up in periods where the soil dries out, because during wet periods the hydraulic functions have no influence on the simulated evaporation. *Table 1* shows the relative differences for each year in percentage. Negative values represent an underestimation, whereas positive values indicate overestimation of evaporation.

For VGM model types, the lab-derived and the PTF derived functions led to practically identical simulations, whereas use of functions based on the in-situ measurements of the water retention curve lead to smaller E_a . The difference in E_a predictions due to the different model types is obviously systematic, with higher evaporation rates for the PDI model under dry conditions.

Figure 5 shows the cumulative evaporation for summer periods of the years 2016 to 2019. In each instance, predicted evaporation with the PDI models are close to the actual measured evaporation, indicating that inclusion of the non-capillary liquid water flow in the soil hydraulic model significantly improves the prediction of evaporation.

Summary and Conclusion

The bare soil evaporation of the sand was highly underestimated when non-capillary liquid water flow was neglected in the simulations, whereas a good match of model predicted and measured evaporation was found using the more comprehensive model. The choice of the method for determining the function parameters had only a small influence on the results.

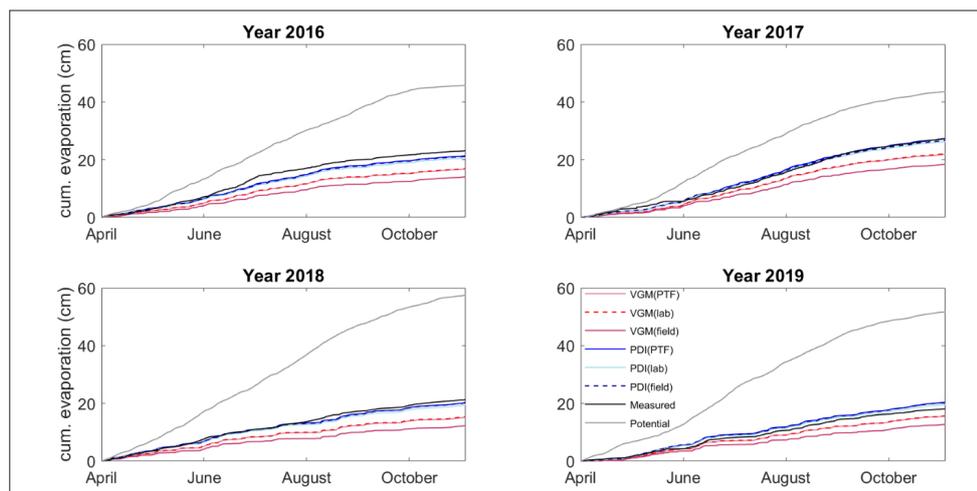


Figure 5. Measured and simulated cumulative evaporation (cm) for the VGM and PDI models for the year 2016-19.

Literature

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

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(9), 7530-7534.

Lebeau M., Konrad J.M. (2010) A new capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 46(12).

Mualem Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522.

Peters A. (2013) Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water resources. Research*, 49(10), 6765-6780.

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(9), 7535-7539.

Peters A., Groh J., Schrader F., Durner W., Vereecken H., Pütz T. (2017) Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. *Journal of hydrology*, 549, 731-740.

Peters A., Iden S.C., Durner W. (2015) Revisiting the simplified evaporation method: Identification of hydraulic functions considering vapor, film and corner flow. *Journal of Hydrology*, 527, 531-542.

Schaap M.G., Leij F.J. (2000) Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 843-851.

Šimůnek J., Šejna M., Saito H., Sakai M., Van Genuchten M.T. (2008) The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably

saturated media, version 4.0: HYDRUS Software Series 3. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 315.

Snyder R.L., Bali K., Ventura F., Gomez-MacPherson H. (2000) Estimating evaporation from bare or nearly bare soil. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126(6), 399-403.

Van Genuchten M.T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.

Acknowledgement

The first author greatly acknowledges the support of the DAAD program. Experimental part of this research was conducted at the lysimeter station of Grünewalde, in Finsterwalde, Germany.

Estimating soil hydraulic parameters from lysimeter data: a Bayesian perspective

Marleen Schübl^{1*}, Giuseppe Brunetti¹ and Christine Stumpp¹

Zusammenfassung

Deterministische Modelle sind für die Simulation der Grundwasserneubildung geeignet. Parameter können mittels Messungen des Bodenwassergehalts, Matrixpotenzials und Sickerwassermengen invers geschätzt werden. Inwiefern die Art der für die Modellkalibrierung verwendeten Messungen die Modellunsicherheiten beeinflusst, ist jedoch wenig bekannt und soll in dieser Studie unter Anwendung einer Bayesschen Analyse untersucht werden. Die Daten eines monolithischen Gumpenstein-Lysimeters wurden systematisch zur Modellkalibrierung verwendet und die damit verbundenen Parameter- und Vorhersageunsicherheiten für die Grundwasserneubildung quantifiziert. Basierend auf unseren Ergebnissen für den untersuchten Standort empfehlen wir die Kombination von Sickerwasser- und Matrixpotentialmessungen, um die Unsicherheit in der Grundwasserneubildungsvorhersage zu minimieren. Um eine allgemeingültige Empfehlung für andere Böden oder Klimazonen auszusprechen, ist jedoch eine umfassendere Analyse nötig.

Schlagwörter: Bayessche Statistik, Lysimetermodellierung, Grundwasserneubildung

Summary

Deterministic models are applicable for the simulation of groundwater recharge. Parameters can be inversely estimated using measurements of soil water content, matric potential and seepage. However, it is not well understood how the type of observations used for model calibration affects associated model uncertainties which was specifically assessed in this study applying a Bayesian analysis. Data from a monolithic Gumpenstein lysimeter was systematically used for calibration and quantification of associated parameter and predictive uncertainties in groundwater recharge estimation. Based on our results for the investigated site, we recommend simultaneous assimilation of lysimeter seepage and matric potential measurements to minimize uncertainty in groundwater recharge prediction. However, a more comprehensive analysis is required to make a generally valid recommendation for other soils or climates.

Keywords: Bayesian statistics, lysimeter modelling, groundwater recharge estimation

Introduction

Knowledge on water recharging aquifers through the vadose zone is essential for a sustainable use of groundwater (Taylor et al. 2013). However, groundwater recharge rates are difficult to determine in practice. Lysimeter experiments generally provide an important tool for the estimation of water fluxes combined with physically based models the information from lysimeter experiments can be used for improved model calibration and for the simulation of groundwater recharge rates at the field scale. The improved, inverse model calibration is required for the identification of soil hydraulic properties

¹ University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU) Vienna, Institute for Soil Physics and Rural Water Management, Muthgasse 18, A-1190 Vienna

* Ansprechpartner: Marleen Schübl, email: marleen.schuebl@boku.ac.at

(SHP) from in-situ measurements because SHP from laboratory experiments can only be poorly transferred to field conditions. However, inverse calibration can be associated with uncertainties resulting from different sources of systematic or random errors (Beven 2006, Vereecken et al. 2016) which propagate further into the recharge prediction. The extent of the model uncertainty depends for example on the type and combination of data that is assimilated in the model. For an efficient soil water monitoring design that is aimed at the estimation of groundwater recharge, it would therefore be helpful to identify which information is needed or best suited for the reduction of uncertainty in groundwater recharge prediction.

Therefore, a Bayesian framework is used for estimating model uncertainties in HYDRUS-1D in different scenarios when assimilating time series of soil water content, matric potential and seepage data obtained from a monolithic lysimeter experiment in Gumpenstein, Styria, Austria. The uncertainty in groundwater recharge prediction is evaluated accordingly.

Material and Methods

Inverse estimation of soil hydraulic properties in HYDRUS 1-D

The HYDRUS-1D software numerically solves water flow equations in variably saturated porous media accounting for plant water uptake. The relation between soil pressure head and soil water content is given by the van-Genuchten-Mualem model (VGM) (Šimůnek et al. 2008). The SHP can be inversely estimated by minimizing the difference between simulated and the observed variables. Three different types of observations are used for assimilation in this study in different scenarios (*Table 1*): daily measurements of volumetric soil water content and matric potential in two depths (25 and 45 cm), and daily amounts of seepage obtained from the lysimeter in 1.5 m depth. Setting the lower boundary condition to seepage face, the software is used to simulate the seepage flux in 1.5 m depth as approximation to the groundwater recharge flux.

Bayesian analysis

HYDRUS-1D is coupled with a Bayesian framework for estimating model uncertainties. It is used to integrate a priori knowledge of the system in the statistical inference, to combine it with the observed data in order to derive the posterior probabilities of model parameters. Given several measurement types, the resulting data likelihood is aggregated as the product of likelihoods from the individual data types. For each type of measurement, an uncorrelated normally distributed measurement error is assumed and estimated alongside with the model parameters. Different subsets of observed soil water data were included in the Bayesian analysis for the evaluation of the data's effectiveness in constraining model predictive uncertainties similar to Brunetti et al. (2020). The Affine invariant ensemble sampling algorithm emcee (Foreman-Mackey et al. 2013) is used in combination with HYDRUS-1D (Brunetti et al. 2019) to efficiently draw samples from the posterior distribution until a convergence criterion is met.

Table 1. Scenarios for the assimilation of measured variables (volumetric soil water content and matric potential measured in 25 and 45 cm depth; seepage collected from the lysimeter at 1.5 m depth) using HYDRUS-1D.

Scenario A	Seepage & matric potential
Scenario B	Seepage
Scenario C	Seepage & matric potential & vol. soil water content
Scenario D	Seepage & vol. soil water content
Scenario E	Matric potential & vol. soil water content
Scenario F	Matric potential
Scenario G	Vol. soil water content

Results and Discussion

The scenarios in *Table 1* are sorted by decreasing model response variance (A-G). Posterior predictive checks showed that the lowest uncertainty in groundwater recharge prediction was achieved with the simultaneous assimilation of seepage and matric potential measurements (Scenario A) which provided an improvement compared to the assimilation of seepage measurements alone (Scenario B). Additional information from soil water content measurements (Scenario C) reduced parameter uncertainties, especially in the residual and saturated water content. However, it did not further reduce the uncertainty in groundwater recharge prediction. The marginal and joint parameter uncertainties for Scenario A is shown in *Figure 1*, the resulting uncertainties in groundwater recharge prediction are shown in *Figure 2*. The Scenarios that did not involve assimilation of seepage data (scenarios E-G) resulted in the largest uncertainties in the prediction of groundwater recharge.

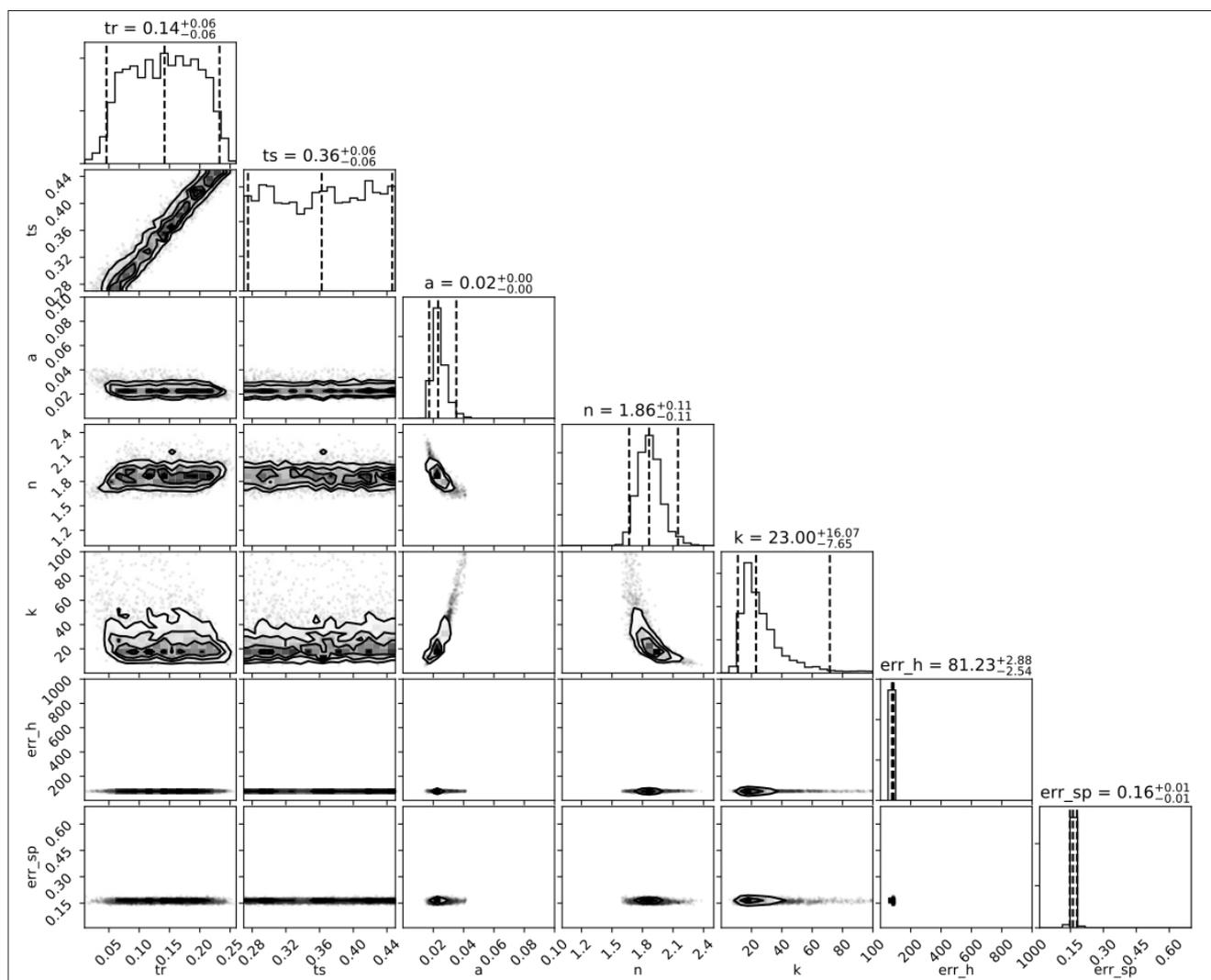
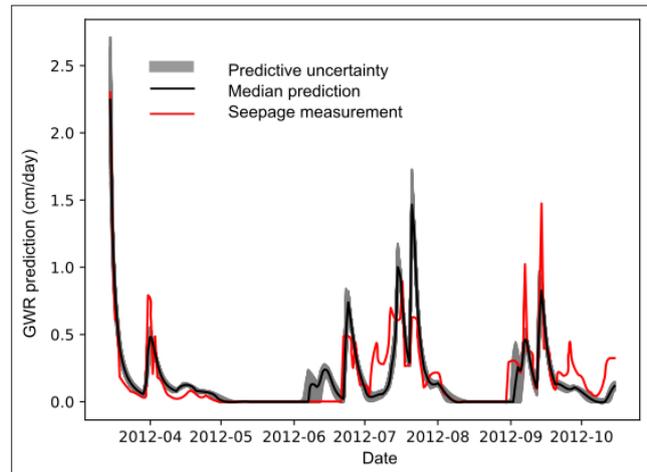


Figure 1. Uncertainties in SHP and measurement errors for Scenario A (assimilation of seepage and matric potential measurements): tr = residual water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), ts = saturated water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), a = VGM shape parameter α (cm^{-1}), n = VGM shape parameter n (-), k = saturated hydraulic conductivity (cm d^{-1}), err_h = measurement error in matric potential (hPa), err_sp = measurement error in seepage measurement (cm). Upper panels of each column depict the marginal posterior distributions of each parameter. Numbers are given for the median value and the 95% uncertainty range, drawn as dashed lines. The lower panels in each column show the joint posterior distribution of two parameters each.

Figure 2. Posterior uncertainty in groundwater recharge (GWR) prediction according to Scenario A compared to lysimeter measurements (red) for the model calibration period.



Conclusion and Outlook

This study provides an example for the applicability of a Bayesian analysis with real data from a lysimeter experiment for determining uncertainties in the inverse estimation of SHP and the associated uncertainty in groundwater recharge prediction. Based on our results for the investigated site, we recommend simultaneous assimilation of lysimeter seepage and matric potential measurements to minimize uncertainty in groundwater recharge prediction. In order to make general recommendations for an efficient soil water monitoring design for the simulation of groundwater recharge, a more comprehensive analysis is required for other soils or climates.

References

- Beven K. (2006) A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 18-36.
- Brunetti G., Šimůnek J., Bogena H., Baatz R., Huisman J.A., Dahlke H., Vereecken H. (2019) On the Information Content of Cosmic-Ray Neutron Data in the Inverse Estimation of Soil Hydraulic Properties. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-24.
- Brunetti G., Papagrorgiou I.A., Stumpp C. (2020) Disentangling model complexity in green roof hydrological analysis: A Bayesian perspective. *Water Research*, 182.
- Foreman-Mackey D., Hogg D.W., Lang D., Goodman J. (2013) emcee: The MCMC Hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(925), 306-312.
- Šimůnek 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.
- Taylor R.G., Scanlon B., Döll P., Rodell M., Van Beek R., Wada Y., Longuevergne L., Leblanc M., Famiglietti J.S., Edmunds M., Konikow L., Green T.R., Chen J., Taniguchi M., Bierkens M.F.P., Macdonald A., Fan Y., Maxwell R.M., Yechieli Y., et al. (2013) Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322-329.
- Vereecken H., Schnepf A., Hopmans J.W., Javaux M., Or D., Roose T., Vanderborght J., Young M.H., Amelung W., Aitkenhead M., Allison S.D., Assouline S., Baveye P., Berli M., Brüggemann N., Finke P., Flury M., Gaiser T., Govers G., et al. (2016) Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15(5), vzj2015.09.0131.

Abschätzung und Reduktion der Nitratauswaschung im Feldgemüsebau

Ernst Spiess^{1*}, Frank Liebisch¹, Reto Neuweiler² und Oliver Zemek¹

Zusammenfassung

Das Nitratauswaschungspotenzial von 40 Gemüsearten wurde anhand von Literaturwerten zum N-Düngebedarf, zur N-Menge in den Ernterückständen und zur Wurzeltiefe klassifiziert. Die Auswaschung könnte insbesondere durch die Steuerung der Bewässerung, eine genauere Ermittlung des N-Düngebedarfs, eine vermehrte Integration von Zwischenkulturen in die Fruchtfolge sowie ein optimiertes Ernterückstandsmanagement reduziert werden.

Schlagwörter: Düngung, Ernterückstände, Stickstoff, Wurzeltiefe

Summary

The nitrate leaching potential of 40 vegetable species was classified on the basis of literature values on N fertilizer requirement, N quantity in crop residues and rooting depth. Leaching could be reduced in particular by controlling irrigation, a more precise determination of the N fertilizer requirement, an increased integration of catch crops in the rotation and an optimized crop-residue management.

Keywords: crop residues, fertilization, nitrogen, rooting depth

Einleitung

Bei stark erhöhten Nitratkonzentrationen in einer Trinkwasserfassung stellt sich meistens die Frage, wie die im Einzugsgebiet der Wasserfassung angebauten Kulturen hinsichtlich ihres Auswaschungspotenzials einzuschätzen sind. In solchen Gebieten wird oftmals auch Gemüse angebaut. Die Literatur zu den Stickstoff(N)-Verlusten durch Auswaschung im Feldgemüsebau zeigt ungeachtet der Methodik (Lysimeter, Saugkerzen, Anion-Austauschverfahren, N_{\min} -Bodenproben, Modellierung) ein erhebliches Auswaschungspotenzial unter bzw. nach Gemüsekulturen. Die publizierten Ergebnisse eignen sich jedoch nicht oder nur bedingt für eine Differenzierung der Nitratauswaschung nach Gemüsearten, weil sich die Standort- und Versuchsbedingungen wie Boden und Klima, die Bewirtschaftungsmaßnahmen und die Messmethoden stark unterscheiden. In einer Literaturstudie (Zemek et al. 2020) wurden deshalb Freilandgemüsearten nach deren Auswaschungspotenzial klassifiziert und Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Reduktion der Nitratauswaschung evaluiert.

Material und Methoden

Für 40 Gemüsearten wurden quantitative Daten (i) zum N-Düngebedarf, (ii) zur N-Menge in den Ernterückständen und (iii) zur Wurzeltiefe zusammengestellt. Anschließend wurde das Nitratauswaschungspotenzial mit Hilfe dieser drei Parameter eingeschätzt, indem die Gemüsearten für jeden Parameter in eine von vier Klassen eingeteilt wurden. Jeder Klasse wurde eine Punktzahl von 1 (geringer) bis 4 (sehr hoher Beitrag zum Auswaschungspotenzial) zugeordnet. Vier Punkte wurden bei hohem N-Düngebedarf, einer

¹ Agroscope, Reckenholzstraße 191, CH-8046 Zürich, ² Agroscope, Müller-Thurgau-Straße 29, CH-8820 Wädenswil

* Ansprechpartner: DI Ernst Spiess, email: ernst.spiess@agroscope.admin.ch

großen N-Menge in den Ernterückständen bzw. einer geringen Wurzeltiefe vergeben. Aus der Summe der Punkte der drei Parameter, die minimal 3 und maximal 12 beträgt, ergab sich dann das Nitratauswaschungspotenzial.

Resultate und Diskussion

Nitratauswaschungspotenzial

Der **N-Düngebedarf** ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Sollwert an mineralischem Stickstoff (N_{min}) und dem N_{min} -Gehalt im Boden vor Kulturbeginn. Der N_{min} -Sollwert repräsentiert das N_{min} -Angebot, mit dem der Höchstertragsbereich im Mittel vieler Düngungsversuche gerade erreicht wird. Um Höchsterträge zu erzielen und Qualitätseinbußen (z.B. unzureichende Grünfärbung der Blätter) zu vermeiden, sollte bei manchen Kulturen ein N_{min} -Mindestvorrat im durchwurzelten Bodenbereich bis zur Ernte vorhanden sein, denn ein großer Teil der Feldgemüsearten wird schon im vollen vegetativen Wachstum geerntet, wenn der N-Bedarf der Kulturen noch hoch ist. Kohlgemüse weist im Vergleich zu Blattgemüse (z.B. Nüsslisalat und Spinat) einen hohen N_{min} -Sollwert auf (Abbildung 1).

Im Zuge der Ernte können im Freilandgemüsebau erhebliche Mengen an **Ernterückständen** mit entsprechend großen N-Mengen auf dem Feld anfallen. Im Durchschnitt aller Kulturen verbleiben 118 kg N ha^{-1} mit den Ernterückständen auf dem Feld, wobei die Spanne von 5 bis 550 kg N ha^{-1} reicht (Abbildung 2).

Die **Wurzeltiefe** ist von Bedeutung, weil Nitrat in tieferen Bodenschichten nur von tiefwurzeln Kulturen aufgenommen und damit vor der Auswaschung ins Grundwasser bewahrt werden kann. Die wenigen verfügbaren Publikationen lassen auf große Unterschiede in der Durchwurzelungstiefe zwischen den Gemüsearten schließen (Abbildung 3).

Ein hohes **Nitratauswaschungspotenzial** (Tabelle 1) besteht insbesondere bei den Kohlarten und beruht auf der hohen N-Düngung und den großen N-Mengen in den Ernterückständen, wobei bei Kabis die in der Literatur hervorgehobene große Wurzeltiefe zur Verringerung des Potenzials beiträgt. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei

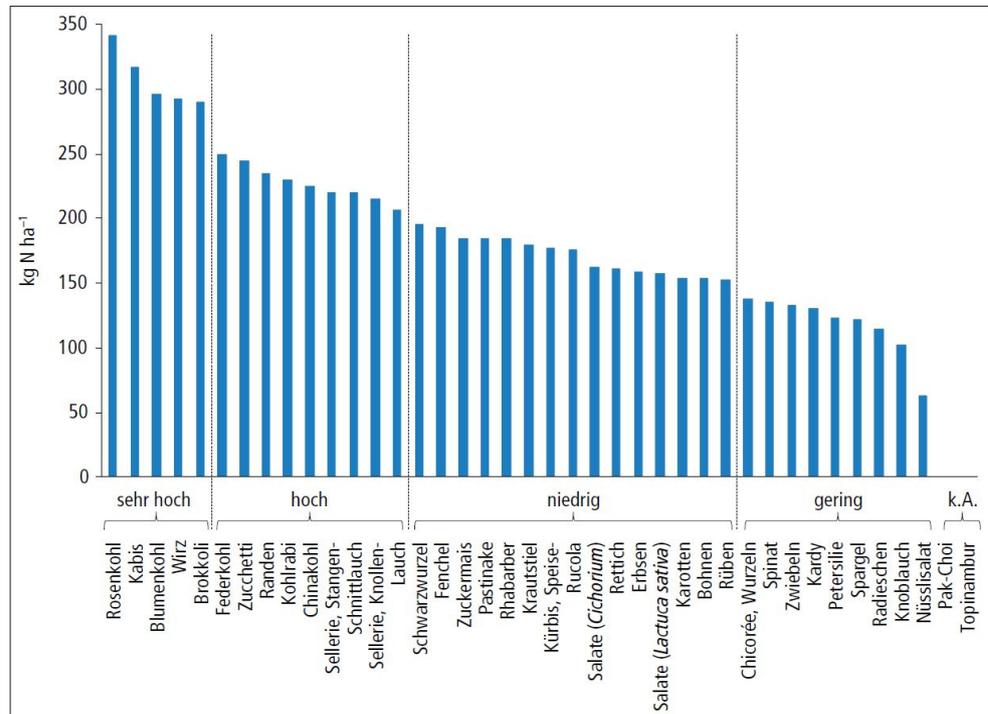


Abbildung 1: N_{min} -Sollwerte der Gemüsearten zur Bestimmung des N-Düngebedarfs im Freilandgemüsebau nach der N_{min} -Methode (k.A. = keine Angabe).

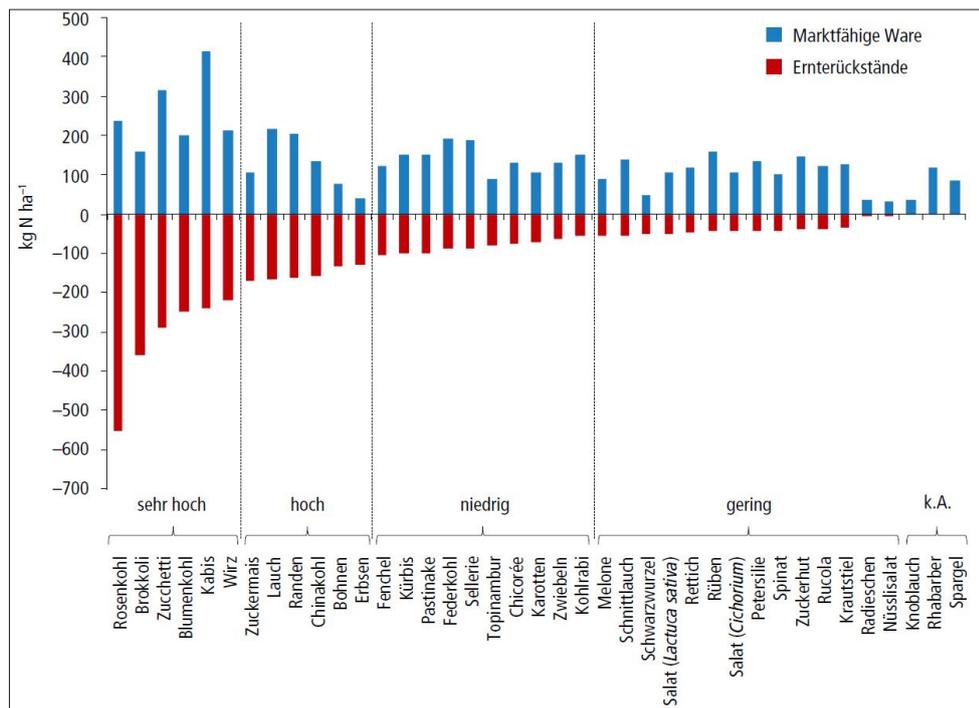


Abbildung 2: Durchschnittliche N-Mengen in den oberirdischen Ernterückständen im Freilandgemüsebau. k.A. = keine Angabe). Zum Vergleich werden die Werte für die marktfähige Ware angegeben.

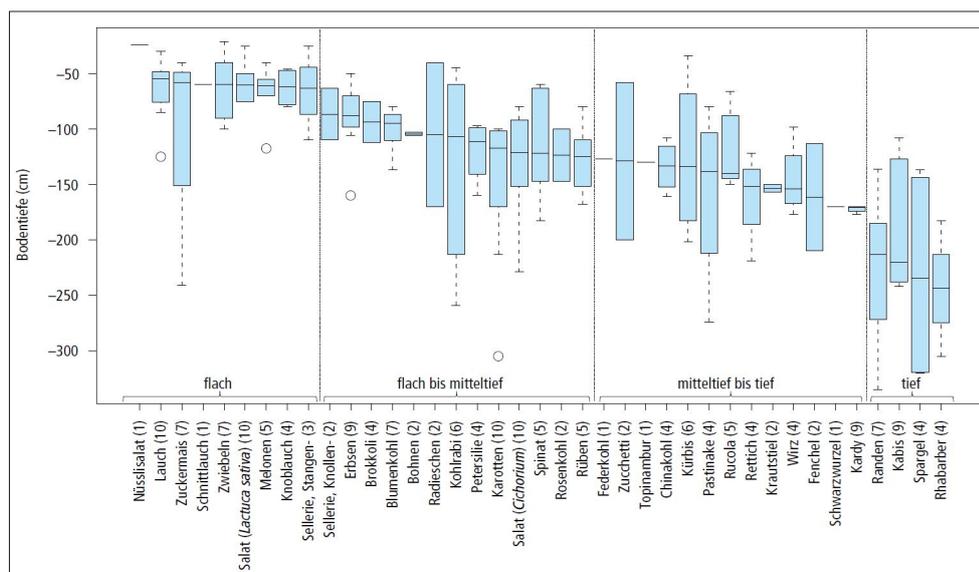


Abbildung 3: Wurzeltiefen der Gemüsearten am Ende der Kulturzeit (Anzahl der Messwerte in Klammern).

den Blattgemüsearten (z.B. Salate, Spinat und Rukola), die zwar meist eine geringe Wurzeltiefe aufweisen, ein geringes bis mittleres Potenzial aufgrund des niedrigeren N-Düngebedarfs und der kleineren N-Menge, die mit den Ernterückständen auf dem Feld verbleibt.

Maßnahmen zur Reduktion der Nitratverluste

Die Bewertung der Bewirtschaftungsmaßnahmen nach ihrem Reduktionspotenzial, dem Wissensstand und der Praxistauglichkeit ergab vier Maßnahmen, die sich zur Reduktion der Nitratauswaschung besonders eignen:

1. Steuerung der Bewässerung: Dazu stehen primär vier Methoden als Entscheidungshilfe zur Verfügung: (i) die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz (z.B. Geisenheimer Steuerung), (ii) mehrschichtige Bodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodelle, (iii)

Tabelle 1: Nitratauswaschungspotenzial der Gemüsearten im Freilandanbau.

Wert	Gemüseart
11	Blumenkohl, Brokkoli, Rosenkohl
10	Lauch, Wirz
9	Zucchetti, Zuckermais, Kabis, Stangensellerie
8	Bohnen, Chinakohl, Erbsen, Federkohl, Knollensellerie, Kohlrabi, Schnittlauch
7	Randen, Zwiebeln, Karotten, Salate (<i>Latuca sativa</i>)
6	Fenchel, Kürbis, Pastinake, Nüsslisalat, Rüben, Salate (<i>Cichorium</i>)
5	Schwarzwurzel, Spinat, Krautstiel, Petersilie, Radieschen, Rettich, Rucola
n.a.	Knoblauch, Chicorée, Rhabarber, Topinambur, Kardy, Spargel, Pak-Choi

n.a. = nicht anwendbar aufgrund fehlender Angaben in der Literatur

- Bodenfeuchtesensoren (z.B. Tensiometer, FDR) und (iv) das kontinuierliche sensorgestützte Monitoring des Pflanzenbestandes (z.B. Bestandestemperatur).
- Verbesserte Ermittlung des N-Düngebedarfs: Vielversprechende Methoden dazu sind (i) die N_{\min} -Methode, welche auf der Messung der N_{\min} -Menge in der von den Wurzeln nutzbaren Bodenschicht zu Kulturbeginn beruht, (ii) das Kulturbegleitende- N_{\min} -Sollwert-System KNS mit mehreren N_{\min} -Bodenproben während der Kulturperiode und (iii) das Computerprogramm N-Expert, das die N-Verfügbarkeit anhand von Bodeneigenschaften, Klima- und Bewirtschaftungsdaten modelliert.
 - Vermehrter Anbau von Zwischenkulturen: Zwischenkulturen nehmen Wasser und N aus dem Boden auf. Dadurch wird die Sickerwasserbildung reduziert, und das anfallende Sickerwasser weist eine geringere Nitratkonzentration auf.
 - Optimierung des Ernterückstandsmanagements: Während die Ernterückstände bis anhin vorwiegend auf den Feldern zurückbleiben, sollte in Zukunft deren Abfuhr mit nachfolgender Weiterverwertung in Vergärungs- und Kompostieranlagen in Erwägung gezogen werden, insbesondere beim Anbau von Gemüsearten mit hohen N-Mengen im zurückbleibenden Pflanzenmaterial sowie beim letzten Satz in der Vegetationsperiode. Dabei ist auch der Humusbilanz Beachtung zu schenken.

Schlussfolgerungen

Der hier vorgestellte Ansatz für eine Differenzierung der Gemüsearten nach dem Nitratauswaschungspotenzial ist mit Hilfe einer Modellierung weiter zu entwickeln. Anstatt einzelner Gemüsearten sollten vielmehr gemüsebauliche Kulturfolgen, die in der Praxis häufig vorkommen, bewertet werden. Eine Überprüfung der modellierten Daten könnte anhand von Messwerten aus neuen Versuchen erfolgen. Durch die konsequente Anwendung der oben beschriebenen Maßnahmen sowie deren Weiterentwicklung erscheint eine Reduktion der Nitratauswaschung im Feldgemüsebau möglich.

Dank

Das Forschungsprojekt NitroGäu wurde finanziell und inhaltlich durch das Bundesamt für Landwirtschaft und den Kanton Solothurn unterstützt.

Literatur

Zemek O., Neuweiler R., Spiess E., Stüssi M., Richner W. (2020) Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau – eine Literaturstudie. Agroscope Science Nr. 95, 117 S. <https://doi.org/10.34776/as95g> [30.11.2020].

Substratevaluierung anhand von Stadtbaumlysi- metern mit pflanzenphysiologischem Monitoring

Anna Zeiser^{1*}, Thomas Weninger¹, Stefan Schmidt², Rainer Weisgram³
und Erwin Murer¹

Zusammenfassung

Die gesunde Entwicklung von Stadtbäumen ist Voraussetzung für deren Funktionalität. Hierbei spielt die Gestaltung des Wurzelraums eine zentrale Rolle. In einer Lysimeteranlage in Wien werden neben optimierten Baumsubstraten auch innovative Schwammstadtsysteme sowie deren Auswirkungen auf die Baumvitalität mittels umfangreicher Sensorik getestet. Erste Messergebnisse zeigten den Einfluss des verwendeten Baumsubstrates auf den Bodenwasserhaushalt und auf das Baumwachstum während der Vegetationsperiode. Bei einer überbauten Variante stellte sich stagnierendes Wachstum als Reaktion auf Wasserstress ein. Dies verdeutlichte die Wichtigkeit der Substratoptimierung hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes. Die Schwammstadtsubstrate waren bereits nach einer Vegetationsperiode weitreichend durchwurzelt. Dies wurde sowohl durch die gemessene Wasseraufnahme aus dem Boden sichtbar, als auch durch fotografische Erkundungen. Im zukünftigen Betrieb sollen noch weitere Vitalitätsparameter erfasst werden.

Schlagwörter: Stadtbäume, Baumsubstrat, Transpiration, Vitalitätsbeurteilung

Summary

The healthy development of urban trees is a prerequisite for their functionality. In this context, the design of the root zone plays a central role. In addition to optimized tree substrates, innovative sponge city systems and their effects on tree vitality are being tested in a lysimeter facility in Vienna with the aid of extensive measurement sensors. Initial measurement results show a clear influence of the tree substrate used on the soil water balance and this in turn on tree growth during the vegetation period. Stagnant growth occurred as a reaction to water stress in an overbuilt type. This illustrates the importance of tree substrate optimization with respect to soil water balance. The sponge substrates are extensively rooted after only one growing season. This is visible from the measured soil water balance as well as from photographic explorations. In future operation, further vitality parameters are to be recorded.

Keywords: Urban Trees, Tree Substrates, Transpiration, Tree Vitality

Einleitung

Der städtische Raum ist durch seine dichte Bebauung besonders prädestiniert dafür, Hitzeinseln auszubilden, die Gesundheit und Wohlbefinden der BewohnerInnen gefährden. Die fortschreitenden Klimaveränderungen in Richtung Erwärmung und Trockenheit verstärken das Risiko. Grünflächen, insbesondere Stadtbäume, sind aufgrund ihrer kühlenden Wirkung bewährte Instrumente zur Vermeidung solcher Bedrohungen. Da die genannten Einflüsse auch ein langjähriges, vitales Gedeihen von Bäumen erschweren, sind angepasste

¹ Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Pollnbergstraße 1, A-3252 Petzenkirchen; ² Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Gartenbau Schönbrunn, Grünbergstraße 24, A-1130 Wien; ³ Wiener Stadtgärten MA 42, Johannesgasse 35, A-1030 Wien

* Ansprechpartner: DI Anna Zeiser, email: anna.zeiser@baw.at

Methoden gefragt, um die positiven Wirkungen für die Stadtbevölkerung bereit stellen zu können. Für die Vitalität von Stadtbäumen entscheidend ist die Ausbildung eines ausreichend großen und gut erschließbaren Wurzelvolumens. Dazu werden laufend neue Varianten des Unterbodenaufbaus entwickelt, die höhere Vitalität versprechen. Vor allem das Schwammstadt-Prinzip hat Potenzial, da auch unter Verkehrsnebenflächen Wurzelraum geboten wird. Diese Technik wird in Österreich zunehmend erprobt (Grimm et al. 2019). Um weitreichende Aussagen zur Wirksamkeit der Varianten des Bodenaufbaus zu gewinnen, können verschiedene Messmethoden kombiniert werden. Neben der Standardanwendung von Lysimetern, also der vollständigen Überwachung des Wasserkreislaufes, bietet eine Analyse der Pflanzenentwicklung vielversprechende Möglichkeiten. Eine weit verbreitete Methode ist die kombinierte Messung des Saftflusses im Stamm und der Entwicklung des Baumumfanges mittels Dendrometer (McCarthy et al. 2011). Gute Erfahrungen bei Bäumen wurden auch mit Thermographie, Messung der stomatären Leitfähigkeit und Chlorophyllfluoreszenz sowie Kombinationen dieser Methoden erzielt (Wullschlegler et al. 1998, Hermans et al. 2003).

Bauliche Einschränkungen durch verdichtete Bodenkörper aber auch Übergänge zwischen verschiedenen Substratschichten können Barrieren bilden und somit die langfristige Standfestigkeit gefährden und das vitale Wachstum einschränken. Mittels bildgebender Verfahren mit Hilfe von durchsichtigen Einbauten kann die Wurzelentwicklung regelmäßig kontrolliert und qualitativ, aber auch quantitativ gemonitort werden (Johnson et al. 2001).

Unter Einbeziehung all dieser Aspekte wurde in der Lysimeteranlage Jägerhausgasse in Wien die eingespielte Messstrategie ausgebaut und mit pflanzenphysiologischen Methoden erweitert. Damit wird das Potential erhöht, aussagekräftige Vergleiche zwischen verschiedenen Varianten der Unterbodengestaltung von Stadtbäumen ziehen zu können.

Methoden

Die Lysimeteranlage Jägerhausgasse besteht aus sechs Lysimetern und wurde 2015 zur langjährigen Testung von unterschiedlichen Baumsubstraten errichtet (Murer und Schmidt 2019). Im Jahr 2019 wurden drei Lysimeter mit Schwammstadtsubstraten für Stadtbäume erneuert. Während sich die ursprünglichen Baumsubstrat-Lysimeter hinsichtlich Substrateigenschaften und Volumen an den Richtlinien der FLL (2010) orientierten und einer Optimierung des Substrates in der Baumscheibe in Ballennähe dienen, zielte der Lysimeteraufbau mit Schwammstadtssystem auf die Wurzelraumerweiterung unter Verkehrsnebenflächen ab. Das Schwammstadtsubstrat besteht aus Steinen, die für die Lastabtragung von Verkehrsflächen sorgen, und in deren Hohlräumen eingeschlammtem Feinsubstrat, das dem Baum Wasser, Nährstoffe und Luft zur Verfügung stellen soll. Solche Substrate wurden in den Lysimetern eingebaut, bepflanzt und mit Sensoren zur

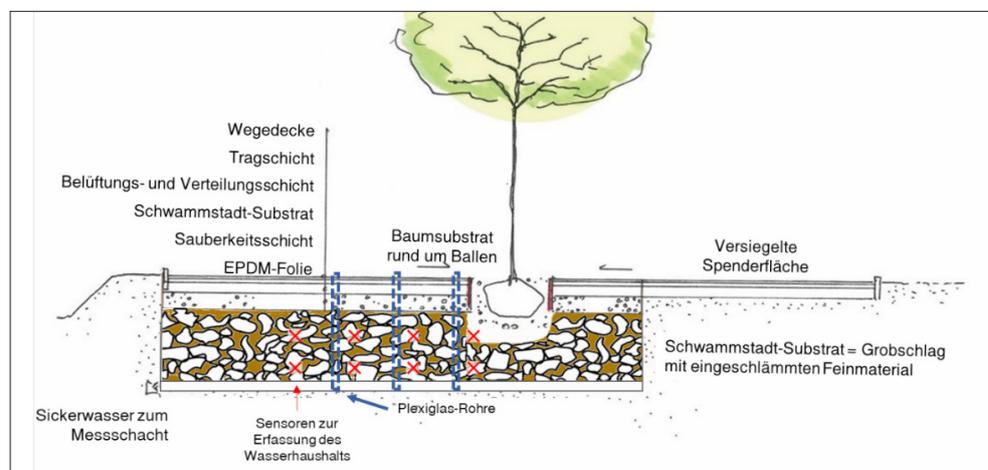


Abbildung 1: Skizze Aufbau Schwammstadt-Lysimeter.

Erfassung von Sickerwasser, volumetrischem Wassergehalt, Matrixpotenzial und Bodentemperatur, sowie der Gewinnung von Bodenwasser in unterschiedlichen Tiefenstufen und Distanzen vom Baum ausgestattet (Abbildung 1).

Zusätzlich zur Beobachtung des Bodenwasserhaushaltes wurde die Messstrategie zum Monitoring von Wachstum und Vitalität kontinuierlich weiterentwickelt. Die Grundlage dafür bilden seit 2019 kontinuierliche Messungen von Saftstrom (tissue heat balance Prinzip) und Stammumfang mit Sensoren von EMS Brno (SF81, EMS 8X, DR 26E). Die Wasseraufnahme der Einzelbäume aus dem Boden wird aus den Saftstrommessungen errechnet und fließt in die Wasserbilanz ein. Der optische Gesamteindruck und der Zuwachs an ausgewählten, markierten Zweigen werden zweimal jährlich bonitiert. Die neu errichteten Schwammstadt-Lysimeter wurden zusätzlich mit transparenten Plexiglasrohren (Innendurchmesser = 3,4 cm) in drei Entfernungen von der Stammachse (70 cm, 150 cm, 220 cm) ausgestattet, in denen regelmäßig Fotoaufnahmen zur Detektion von Wurzeln gemacht wurden (TESLONG Dual Lense Endoscope). Ab 2021 werden regelmäßig systematische Messungen der stomatären Leitfähigkeit (METER SC-1) und Infrarotaufnahmen (FLIR C5) in die Beurteilung mit einbezogen und sollen vor allem Informationen über den Trockenstressstatus der Bäume liefern.

Ergebnisse und Diskussion

Die Lysimeteranlage unterliegt seit ihrer Erbauung einem kontinuierlichen Verbesserungs- und Erweiterungsprozess, wodurch nicht das vollständige Datenspektrum über

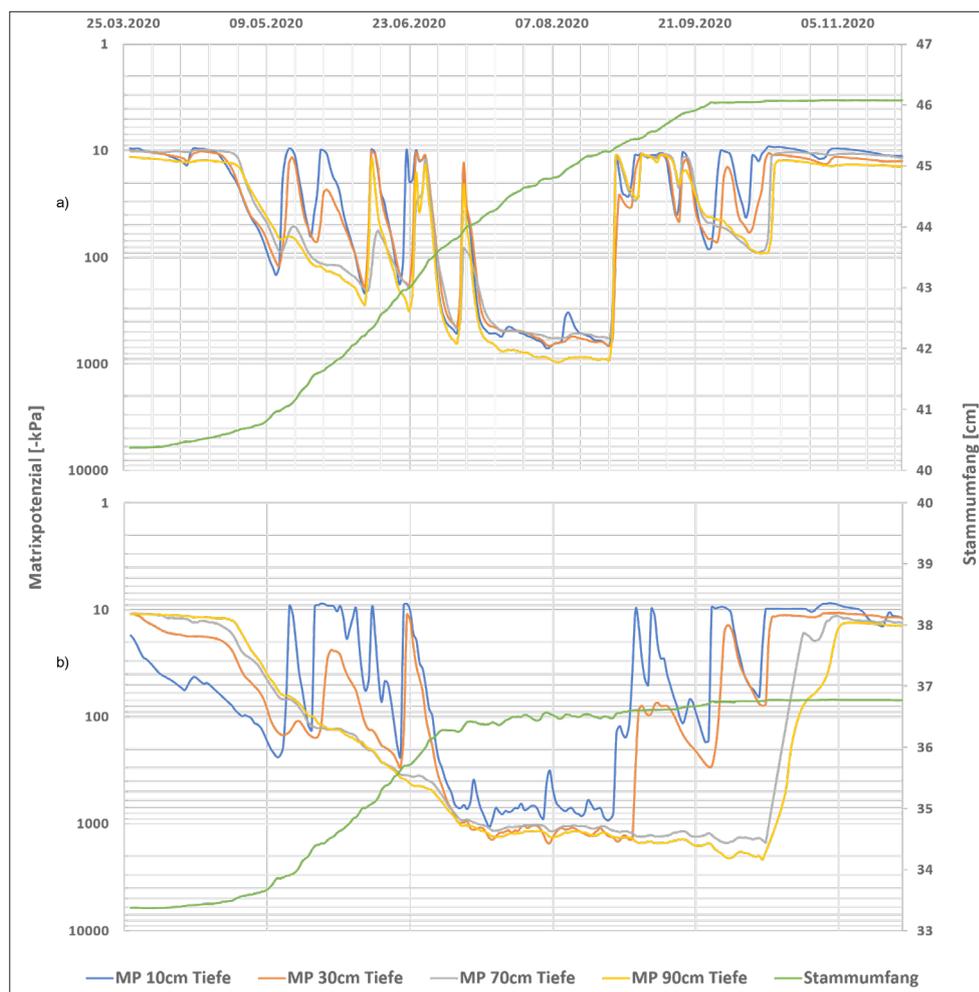


Abbildung 2: Verlauf von Matrixpotenzial (MP) und Stammumfang im Jahr 2020 in a) Lysimeter 3, nicht überbaubares Wiener Baumsubstrat und b) Lysimeter 5, überbaubares Wiener Baumsubstrat.

die gesamte Laufzeit zur Verfügung steht. Für die Kombination von Beobachtungen zum Bodenwasserhaushalt und pflanzenphysiologischen Messungen werden Intervalle mit verfügbaren homogenen Datensätzen des Jahres 2020 herangezogen.

Im Lysimeter mit nicht überbaubarem Wiener Baumsubstrat nahm der Stammumfang über die gesamte Wuchsperiode mit beinahe gleichbleibender Rate zu (Abbildung 2a) während unter überbaubarem Baumsubstrat eine kürzere kontinuierliche Wachstumsphase vor einer annähernden Stagnation ab Ende Juni erkennbar war (Abbildung 2b). Stagnierendes Wachstum während der Vegetationsperiode lässt einen oder mehrere Stressfaktoren vermuten. Die gemessenen Matrixpotenzialwerte in diesem Zeitraum von -1200 bis -2000 kPa deuten auf Wasserstress hin (Abbildung 2b). Das Matrixpotenzial im nicht überbaubaren Wiener Baumsubstrat hielt sich im untersuchten Zeitraum im Bereich -500 bis -1000 kPa, und reagierte in tieferen Schichten wesentlich besser auf Wiederbefeuchtung (2a). Dieser Unterschied veranschaulicht die Bedeutung der Substratgestaltung für die gesunde Entwicklung von Stadtbäumen.

Die Schwammstadt-Lysimeter wurden im Jahr 2020 regelmäßig bewässert, wodurch sich keine Trockenperioden einstellen konnten. Einen Rückschluss auf die Wurzel ausbreitung im Schwammstadtsubstrat ermöglichen die Verläufe der Sensoren MP 50cm - 70cm und MP 100cm - 70cm, die sich im Abstand von 50 und 100 cm vom Baum in einer Tiefe von 70 cm befinden, im September (Abbildung 3). Diese deuten einen Wasserentzug durch Wurzeln an, die bis in die Sensorumgebung eingewachsen waren. Bereits nach einer Vegetationsperiode zeigte die fotografische Erkundung des Wurzelraumes, dass das Schwammstadtsubstrat in einer Entfernung von 70 cm stark (Abbildung 4a) und in 150 cm Entfernung ebenfalls, aber etwas schwächer durchwurzelt war (Abbildung 4b).

Conclusio und Ausblick

Trotz des kurzen Interpretationszeitraumes bieten die Ergebnisse bereits wertvolle Einblicke in das System Stadtbaum. Der Zusammenhang zwischen Stagnation des Wachstums oder sogar Reduktion des Stammumfanges und dem Wasserstress ermöglicht einfaches Monitoring, ohne auf invasive oder manuell aufwändige Messtechnik zurückgreifen zu müssen. Im zukünftigen Betrieb der Lysimeteranlage werden verschiedene portable Messsysteme zusätzlich Informationen über weniger offensichtliche Vitalitätsparameter liefern.

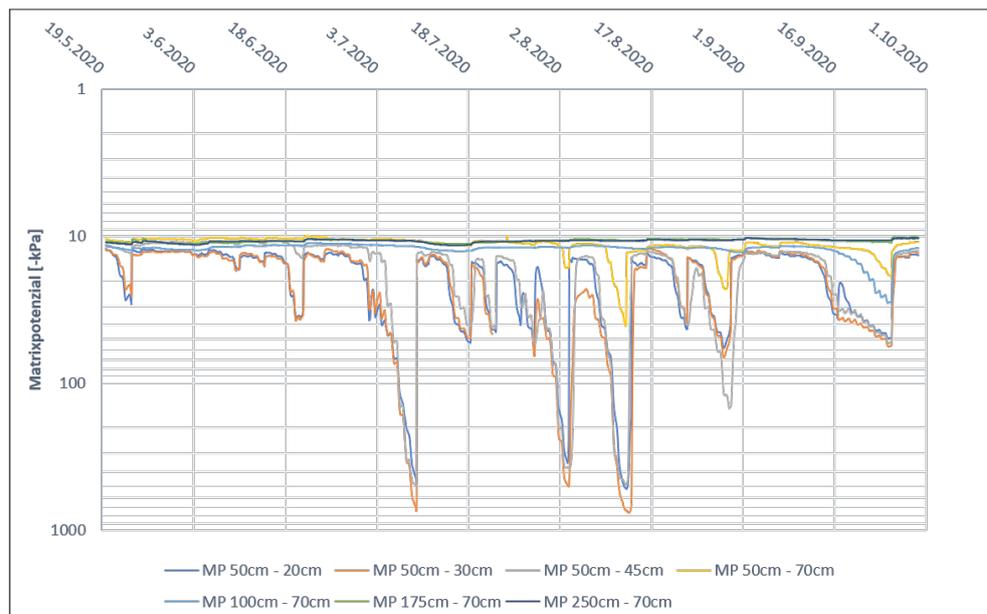


Abbildung 3: Matrixpotenzialverlauf im Jahr 2020 im Lysimeter 4, Schwammstadtsubstrat.



Abbildung 4: Wurzelbeobachtungen am 23.09.2020 im Schwammstadtsubstrat in Lysimeter 4 in einer Tiefe von ca. 50 cm – a) in 70 cm Entfernung, und b) 150 cm Entfernung vom Baum.

Literatur

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. – FLL (2010) Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate.

Grimm K., Murer E., Schmidt S., Zimmermann D. (2019) Das „Schwammstadtprinzip“ und der Arbeitskreis Schwammstadt. ZOLL+ 34, 38-41.

Hermans C., Smeyers M., Rodriguez R.M., Eyletters M., Strasser R.J., Delhaye J.-P. (2003) Quality assessment of urban trees: A comparative study of physiological characterization, airborne imaging and on site fluorescence monitoring by the OJIP-test. J Plant Physiol 160(1), 81-90.

Johnson M.G., Tingey D.T., Phillips D.L., Storm M.J. (2001) Advancing fine root research with minirhizotrons. Environ Exp Bot 45(3), 263-289.

McCarthy H.R., Pataki D.E., Darrel Jenerette G. (2011) Plant water-use efficiency as a metric of urban ecosystem services. Ecol Appl 21(8), 3115-3127.

Murer E., Schmidt S. (2019) Baum-Lysimeter–ein Beitrag zur natürlichen Klimatisierung der Stadt? Lysimetertagung 2019, Tagungsband.

Wullschleger S.D., Meinzer F.C., Vertessy R.A. (1998) A review of whole-plant water use studies in trees. Tree Physiol 18, 499-512.

Zum Wasserhaushalt grundwassernaher Standorte im Wechselspiel von Nass- und Trockenjahren

Ottfried Dietrich^{1*}, Axel Behrendt¹ und Martin Wegehenkel¹

Zusammenfassung

Grundwassernahe Standorte sind durch einen besonderen Wasser- und Stoffhaushalt gekennzeichnet, welcher sehr sensibel auf Veränderungen im hydrologischen System reagiert. In den letzten Jahren kam es in Deutschland zunehmend zu klimatischen Extremen wie Nass- und Trockenjahren. An zwei typischen, als Grasland genutzten, grundwassernahen Standorten wurden Untersuchungen zur Verdunstung und zur Entwicklung der Grundwasserstände durchgeführt. Dabei wurden eine Grundwasser-Lysimeter-Anlage und eine Eddy-Kovarianz-Station zur Messung der Verdunstung genutzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Standorte insbesondere extreme Trockenbedingungen nicht ausreichend kompensieren können, wenn sie nur über geringe Zuflüsse aus größeren Einzugsgebieten verfügen.

Schlagwörter: Grundwasser-Lysimeter, Feuchtgebiet, Grundwassergang, Verdunstung, Bestandskoeffizient

Summary

Shallow groundwater sites are characterised by a special water and matter balance. They react very sensitively to changes in their hydrological system. The probability of climatic extremes such as wet or dry years increased during the last years in Germany. Evapotranspiration rates and groundwater levels were measured at two different managed grassland sites with shallow groundwater tables located in the Federal State of Brandenburg. A groundwater lysimeter station was used for the estimation of evapotranspiration in the Spreewald wetland and an eddy covariance station in the Havelländisches Luch wetland. An average, wet and a dry year were selected for the analyses of the impacts on the water balance. The results show that the sites are not able to compensate the dry conditions sufficiently if these sites are not supplied with additional water from a sufficiently large catchment area.

Keywords: Groundwater lysimeter, wetland, groundwater table, evapotranspiration, crop coefficient

Einführung

Grundwassernahe Standorte prägen weite Teile des norddeutschen Tieflands. Häufig handelt es sich um Moor- oder grundwassernahe Sandstandorte, die heute größtenteils landwirtschaftlich als Grasland genutzt werden. Die Standorte stehen oftmals unter besonderem Schutz als Lebensraum für bedrohte Arten. Ihr Wasserhaushalt gilt als sehr sensibel gegenüber Veränderungen. Er weist eine Reihe von Besonderheiten gegenüber grundwasserfernen Sickerwasserstandorten auf und bestimmt eine Vielzahl von biogeochemischen Prozessen, welche die Standorte zu Quellen oder Senken für Nährstoffe und Treibhausgase werden lassen. Es ist daher von großer Bedeutung die Auswirkungen zunehmender klimatischer Extreme (Nass- und Trockenjahre) auf den Wasserhaushalt dieser Standorte zu untersuchen.

¹ Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Eberswalder Str. 84, D-15374 Müncheberg

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

Material und Methoden

Die Untersuchungsflächen befinden sich im Spreewald südöstlich von Berlin (51°52'N, 14°02'O) und in Paulinenaue im Havelländischen Luch westlich von Berlin (52°41'N, 12°44'O). Beide Standorte sind entwässerte Niedermoore mit flurnahen Grundwasser(GW) ständen, die als Grasland genutzt werden. Sie sind ca. 130 km Luftlinie voneinander entfernt. Die klimatischen Verhältnisse sind daher vergleichbar, jedoch kann es insbesondere bei lokal begrenzten Starkniederschlägen auch große Unterschiede geben. Ausgewertet werden im Beitrag Messdaten aus drei Jahren (2016 - 2018). Das Jahr 2016 entspricht langjährig mittleren Niederschlagsverhältnissen, 2017 ist ein vergleichsweise nasses Jahr und 2018 ein extrem trockenes Jahr.

Beide Standorte sind mit Wetterstationen zur Erfassung der meteorologischen Randbedingungen Lufttemperatur (TL), Niederschlag (P), Nettostrahlung, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit ausgestattet. Die Daten werden für die Berechnung der FAO-Gras-Referenz-Verdunstung (ETp) nach Allen et al. (1998) und der klimatischen Wasserbilanz (KWB) genutzt. Mehrere GW-Logger messen die GW-Stände auf den Untersuchungsflächen. Von diesen werden für die Auswertung eine repräsentative Messstelle im Spreewald (Ref) und zwei Messstellen (M2, M8) im Havelluch ausgewählt, da die Unterschiede in Geländere relief der Untersuchungsfläche im Havelluch größer sind.

Im Spreewald wird eine GW-Lysimeter-Station, deren technische Ausstattung, Datenerfassung und Datenauswertung in Dietrich et al. (2016) ausführlich beschrieben ist, für die Messung der tatsächlichen Verdunstung (ETa) genutzt. Ein Bodenmonolith der Anlage wird hierfür nach dem gemessenen GW-Stand der Messstelle „Ref“ gesteuert.

Auf der Untersuchungsfläche in Paulinenaue wird ETa mit einer Eddy-Kovarianz-Station gemessen. Die Station verwendet einen CSAT3 Ultraschall-Anemometer (Campbell Scientific Ltd.) für die Messung der Windkomponenten und einen LI-7500 (LI-COR Biosciences) für die Messung des Wassergehalts der Luft. Alle Strahlungskomponenten werden mittels eines CNR1 (Kipp & Zonen) und der Bodenwärmestrom mittels Bodenwärmestromplatten (Huxeflux) gemessen. Für die Datenaufbereitung der 20 Hz Messwerte wird das Software Paket TK3 der Universität Bayreuth genutzt (Mauder and Foken 2015). Auf der Basis der 30 Minuten Werte von Nettostrahlung, Bodenwärmestrom, latentem und sensiblem Wärmestrom wird anschließend die Energiebilanzlücke mit der Bowen-Verhältnis-Methode geschlossen (Mauder et al. 2018).

Alle Messwerte werden zu Tages-, Monats- und Jahreswerten aggregiert. Aus der tatsächlichen Verdunstung (ETa) und der Gras-Referenz-Verdunstung (ETp) wird der Bestandskoeffizient Kc berechnet.

$$Kc = ETa / ETp \quad (1)$$

Ergebnisse und Diskussion

Untersuchungsjahre 2016 bis 2018

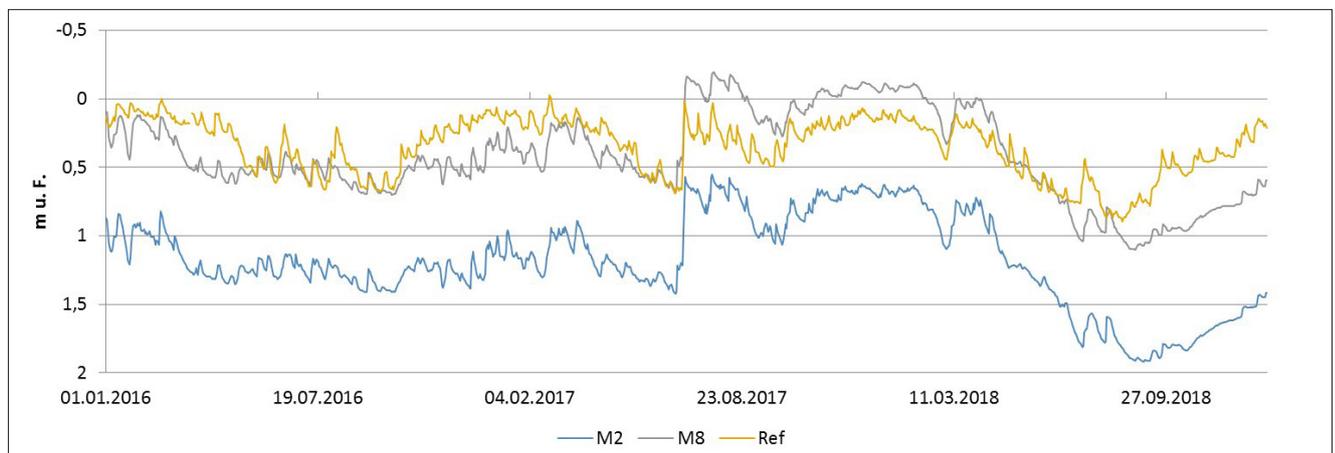
In *Tabelle 1* sind die wichtigsten meteorologischen Kennwerte der drei Untersuchungsjahre zusammengefasst. Sie verdeutlichen, dass sich die drei Jahre nicht nur in den Niederschlägen deutlich voneinander unterscheiden. Das trockene Jahr 2018 ist zusätzlich noch durch eine extrem hohe ETp gekennzeichnet, was in beiden Gebieten zu einem Defizit von über 500 mm in der KWB in der Vegetationsperiode führt.

Auswirkungen auf Grundwasserstände

Entsprechend den meteorologischen Bedingungen unterscheidet sich auch der Verlauf der GW-Stände in den drei Jahren deutlich voneinander (*Abbildung 1*). Im Jahr 2016 ist der GW-Gang an beiden Standorten relativ ausgeglichen. Im Frühjahr 2017 sinken

	Jahr	Spreewald				Havelluch			
		TL	P	ETp	KWB	TL	P	ETp	KWB
		in °C	in mm			in °C	in mm		
		Januar - Dezember							
trockenes Jahr	2018	10,1	325	787	-462	10,2	274	829	-555
mittleres Jahr	2016	9,2	502	636	-134	9,4	455	693	-238
nasses Jahr	2017	9,4	650	649	1	9,5	715	657	58
		April - September							
trockenes Jahr	2018	17,0	153	667	-514	16,8	121	696	-575
mittleres Jahr	2016	15,3	253	547	-294	15,4	238	585	-347
nasses Jahr	2017	14,8	400	529	-128	14,6	468	525	-57

Tabelle 1: Meteorologische Kennzahlen der Jahre 2016 bis 2018.



die Wasserstände bis Ende Juni ab, um dann im nassen 2. Halbjahr mit den extremen Niederschlägen Ende Juni/Anfang Juli stark anzusteigen. An der Messstelle M8 im Havelluch steigen sie für viele Wochen bis über Gelände an und sinken erst im Frühjahr 2018 wieder auf das für die Flächen normale Niveau ab. Danach folgt dann eine extrem trockene und verdunstungsintensive Phase, die zu extrem tiefen GW-Ständen führt. Der Verlauf des GW-Gangs ist in beiden Untersuchungsgebieten ähnlich. Jedoch sind die Auswirkungen im Havelluch wesentlich intensiver als im Spreewald. Das liegt daran, dass die meteorologischen Extreme im Havelluch stärker waren und an den grundverschiedenen hydrologischen Situationen in den beiden Einzugsgebieten. Die Untersuchungsflächen im Havelluch haben nur ein kleines Einzugsgebiet mit geringen Zuflüssen. Der Spreewald verfügt dagegen mit dem oberhalb liegenden Spree-Einzugsgebiet und den darin liegenden großen Wasserspeichern über eine relativ gute Wasserversorgung. So können insbesondere die extrem trockenen Bedingungen besser ausgeglichen werden.

Die Summenhäufigkeiten der GW-Flurabstände in *Abbildung 2* zeigen sowohl die Unterschiede zwischen den drei Jahren, als auch das grundsätzlich gleiche Verhalten der GW-Stände an beiden Standorten noch anschaulicher. Im Havelluch waren die GW-Flurabstände 2018 in rd. 30 % des Jahres noch geringer als im mittleren Jahr 2016. Dieses sind noch Auswirkungen aus dem nassen Jahr 2017, die bis ins Frühjahr 2018 reichten.

Auswirkungen auf Verdunstung

Die mit unterschiedlichen Methoden gemessenen ETa-Tageswerte beider Standorte zeigen den typischen Jahresgang, der jeweils der ETp folgt (*Abbildung 3*). Die Jahressummen der ETp-Werte und auch die Summen von April bis September sind 2018 an beiden Standorten deutlich höher als in den beiden anderen Jahren (*Tabelle 2*). Dieses

Abbildung 1: Tagesmittel der GW-Flurabstände an zwei Messstellen im Havelluch (M2, M8) und der Referenzmessstelle der Lysimeteranlage im Spreewald (Ref).

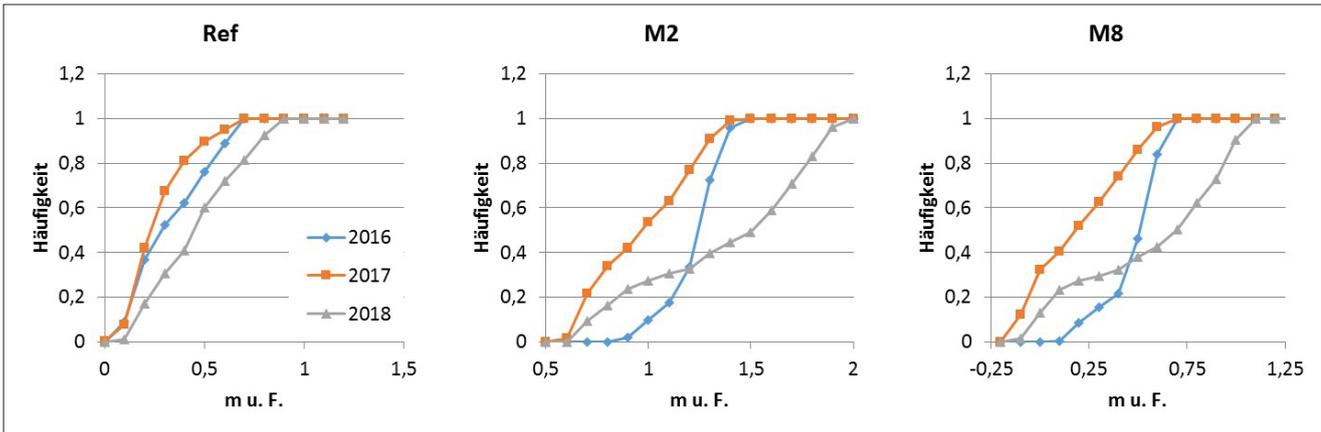


Abbildung 2: Summenhäufigkeit der GW-Flurabstände in den drei Untersuchungsjahren an den Messstandorten im Spreewald (Ref) und Havelluch (M2, M8).

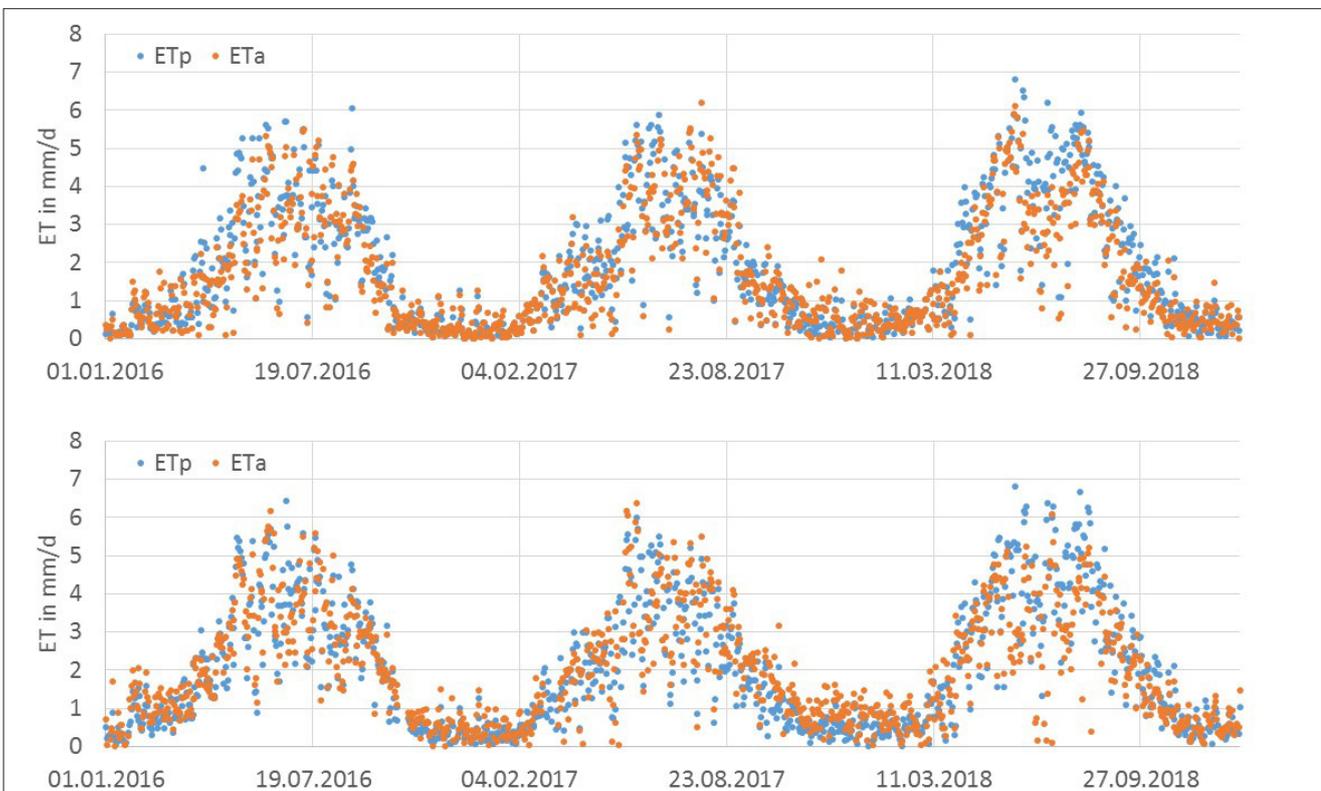


Abbildung 3: Tagessummen der FAO-Gras-Referenz-Verdunstung (ETp) und der tatsächlichen Verdunstung (ETa) im Spreewald (oben) und Havelluch (unten).

Verhalten spiegelt sich bei den ETa-Summen nicht wider. Sowohl bei den Tageswerten als auch die Summenwerte der ETa zeigen eine Unterschreitung der ETp-Werte im trockenen Jahr 2018 durch unzureichende Wasserversorgung des Pflanzenbestandes als Folge der tief abgesunkenen GW-Stände (Abbildungen 1,2).

Auswirkungen auf Kc-Wert

Die Kc-Werte der drei Jahre bzw. der drei Vegetationsperioden unterscheiden sich signifikant voneinander ($p < 0,01$). Sie sind in beiden Gebieten im nassen Jahr 2017 am höchsten und im trockenen Jahr 2018 am niedrigsten (Abbildung 4). Es unterstreicht die zeitweise unzureichende Wasserversorgung des Pflanzenbestandes 2018. Die größere Schwankungsbreite der Werte aus dem Havelluch ist vor allem der Mess-

	Jahr	Spreewald				Havelluch			
		ETp	ETa	nETa	Kc	ETp	ETa	nETa	Kc
		in mm				in mm			
		Januar - Dezember							
trockenes Jahr	2018	787	653	364	0,83	829	680	358	0,82
mittleres Jahr	2016	636	581	364	0,91	693	705	354	1,02
nasses Jahr	2017	649	646	365	1,00	657	689	343	1,05
		April - September							
trockenes Jahr	2018	667	547	183	0,82	696	542	177	0,78
mittleres Jahr	2016	547	487	183	0,89	585	572	183	0,98
nasses Jahr	2017	529	508	183	0,96	525	540	179	1,03

Tabelle 2: Summen der FAO-Gras-Referenz-Verdunstung (ETp), der tatsächlichen Verdunstung (ETa), der Anzahl der Messwerte (nETa) und der mittleren Kc-Werte in Spreewald und Havelluch.

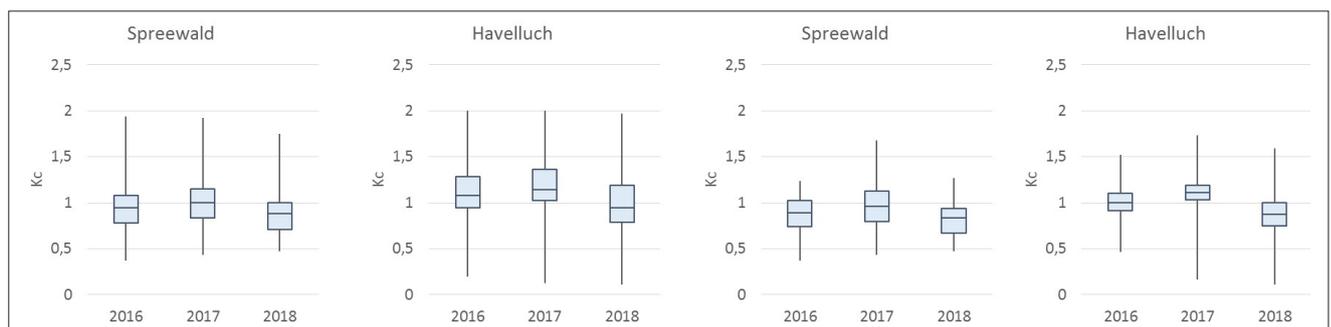


Abbildung 4: Whisker-Plots der Kc-Werte an den Standorten Spreewald und Havelluch im gesamten Jahr (links) und in der Vegetationsperiode von April bis September (rechts).

methode geschuldet. So erfasst der Footprint der Eddy-Kovarianz-Messung eine vielfach größere Fläche als die Grundfläche des Lysimeters und beinhaltet selbst schon eine große Heterogenität im Pflanzenbestand, welche durch die ETa-Werte widergespiegelt wird.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen die Auswirkungen der unterschiedlichen meteorologischen Randbedingungen auf die ETa und infolge der damit verbundenen Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers auf den GW-Gang im Jahresverlauf. Grundwassernahe Standorte mit Grasland-Nutzung haben aufgrund der guten Wasserversorgung des Pflanzenbestandes eine sehr hohe ETa, welche die ETp häufig noch übersteigt. In extrem trockenen Jahren, wie 2018, kann es infolge der hohen ETa auch auf diesen Standorten zur Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers und tief absinkenden GW-Ständen kommen, was wiederum auch zu einer Reduzierung der ETa führt. Insbesondere Standorte ohne ausreichende Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet können daher in ihrem zukünftigen Bestand gefährdet sein.

Literatur

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.

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.

Mauder M., Foken T. (2015) Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3 (update). Eigenverlag, Bayreuth. <https://epub.uni-bayreuth.de/2130/>

Mauder M. et al. (2018) Evaluation of energy balance closure adjustment methods by independent evapotranspiration estimates from lysimeters and hydrological simulations. *Hydrological Processes*, 32(1): 39-50.

Modellierung hydraulischer und geochemischer Prozesse in Grundwasser-Lysimetern

Mariel Davies^{1*}, Ottfried Dietrich¹ und Christoph Merz¹

Zusammenfassung

Auf grundwassernahen Standorten hängt die Funktion des Standortes als Senke oder Quelle für Nährstoffe und Treibhausgase von den hydrologischen und geochemischen Gegebenheiten ab. Gute Kenntnisse der komplexen Prozesse, inklusive des Einflusses von Klimawandel und anthropogener Maßnahmen sind die Voraussetzung für verbesserte Modelle und deren Anwendung für nachhaltiges Management. In einem interdisziplinären ZALF-Projekt werden Wasser- und Stoffflüsse analysiert und modellbasiert bewertet. Ein Teilprojekt befasst sich mit der hydraulischen und geochemischen Modellierung sowie der reaktiven Transportmodellierung der Prozesse in Grundwasser-Lysimetern. Erste Ergebnisse der Parametrisierung und Validierung der hydraulischen Modellierung liegen vor. Sie bilden die Grundlage für die weitere Modellierung von Umsatz- und Transportprozessen und der späteren Entwicklung verbesserter Managementsysteme für die betreffenden Standorte.

Schlagwörter: Ungesättigte Zone, gesättigte Zone, Feuchtgebiet, Niedermoor, hydraulische Modellierung

Summary

The role of shallow groundwater sites as a sink or source of nutrients and greenhouse gases depends on the hydraulic and geochemical situation. Knowledge of the complex processes, including the influence of climate change and anthropogenic activities are required for improved models and their application in sustainable management practices. In an interdisciplinary ZALF-Project, water and solute fluxes are analysed and evaluated by modeling. A subproject deals with hydraulic and geochemical modeling as well as reactive transport modeling of the processes in groundwater lysimeters. The parameterization and validation of the hydraulic model has produced first results. This model will be the foundation for further modeling of turnover and transport processes and the development of improved management practices for the sites concerned.

Keywords: vadose zone, saturated zone, wetland, fen, hydraulic modeling

Einleitung

Die Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe von Niedermooren bzw. Standorten mit flachem Grundwasserstand sind hochkomplex. Die Rolle dieser Standorte als bedeutende Senken oder Quellen für Nährstoffe und gelöste Stoffe hängt maßgeblich von landwirtschaftlichen und wasserwirtschaftlichen Maßnahmen wie Entwässerung und Stauhaltung ab, die den Wasserstand beeinflussen. Die vertikalen Wasserflüsse werden von Faktoren wie Grundwasserstand, Niederschlag, Kapillarität, Evapotranspiration und Wasseraufnahme durch Wurzeln, die teilweise direkt aus dem Grundwasser (GW) oder Kapillarsaum erfolgt, beeinflusst. Diese Flüsse transportieren nicht nur gelöste Stoffe, sie beeinflussen auch

¹ Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Eberswalder Str. 84, D-15374 Müncheberg

* Ansprechpartner: Mariel Davies, email: davies@zalf.de

die geochemischen Verhältnisse wie Sauerstoffverfügbarkeit und Redoxpotential im Bodenprofil, die wiederum die Mobilisierung von Nährstoffen und Kohlenstoff bestimmen. In unserem Projekt werden der Wasser- und Stoffhaushalt eines solchen grundwasser-nahen Standorts experimentell in Grundwasser-Lysimetern (GW-Lysimeter) nachgebildet und hydraulisch und geochemisch modelliert, um vertiefte Prozesskenntnisse zu erlangen.

Material und Methoden

Grundwasser-Lysimeter

Der Lysimeterstandort ist ein entwässertes Niedermoor im Spreewald südöstlich von Berlin (51°52'N, 14°02'O). Er wird als extensives Grasland genutzt und hat einen flach anstehenden Grundwasserspiegel zwischen +10 cm bis minimal -125 cm. Dort werden seit über 10 Jahren vier wägbare GW-Lysimeter mit 2 m³ Volumen betrieben. Sie sind mit einem ungestörten Profil vom selben Standort inklusive erhaltener Vegetation befüllt. Der Grundwasserstand in den Lysimetern kann jeweils mithilfe von Ausgleichsgefäßen und Pumpen an den umliegenden Grundwasserstand oder andere Regimes angepasst werden. Das Verfahren wird in Dietrich et al. (2016) ausführlich beschrieben. Zur Station gehört auch eine Wetterstation, die Lufttemperatur, Bodentemperatur, Niederschlag, Nettostrahlung, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit erfasst (Abbildung 1).

An den Lysimetern werden eine Vielzahl von Parametern erfasst (Tabelle 1). Der Fokus liegt dabei auf der zeitlich hoch aufgelösten Messung hydraulischer und geochemischer Daten. Die weitere technische Ausstattung der Lysimeter (außer Redox- und Sauerstoffsonden) wird ebenfalls ausführlich in Dietrich et al. (2016) dargestellt.

Hydraulische Modellierung

Modelliert werden vertikale Flüsse mit dem eindimensionalen Modell Hydrus-1D (Šimůnek et al. 2008), welches die Richards-Gleichung für die variabel gesättigte Bodenzone numerisch löst. Das Ziel ist, die vertikalen Flüsse und Wassergehalte räumlich hochaufgelöst zu bestimmen und zu charakterisieren. Diese bilden zusammen mit der chemischen Modellierung mit dem Modell PHREEQC (Parkhurst und Appelo 1999) die Grundlage für die reaktive Transportmodellierung mit dem Programm HP1 (Jacques et al. 2006), welches die beiden Modelle kombiniert.

Inputs für die hydraulische Modellierung sind die Bodenhorizonte mit ihren bodenphysikalischen Eigenschaften, die Randbedingungen an der Geländeoberkante (Niederschlag P, FAO-Gras-Referenz-Verdunstung ET_p nach Allen et al. (1998), ermittelt aus

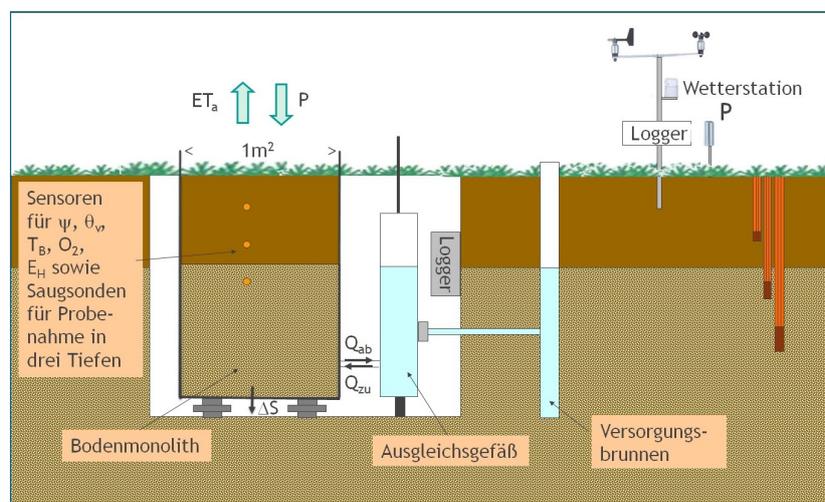


Abbildung 1: Aufbau der wägbaren GW-Lysimeter mit Sensoren und Wetterstation.

Erfasster Parameter	Sensor (Hersteller)	Messintervall	Tiefen
Grundwasserstand	Drucksensor (Keller)	10 min	
Volumetrischer Wassergehalt θ_v	Thetha Probe ML2x (Delta T)	10 min	30, 60, 90 cm
	Profilsonde EnviroSCAN (Sentek)	10 min	10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120 cm
	Diviner 2000 (Sentek)	14 d	0-160 cm, alle 10 cm
Matrixpotential ψ_m	Tensiometer (UGT)	10 min	30, 60, 90 cm
Zufluss und Abfluss am unteren Rand R_{zu}/R_{ab}	Drucksensor (Keller)	1 h	
Speicheränderung ΔS	Wägezellen Modell 3510 (Soemer)	10 min	
Redoxpotential EH	Redoxelektroden (Ecotech)	1 h	30, 60, 90 cm
Sauerstoffgehalt	OXYBase Sauerstoffsonde (PreSens)	1 h	
Inhaltsstoffe und chemische Parameter der Bodenlösung	Probenahme mit Saugsonden (UGT) und anschließender Laboranalyse	14 d	
Wetterdaten		1 min	
Leaf Area Index (LAI)	LAI-Sonde (SunScan)	14 d	
Biomasseertrag		$2 \times a^{-1}$	
Vegetationskartierung		$1 \times a^{-1}$	

Tabelle 1: An der Lysimeterstation erfasste Parameter.

den Wetterdaten, oder die tatsächliche Verdunstung ET_a des Lysimeters), die Randbedingungen am unteren Rand (Zu- und Abflüsse R_{zu}/R_{ab}) und die an die Bodenschichten und hydraulischen Verhältnisse angepasste Diskretisierung (höhere Diskretisierung in Schichten mit höheren Flüssen und Schwankungen des Matrixpotentials). Daraus modelliert Hydrus-1D die Wassergehalte, Matrixpotentiale, Wasserflüsse und -bilanzen in der vorgegebenen räumlichen und zeitlichen Auflösung.

Erste Ergebnisse und Diskussion

Hydraulische Messwerte

Die zeitlich hochaufgelösten Messwerte für Wasserstand (GW), volumetrischen Wassergehalt θ_v und Matrixpotential ψ_m zeigen den typischen Tagesgang von flachen Grundwasserstandorten: Üblicherweise täglich schwankende Werte auf Grund des Zusammenspiels von Verdunstung, Wasserentnahme und Zufluss über den Tag (*Abbildung 2*). Zu erkennen ist in *Abbildung 2* die gegenseitige Abhängigkeit von volumetrischen Wassergehalt θ_v und Matrixpotential ψ_m und der große Einfluss des Niederschlages auf beide Messgrößen. Ebenso sichtbar ist das zeitlich verzögerte Erreichen des gemessenen Wassergehaltes (über 43 %) im Vergleich zum sehr schnellen Ansteigen des Matrixpotentials nach einem Niederschlagsereignis.

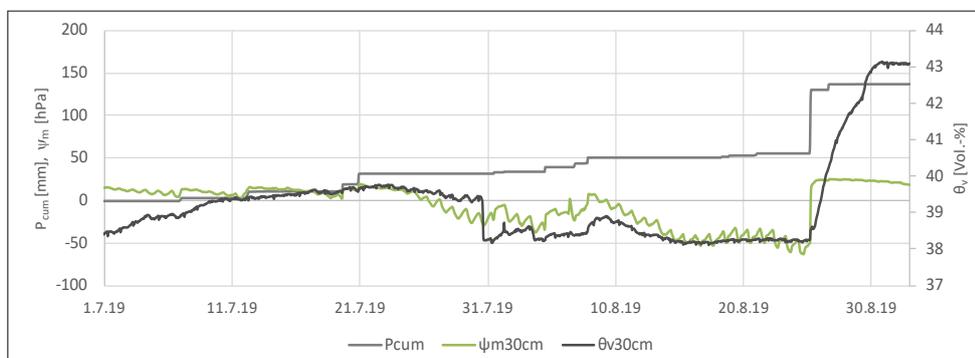
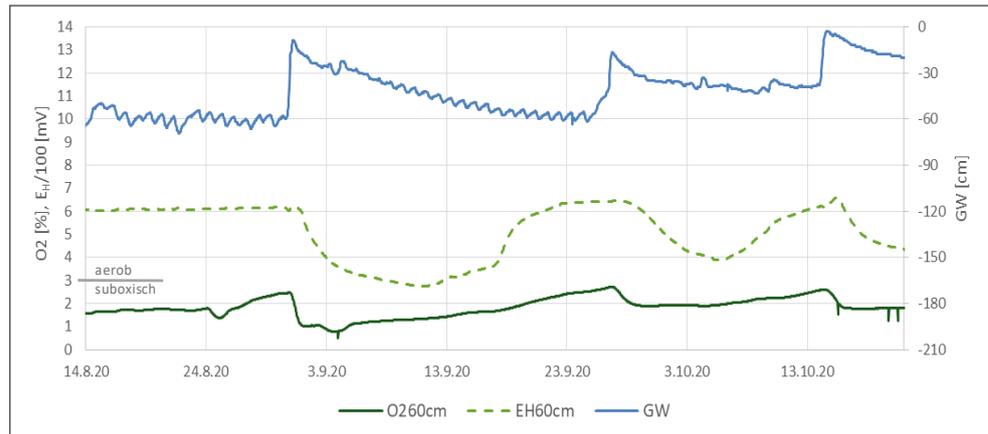


Abbildung 2: Kumulierter Niederschlag (P_{cum}), sowie Matrixpotential (ψ_m 30cm) und volumetrischer Wassergehalt (θ_v 30cm) in 30cm Tiefe.

Abbildung 3: Sauerstoffgehalt (O260cm) und Redoxpotential (EH60cm) in 60 cm Tiefe, Grundwasserstand unter Geländeoberkante (GW).



Messwerte Redoxpotential und Sauerstoffgehalt

Die Messungen des Redoxpotentials und der Sauerstoffgehalte in mehreren Tiefen zeigen den Zusammenhang zwischen Wasserstand und Geochemie. Beispielhaft ist dies in *Abbildung 3* anhand der Messwerte in 60 cm Tiefe dargestellt. Hier befindet sich zunächst der Sauerstoffgehalt auf einem niedrigen Niveau von 1-2 %, das Redoxpotential in einem aeroben Bereich von ca. 600 mV, während sich der Grundwasserstand im Bereich dieser Schicht bei ca. 60 cm befindet. Nach Niederschlagsereignissen, bei denen der Wasserstand jeweils ansteigt, sinken Sauerstoffgehalt und Redoxpotential ab. Das Redoxpotential liegt dann mit 300 - 400 mV in einem Bereich an der Grenze zu suboxischen Verhältnissen. Die Redox- und Sauerstoffwerte steigen wieder, wenn der Wasserstand absinkt. Es ist noch nicht abschließend geklärt, welcher Wasserstand oder Wassergehalt über welchen Zeitraum ein Ansteigen des Redoxpotentials auslöst und welche Bedingungen hier prägend sind, da es auch Ausnahmen gibt, wie das steigende Redoxpotential in 60 cm Tiefe vor dem 13.10. bei einem Wasserstand von ca. 40 cm unter Gelände (*Abbildung 3*).

Erste Ergebnisse der Modellierung: Matrixpotential

Abbildung 4 zeigt einen ersten Vergleich zwischen gemessenen und mit Hydrus-1D modellierten Werten des Matrixpotentials in 30 cm Tiefe. In diese Modellierung fließen die oberen Randbedingungen P und ETp sowie R_{zu}/R_{ab} am unteren Rand des Lysimeters ein. Das Modell gibt den Verlauf des Matrixpotentials gut wieder. Es unterschätzt jedoch den Wert des Matrixpotentials an einigen Zeitpunkten. Es unterschätzt ebenso die Amplitude des täglichen Gangs des Wasserstandes in der ungesättigten Zone, was darauf hinweist, dass der spezifische Bodenwasserspeicher überschätzt wird.

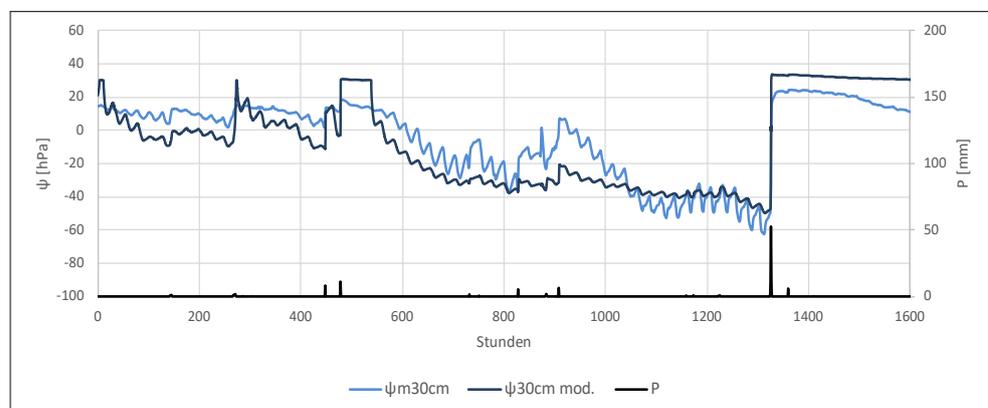


Abbildung 4: Matrixpotential ($\psi_{m,30cm}$) in 30 cm Tiefe, gemessen sowie in Hydrus-1D modelliert ($\psi_{m, mod.}$), und stündlicher Niederschlag (P).

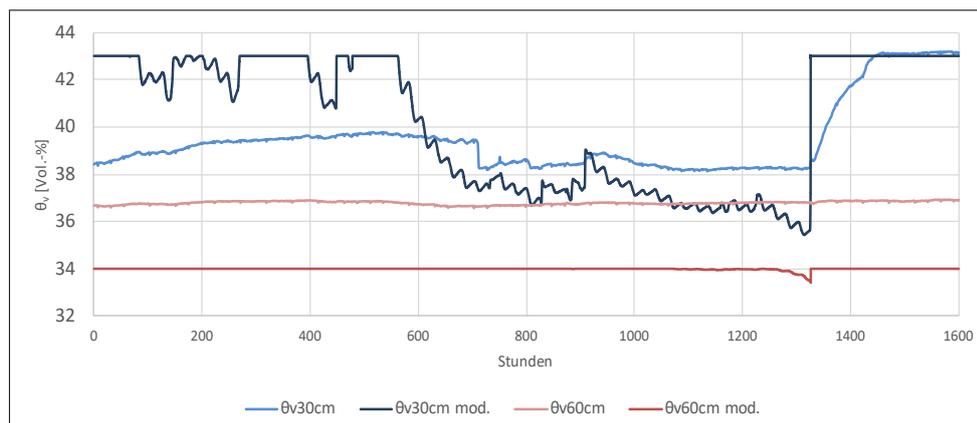


Abbildung 5: Gemessene volumetrische Wassergehalte in 30 ($\theta_{v,30\text{cm}}$) und 60 cm ($\theta_{v,60\text{cm}}$) Tiefe, sowie in Hydrus-1D modellierte volumetrische Wassergehalte ($\theta_{v,30\text{cm mod.}}$ und $\theta_{v,60\text{cm mod.}}$).

Erste Ergebnisse der Modellierung: Wassergehalte

Der modellierte Wassergehalt wird teils über- oder unterschätzt (Abbildung 5). Die Abbildung 4 zeigte, dass in 30 cm Tiefe die Bodenschicht in folgenden Zeiträumen gesättigt ist: Einen Teil der ersten 600 Stunden sowie der Zeitraum nach einem Starkniederschlag bei 1320 Stunden. Das Modell berechnet bei Sättigung stets einen maximalen Wassergehalt von ca. 43 % (Abbildung 5). Tatsächlich können bei Sättigung jedoch verschiedene Wassergehalte gemessen werden, in den ersten 600 Stunden beispielsweise zwischen 38 und 40 % und erst nach dem Niederschlagsereignis 43 %. Mögliche Gründe für Abweichungen sind Hysterese und Lufteinschluss bzw. duale Porosität, welche dazu führen können, dass der tatsächliche Wassergehalt über lange Zeit kleiner ist als der maximale Wassergehalt. Diese sind noch nicht in das Modell integriert. Im Zeitraum zwischen 600 und 1320 Stunden unterschätzt das Modell dagegen den Wassergehalt in 30 cm Tiefe. Das Modell berücksichtigt zudem nicht das verzögerte Ansteigen des Wassergehalts nach dem Starkniederschlag. In 60 cm Tiefe, eine Schicht die im abgebildeten Zeitraum durchgängig gesättigt ist, unterschätzt das Modell den Wassergehalt bei Sättigung.

Schlussfolgerung und Ausblick

Die hydraulische Modellierung generiert erste Ergebnisse, die das Matrixpotential nachbilden. Notwendig sind eine bessere Anpassung der bodenphysikalischen Parameter und die Berücksichtigung von Wasseraufnahme durch Wurzeln, Hysterese, dualer Porosität und Besonderheiten von stauenden tonigen Bodenschichten. Dies kann mit inverser Modellierung und Sensitivitätsanalysen erfolgen. Mit den Zeitreihen der chemischen Zusammensetzung der Bodenlösung werden im nächsten Schritt die Umsatzprozesse im System ermittelt, und auf Grundlage der Redoxverhältnisse eine eindimensionale reaktive Transportmodellierung durchgeführt.

Literatur

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 1-300.

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. In: Agricultural Water Management 163, 75-89. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.09.005.

Jacques D., Šimůnek J., Mallants D., van Genuchten M.Th (2006) Operator-splitting errors in coupled reactive transport codes for transient variably saturated flow and contaminant transport in layered soil profiles. In: *Journal of contaminant hydrology* 88 (3-4), 197-218. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.06.008.

Parkhurst D., Appelo T. (1999) User's guide to PHREEQC version 2 - a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. In: *Water Resources Research Investigations Report* 99 (4259), S. 312.

Šimůnek J., van Genuchten M.Th., Šejna M. (2008) Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. In: *Vadose Zone Journal* 7 (2), S. 587–600. DOI: 10.2136/vzj2007.0077.