

18. Gumpensteiner Lysimetertagung

Lysimeter - ein geeignetes Instrument zur Quantifizierung von Wasser-, Nähr- und Schadstoffflüssen

Lysimeter - a perfect tool for quantifying fluxes of water, nutrients and pollutants

21. und 22. Mai 2019
HBLFA Raumberg-Gumpenstein

www.raumberg-gumpenstein.at



BERICHT

18. Lysimetertagung

am 21. und 22. Mai 2019
an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Organisation

- Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein
- Arbeitsgruppe Lysimeter



Impressum

Herausgeber

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning-Donnersbachtal
des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit
und Tourismus

Direktor

HR Mag. Dr. Anton Hausleitner

Für den Inhalt verantwortlich

die Autoren

Redaktion

Brigitte Marold

Druck, Verlag und © 2019

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

ISBN-13: 978-3-902849-64-9

ISSN: 1818-7722

Dieser Band wird wie folgt zitiert:

18. Gumpensteiner Lysimetertagung, 21.-22.05.2019, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein 2019

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Quantification of water flow and transport in soils	11
Christine Stumpp	
Climagrocycle - ¹³C und ¹⁵N Isotopen in einer Lysimeteranlage	15
Anna Wawra, Andreas Baumgarten, Helene Berthold, Rebecca Hood-Nowotny, Johannes Hösch, Herbert Formayer, Erwin Murer, Andreea Spiridon, Johannes Wagenhofer und Andrea Watzinger	
Neighbourhood matters: implications of canopy structure on plant water-use strategies	19
Elena Tello-Garcia, Lisa Huber, Erich Tasser und Georg Leitinger	
Wasserhaushaltsuntersuchungen an den wägbaren Lysimeteranlagen der Stationen Grünwalde (südliches Brandenburg) und Colbitz (Sachsen-Anhalt) als Datenbasis für die Validierung agrarmeteorologischer Wasserhaushaltsmodelle	23
Carina Schuhmann, Falk Böttcher, Christiana Mühlner, Wolfgang Wiermann und Michael Haubold-Rosar	
Lysimeteruntersuchungen zum Bodenwasserhaushalt eines Steppenstandorts in Sibirien	29
Lisa Haselow, Holger Rupp und Ralph Meißner	
Einfluss erhöhter Temperatur und CO₂-Konzentration auf den Bodenwasserhaushalt im Dauergrünland	33
Veronika Slawitsch, Markus Herndl, Andreas Schaumberger, Erich M. Pötsch und Steffen Birk	
Auswirkungen von erhöhter Temperatur und CO₂-Konzentration im Dauergrünland auf den im Sickerwasser gelösten organischen Kohlenstoff und Stickstoff	41
Markus Herndl, Veronika Slawitsch, Erich M. Pötsch, Martina Schink und Matthias Kandolf	
Tau - ein bedeutsamer Bestandteil des Wasserhaushaltes eines Grünlandstandortes - Eine lysimeterbasierte Studie	49
Max Brunke, Jannis Groh, Jan Vanderborght, Harry Vereecken und Thomas Pütz	
Einfluss unterschiedlicher Formen der Bewirtschaftung der Brache auf die Verdunstung ackerbaulich genutzter Böden im mitteldeutschen Trockengebiet	59
Steffi Knoblauch	
Lysimeteruntersuchungen als Schlüssel zum Verständnis der differenzierten Dürreauswirkungen und potentieller Langzeitfolgen	67
Stefan Werisch, Anke Winkler, Ulrike Haferkorn, L. Jäkel und G. Beeck	
Langzeituntersuchungen zum Sickerwasser- und Stickstoffaustrag in Abhängigkeit von Bodenart, Nutzung und Mineraldüngung	73
Janine Köhn, Ralph Meißner, Holger Rupp und Frido Reinstorf	
Lysimeter- und Parzellenversuche zur Verlagerung von Pflanzenschutzmittel(PSM)-Wirkstoffen bei konventioneller Bewirtschaftung und Erarbeitung von PSM-Reduktionsstrategien	81
Nadine Tauchnitz, Holger Rupp, Florian Kurzius, Christian Wolff, Elke Bergmann, Rainer Haupt, Matthias Schrödter und Ralph Meissner	
Präzise Bestimmung von Niederschlags- und Verdunstungsereignissen aus Lysimetermessungen mit Hilfe eines verbesserten Datenfilters	87
Andre Peters und Wolfgang Durner	

Versuche zur Verminderung des Oaseneffekts auf Lysimetern	93
Ernst Spiess, Clay Humphrys und Volker Prasuhn	
Baum-Lysimeter - ein Beitrag zur natürlichen Klimatisierung der Stadt?	99
Erwin Murer und Stefan Schmidt	
Field drainage lysimeter research in New Zealand: a review	107
MS Srinivasan und Abigail Lovett	
Massenbilanzierung von atmogenen PAK mit alpinen Lysimeterdaten	111
Thomas Schiedek, Lidia Nersissian, Steffen Birk und Markus Herndl	
Neue Methode zur Messung hydro-physikalischer Eigenschaften von Kultursubstraten und Bewertung ihrer Eignung für gärtnerische Anwendungen	117
Uwe Schindler und Frank Eulenstein	
Vergleich unterschiedlicher Niederschlags-Messsysteme am Gebirgsstandort Stoderzinken.....	125
Aleksandar Bijelic, Steffen Birk, Veronika Slawitsch und Markus Herndl	
Are solute concentrations measured in leachate tank and in by-pass collection flask of TERENO SoilCan lysimeters comparable?.....	129
Holger Rupp, Ralf Gründling und Hans-Jörg Vogel	
Änderung des Bodenwasseranteils in einem Lysimeter: Ein Vergleich von Wiege- und Sensordaten	133
Reinhard Nolz und Peter Cepuder	
Wird unter Winterweizen oder Wintergerste mehr Nitrat ausgewaschen?	137
Ernst Spiess, Clay Humphrys und Volker Prasuhn	
Comparison of dendrometer measurements with lysimeter data at Agroscope Reckenholz.....	143
Luzia von Känel, Josefa Fuchs, Volker Prasuhn und Peter Molnar	
Auswirkungen unterschiedlicher Grundwasser-Steuerregime auf den Wasserhaushalt eines grundwassernahen Standorts.....	147
Ottfried Dietrich, Marcus Fahle, Thomas Kaiser und Jörg Steidl	
Role of the wastewater irrigation in the chemical composition of next-year-leachate	151
Ágnes Kun, Ildikó Koložsvári, Mária B. Oncsik und Csaba Bozán	
New developments at the Lysimeter Station in Szarvas	155
Mihály Jancsó, Ágnes Kun, Árpád Székely, Timea Szalóki, Marks Ibadzade und Csaba Bozán	
Reactions of Alpine grassland species in agricultural ecosystems to predicted climate changes	157
Georg Leitinger, Erich Tasser, Ulrike Tappeiner, Francesca Scandellari, Michael Thoma und Massimo Tagliavini	
Drought effects on evapotranspiration and productivity of grassland seed mixtures for dry and humid sites.....	159
Lisa Huber, Elena Tello-García, Andre Peters, Erich Tasser und Georg Leitinger	
50 Jahre Grundwasserlysimeteranlage Paulinenaue - ausgewählte Ergebnisse.....	163
Axel Behrendt, Jürgen Pickert und Frank Eulenstein	

Soil water content and EC distributions under drip fertigation of onion	167
Asen Nikolov, Tsveta Moskova, Vera Petrova, Margarita Himmelbauer, Peter Cepuder, Reinhard Nolz, Thomas Weninger, Ivona Dimitrova und Vesselin Koutev	
Simulation of the irrigation practice applied in the hobby gardens of Karcag in simple drainage lysimeters	171
Lúcia Sinka, A.R. Garcia, Krisztina Czeller, Géza Tuba und József Zsembeli	
Water use efficiency of <i>Miscanthus giganteus</i> under different irrigation doses	175
Krisztina Czeller, Géza Tuba, Györgyi Kovács, Lúcia Sinka, József Zsembeli und A. Percze	

Vorwort

Am 21. und 22. Mai 2019 findet an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein die 18. Gumpensteiner Lysimetertagung statt. Das Generalthema dieser internationalen Tagung lautet: „Lysimeter - ein geeignetes Instrument zur Quantifizierung von Wasser-, Nähr- und Schadstoffflüssen“.

Der Boden ist die natürliche und unentbehrliche Lebensgrundlage für unsere Pflanzen, Tiere und uns Menschen. Um dauerhaft gesunde und bekömmliche Lebensmittel zu gewinnen, sind intakte Böden notwendig. Dazu kommt, dass der Boden nicht wirklich erneuerbar ist und somit als Ressource nur begrenzt zur Verfügung steht. Regelmäßige Bodenanalysen, bedarfsgerechtes Düngen und ein sparsamer Maschineneinsatz erhalten die Bodenfruchtbarkeit und sorgen auch für einen effizienten Umweltschutz.

Für eine gesunde Ernährung des Menschen ist neben fruchtbaren und schadstoffarmen Böden auch ein ausreichendes und qualitativ gutes Trinkwasser notwendig. Das Grundwasser bildet die Basis für die Trinkwasserversorgung. Die Sicherung von Qualität und Quantität des Grundwassers ist daher für die zukünftige Trinkwasserversorgung unerlässlich. Um die Gefährdung eines Grundwasserkörpers gegenüber Verschmutzung einschätzen zu können, sind Daten über Stoffausträge mit dem Sickerwasser aus verschiedenen Ökosystemen notwendig.

Wissenschaft und Forschung kommt in diesem Zusammenhang eine ganz besondere Bedeutung, aber auch Verantwortung zu, geht es im Kern doch um die Erhaltung unserer natürlichen Lebensgrundlagen. Die HBLFA Raumberg-Gumpenstein nimmt diesen Auftrag sehr ernst und setzt derzeit 12 Lysimeter ein.

Die Lysimetertechnik bietet die Möglichkeit, den Stoffaustrag mit dem Sickerwasser unter weitgehend natürlichen Standortbedingungen zu quantifizieren. Daher wird die Lysimetertechnik bereits seit vielen Jahren erfolgreich in der Agrar- und Umweltforschung eingesetzt. Damit soll ein wesentlicher Beitrag zur Quantifizierung von Wasser- und Nährstoffflüssen in verschiedenen Grünlandökosystemen geleistet werden.

Genauso wichtig wie das Generieren neuer umsetzbarer Erkenntnisse ist die Weitergabe und Umsetzung dieses Wissens. Mit dieser Veranstaltung, der wir einen guten Verlauf wünschen, wird dieses Vorhaben bestmöglich umgesetzt. Ihnen allen einen angenehmen Aufenthalt an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein und in Irnding-Donnersbachtal sowie eine Fülle hochwertiger wissenschaftlicher Informationen.

Dr. Anton Hausleitner

Direktor

Dr. Johann Gasteiner

Direktor Stv.
Leiter für Forschung und Innovation

Vorträge

Quantification of water flow and transport in soils

Christine Stumpp^{1*}

Zusammenfassung

Lysimeter eignen sich Wasser- und Massenflüsse in der ungesättigten Zone zu untersuchen. Durch den Einsatz von Umwelttracern oder künstlicher Tracer können zusätzliche Informationen generiert werden, so dass diese Tracer zu einem verbesserten Prozessverständnis von Wasserflüssen und Stofftransport beitragen. Zusammen mit der mathematischen Modellierung lassen sich somit unter anderem die Verweilzeiten des Wassers, bodenhydraulische Eigenschaften oder spezifische Transportprozesse identifizieren und quantifizieren. Es wird auf mehrere Beispiele eingegangen, in denen Tracer zusätzlich zum Monitoring eher klassischer Variablen (Wassergehalt, Matrixpotential, Sickerwassermengen) herangezogen wurden, um somit Fließ- und Transportprozesse in der ungesättigten Zone noch besser verstehen und quantifizieren zu können. Diese Beispiele beinhalten die Bestimmung von Verweilzeiten in unterschiedlichen Böden und bei unterschiedlicher Landnutzung, die Untersuchung von Fließheterogenität in Lysimeterreplikaten und die verbesserte inverse Modellierung zur Quantifizierung von bodenhydraulischen Eigenschaften und Transportparametern. Des Weiteren werden Möglichkeiten aufgezeigt, bei denen der Einsatz von Umwelttracern für zukünftige Fragestellungen herangezogen werden könnte, um offene Fragen in der Bodenhydrologie und in der Ökohydrologie zu beantworten.

Schlagwörter: Lysimeter, Tracer, stabile Wasserisotope, mathematische Modellierung

Summary

Lysimeters are perfect tools to investigate water and mass fluxes in the unsaturated zone. Using environmental or artificial tracers in these experimental setups can further advance our understanding of flow and transport processes. In combination with mathematical models water transit times, hydraulic properties or specific transport processes can be identified and quantified. Here, several examples are presented on how tracers can be used to gain additional information about water flow and transport in the unsaturated zone compared to more traditional soil hydrological monitoring approaches. These examples include the estimation of water transit times for different soils and different land use, the identification of flow heterogeneities in lysimeter replicates, and inverse modelling approaches for quantification of soil hydraulic properties and transport parameters. Further, current challenges and future opportunities in combining tracer approaches and lysimeter experiments are presented for solving open research questions in soil hydrology.

Keywords: lysimeter, tracer, water stable isotopes, mathematical modelling

Introduction

Importance of Lysimeters

Lysimeters are perfect tools to investigate water and mass fluxes in the unsaturated zone. Processes can be studied in a definite soil volume. Despite high costs, the advantages of lysimeters are the controlled and measurable boundary conditions enabling mass balance calculations for both, water and solutes. They can be seen as an intermediate experimental setup between laboratory soil columns and field studies. There are many different setups ranging from very simple boxes to high precision lysimeters (Pütz et al. 2016). Recent technical developments and research is summarized in Pütz et al. (2018) highlighting that lysimeter studies have been used to investigate evaporation,

evapotranspiration, recharge, and leaching as well as improve modelling.

Importance of Tracers

Artificial tracers are applied in the hydrological cycle to get information about water flow and transport (Leibundgut et al. 2009). In lysimeters, conservative tracers are often combined with reactive contaminants (as tracers) allowing to understand the fate of these contaminants (e.g. pesticides) in the unsaturated zone and to quantify leaching (Schuhmann et al. 2016, Torrentó et al. 2018). Most commonly used artificial tracers are salts and dyes (Flury & Wai 2003, Leibundgut et al. 2009). For example, bromide and deuterated water were used as artificial tracers to identify different flow components and to quantify flow and transport parameters

¹ Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

* Ansprechpartner: Univ. Prof. Dr. Christine Stumpp, christine.stumpp@boku.ac.at

by comparing different modelling approaches (Stumpp et al. 2009b). Generally, the gained information from artificial tracer experiments performed for a specific time period strongly depends on the initial (soil water content) and boundary conditions (infiltration, precipitation, evapotranspiration) during this specific time period. Thus, results are only valid for these specific conditions and might not be representative for the system at other times (Leibundgut et al. 2009). In turn, it enables to study specific processes under specific initial and boundary conditions, like the initiation and quantification of preferential flow (Allaire et al. 2009).

In contrast to artificial tracers, environmental tracers are beneficial when covering processes at larger scales and/or over long-time periods. They provide integrative information about both water flow and transport. Environmental tracers are substances already present in the environment and provided by nature (e.g. stable and some radioactive isotopes, temperature, chloride) or anthropogenic input (like tritium or noble gases). For studying water flow and solute transport, the hydrogen and oxygen isotopes are of special interest. As being part of the water molecule, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ provide a tracer signal with every precipitation event over a certain space. Due to fractionation effects, stable isotopes of water have a seasonal distribution in precipitation with more depleted values in winter (colder season) and more enriched values in summer (warmer season) (Clark & Fritz 1997). Following the seasonal distribution of stable isotopes in the soil water, and its relative changes since that water fell as snow or rain, gives integrative information not only about water flow but also about transport processes with time and depth below ground. The seasonal distribution is attenuated due to dispersion and thus enables to study flow in systems with transit times about ≤ 5 years - depending on the dispersivity of the system.

Flow and transport

Mathematical Modelling

Lumped parameter modeling is a less parameter-intensive method compared to the traditional numerical modeling approaches used for studying flow and transport processes. It was shown in lysimeter experiments with bare, sandy soils using environmental isotopes as tracers that this modelling approach gives adequate results even in the unsaturated zone and is comparable to numerical modeling of water flow and tracer transport (Maciejewski et al. 2006, Maloszewski et al. 2006). However, the application of the lumped parameter model for agricultural soils is challenged by strongly variable water flux during crop periods (Stumpp et al. 2009a). One of the most important challenges in applying the lumped parameter approach is the estimation of the tracer concentrations in the recharging water (input function) based on the available data. Several methods (e.g. calculating seasonal recharge factors) were developed for the application under saturated conditions and at catchment scale (McGuire & McDonnell 2006). For soils, a method was developed to estimate the isotope input function of recharging water (Stumpp et al. 2009c). The new input function was based on the actual evapotranspiration rates which were determined indirectly from the change in mass of the lysimeter. Thus, only precipitation events

were considered effectively contributing to the lysimeter discharge. The combination of the new modified input function and splitting the observation periods into individual vegetation periods greatly improved the lumped parameter model outputs compared to the unmodified input data. The reliability of the lumped parameter model was confirmed by comparing the fitted and measured values, and the parameters to those derived from numerical modeling with HYDRUS-1D which is state of the art for transient water flow and transport modeling (Šimůnek et al. 2008). Both model approaches resulted in similar dispersivities and mean water contents, which were also in the same range as the measured values.

When simulating the transport of water stable isotopes, fractionation processes need to be considered and isotopes cannot be treated like other solutes at the upper boundary. If fractionation processes can be neglected though, a modified version of HYDRUS-1D can be used to account for isotope transport (Stumpp et al. 2012). Here, the relative concentration of isotopes (delta content) does not accumulate at the upper boundary due to evaporation. This is in contrast to the standard treatment of solutes during evaporation in HYDRUS-1D, where solutes stay behind in the soil while water is removed. This modified version has been used not only for the simulation of water flow and transport in lysimeters (Groh et al. 2018) but also for the interpretation of isotope data from soil cores (Sprenger et al. 2016).

For calibration of numerical water flow and transport models and for the inverse estimation of soil hydraulic properties usually water content and/or matric potential measurements are used. However, no direct information on transport can be gained from these data. We showed that water stable isotope data contained additional information and significantly improved the inverse estimation of soil hydraulic and of transport parameters (Groh et al. 2018). Here, a combined integration of water content, matric potential and isotope data in one objective functions gave better results compared to a sequential optimization procedure.

Land use effects

Land cover and agricultural management practices can significantly influence soil hydraulic properties, bulk density, and soil structure. In lysimeter experiments, it was investigated whether these changes near the soil surface, resulting from different fertilizer applications or land cover, have any net effect on water transit times and groundwater recharge over long time periods or whether they merely impact soil structure. Five lysimeters containing undisturbed soil monoliths from the same agricultural field site were investigated over a period of five years in Gumpenstein (Stumpp et al. 2012). Liquid cattle slurry and solid animal manure were applied to the lysimeters containing soil planted with maize and winter rye. The lysimeters that had a cover of grass/clover were treated with mineral fertilizer. The influence of land cover and type of fertilizer application on water flow and solute transport was quantified for all lysimeters using a modified version of HYDRUS-1D. The highest drainage was observed in the maize lysimeter treated with cattle slurry, and the lowest in the grass lysimeter treated with mineral fertilizer. Pronounced differences in water contents and estimated saturated hydraulic conductivities

between the lysimeters were restricted to the upper 25 to 30 cm of the soil. In particular, the lysimeters treated with animal manure had higher porosities, indicating a higher content of organic matter. Main differences in discharge between the lysimeters were observed in spring and during the plant growth periods, indicating the importance of non-uniform, patchy infiltration patterns during snow melt and of root water uptake, respectively. Mean water flow velocities, transit times and effective water contents were estimated from the stable water isotope data, providing evidence of the impact of land cover and type of fertilizer application. Smaller mean transit times were found in the maize lysimeters and for soils with liquid cattle slurry applications. Simulations indicate that numerical modeling can reproduce the general trend of water flow and isotope transport. Despite differences in mean transit times, fitted dispersivities were all in the same range, suggesting similar soil structures in the five lysimeters. However, more data for calibration and more information about heterogeneous infiltration would be required to improve the model accuracy. In general, stable water isotopes clearly added value, elucidating differences in mean flow parameters between the lysimeters. Thus, they provided evidence of the impacts of land cover and fertilizer applications, which are not obvious from water balance and mean discharge rates alone.

Outlook

Measuring hydrogen and oxygen isotope ratios in soil pore water or in the drainage of lysimeters have certainly advanced our understanding of water flow and transport processes in the unsaturated zone. There are many other opportunities where the combined use of lysimeters and tracers can help to better understand the dynamic interplay of hydrological, geochemical and ecological processes (Stumpp et al. 2018). For the application of water stable isotopes, this includes processes like snow melt infiltration, evaporation or the separation of transpiration and evaporation. For examples, it could be answered in which depths plants take up water and how long this water has been stored in the unsaturated zone. In addition, new automated systems that can provide high-resolution in-situ measurements and real-time data analysis have now been developed. These technological breakthroughs are thus poised to improve our understanding and the modeling of water and matter fluxes in the atmosphere–plant–soil–groundwater continuum.

References

- Allaire S.E., Roulier S., Cessna A.J. (2009) Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology* 378, 179-204.
- Clark I.D., Fritz P. (1997) *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 352 pp.
- Flury M., Wai N.N. (2003) Dyes as tracers for vadose zone hydrology. *Reviews of Geophysics* 41, 1.
- Groh J., Stumpp C., Lücke A., Pütz T., Vanderborght J., Vereecken H. (2018) Inverse Estimation of Soil Hydraulic and Transport Parameters of Layered Soils from Water Stable Isotope and Lysimeter Data. *Vadose Zone Journal* 17, DOI:10.2136/vzj2017.09.0168.
- Leibundgut C., Maloszewski P., Külls C. (2009) *Tracers in hydrology*. Wiley & Sons Ltd., West Sussex, UK, 415 pp.
- Maciejewski S., Maloszewski P., Stumpp C., Klotz D. (2006) Modelling of water flow through typical Bavarian soils (Germany) based on lysimeter experiments: 1. Estimation of hydraulic characteristics of the unsaturated zone. *Hydrological Sciences Journal* 51(2), 285-297.
- Maloszewski P., Maciejewski S., Stumpp C., Stichler W., Trimbom P., Klotz D. (2006) Modelling of water flow through typical Bavarian soils based on lysimeter experiments: 2. Environmental deuterium transport. *Hydrological Sciences Journal* 51(2), 298-313.
- Pütz T., Fank J., Flury M. (2018) Lysimeters in Vadose Zone Research. *Vadose Zone Journal* 17, DOI:10.2136/vzj2018.02.0035.
- Pütz T., Kiese R., Wollschläger U., Groh J., Rupp H., Zacharias S., Priesack E., Gerke H.H., Gasche, R. Bens O., Borg E., Baessler C., Kaiser K., Herbrich M., Munch J.-C., Sommer M., Vogel H.-J., Vanderborght J., Vereecken H. (2016) TERENO-SOILCan: a lysimeter-network in Germany observing soil processes and plant diversity influenced by climate change. *Environmental Earth Sciences* 75(18), 1242, DOI:10.1007/s12665-016-6031-5.
- Schuhmann A., Gans O., Weiss S., Fank J., Klammler G., Haberhauer G., Gerzabek M.H. (2016) A long-term lysimeter experiment to investigate the environmental dispersion of the herbicide chloridazon and its metabolites—comparison of lysimeter types. *Journal of Soils and Sediments* 16(3), 1032-1045, DOI:10.1007/s11368-015-1311-3.
- Šimůnek J., van Genuchten M.T., Sejna M. (2008) Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal* 7(2), 587-600.
- Sprenger M., Seeger S., Blume T., Weiler M. (2016). Travel times in the vadose zone: Variability in space and time. *Water Resources Research* 52(8), 5727-5754, DOI:doi:10.1002/2015WR018077.
- Stumpp C., Brüggemann N., Wingate L. (2018) Stable Isotope Approaches in Vadose Zone Research. *Vadose Zone Journal* 17, DOI:10.2136/vzj2018.05.0096.
- Stumpp C., Maloszewski P., Stichler W., Fank J. (2009a) Environmental isotope ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrological data to assess water flow in unsaturated soils planted with different crops: Case study lysimeter station „Wagna“ (Austria). *Journal of Hydrology* 369(1-2), 198-208.
- Stumpp C., Nützmann G., Maciejewski S., Maloszewski P. (2009b) A comparative modeling study of a dual tracer experiment in a large lysimeter under atmospheric conditions. *Journal of Hydrology* 375(3-4), 566-577.
- Stumpp C., Stichler W., Kandolf M., Šimůnek J. (2012) Effects of land cover and fertilization method on water flow and solute transport in five lysimeters: A long-term study using stable water isotopes. *Vadose Zone Journal* 11, doi:10.2136/vzj2011.0075.
- Stumpp C., Stichler W., Maloszewski P. (2009c) Application of the environmental isotope $\delta^{18}\text{O}$ to study water flow in unsaturated soils planted with different crops: Case study of a weighable lysimeter from the research field in Neuherberg, Germany. *Journal of Hydrology*, 368(1-4), 68-78.
- Torrentó C., Prasuhn V., Spiess E., Ponsin V., Melsbach A., Lihl C., Glauser G., Hofstetter T.B., Elsner M., Hunkeler D. (2018) Adsorbing vs. Nonadsorbing Tracers for Assessing Pesticide Transport in Arable Soils. *Vadose Zone Journal*, 17(1). DOI:10.2136/vzj2017.01.0033.

Neighbourhood matters: implications of canopy structure on plant water-use strategies

Elena Tello-Garcia^{1*}, Lisa Huber¹, Erich Tasser² and Georg Leitinger¹

Zusammenfassung

Alpines Grasland bietet viele Ökosystemdienstleistungen (u.a. Wasserversorgung und Futterproduktion) und wird laut aktuellen Klimaszenarien in Zukunft öfter und mit intensiveren Trockenperioden konfrontiert werden. Ein Lysimeterexperiment auf dem sozio-ökologischen Langzeitforschungsstandort (LTSER) ‚Stubaital‘ in Tirol untersucht die Reaktion auf Trockenheit von zwei unterschiedlichen Alpenen Graslandtypen. Kleinlysimeter (Smart Field lysimeters®, SFL, METER Group) wurden mit zwei Einsaatmischungen für Grasland (Dauerwiese für trockene und feuchte Lagen) bepflanzt. Sowohl bodenhydrologische Parameter als auch die stomatare Leitfähigkeit der funktionellen Gruppen wurden während einer Trockenperiode gemessen. Unter gemeinsamen Klimabedingungen und im gleichen standardisierten Boden, wiesen die beiden Graslandtypen verschiedene Wassernutzungsstrategien auf und unterschieden sich in ihrer Produktivität. Wir konnten Unterschiede in der Reaktion auf Trockenheit für die beiden Graslandtypen, für funktionelle Gruppen und innerhalb der funktionellen Gruppen nachweisen.

Schlagwörter: Smart-field-Lysimeter, Stomatare Leitfähigkeit, Klimawandel, Grünlandwirtschaft

Summary

In a future climate change scenario probabilities of drought periods in Alpine grasslands, which provide multiple ecosystem services (i.e. water provisioning and grassland productivity), will increase. To assess the reaction of Alpine grassland to drought conditions, two types of grassland seed mixtures (permanent meadow for dry and humid sites) were grown and investigated in a garden experiment at the long term socio-ecological research (LTSER) site ‘Stubai Valley’, Tyrol, Austria. Soil hydrology analyses were performed using high precision lysimeters (Smart Field lysimeters®, SFL, METER Group) and stomatal conductance of the main functional groups was measured during an extended drought period. Sharing a common environment and the same standardized soil, the two types of Alpine grassland showed different water-use strategies and productivity. Responses to drought revealed differences between grassland types, functional groups and even within functional groups present in both grassland types, although soil hydrology did not differ.

Keywords: Smart-field-lysimeter, stomatal conductance, climate change, grassland management

Introduction

Precipitation patterns will be modified and a change in water resources timing and amount is predictable worldwide (IPCC 2013), increasing the possibility of drought periods in Alpine grasslands, which generally have become sufficient water supply so far (van der Schrier et al. 2007). Alpine grasslands are biodiversity hotspots and provide multiple ecosystem services, which will be negatively affected by climate change, especially the ecosystem service ‘forage production’ (Jäger et al. (submitted)). Beyond the direct implications of water availability on biomass productivity, drought impacts on different types of Alpine grassland has been assessed and differences in water use strategies have been shown (Leitinger et al. 2015, Frenck et al. 2018), suggesting that species composition play an important role in the response to varying water supply. The composition of species in the community and the resulting functional structure adjust to varying drought conditions, optimizing water use according to different strategies and regulating the use and allocation of limiting resources (Peñuelas et al. 2004). At the individual level, water losses are controlled

by stomatal conductance, which varies among plant species depending on water availability (Silva 2015).

The importance of understanding water fluxes and the role of species composition in order to improve grassland management becomes evident. To address drought implications in Alpine grasslands, a network of automated small-scale lysimeters were used to emerge specific differences in the temporal dynamics of water fluxes of two different grassland seed mixtures (permanent meadow for dry and humid sites), as well as differences at plant functional group level, under an extended drought period. We hypothesize that water use strategies under persistent drought periods are specific for each functional group, and that different species composition will lead to a different water use strategies in Alpine grassland.

Methodology

The field site was established in the Long-Term Ecological Research (LTER) Austria site “Stubai”, Neustift im Stubaital (Austria), located at the valley floor at 972 m a.s.l.

¹ Department of Ecology, University of Innsbruck, Sternwartestraße 15, A-6020 INNSBRUCK

² Institute of Alpine Environment, Eurac Research, Viale Druso 1, I-39100 BOZEN

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

(WGS84: 47.115833 N, 11.320556 E) in a meadow used for hay production. Investigations were carried out during part of the growing season (May-August) in the year 2018.

Two grassland seed mixtures (Schwarzenberger 2018) with different plant species composition, commonly used when recultivating in two locations of the Alps which differ in their predominant climate, were cultivated. A permanent humid adapted type (type SR037), commonly used in the Stubai valley, which has a northern Central-European climate with high precipitation totals, many rainy days, and a distinct maximum of precipitation during summer with little interannual variability. The humid seed mixture was mainly composed by grasses (i.e. *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne*, *Poa pratensis*), legumes (*Trifolium hybridum*, *Trifolium pratense* and *Trifolium repens*) and herbs (*Lotus corniculatus*). Contrastingly, a drought adapted mixture (type DWi-r*), mostly composed by grasses (i.e. *Festuca arundinacea*, *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*) and legumes (*Medicago sativa*, *Trifolium pratense* and *Trifolium repens*). Drought seed mixture is commonly used in regions in South Tyrol, Italy, with a dry inner alpine climate, characterized by low precipitation total and a highly variable distribution of precipitation.

Seed mixtures were grown on standardized soils directly in 12 small-sale lysimeters with 0.3m diameter and depth. The lysimeters were distributed into four plots of 3.5 x 3.5 m. Lysimeters were equipped with soil water content, soil temperature and soil matric potential probes installed at 0.05, 0.15 and 0.25m depth. All plots which were subjected to drought treatment were closed using a UV permeable transparent polythene film (Lumisol Clear AF, 88% - 92% light transmittance).

At the field site, all experimental plots were managed congruently with the land-use scheme of the surrounding

meadow. Two cuts were made, before the drought experiment started (07.06.2018) and at the end of the experiment (08.08.2018) and it was fertilized once (19.04.2018). The experiment involved two different rainfall scenarios: a) moist treatment, i.e. Stubai Valley environment, plots were constantly irrigated and a bi-directional pumping system at the bottom of the lysimeter acted as groundwater supplier; b) drought treatment, where plots experienced an extensive drought period. We use the word 'drought' to refer to an experimental condition of volumetric water content (θ) that is low enough to cause a physiological response relative to plants at a higher θ . The drought treatment was divided in two phases, a first period (07.06.2018 – 02.07.2018) when shelters were installed preventing irrigation, but the pumping system supplied groundwater; and a second period (03.07.2018 – 08.08.2018) of extreme drought where the pumping system was switched off and there were neither irrigation nor groundwater supply.

Stomatal conductance of the functional groups present in both vegetation types (grasses and legumes) was measured with a DECAGON SC-1 Leaf Porometer (Decagon Devices 2016). Measurements were made on sunny days, approximately twice a week; each measurement was replicated three times per functional group and lysimeter, three or four times a day. The individuals analysed were always completely exposed to the sun. To assess productivity of each grassland type, biomass was determined by weighing harvested biomass after the cut. The harvested plant material was separated into functional groups.

Results

Changes in soil water content between moist and drought treatments are evident (Figure 1), verifying the proper functioning of the irrigation treatments. At the beginning of the

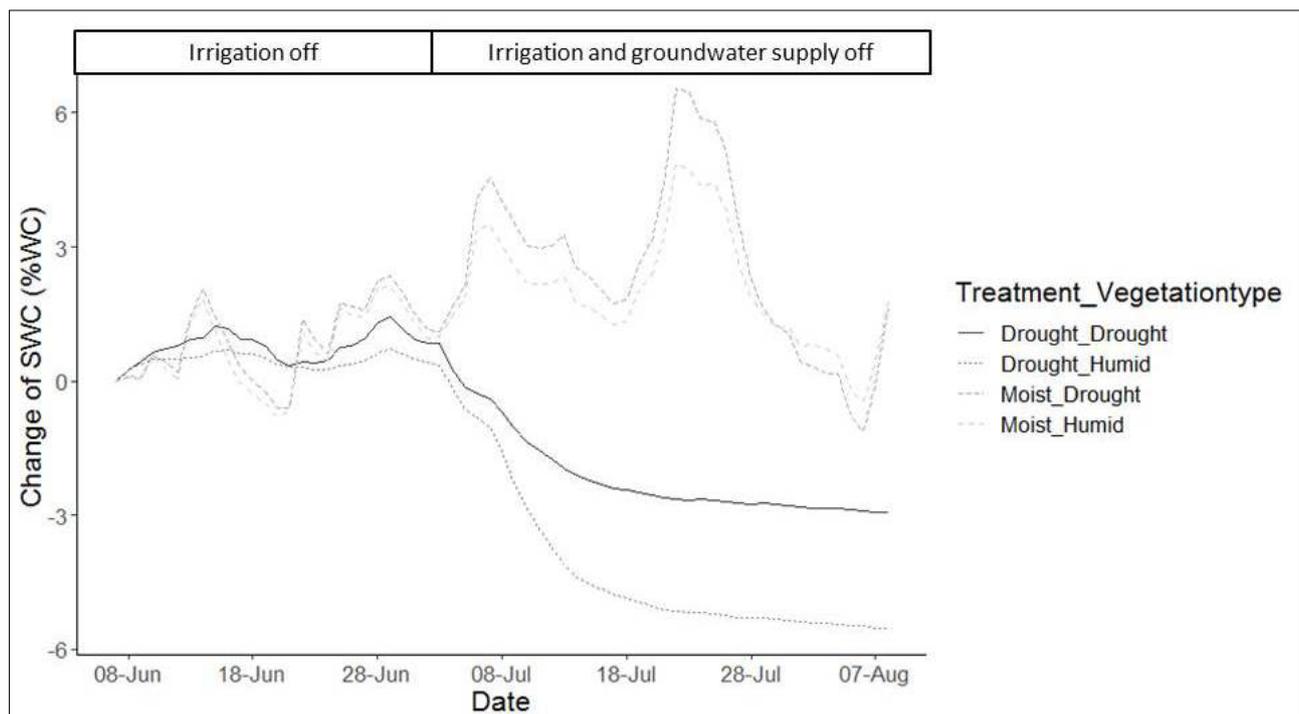


Figure 1. Changes of soil water content (SWC) (%WC) during the experiment.

Table 1. Differences on stomatal conductance between moist and drought treatments for each functional group present in drought or humid adapted vegetation at the first three porometer measurement days of the drought experiment. After day 18.07.2018 results remain the same. Significant p values in bold.

Date	Vegetation type	Functional group	Treatment P
02.07.2018	Humid	Grasses	0.833
		Legumes	0.517
	Drought	Grasses	0.179
		Legumes	<0.001
09.07.2018	Humid	Grasses	0.061
		Legumes	0.0445
	Drought	Grasses	<0.001
		Legumes	<0.001
18.07.2018	Humid	Grasses	<0.001
		Legumes	<0.001
	Drought	Grasses	<0.001
		Legumes	<0.001

drought, when groundwater supply was still possible, there were no differences between moist and drought treatment. Since the beginning of the extreme drought (03.07.2018), lysimeters under moist and drought treatments differed. Vegetation types showed a different reaction to severe drought ($p < 0.001$). Humid adapted vegetation reacted faster and decreased 6% in water content; however drought adapted vegetation lost 3% of soil water content. The loss of water in moist conditions at the end of the project could be explained by the exceptional drought and heat of summer 2018. Similarly to soil water content, stomatal conductance showed significantly different trends for lysimeters under moist or drought treatment, whereby the difference between treatments increased with time ($p < 0.001$). The functional groups legumes and grasses showed different stomatal conductance in moist treatment, legumes showed higher rates of conductance than grasses ($p < 0.001$). Although when drought was severe, the stomatal conductance of both functional groups dropped to minimum and there was no difference between them. Additionally, differences within the functional group legumes in drought adapted vegetation were found for the moist treatment ($p < 0.001$). *Medicago sativa* showed higher conductance rates than species from genus *Trifolium*, while in drought treatment conductance rates were similar.

Drought and humid adapted vegetation types showed similar stomatal conductance in moist conditions, although in drought conditions stomata reaction of grasses and legumes was influenced by the vegetation type ($p < 0.001$, $p = 0.009$, respectively). Analyzing temporal changes on conductance reaction of both functional groups along the drought treatment (Table 1), it was shown that legumes in drought vegetation differed earlier (02.07.2018), when drought is not extreme, while legumes in the humid adapted vegetation responded later (09.07.2018), six days after the severe drought started. Grasses showed a later stomata reaction than legumes, differences of grass conductance between treatments was shown since 09.07.2018 for humid vegetation, and even later for drought adapted vegetation (18.07.2018; 15 days after the severe drought started). It suggested that drought adapted vegetation (both functional groups) reacted faster to drought conditions than humid

adapted vegetation. Additionally, functional groups showed the same trend in both treatments, with legumes reacting faster to drought conditions than grasses.

The biomass weighted at the end of the experiment showed that lysimeters subjected to a drought period differed from those well irrigated ($p = 0.018$ for drought adapted vegetation and $p = 0.042$ for humid adapted vegetation). Drought and humid adapted vegetation showed similar biomass productivity under moist conditions. Although, they differed in drought conditions ($p = 0.042$), suggesting that drought adapted biomass had a higher amount of standing biomass. Legumes were the most abundant functional group, covering a range of 92-94% in well irrigated lysimeters and 79-86% in lysimeters after drought treatment. Remainder biomass was represented by grasses and herbs were negligible, showing a maximum of 0.7%. Alternatively to total biomass, grass productivity did not show any differences neither between vegetation types nor between irrigation treatments (Figure 2). Legumes, since they represented most of the vegetation, showed the same trend as total biomass.

Discussion

Sharing a common environment and soil type, drought and humid adapted grassland types seem to differ in their water use strategies in drought conditions. Results of this experiment reveal a divergence in the stomatal conductance of the two Alpine grassland communities in drought conditions. In line with Leitinger et al. (2015) and Frenck et al. (2018), humid adapted vegetation did not react to the absence of water supply until drought is severe. It follows a water spending strategy; i.e. it hardly reduces transpiration with decreasing water availability until close to the wilting point. In contrast, drought adapted vegetation restrict stomatal conductance when drought is moderate. Therefore, it follows a water saving strategy; i.e. it implies a strict regulation of the stomata with decreasing water availability. Strategies followed by both types of vegetation become more evident when analyzing soil hydrology. Humid adapted vegetation has a greater loss of soil water content than drought vegetation during the drought period. It becomes more evident when the groundwater supply is off and the severe drought begins. The analysed water fluxes from the interface soil-plant-atmosphere in the lysimeter scale to some degree with productivity and total biomass of the vegetation, where consequences of water use strategies are evident. Humid-adapted vegetation risks hydrological failure and does not reduce transpiration since the beginning of the severe drought, resulting in lower biomass productivity and a high decrease of soil water content. However, drought adapted vegetation produces more biomass efficiently. Understanding the differences in plant water use strategies of varying vegetation types is important for grassland management strategies, in terms of increasing the productivity.

Different influences of soil properties can be discarded in this case because the same standardized soil was used for all lysimeters. Therefore, differences between the studied grasslands seem to be driven by plant community assembly. As hypothesized, stomatal conductance differ between functional group and even there are differences between species. The presence of *Medicago sativa* in drought vegetation could be decisive for the water use strategy chosen

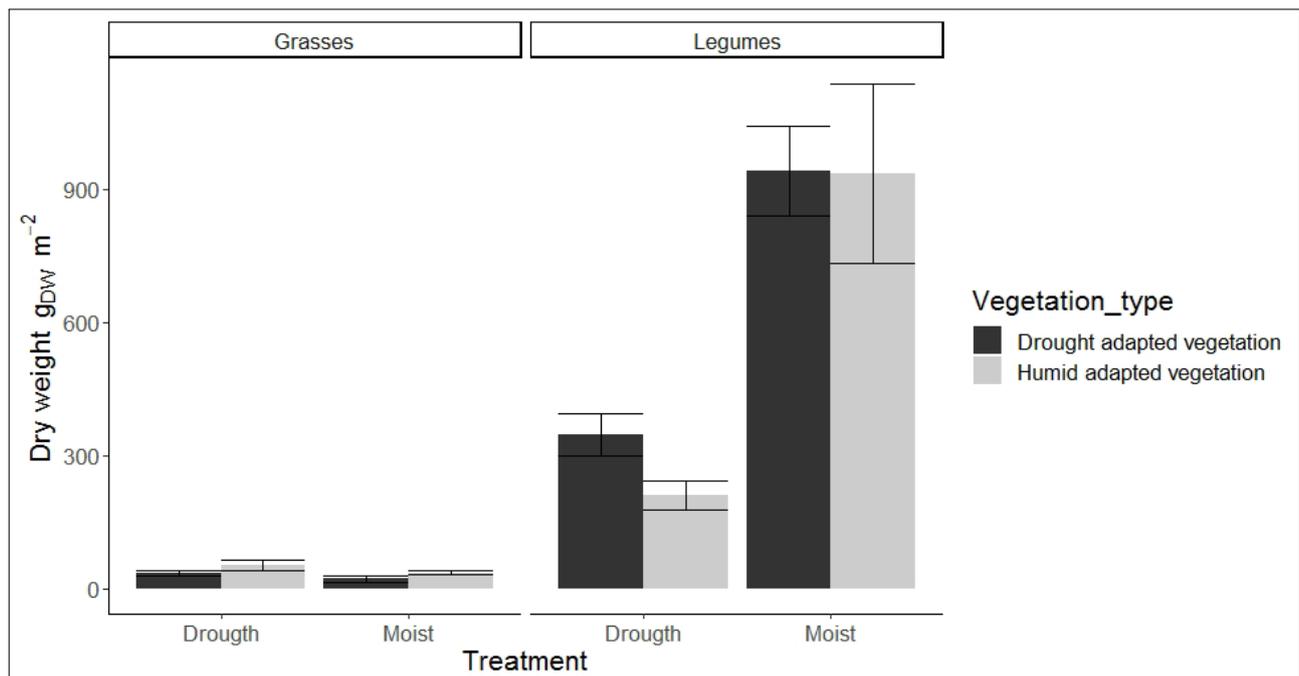


Figure 2. Average biomass dry weight (\pm SD) (gDW m⁻²) of grasses and legumes present in humid and drought adapted vegetation after moist and drought treatments.

because of its preference for moderately dry soils (Landolt et al. 2010); while *Trifolium hybridum*, only present in humid vegetation, and *Trifolium pratense*, abundant in both vegetation types, show a preference for moderately humid soils. Additionally, *Festuca arundinacea*, a grass species abundant in drought adapted vegetation, is mainly settled in wet meadow, although due to its good rooting, it is considered to be very drought resistant (Landolt et al. 2010). Thus, species exclusive for each vegetation type differ in their irrigation preferences and it could be decisive in the water use strategy of the vegetation.

Conclusion

The reduction of water availability reduces stomatal conductance and biomass productivity, and increase the loss of soil water for both Alpine grassland types. Drought adapted vegetation follows a water saving strategy that implies more efficient biomass productivity, while humid vegetation does not adapt fast enough to the lack of water supply. Hence, plant community composition could be an important factor in future grassland management, at least at the level of functional groups. Further studies would be needed to determine the variety in water-use strategies at species level.

References

- Decagon Devices I. (2016) Leaf Porometer. Operator's manual.
- 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.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jäger H., Peratoner G., Tappeiner U., Tasser E. (submitted). Forage yield from Grassland - Ecosystem Service status and perspective under Climate Change in the European Alpine Space. *Science of The Total Environment*.
- Landolt E., Bäumler B., Erhardt A., Hegg O., Klölzli F., Lämmler W., Nobis M., Rudmann-Maurer K., Schweingruber F.H., Theurillat J., Urmi E., Vust M., Wohlgemuth T. (2010) Flora indicativa. Ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen. Haupt Verlag.
- Leitinger G., Ruggenthaler R., Hammerle A., Lavorel S., Schirpke U., Clement J.C., Lamarque P., Obojes N., Tappeiner U. (2015) Impact of droughts on water provision in managed alpine grasslands in two climatically different regions of the Alps. *Ecohydrology* 8:1600-1613.
- Peñuelas J., Gordon C., Llorens L., Nielsen T., Tietema A., Beier C., Bruna P., Emmett B., Estiarte M., Gorissen A. (2004) Nonintrusive field experiments show different plant responses to warming and drought among sites, seasons, and species in a north-south European gradient. *Ecosystems* 7:598-612.
- Schwarzenberger (2018) Schwarzenberger Samen & Gartenbedarf. Retrieved from: https://www.samens-schwarzenberger.at/downloads/datenblaetter_landwirtschaft.html.
- Silva L.C.R. (2015) From air to land: Understanding water resources through plant-based multidisciplinary research. *Trends in Plant Science* 20:399-401.
- Van der Schrier G., Efthymiadis D., Briffa K.R., Jones P.D. (2007) European Alpine moisture variability for 1800–2003. *International Journal of Climatology* 27:415-427.

Wasserhaushaltsuntersuchungen an den wägbaren Lysimeteranlagen der Stationen Grünewalde (südliches Brandenburg) und Colbitz (Sachsen-Anhalt) als Datenbasis für die Validierung agrarmeteorologischer Wasserhaushaltsmodelle

Carina Schuhmann², Falk Böttcher^{1*}, Christiana Mühlner³, Wolfgang Wiermann⁴
und Michael Haubold-Rosar⁵

Zusammenfassung

Die parallelen Untersuchungen der Wasserhaushaltsgrößen, die an den Lysimeteranlagen Grünewalde und Colbitz durchgeführt werden, umfassen die Jahre 2012 bis 2017 und dienen neben anderen Zwecken dazu, agrarmeteorologische Wasserhaushaltsmodelle zu prüfen. Dazu ist es zunächst nötig, dass die Hauptzielgröße, die aktuelle Verdunstung in größtmöglicher Genauigkeit bestimmt wird. Hier werden die Schritte dargestellt, wie dies am Beispiel der beiden Lysimeteranlagen erfolgt. Das Besondere der beiden Standorte ist dabei der nur extensiv genutzte Dauerbewuchs. Die Ergebnisse zeigen, dass die Modellverbesserungen essentiell auf die Ergebnisse des Langzeitmonitorings an den Lysimeteranlagen angewiesen sind. Dabei treten charakteristische Unterschiede zwischen dem Sommer- und dem Winterhalbjahr auf. Im Winterhalbjahr sind die Schneedeckenverhältnisse und Bodentemperaturwerte im Frostbereich sowohl in räumlicher als auch zeitlicher Verteilung maßgebend, während im Sommerhalbjahr die phänologische Entwicklung entscheidend ist.

Schlagwörter: Bodenwasserhaushalt, Langzeitmonitoring, Anpassung an den Klimawandel, Lysimetrie, Agrarmeteorologie

Summary

The parallel investigations of the water balance parameters, which are carried out at the lysimeter systems Grünewalde and Colbitz, cover the years 2012 to 2017 and serve, among other purposes, to test agrometeorological water balance models. First the main target size real evaporation has to be determined in the highest possible accuracy. Here the steps are shown by example of the two lysimeter systems. The special feature of the two locations is an extensively used permanent plant cover. The results show that model improvements are essentially dependent on the results of long-term monitoring with the lysimeter systems. There are characteristic differences between the summer and winter months. In the winter half-year, the snow cover conditions and soil temperature values in the frost area are decisive, while in the summer half-year the phenological development is crucial.

Keywords: soil water monitoring, long-term monitoring, adaptation to climate change, lysimetry, agricultural meteorology

Einleitung

Die Lysimeterstation Colbitz des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), in der Colbitz-Letzlinger-Heide gelegen, liefert seit dem Jahr 1970 Langzeitmessungen der Bodenwasserhaushaltskomponenten. Sie ist eine von ganz wenigen Stationen, die einen solchen Fundus von Langzeitdaten bereitstellen. Diese Daten bieten einerseits die Möglichkeit, die Frage zu klären, ob es langjährige Veränderungen der Messwerte gibt. Andererseits können die Daten sehr gut zur Modellvalidierung und -anpassung genutzt werden, so dass diese Modelle für

ähnlich klimatisch beeinflusste Regionen angewendet werden können. Die wägbaren Lysimeter der Station Grünewalde des Forschungsinstituts für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB) in Südbrandenburg wurden im Jahr 2011 eingerichtet. Die Unterschiedlichkeit der Umgebungsbedingungen und verwendeten Bodenarten der beiden Lysimeterstationen macht einen Vergleich mit Modellrechnungen für die beiden relativ niederschlagsarmen Standorte sehr interessant. Zusätzlich zeigte das Jahr 2018 im Kontext mit den in den unterschiedlichen Klimamodellen erwarteten Niederschlagsänderungen, dass Wasserhaushaltsmodelle auf diese Bedingungen hin überarbeitet werden müssen.

¹ Deutscher Wetterdienst, Abt. Agrarmeteorologie, Kärnerstraße 68, D-04288 LEIPZIG

² Technische Universität Bergakademie, IÖZ, Brennhausgasse 14, D-09599 FREIBERG

³ Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), Willi-Brundert-Straße 14, D-06132 HALLE

⁴ Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), Otto-von-Guericke Straße 5, D-39104 MAGDEBURG

⁵ Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. Finsterwalde, Brauhausweg 2, D-03238 FINSTERWALDE

* Ansprechpartner: Falk Böttcher, falk.boettcher@dwd.de

Material und Methoden

Lysimeterstation Colbitz

Die Anlage der wägbaren Lysimeter Colbitz befindet sich auf einer Lichtung im Wald (Hagenau 2014) (*Abbildung 1*). Dadurch sind am Lysimeterstandort mikroklimatische Besonderheiten möglich, die sich von den großflächigen klimatischen Bedingungen, die vom Übergang des maritimen Klimas in eher kontinental beeinflusste Klimaregionen gekennzeichnet sind, unterscheiden (Helbig 1988). Diese können zum Beispiel darin bestehen, dass es kühler bleibt als außerhalb des Waldes u.a. aufgrund der Beschattung, welche die Bäume bieten.

Die Lysimeterstation umfasst eine Fläche von 200 m², auf der sich neben den Niederschlagsmessgeräten 12 wägbare, mit der Bodenoberfläche abschließende, Lysimetergefäße befinden. Die Gefäße wurden in zwei Reihen von Nord nach Süd angeordnet, wobei in der Breite zwischen den Mittelpunkten der Töpfe 4,3 m und in der Länge 4,2 m liegen (Kortüm und Helbig 1980). Die Lysimetertöpfe weisen eine Oberfläche von 1 m² und eine nutzbare Tiefe von 2 m auf. Die Lysimetergefäße stehen auf Schallgewichtswaagen, die von einem großen Kellerraum aus bedient werden können. Der Sickerwasserablauf wurde 1996 umgebaut, so dass das anfallende Sickerwasser allein gravimetrisch am Lysimeterboden austritt und die Sickerwassermenge von Kippwaagen erfasst wird (UFZ 1996). Mit Hilfe des Abflusses kann die Versickerung des Niederschlags im Bodenmonolith verfolgt werden (Kortüm und Helbig 1980).

Die in den Gefäßen befindlichen Böden wurden monolithisch an drei verschiedenen Standorten gewonnen (Hagenau 2014). Es handelt sich um typische Böden der Colbitz-Letzlinger-Heide:

- Lysimeter Nr. 1–6: (podsolige) Braunerde auf Geschiebedecksand über Hochflächensand,
- Lysimeter Nr. 7–9: Braunerde auf Sand,
- Lysimeter Nr. 10–12: Parabraunerde/lessivierte Braunerde auf Sand mit lehmigen Bändern (Hagenau 2014).

Die Lysimeter wurden zu Beginn mit Drahtschmiele bepflanzt (*Deschampsia flexuosa*) und danach sich selbst überlassen (Helbig 1988). Durch die natürliche Sukzession sollte sich ein repräsentativer Zustand für eine Waldlichtung ausbilden, wobei pro Jahr nur ein bis zwei Mal durch eine Mahd eingegriffen wird (Hagenau 2014). Der aktuelle Bewuchs spiegelt typische Vegetationsformen der Colbitz-Letzlinger



Abbildung 1: Ansicht der Lysimeteranlage Colbitz (Foto: LHW 21.12.2015).



Abbildung 2: Ansicht der Lysimeteranlage Grünewalde (Foto: Carina Schuhmann 01.06.2017).

Heide wider; auf den Lysimeter 1 bis 9 ist hauptsächlich Besenheide (*Calluna vulgaris*) vertreten, auf den Lysimetern 10 bis 12 Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos*).

Aufgrund der hohen Anzahl an negativen Verdunstungswerten, wurde das Lysimeter 8 aus der weiteren Betrachtung ausgeklammert.

Lysimeterstation Grünewalde

Die Lysimeterstation Grünewalde wird seit 1955 auf Rekultivierungsflächen des ehemaligen Tagebaus Koyne betrieben. An den Lysimeteranlagen befindet sich eine automatische Wetterstation. Die vier wägbaren Edelstahl-Lysimeter wurden im Jahr 2011 in einem unterirdischen HDPE - Container installiert (*Abbildung 2*). Die einzelnen Lysimetersäulen sind 2,5 m hoch und haben eine nutzbare Oberfläche von 1 m². Kontinuierlich werden die folgenden Parameter gemessen: Wassergehalt und Saugspannung in 50, 100 und 150 cm Tiefe, Lysimetergewicht und Sickerwassermenge.

Die Lysimeter enthalten folgende Böden:

- Lysimeter 1 und 2: Braunerde aus Sand als ungestört gestochener Bodenmonolith,
- Lysimeter 3 und 4: schichtenweise eingefüllte Kippsubstrate (Lys. 3: Ss, Lys. 4: Sl2).

Während Lysimeter 2 bewuchsfrei gehalten wird, tragen die Lysimeter 1, 3 und 4 eine Grasdecke mit der winterharten Weidelgrassorte *Arvicola* (dt. Weidelgras). Die Braunerdemonolithe wurden direkt nebeneinander von einer natürlichen Ackerfläche gewonnen. Die typischen Kippsubstrate stammen aus dem Tagebau Welzow. Auf Grund der Ausnahmestellung des Lysimeters 2 (ohne Bewuchs), wird dieses in der weiteren Betrachtung nicht näher betrachtet.

Zur klimatischen Einordnung wurden die den Lysimeterstandorten nächstgelegenen DWD-Stationen herangezogen. Hier zeigen die langjährigen Klimawerte 1961-1990 eine erstaunliche Übereinstimmung, sowohl hinsichtlich Jahresmitteltemperatur (beide 8,5 °C), als auch Jahresniederschlagssumme (Gardelegen 562,8 mm, Doberlug-Kirchhain 559,8 mm). Für den Zeitraum 1981 bis 2010 sind an beiden Standorten die Jahresmitteltemperaturen auf 9,2 °C gestiegen, allerdings zeigt sich beim Niederschlag eine Differenz

von ca. 34 mm (Gardelegen 546 mm; Doberlug-Kirchhain 580 mm).

Bei den verwendeten Daten handelt es sich um Tageswerte der Wiegedifferenz, des Sickerwassers und des Niederschlages aus dem Zeitraum vom 01.01.2012 bis zum 31.12.2017 von beiden Stationen.

Die Wasserhaushaltsmodellierungen für Grünewalde und Colbitz erfolgten mit dem Modell METVER auf Grundlage der am Standort gemessenen meteorologischen Daten.

Das Modell METVER zur Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete wurde von Müller und Müller (1988a, 1988b, 1989) ab Ende der 1980er Jahre entwickelt und seitdem immer wieder an aktuelle agrarmeteorologische Fragestellungen angepasst. Es ist ein Einschichtmodell, bei dem die Bestimmung der realen beziehungsweise potentiellen Evapotranspiration auf dem Verfahren von Turc (1961) und dessen Modifikation nach Wendling et al. (1991) basiert. In diesem Modell sind die Ausschöpfungsschicht ZG, aus der Pflanzen Wasser beziehen, und die Durchwurzelungsschicht variabel. Sie sind Funktionen der Zeit aber auch abhängig von der Entwicklung der jeweiligen Pflanzenkultur. METVER besitzt einen Entzugssektor, der dem Raum der Hauptdurchwurzelungszone ZD entspricht und 60% der nutzbaren Feldkapazität (nFK) der Ausschöpfungsschicht ausmacht. Die restlichen 40% der nFK entfallen auf den darunter liegenden Nachlieferungssektor. Ausschöpfungsschichtdicke und Dicke des Entzugssektors stehen also im Verhältnis 5:3.

Es gilt: $Z_G = \frac{5}{3} * Z_D$

Das Modell besitzt eine räumliche Auflösung von maximal 20 Dezimeterschichten. METVER nutzt als Eingangsdaten die Tagesmitteltemperatur in 2m Höhe, die Tagesniederschlagssumme in 1m Höhe sowie die Tagessumme der

Globalstrahlung. Prinzipiell können also auch hier die Routinemessungen des DWD verwendet werden. Im Dialog mit dem Modellprogramm müssen noch Angaben zur geographischen Lage, zur Anzahl der 10 cm-Schichten und zur Oberflächennutzung gemacht werden. Für einen Modelllauf kann aber nur eine Kultur als Nutzungsparameter verwendet werden. Eine Steuerdatei verweist dabei auf einen biologisch-pflanzenphysiologischen Faktor, die effektiv wirksame Durchwurzelungstiefe und die Interzeptionskapazität für jeden Tag im Jahr. Intern erfolgt eine Korrektur des Niederschlags basierend auf Richter (1995). Vereinfacht wird bei einer Tagesmitteltemperatur kleiner 0 °C um +30%, anderweitig um +10% korrigiert. Die Anpassung an die bodenhydrologischen Bedingungen vor Ort wird über eine weitere Steuerdatei realisiert, die auch im Vorfeld der Modellrechnung erstellt wurde. METVER errechnet Werte für die potenzielle und reale Evapotranspiration, das Sickerwasser aus der tiefsten Bodenschicht zum Grundwasser, den gesamten Bodenwassergehalt, die Ausschöpfungsschichtdicke und die Bodenfeuchte in %nFK, bezogen auf die Ausschöpfungsschichtdicke. Die Ausgabe der Ergebnisse kann tages-, halbdekaden-, dekaden- oder monatsweise erfolgen. Nach Kayser (2002) liegen die Stärken des Modells bei der Berechnung für Grünland beziehungsweise für kurzes Gras. Aber auch für die Berechnung mit Wintergetreide ist es gut geeignet.

Ergebnisse der aktuellen (realen) Verdunstung (AET)

Lysimeterstation Colbitz

In *Abbildung 3* sind die mittleren täglichen realen Verdunstungen (AET) über die Dekade gemittelt dargestellt. Wie vorher bereits erwähnt, wurde hierbei das Lysimeter 8 nicht betrachtet. Die mit METVER modellierten Werte

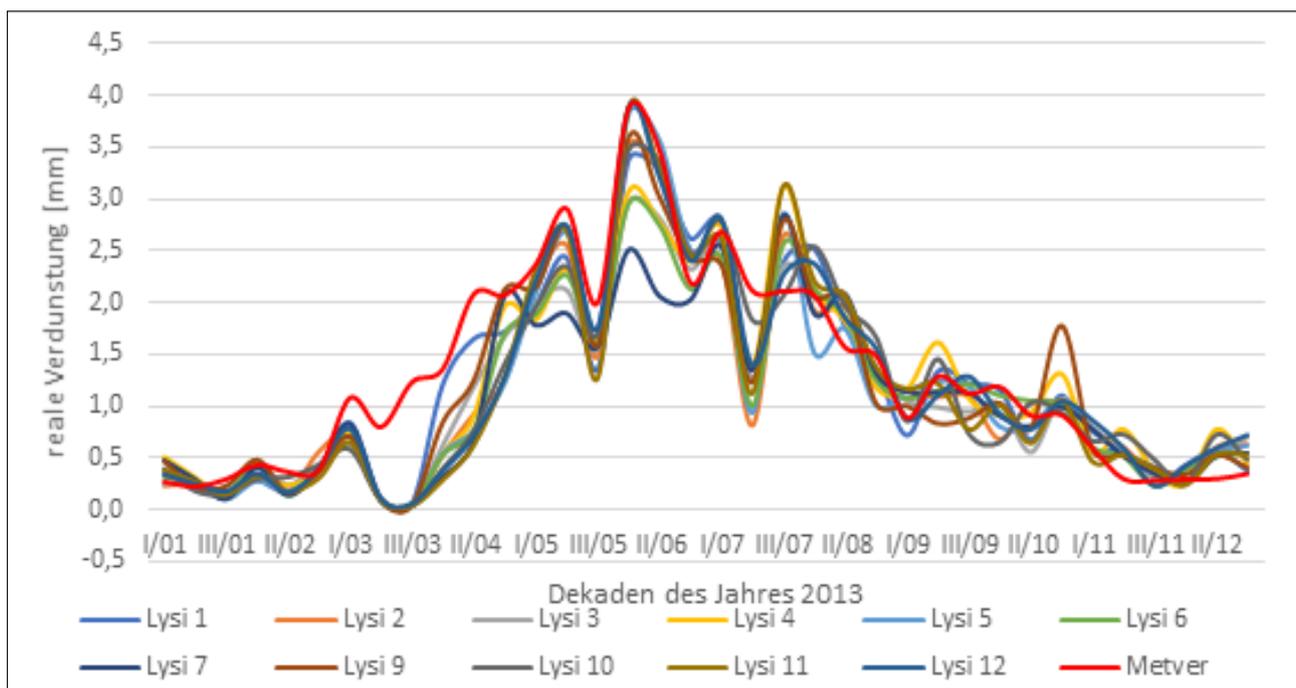


Abbildung 3: Jahresverlauf der mittleren täglichen Verdunstung in den Dekaden des Jahres 2013 der Lysimeterstation Colbitz.

sind in der Abbildung in der roten Kurve „Metver“ dargestellt. Sehr auffällig ist im Jahr 2013, dass in den Dekaden I/01 bis III/02 der Verlauf der realen Verdunstung bei den unterschiedlichen Lysimetern fast identisch ist und auch die mit METVER modellierte Kurve annähernd gleich ist. Dies ist eine Folge der nicht plausiblen Ergebnisse der Verdunstungsberechnung auf der Basis der Lysimeterwägungen, die vor allem im Winter bei Lysimeterstationen auftreten. Auf den langjährigen Erfahrungen an anderen Lysimeterstationen (bspw. Brandis) aufbauend und aufgrund der Vegetationsruhe im Winter, fiel die Entscheidung, negative Verdunstungswerte durch die potentielle Evapotranspiration (PET) zu ersetzen. Dies verhält sich in allen betrachteten Jahren 2012 bis 2017 gleichartig. Der deutliche und gleichmäßige Abfall in den Dekaden II/03 und III/03 ist dadurch zu erklären, dass in diesen Tagen des Jahres 2013 eine geschlossene Schneedecke zu verzeichnen war bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes. Für diese Tage wurde eine Schneedeckenverdunstung von 0,01 mm pro Tag gesetzt. In den Dekaden I/05 bis II/07 passen die modellierten Werte exzellent zu den Messwerten und zeigen den gleichen Verlauf, wobei die modellierten Werte im Bereich I/05 bis etwa II/06 leicht oberhalb oder im oberen Bereich der vorhandenen Werte liegen.

Lysimeterstation Grünewalde

In *Abbildung 4* ist die mittlere tägliche reale Verdunstung in den Dekaden des Jahres 2013 für die Lysimeter 1, 3 und 4 der Station Grünewalde dargestellt. Zuerst einmal ist sehr gut ersichtlich, dass die Ergebnisse der Lysimeter in ihren Verläufen gut zueinander passen. Vor allem in den Dekaden I/01 bis II/07 verlaufen die Werte der Lysimeter 3 und 4 fast identisch. Dass der Verlauf des Lysimeters 1 leicht abweicht, lässt sich mit den unterschiedlichen Bodenarten begründen.

Im Gegensatz zu Colbitz, liegt die mit METVER modellierte AET in den Monaten Januar bis März deutlich über den Werten aus den Lysimetermessungen. Der Messwertverlauf ist auch hier geprägt durch die Korrekturen der negativen oder wirklichkeitsfernen Messwerte der Lysimeter.

Fehlerbetrachtung

Die Fehlerbetrachtung muss zwei wichtige Aspekte bedenken. Der erste Gesichtspunkt ist, dass Fehlerquellen in den Rohdaten liegen können. Die fehlerhaften Daten – negative Verdunstungswerte oder unrealistisch hohe Werte – treten vor allem in den Wintermonaten von Oktober bis März auf. Dies kann unterschiedliche Ursachen haben, bspw. eine vorhandene Schneedecke. Diese sorgt je nach Temperatur zu einer Erhöhung des Gewichts des Lysimeters (bei Temperaturen über 0°C und Regen wird der Schnee deutlich schwerer, als bei negativen Temperaturen und Trockenheit). Außerdem können sogenannte Brückenkräfte entstehen, die ebenfalls zu einer Erhöhung des Gewichts führen. Auch Frost kann aufgrund von Schrumpfungprozessen zu falschen Werten führen, da so zwischen Bodenmonolith und Lysimetertopf ein Spalt entsteht, der dazu führt, dass Wasser an der Innenwand herunterlaufen kann.

Die Vegetation spielt bei der realen Verdunstung eine entscheidende Rolle. Obwohl die Lysimeter der beiden Stationen mit Gräsern bewachsen sind, entwickelt sich die Vegetation jeder Station, gar jedes Lysimeters unterschiedlich. So unterscheidet sich der Bewuchs am Standort Colbitz auf einer Lichtung im Wald deutlich von der Vegetation am Standort Grünewalde auf einer freien Fläche. In *Abbildung 2* ist der Unterschied im Bewuchs zwischen den einzelnen Lysimetern in Grünewalde gut zu sehen. Die Lysimeter 1 bis 9 der Station Colbitz sind mit *Calluna vulgaris* bewachsen,

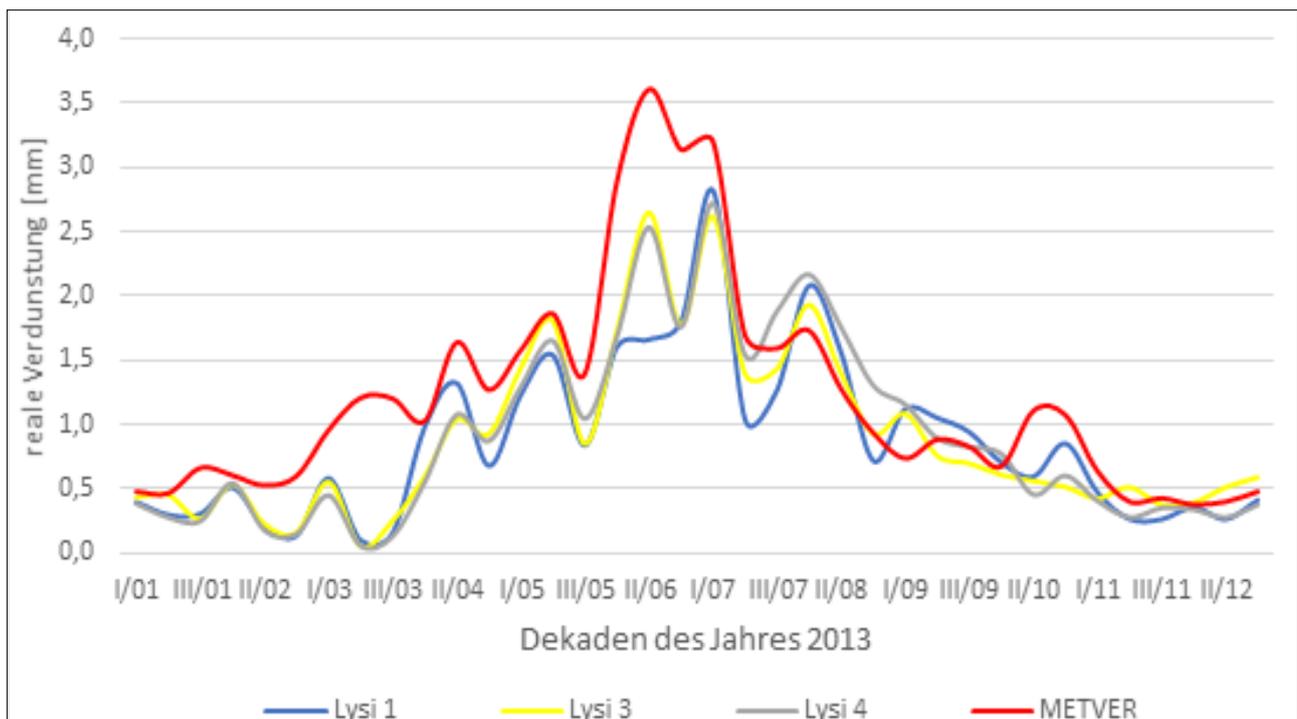


Abbildung 4: Jahresverlauf der mittleren täglichen Verdunstung in den Dekaden des Jahres 2013 der Lysimeterstation Grünewalde.

zeigen aber ein ähnliches Verdunstungsverhalten wie die Graslysimeter an diesem Standort.

Die Zusammensetzung und Dichte des Bewuchses wird insbesondere durch die Eigenschaften der Böden in den Lysimetern beeinflusst. Insgesamt sind auf beiden Stationen fünf unterschiedliche Böden eingesetzt worden, wobei hier besonders die beiden Lysimeter der Station Grünewalde hervorzuheben sind, die mit einem geschütteten Haldenboden gefüllt sind. Die gewachsenen Böden, die als ungestörte Bodenmonolithe eingebaut wurden, weisen einen anderen Wasserhaushalt auf als die künstlich angelegten, geschütteten Böden. Zum anderen muss der Hintergrund des Modells hier berücksichtigt werden. Das Modell wurde entwickelt, um die Verdunstung in landwirtschaftlichen Nutzgebieten zu errechnen, und ihm liegt eine mittlere Phänologie zugrunde. Die beiden letzten Punkte werden im folgenden Abschnitt näher beleuchtet.

Diskussion

Der Vergleich beider Stationen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Lage – Colbitz auf einer Lichtung im Wald, Grünewalde frei auf einer Halde – sehr interessant, weil dadurch mikroklimatische Unterschiede in den Messwerten durchschlagen, die durch das verwendete Modell nicht abbildbar sind. Des Weiteren weisen beide Stationen unterschiedliche Bodentypen auf. In den dargestellten Ergebnissen zeigt sich deutlich, dass die Messwerte solcher Stationen weiterhin zur Verbesserung von Modellwerten hilfreich sein werden. Besonders das Bodengefüge ist hierbei zu beachten. Das Modell mit seinen Konstanten ist für gewachsene, landwirtschaftlich genutzte Flächen konzipiert worden. Um auch andere Bodenarten, -strukturen und -nutzungen vollumfänglich abbilden zu können, müsste darüber nachgedacht werden, ob in METVER Konstanten so verändert werden können, dass sie die wasserhaushaltlichen Zusammenhänge besser abbilden können. Außerdem ist beim Modell METVER zu bedenken, dass die Wachstumsphase der Pflanzen auf eine mittlere Phänologie ausgelegt ist. Die langjährigen Beobachtungen des Klimas zeigen, dass sich die phänologischen Phasen insbesondere in der ersten Hälfte der Vegetationszeit deutlich verfrühen. Dies führt dazu, dass das Modell METVER die Wachstumszeit der Pflanzen etwas zu spät ansetzt.

Es sei auch angemerkt, dass die Messdaten kritisch betrachtet werden müssen. In den Monaten von Dezember bis März liefern die Lysimeter aus verschiedenen Gründen oft schwierig zu interpretierende Messwerte, die sehr oft durch potenzielle Verdunstungswerte ersetzt werden müssen. Für die vegetationsbezogene Auswertung der Lysimeterergebnisse ist dies aber nur von geringer Relevanz, da das Hauptaugenmerk auf den Lysimetermesswerten in der Vegetationszeit liegt. Auch die Sorgfalt spielt bei Lysimeterstationen

eine wesentliche Rolle. So ist eine tägliche Betreuung der Anlage für eine reibungslose Messung und Aufzeichnung der Werte sehr wichtig. Nicht plausible Messwerte oder fehlende Messwerte der Lysimeter und der meteorologischen Stationen werden bei einer nicht kontinuierlichen Betreuung wahrscheinlich nicht rechtzeitig erkannt.

Schlussfolgerungen

Es sollte sichergestellt werden, dass die Messungen langfristig stabil mit einem gleichbleibenden Qualitätsniveau fortgesetzt werden, denn langjährige Messungen sind selten und stellen schon deshalb einen besonderen Wert dar. Wichtig ist bei dem Vergleich mit Modellen, dass die Hintergründe der Modelle beachtet werden. Gerade beim Modell METVER ist die Phänologie zu berücksichtigen und so wäre hier zu überlegen, das Modell mit einem Ontogenesemodell zu koppeln, um die Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten zu kompensieren.

Literatur

- Hagenau J. (2014) Wasser- und Stoffhaushalt der wägbaren Lysimeterstation Colbitz. Ein Referenzstandort zur Umsetzung der Erfordernisse der EU-WRRL, im Auftrag des LHW 16.09.2014.
- Helbig A. (1988) Vergleich der Wasserhaushaltskomponenten eines Kieferbestandes und einer Waldgrasfläche nach Lysimetermessungen. Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik (140).
- Kayser M. (2002) Aspekte zum Wasserhaushalt von Sandlössen im Mitteldeutschen Trockengebiet, Dissertation an der TU Berlin.
- Kortüm F., Helbig A. (1980) Zur Auswertung von Lysimeterbeobachtungen, Zeitschrift für Meteorologie, 107-111.
- Müller J., Müller G. (1988a) Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, 1. Mitteilung, Z. Meteorol., 38, 332-336.
- Müller J., Müller G. (1988b) Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, 2. Mitteilung, Z. Meteorol., 38, 361-365.
- Müller J., Müller G. (1989) Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, 3. Mitteilung, Z. Meteorol., 39, 142-149.
- Richter (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194.
- Turc (1961) Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. – Ann Agron. Paris 12: 13-49.
- Wendling U.H., Schellin H.-G., Thoma M. (1991) Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. – Z. Meteorol., 34: 82-85.
- UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (1996) Erfassung des Wasserhaushalts bewaldeter Areale und Heidevegetation. Jahresbericht über Lysimetermessungen in der Colbitz-Letzlinger Heide. Unveröffentlicht.

Lysimeteruntersuchungen zum Bodenwasserhaushalt eines Steppenstandorts in Sibirien

Lisa Haselow^{1*}, Holger Rupp¹ und Ralph Meißner¹

Zusammenfassung

Diese Studie quantifiziert Wasserhaushaltskomponenten, die mit Hilfe von wägbaren Gravitationslysimetern in der Kulunda-Steppe im südwestlichen Sibirien (Russland) erfasst wurden. Während ein Lysimeter die natürliche Steppenvegetation (LYS 1) beibehält, wurde das zweite Lysimeter (LYS 2) während des Untersuchungszeitraums durch Weizenanbau landwirtschaftlich genutzt. Innerhalb von 68 Tagen wurden insgesamt 114,7 mm Niederschlag durch LYS 1 und 126,6 mm durch LYS 2 gemessen; die aktuelle Evapotranspiration (ET_a) betrug 154,4 mm bzw. 202,8 mm. Bei LYS 1 konnte ein durchschnittlicher Wassergehalt von 21,8% in 30 cm Tiefe gemessen werden, der mit zunehmender Tiefe abnahm. LYS 2 zeigte hingegen mit 18,3% eine geringere Bodenfeuchte im Oberboden, die zum Unterboden anstieg. Aufgrund des hohen Weizenbestandes führte Interzeption zu einer reduzierten Niederschlagsmenge, wogegen die Transpirationsregulierung der Pflanze eine geringere ET_a zur Folge hatte. Der Bodenwassergehalt nahm mit zunehmender Trockenheit ab. Die natürliche Grasdecke auf LYS 2 zeigte trotz des Wasserverlustes durch ET_a eine erhöhte Wasserspeicherkapazität des Bodens. Dieser Standort ist demnach resistenter gegenüber Wasserknappheit im Vergleich zum landwirtschaftlich genutztem.

Schlagwörter: semi-arid, Niederschlag, aktuelle Evapotranspiration, Bodenfeuchte

Summary

This study quantifies parameters of the water balance in the Kulunda steppe of southwest Siberia (Russia). The measurements were conducted by weighable gravitation lysimeters. The first lysimeter (LYS 1) was covered by wheat during the study, whereas the second lysimeter (LYS 2) was permanently characterised by pristine steppe vegetation. Within 68 days the total amounts of precipitation ranged from 114.7 mm at LYS 1 to 126.6 mm at LYS 2. The actual evapotranspiration (ET_a) was by 154.4 mm and 202.8 mm, respectively. At LYS 1 mean soil moisture of 21.8% was measured in 30 cm depth which decreased with the depth. In contrast, LYS 2 showed lower soil moisture with 18.3% at the topsoil, but the water content increased to the subsoil. Due to the large coverage of wheat at LYS 1 interception could have led to a reduction of precipitation. The lower ET_a rates are caused by the transpiration regulation of the vegetation. The soil moisture at LYS 1 was dependent on precipitation and became lower with aridity. However, the pristine steppe vegetation at LYS 2 showed high ET_a , but soil moisture pointed to a higher water-holding capacity. Therefore, the soil is more resistant to water stress.

Keywords: semi-arid, precipitation, actual evapotranspiration, soil moisture

Einleitung

In semi-ariden Regionen ist Wasser eine lebenswichtige Ressource, die durch den voranschreitenden Klimawandel immer mehr reduziert wird. Da sich die resultierende Wasserknappheit auf die Vegetation auswirkt, gewinnt das Management von regionalen Wasserressourcen immer mehr an Priorität. Insbesondere die Landwirtschaft ist dazu gezwungen sich den Folgen des Klimawandels entsprechend anzupassen. Mit einem Blick in die Zukunft wiesen Studien auf Regionen, die eine äußerst hohe Anfälligkeit demgegenüber zeigen (Fraser et al. 2013, Degefie et al. 2014). Als ein Hotspot gilt Sibirien. Eine nachhaltige und angepasste Landwirtschaft ist hier von besonderer Bedeutung, da die Region aufgrund ihrer Größe und ihres Ertragspotentials zu den „Brotkörben“ der Welt zählt (Swinnen et al. 2017). Für eine entsprechende Anpassung müssen jedoch Informationen über den regionalen Wasserhaushalt vorliegen.

In den letzten Jahren erwies sich die Lysimetrie als eine geeignete Methode zur Bestimmung von Wasserhaushaltsgrößen (Meißner et al. 2010, Schrader et al. 2013). Neben bodenhydrologischen und bodenchemischen Prozessen sind wägbare Lysimeter dazu in der Lage den Austausch von Wasser zwischen Pedosphäre und Atmosphäre zu ermitteln. Jedoch blieben derartige Untersuchungen in den semi-ariden Regionen Sibiriens bislang aus.

Vor diesem Hintergrund bot das Forschungsprojekt KULUNDA (Balikyn et al. 2016) mit einem komplett ausgestatteten Monitoring-Netzwerk die Möglichkeit, den Wasserhaushalt in der Kulunda-Steppe im südwestlichen Sibirien zu bestimmen. Ziel dieser Studie ist es die Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, aktuelle Evapotranspiration und Bodenwasser anhand von zwei wägbaren Lysimetern zu quantifizieren. Angesichts der unterschiedlichen Lysimeterbedeckung erfolgt zusätzlich

¹ Department Bodensystemforschung, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Falkenberg 55, D-39615 ALTMÄRKISCHE WISCHE

* Ansprechpartner: Lisa Haselow, lisa.haselow@ufz.de

die Bewertung des Bodenwasserhaushalts in Abhängigkeit von der Vegetation.

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Das zentral kontinentale Klima in der Kulunda-Steppe ist durch kurze, heiße Sommer und lange, kalte Winter gekennzeichnet. Die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt 0 °C. Der Niederschlag schwankt jährlich zwischen 250 und 450 mm. Die Landschaftsverdunstung ist zwei- bis dreimal höher als der zu verdunstende Anteil des Niederschlags. Den klimatischen Verhältnissen entsprechend, entwickelten sich die Bodentypen Tschernosem, Kastanozem, Solonetz und Solonchak. Die landwirtschaftlichen Flächen werden hauptsächlich zum Anbau von Weizen, Raps, Sonnenblumen, Erbsen und Mais verwendet. Die weitestgehend natürlichen Steppenböden wurden in den 1950er Jahren im Zuge der Neulandaktion einmal umgebrochen, jedoch nicht weiter bearbeitet. Demnach dominieren natürliche Steppengräser die Landschaft.

Messnetzwerk

Der Aufbau der Lysimeterstation (Hersteller „UGT-Müncheberg“, Deutschland) erfolgte im Jahr 2013 auf der Testfarm in Poluyamki (ca. 700 km südwestlich von Novosibirsk). Hierfür wurden insgesamt zwei Bodensäulen von einem landwirtschaftlich bewirtschafteten (Lysimeter 1 – LYS 1) und einem natürlichen Steppenstandort (Lysimeter 2 – LYS 2) monolithisch extrahiert (Balikyn et al. 2016). Jedes Lysimeter hat einen Durchmesser von 1 m², eine Tiefe von 2 m, und eine Masse von ca. 4000 kg. Die Gefäße stehen innerhalb der Containerstation jeweils auf drei Wägezellen, die mit einer Präzision von ± 20 g messen (Xiao et al. 2009). Beide Lysimeter sind mit FDR- und Watermark-Sensoren sowie Saugkerzen in den Tiefen 30, 50 und 120 cm ausgestattet. Des Weiteren wird das Sicker- und Oberflächenwasser mit Hilfe von Kippwaagen quantifiziert. Alle Daten werden mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde in einem Datenlogger gespeichert. Eine detaillierte Beschreibung der Lysimeterstation ist in Meißner et al. (2017) zu finden.

Die unterschiedliche Lysimeterbedeckung erlaubte Vergleichsanalysen hinsichtlich des Wasserhaushalts von landwirtschaftlich bewirtschafteten und natürlichen Steppenböden. Während LYS 2 durchgehend mit Federgras (*Stipa pennata*) bedeckt war, wurde LYS 1 mit einer festgelegten Fruchtfolge bewirtschaftet: Weizen (2013), Erbsen (2014), Weizen (2015) und Brache (2016).

Datenverfügbarkeit

Mit der Inbetriebnahme der Lysimeterstation wurden Messungen von 2013 bis 2016 durchgeführt. Die Lysimetermessungen erwiesen sich im Winter aufgrund von Minustemperaturen bis -47°C und hohen Schneedecken als unplausibel. Dementsprechend waren die Daten zwischen Oktober und April für die Auswertung unbrauchbar. Des Weiteren wurde der Zugriff auf die Daten durch russische Behörden erschwert. Zusammenhängende Zeitreihen ohne Datenlücken waren daher selten. Aufgrund dessen

beschränkt sich der hier verwendete Datensatz auf den Zeitraum 25.06. - 31.08.2015.

Datenverarbeitung

Die Aufbereitung der Lysimeterdaten wurde nach dem Prinzip des „Adaptive window and adaptive threshold“ (AWAT) Filters von Peters et al. (2014) durchgeführt. Der Niederschlag (P) und die aktuelle Evapotranspiration (ET_a) wurden von der Lysimetermasse abgeleitet, denn die absolute Masse des Systems (M) ist die Summe aus der Lysimetermasse (M_{LYS}) und dem Abfluss (M_Q). Es ist anzunehmen, dass ein Massenanstieg mit P und eine Massenabnahme mit ET_a einhergehen. Mit der Annahme, dass P und ET_a nicht parallel auftreten, nimmt dementsprechend der inaktive Prozess den Wert 0 an (Schrader et al. 2013):

$$M = M_{LYS} + M_Q$$

$$P = \begin{cases} \Delta M & \text{für } \Delta M > 0 \\ 0 & \text{für } \Delta M \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$ET_a = \begin{cases} \Delta M & \text{für } \Delta M < 0 \\ 0 & \text{für } \Delta M \geq 0 \end{cases}$$

M_{LYS} ist die Lysimetermasse [kg], M_Q ist die Menge an Sickerwasser [kg] und ΔM ist die Massenänderung des Lysimeters [kg] im vorgegebenen Zeitintervall [Δ]. Aufgrund der Geometrie des Lysimeters entspricht eine Massenänderung gleich einer Änderung im Wasservorrat in Millimeter (1 kg ≈ 1 l/m² = 1 mm). Daher werden alle Massenänderungen im Folgenden in Millimeter angegeben.

Ergebnisse und Diskussion

Niederschlag

Innerhalb von 68 Tagen wurden 114,7 mm Niederschlag durch LYS 1 und 126,6 mm durch LYS 2 registriert. Die Differenz von 9,3% ist größtenteils in der unterschiedlichen Bedeckung begründet. Durch den Weizenbestand auf LYS 1 nahm die Interzeption einen nicht vernachlässigbaren Anteil an. Aufgrund der größeren Blattoberfläche erreichte ein Teil der Niederschlagsmenge die Erdoberfläche nicht, da dieser abgefangen wurde und sofort zur Evaporation bereit stand. Daher wird von einem Interzeptionsverlust gesprochen, der sich wahrscheinlich in der geringeren Niederschlagsmenge von LYS 1 widerspiegelte. Frühere Studien haben nachgewiesen, dass auch die Taumenge mit Hilfe von wägbaren Lysimetern gemessen werden kann (Meißner et al. 2007, Xiao et al. 2009). Da Tau mit einem Massenanstieg einhergeht, wird dieser nach Gl. 1 als Niederschlag erfasst. Die Taubildung ist unter anderem von der Blattform abhängig und bei Gräsern besonders prädestiniert. Daher kann davon ausgegangen werden, dass eine höhere Taumenge zu der Niederschlagsmenge von LYS 2 beigetragen hat.

Aktuelle Evapotranspiration (ET_a)

Mit einer ET_a von 154,4 mm bei LYS 1 und 202,8 mm bei LYS 2 (Differenz 23,8%) wurden jeweils 34,6 und 60,2% mehr Wasser verdunstet als vom Niederschlag zur Verfügung gestellt wurde. Die durchschnittliche ET_a lag jeweils

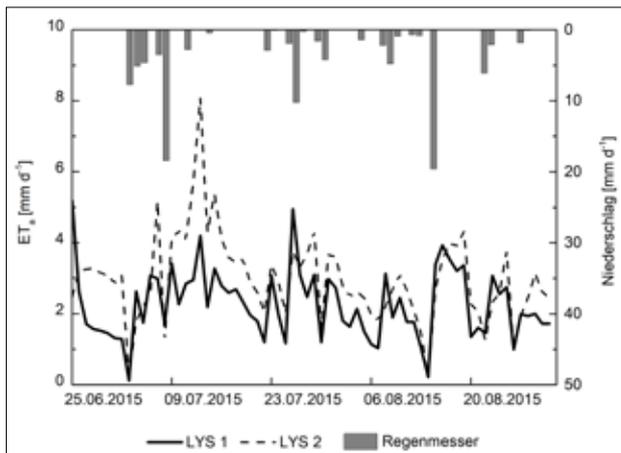


Abbildung 1: Die täglichen ET_a - und Niederschlagsraten zwischen dem 25.06. und 30.08.2015. Der Niederschlag wurde mit Hilfe einer angrenzenden Kippwaage gemessen.

bei 2,3 $mm\ d^{-1}$ bzw. 3 $mm\ d^{-1}$. Die Maxima betragen 5,2 $mm\ d^{-1}$ (LYS 1) bzw. 8,1 $mm\ d^{-1}$ (LYS 2). Die geringeren ET_a -Raten bei LYS 1 sind dem Weizenbestand geschuldet, der in der Lage ist seine Transpiration zu regulieren, um bei heißem und trockenem Wetter einer zu hohen Verdunstung vorzubeugen (Changhei et al. 2010). Ein Vergleich mit der potentiellen Evapotranspiration ($ET_0 = 373,6\ mm$) lässt daraus schließen, dass die ET_a von der Wasserverfügbarkeit des Standortes abhängig war. Dies lässt sich auch im Zusammenhang mit dem gemessenen Niederschlag erkennen (Abbildung 1). Nach Ereignissen mit hohen Niederschlagsraten wurde ein rapider Anstieg der ET_a beobachtet.

Bodenfeuchte

Mit Hilfe der FDR-Sensoren wurde der volumetrische Wassergehalt des Bodens bestimmt. Im Oberboden schwankte die Bodenfeuchte erkennbar, wobei LYS 1 eine stärkere Fluktuation in Abhängigkeit vom Niederschlag zeigte (Abbildung 2). Mit zunehmender Tiefe nahm sowohl die Fluktuation als auch die Bodenfeuchte bei LYS 1 ab. Bei einem Wassergehalt von durchschnittlich 21,8% in 30 cm Tiefe sank diese auf 12,9% in 120 cm. Bei LYS 2 konnte ein gegensätzliches Muster beobachtet werden. Im Oberboden wurde eine Feuchte von ca. 18,3% gemessen, die vergleichsweise stabil blieb. Zum Unterboden hin stieg die Bodenfeuchte auf 23,8% an. Die höhere Bodenfeuchte im Oberboden von LYS 1 wurde von der Infiltrationskapazität des Bodens bestimmt. Durch das ausgeprägte Wurzelsystem des Weizenbestandes gab es einen hohen Anteil an Makroporen, die dazu beitrugen die Infiltrationskapazität zu erhöhen. Die geringe Fluktuation und Bodenfeuchte im Oberboden von LYS 2 wies auf einen dichten und trockenen Boden mit einer niedrigen Infiltrationskapazität hin. Die Zunahme der Bodenfeuchte mit ansteigender Tiefe belegt, dass mehr Wasser gespeichert wurde und damit der Vegetation in Trockenzeiten zusätzlich zur Verfügung stand.

Schlussfolgerungen

Diese Studie untersuchte den Bodenwasserhaushalt in der Kulunda-Steppe in Südwest-Sibirien. Mit Hilfe von zwei wägbaren Gravitationslysimetern wurden die Wasserhaus-

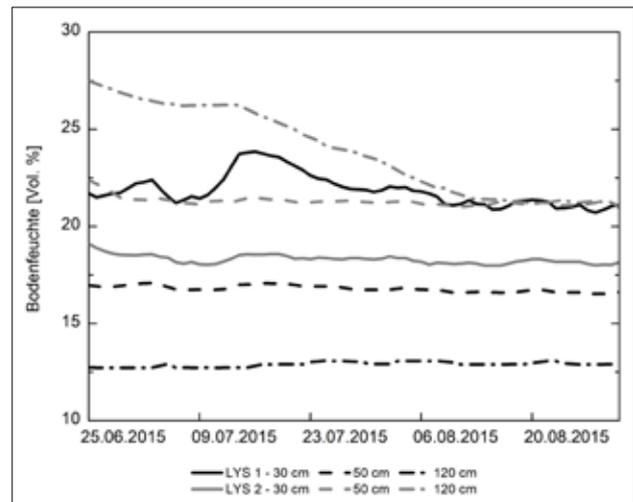


Abbildung 2: Die volumetrische Bodenfeuchte, gemessen in 30, 50 und 120 cm Tiefe.

haltskomponenten Niederschlag, ET_a und Bodenwasser während der Sommersaison 2015 quantifiziert. Die Lysimeter waren jeweils durch Weizen und natürliches Steppengras bedeckt. Die Ergebnisse wiesen auf niedrigere ET_a - und Niederschlagsraten bei LYS 1 hin. Angesichts der größeren Blattoberfläche des Weizens bestand die Möglichkeit, dass der Niederschlag aufgrund von Interzeption reduziert wurde. Obwohl der Weizen aus pflanzenphysiologischen Gründen in der Lage ist, einem hohen Wasserverlust durch ET_a vorzubeugen, sank der Bodenwassergehalt mit zunehmender Trockenheit. Trotz hoher ET_a wies der natürliche Steppenboden von LYS 2 eine verbesserte Wasserspeicherkapazität im Vergleich zum Weizenstandort auf, die ihn und dessen Vegetation resistenter gegenüber Dürren macht.

Neben den ersten Ergebnissen verdeutlichte diese Studie auch die damit verbundenen Schwierigkeiten, zuverlässige Messungen in dieser Region durchzuführen. Sowohl administrative als auch technische Hemmnisse führten dazu, dass lediglich kurze zusammenhängende Datenreihen zur Verfügung standen. Um aussagekräftige Informationen zum regionalen Wasserhaushalt zu erhalten, ist eine Langzeitstudie notwendig, um plausible Messungen ganzjährig, d.h. auch über den Winter, zu gewinnen. Aus diesem Grund wurde im nachfolgenden Projekt ReKKS (Guggenberger et al. 2017) ein ähnliches Monitoring-Netzwerk in der kasachischen Steppe installiert, um die Forschung unter ähnlichen Bedingungen fortzuführen und verlässliche Wasserhaushaltsdaten für diese bisher nicht ausreichend erforschte Region zu erhalten.

Danksagung

Dieser Beitrag basiert auf Studien, die im Rahmen der Forschungsprojekte KULUNDA (FKZ 01LL0905D) und ReKKS (FKZ 01LZ1704C) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert werden. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Unser besonderer Dank gilt G. Schmidt von der Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg und A. A. Bondarovich von der Altai State Universität in Barnaul für die logistische Unterstützung.

Literatur

- Balykin D., Puzanov A., Stepahn E., Meißner R. (2016) Using the innovative lysimeter technology in the german-russian research project „KULUNDA“, in Mueller L., Sheudshen A. K. & Eulenstein F. (ed.) Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia. Springer Water, Switzerland, pp. 387-399.
- Changhai S., Baodi D., Yunzhou Q., Yuxin L., Lei S., Mengyu L., Heipei L. (2010) Physiological regulation of high transpiration efficiency in winter wheat under drought conditions. *Plant Soil Environ.* 56, 340-347.
- Degefie D.T., Fleischer E., Klemm O., Soromotin A.V., Soromotin O.V., Tolstikov A.V., Abramov N.V. (2014) Climate extremes in south western Siberia: past and future. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 28, 2161-2173.
- Fraser E.D.G., Simelton E., Termansen M., Gosling S.N., South A. (2013) „Vulnerability hotspots“: integrating socio-economic and hydrological models to identify where cereal production may decline in the future due to climate change induced drought. *Agr. Forest Meteorol.* 170, 195-205.
- Guggenberger G., Meinel T., Meißner R., Seyfarth M., Frühauf M., Schmidt G., Mikutta R., Kaiser K., Carstens J.F. (2017) Innovationen für nachhaltige landwirtschaftliche Ressourcennutzung und Klimaanpassung in Trockensteppen Kasachstans und Südwestsibiriens (ReKKS). In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): „CLIENT II – Internationale Partnerschaften für nachhaltige Innovationen“.
- Meißner R., Seeger J., Rupp H., Seyfarth M., Borg H. (2007) Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170, 335-344.
- Meißner R., Prasad M.N.V., Du Laing G., Rinklebe J. (2010) Lysimeter application for measuring the water and solute fluxes with high precision. *Curr. Sci. India* 99, 601-607.
- Meißner R., Rupp H., Bondarovich A.A., Rinklebe J. (2017) Soil water management in the siberian Kulunda-dry steppe. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources* 5, 87-91.
- Peters A., Nehls T., Schonsky H., Wessolek G. (2014) Separating precipitation and evapotranspiration from noise - a new filter routine for high-resolution lysimeter data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 1189-1198.
- 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.
- Swinnen J., Burkitbayeva S., Schierhorn F., Prishchepov A.V., Müller D. (2017) Production potential in the „bread baskets“ of Eastern Europe and Central Asia. *Global Food Security* 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.

Einfluss erhöhter Temperatur und CO₂-Konzentration auf den Bodenwasserhaushalt im Dauergrünland

Veronika Slawitsch^{1*}, Markus Herndl², Andreas Schaumberger², Erich M. Pötsch² und Steffen Birk¹

Zusammenfassung

Die nach dem aktuellsten Sonderbericht IPCC 2018 prognostizierten Veränderungen hinsichtlich Temperatur und CO₂-Konzentration werden sich nachhaltig auf den Alpenraum auswirken. Die Kenntnis möglicher Änderungen der Wasserbilanz trägt maßgeblich zum Verständnis des Klimawandeleinflusses auf den Wasserkreislauf und in weiterer Folge auf das Pflanzenwachstum und damit die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen bei. An der HBLFA Raumberg-Gumpenstein können im Rahmen des ClimGrass-Experimentes Auswirkungen veränderter Klimavariablen auf die Wasserbilanz von Grünlandböden quantifiziert werden. Dabei werden Wasserbilanzgrößen von Grünlandflächen, welche mit Infrarotstrahler beheizt bzw. mit CO₂ begast oder unter natürlichen Bedingungen behandelt werden, mit Hilfe von wägbaren Lysimetern ermittelt.

Mit den Lysimeterdaten lassen sich für die Vegetationsperioden des für das derzeitige Klima etwa typischen Jahres 2016 sowie des an der Alpennordseite außergewöhnlich trockenen Jahres 2018 Sickerwasserraten an den beheizten Parzellen von 66 mm bzw. 2 mm, an den begasteten Parzellen hingegen von 315 mm bzw. 16 mm errechnen. Die kombinierten Parzellen mit Temperaturerhöhung sowie CO₂-Erhöhung liefern für denselben Zeitraum Sickerwasserraten von 93 mm bzw. 1 mm und damit um 116 mm bzw. 8 mm weniger als die Referenzparzelle. Das Jahr 2018, welches als wärmstes Jahr in der 251-jährigen Messgeschichte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik aufscheint, weist demnach äußerst geringe Sickerwasserraten für alle Behandlungsvarianten auf, zudem wird auf der beheizten Parzelle erstmals seit Beginn der Messungen über die Vegetationsperiode hinweg ein Defizit des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration errechnet.

Schlagwörter: Klimawandel, Grünland, Lysimeter, Wasserbilanz, Evapotranspiration

Summary

The predicted changes of the recent IPCC 2018 report regarding temperature and CO₂-concentration will have lasting impacts on the alpine region. The information on potential changes of the water balance contribute significantly to the understanding of the climate change impact on the hydrological cycle and furthermore on the plant growth and thereby to the management of agricultural sites.

Within the framework of the ClimGrass-experiment at the AREC Raumberg-Gumpenstein, impacts of changing climate variables on the water balance of grassland soils can be quantified. Water balance parameters of grassland plots, which are heated with infrared heaters as well fumigated with CO₂ or treated under ambient conditions, will be determined using weighable lysimeters.

Using the lysimeter data, the amount of seepage during the vegetation period is calculated for the year 2016, which is typical for the current climate, as well as for the year 2018, which was exceedingly dry in the northern alps. The seepage obtains for 2016 and 2018 amounts to 66 mm and 2 mm, respectively, on the heated plots and 315 mm and 16 mm, respectively, on the fumigated ones. For these two years, the plots with both temperature increase and CO₂-increase provide seepage water amounts of 93 mm and 1 mm, respectively, and therefore 116 mm and 8 mm less than on the reference plot. Accordingly, the year 2018, as the warmest year in the last 251 years of measurement, shows extremely low amounts of seepage and correspondingly high evapotranspiration rates on all different treatment plots. Furthermore, for the first time ever on the heated plots, a deficit of precipitation against evapotranspiration is calculated over the whole vegetation period

Keywords: Climate Change, Grassland, Lysimeter, Water balance, Evapotranspiration

Einleitung

Der Klimawandel ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Die stärksten Auswirkungen des Klimawandels werden dabei weniger kurzfristig, sondern mittel- und langfristig auftreten. Die vom IPCC 2018 prognostizierten veränderten Klimabedingungen in Form von

erhöhten CO₂-Konzentrationen, erhöhten Temperaturen und verstärktem Auftreten von Wetterextremen werden sich nachhaltig auf alle Ökosysteme auswirken und die Stabilität und Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme gefährden.

Österreich ist geprägt von landwirtschaftlich genutzten Flächen, von denen etwa 70% im klimatisch und topographisch benachteiligten Berggebiet liegen (Schaumberger 2011).

¹ Universität Graz, NAWI Graz Geozentrum, Institut für Erdwissenschaften, Heinrichstraße 26, A-8010 GRAZ

² Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

* Ansprechpartner: Veronika Slawitsch, veronika.slawitsch@edu.uni-graz.at

Berggebiete und landwirtschaftlich geprägte Regionen zählen dabei zu den verwundbarsten Gebieten, in denen mit weitreichenden Folgen des Klimawandels zu rechnen ist. Seit rund 1880 erfahren wir hier eine Temperaturzunahme von nahezu 2 °C verglichen mit einer globalen Erwärmung von 0,85 °C (APCC 2014). Der aktuellste IPCC Sonderbericht 2018 geht zwischen 2030 und 2052 von einem weiteren Anstieg der globalen Erwärmung um +1,5°C aus, wenn diese mit der aktuellen Geschwindigkeit weiter zunimmt.

Solch ein Anstieg der Temperatur und CO₂-Konzentration lässt in Österreich markante Veränderungen sowohl in ökonomischer als auch in ökologischer Weise erwarten. Ökonomische Auswirkungen des Klimawandels werden überwiegend durch extreme Wetterereignisse und außergewöhnliche Witterungsperioden bestimmt, aber auch durch graduelle Temperatur- und Niederschlagsänderungen. Ökologische Auswirkungen veränderter Wetterbedingungen könnten sich in der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen wie Bodenfruchtbarkeit, Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität sowie in Humusabbau und Erosion äußern.

Auf landwirtschaftlich genutzten Grünlandflächen wird der Klimawandel mit den prognostizierten erhöhten Temperaturen sowie unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen, zu Veränderungen der Wachstumsbedingungen und damit zu Veränderungen in der Produktion von hochwertigem Grundfutter für eine standortangepasste und nachhaltige Viehwirtschaft führen.

In dieser Arbeit sollen daher die Auswirkungen der Änderungen von Klimafaktoren hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes an alpinen Grünlandflächen quantifiziert werden.

Um das notwendige Verständnis des in Zukunft veränderten Bodenwasserhaushaltes auf Grünlandflächen zu erhalten, werden die Wasserbilanzgrößen während der Vegetationsperiode quantifiziert.

Zu diesem Zweck werden Daten von Lysimetern sowohl unter natürlichen (ambienten) Bedingungen (C0T0) als auch unter zukünftigen Bedingungen mit erhöhten Temperaturen (C0T2), erhöhten CO₂-Konzentrationen (C2T0) und einer Kombination von beiden (C2T2) ausgewertet. Die Daten werden für die Vegetationsperioden 2016, als ein repräsentatives Durchschnittsjahr, sowie für die Vegetationsperiode 2018, als das wärmste gemessene Jahr in der 251-jährigen Messgeschichte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), berechnet sowie für alle unterschiedlichen Behandlungsstufen miteinander verglichen.

Material und Methoden

Versuchskonzept

In dieser Arbeit wird der Einfluss von Klimafaktoren auf die Bodenhydrologie anhand eines Klimamanipulationsexperimentes untersucht. Dabei wird die Umgebungsluft mit CO₂ angereichert (FACE) und damit die Vegetation erhöhten CO₂-Konzentrationen ausgesetzt (Miglietta et al. 2001). Zur Untersuchung von Effekten hinsichtlich erhöhter Temperaturen wird die FACE-Technik mit Infrarotstrahlern ergänzt (T-FACE) (Parton et al. 2007, Kimball et al. 2008). Aufbauend auf diesem Konzept wurde an der Höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein in der Steiermark (Österreich) ein System mit Lysimetern auf

T-FACE-Flächen entwickelt (Lysi-T-FACE), um die Effekte von erhöhten Temperaturen und CO₂-Konzentrationen auf bodenhydrologische Prozesse und Parameter quantifizieren zu können (Herndl et al. 2011).

Die Durchschnittstemperatur am Standort der HBLFA Raumberg-Gumpenstein (710 m.ü.A) beträgt 8,2 °C, die jährliche durchschnittliche Niederschlagsmenge 1056 mm und die Dauer der Vegetationsperiode durchschnittlich 162 Tage (Schaumberger 2011). Beim Bodentyp handelt es sich um eine tiefgründige Braunerde. Der am Klimamanipulationsexperiment (ClimGrass-Anlage) etablierte Grünlandbestand ist eine Dauerwiesenmischung B, welche dreimal jährlich geerntet wird und eine mineralische NPK-Düngung erfährt. Der Pflanzenbestand wird durch Knautgras (*Dactylis glomerata*), Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) und Goldhafer (*Trisetum flavescens*) dominiert. Aufgrund der meteorologischen und vegetationstechnischen Faktoren ist die HBLFA Raumberg-Gumpenstein ein repräsentativer Standort für eine alpine Dauergrünlandwirtschaft.

An der ClimGrass-Anlage werden prognostizierte Erhöhungen von Temperatur und CO₂-Konzentration sowie Trockenperioden auf insgesamt 54 Versuchspartellen in unterschiedlichen Abstufungen und Kombinationen simuliert (Temperatur: ambient, +1,5°C, +3°C; CO₂-Konzentration: ambient, +150 ppm, +300 ppm) (*Abbildung 1*).

Die Beheizung der Versuchspartellen erfolgt mit jeweils sechs Infrarotstrahlern, die mit CO₂ angereicherte Umgebungsluft strömt über einen zentralen Begasungsring in den Pflanzenbestand.

Für die Fragestellung zur Untersuchung des Klimawandeleinflusses auf den Wasserhaushalt an Grünlandflächen werden sechs der Versuchspartellen verwendet, welche mit wägbaren Monolithlysimetern (je 1 m² Oberfläche und 1,5 m Tiefe) ausgestattet sind und über einen zentralen Messschacht serviert werden (*Abbildung 2*).

Die Lysimeter beinhalten eine Sensorausstattung, die TDR-Trime-Sonden pico32 (IMKO GmbH) zur Bodenfeuchtebestimmung sowie mit Temperaturerfassung kombinierte Tensiometer T8-30 (METER Group AG) zur Bestimmung des Matrixpotentials in 10 cm, 30 cm und 50 cm Tiefe umfasst. Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 50 Liter-Tank.

Lysimeterdaten

Die an der ClimGrass-Anlage eingebauten Lysimeter sind ein hochauflösendes technisches System. Die Masse der Bodensäule wird auf 100 g genau gemessen, was einer Wassersäule von 0,1 mm entspricht; die Auflösung der Sickerwassermenge beträgt 10 g, was einer Auflösung von 0,01 mm entspricht. Anhand der Massezunahme sowie der Massenabnahme können die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag N, Evapotranspiration ET, Sickerwasser SW, Speicheränderung ΔS sowie die abgesetzten Niederschläge in Form von Tau und Reif (Groh & Slawitsch et al. 2018) mit höchster Auflösung bestimmt werden.

Die Grundlage für die Berechnung der Wasserbilanzgrößen ist eine geeignete Datenkorrektur sowie Datenaufbereitung. Nach der automatischen Filterung von technischen Grenzwerten und Eliminierung von „Error Codes“ erfolgt die Datenkontrolle über manuelle Korrekturen sowie mit der von Peters et al. 2017 entwickelten Filtermethode AWAT (Adaptive Window and Adaptive Threshold Filter).

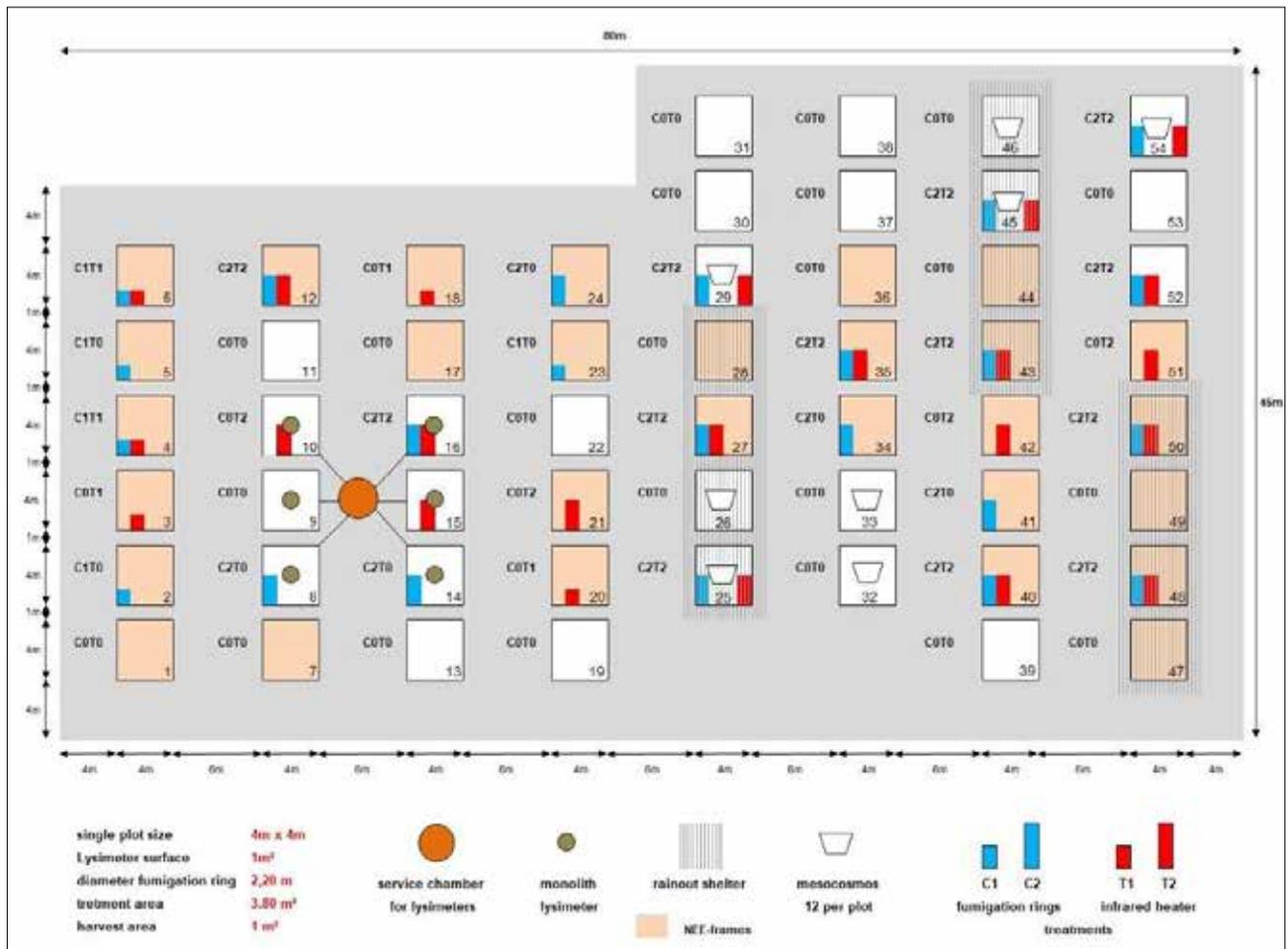


Abbildung 1: Versuchsplan der ClimGrass-Anlage an der HBLFA Raumberg- Gumpenstein (Pötsch et al. 2019).

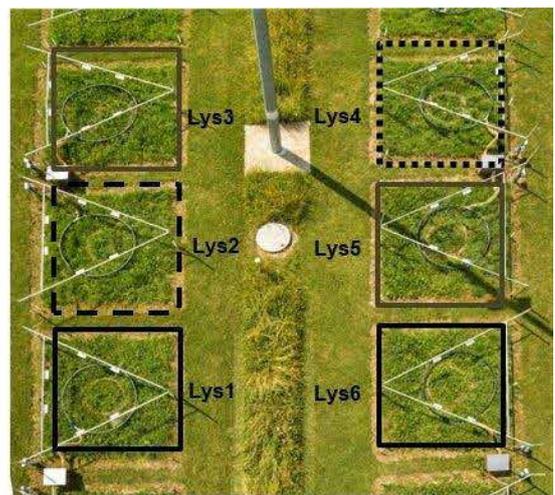
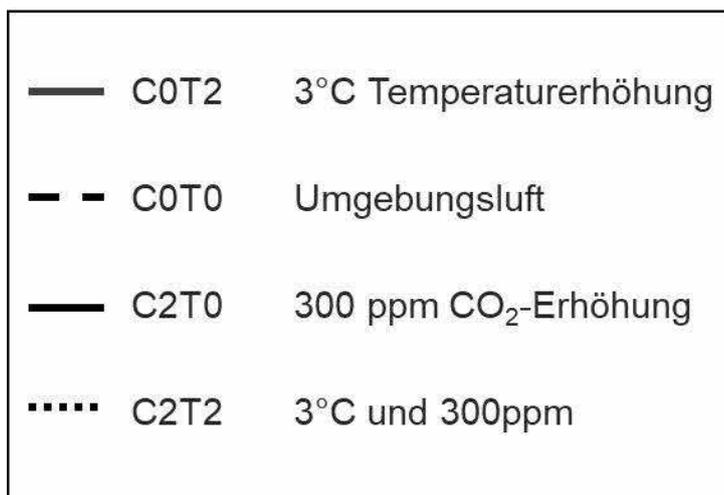


Abbildung 2: Lysimeterkombinationen an der ClimGrass-Anlage.

Dabei wird im ersten Schritt die Speicheränderung ΔS [kg] und der Sickerwasserausfluss SW [kg] täglich beobachtet, unrealistische, fehlerbehaftete Werte eliminiert und Lücken mit Interpolationsmethoden gefüllt. Die hauptsächlich auftretenden Fehler sind bei Kammermessungen, Erntearbeiten oder Wartungsarbeiten zu verzeichnen (Slawitsch et al. 2016).

Im zweiten Schritt wird die Filtermethode AWAT auf alle fehlerbehafteten Daten angewandt, um der großen Herausforderung der Verarbeitung schwacher Signale unter starkem Rauschen gerecht zu werden. Für die AWAT-Methode werden die Summe der kumulativen Flüsse von ΔS und SW beginnend mit einem Zeitpunkt t_1 und einem Anfangszeitpunkt t_0 mit einer benutzerdefinierten Fensterbreite einge-

geben und daraus die Parameter N und ET berechnet. Die Grundannahme der Berechnung von N und ET besteht darin, dass in einem kurzen Zeitschritt entweder Niederschlag oder Evapotranspiration, jedoch nicht beides zugleich stattfindet. Aufgrund dieser Annahme wird jede Änderung der Summe aus ΔS und SW als ET oder N interpretiert (Gleichung 1).

Gleichung 1:

$$N = \Delta S + SW \text{ wenn } \Delta S + SW > 0 \text{ bzw.: } N = 0 \text{ wenn } \Delta S + SW \leq 0$$

$$ET = \Delta S + SW \text{ wenn } \Delta S + SW < 0 \text{ bzw.: } ET = 0 \text{ wenn } \Delta S + SW \geq 0$$

Dabei sollen eine Überschätzung sowie Unterschätzung von N und ET vermieden werden (Peters et al. 2016). Aufgrund der Geometrie des Lysimeters und der Dichte des Wassers ist der kumulierte Fluss in kg gleich dem kumulierten Fluss in mm (Peters et al. 2016).

Im Falle von fehlenden Lysimetergewichten (Speicheränderung ΔS) sowie Sickerwasserausflüssen (SW) und dadurch nicht möglich zu berechnenden Niederschlägen und/oder Evapotranspirationen wird der fehlende Niederschlagswert von einer ca. 100 m nördlich der ClimGrass-Anlage gelegenen Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) herangezogen. Die Evapotranspiration wird nach der Penman Monteith Gleichung (Allen et al. 2006) mit den dafür wesentlichen meteorologischen Parametern, gemessen an der ZAMG Wetterstation am Standort, berechnet.

Nach einem abschließenden Plausibilitätscheck erfolgt die Analyse der Wasserbilanzgrößen N , ET , SW und ΔS sowie die Berechnung der Wasserbilanz in unterschiedlichsten zeitlichen Auflösungen (Gleichung 2).

Gleichung 2:

$$N - ET - SW \pm \Delta S = 0$$

Ergebnisse und Diskussion

Der Vergleich der Wasserbilanzgrößen der unterschiedlich behandelten Varianten zeigt in den Vegetationsperioden 2016 und 2018 deutliche Unterschiede in den Evapotranspirations- und Sickerwassermengen. Die Niederschlagsmen-

gen hingegen fallen auf allen Parzellen erwartungsgemäß recht ähnlich aus. Aufgrund der geringeren nächtlichen Taubildungen an beheizten Parzellen, ergeben sich aber auch beim Niederschlag Unterschiede von bis zu 10%.

Die kumulative Evapotranspiration liegt in der Vegetationsperiode 2016 an der beheizten und begasten Variante (C2T2) bei 687 mm und demnach um knapp 90 mm höher als am Referenzlysimeter (C0T0). Die rein beheizte Variante (C0T2) liefert noch höhere Evapotranspirationsmengen von 734 mm, die unbeheizte, aber begaste Variante (C2T0) eine Evapotranspiration von nur 548 mm (Abbildung 3).

Dementsprechend zeigen die gemessenen Sickerwassermengen von April bis Oktober 2016 deutliche Unterschiede an den unterschiedlich behandelten Lysimetern. Die Variante C2T2 erzielt Mengen von 93 mm, ähnlich der C0T2-Variante mit 66 mm, das Referenzlysimeter C0T0 weist hingegen Sickerwassermengen von 209 mm auf, das C2T0 behandelte Lysimeter sogar über 300 mm.

Die Niederschläge liegen an der C2T2-Variante bei 792 mm, bei der C0T0 ergeben sich 821 mm. Die Differenz von rund 30 mm lässt sich durch die an der beheizten und begasten C2T2-Variante errechnete nächtliche Evaporation erklären: Gegenüber den unbeheizten Lysimetern erhöht die Beheizung die nächtliche Evaporation und vermindert damit den abgesetzten Niederschlag (Tau).

In Summe ergibt sich an der C2T2-Variante ein Überschuss des jährlichen Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration von 105 mm, während die für das Referenzlysimeter C0T0 berechnete Differenz 233 mm beträgt. Die C0T2-Variante liegt dagegen bei nur 57 mm, die höchsten Werte werden bei der begasten, aber unbeheizten C2T0-Variante errechnet mit 330 mm. Die gesamte Vegetationsperiode 2016 zeichnet sich demnach (wie auch jene in den Jahren 2015 und 2017) bei allen unterschiedlichen Behandlungsstufen durch einen deutlichen Überschuss des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration aus, was einer für das inneralpine Dauergrünland typischen positiven klimatischen Wasserbilanz entspricht (Abbildung 4).

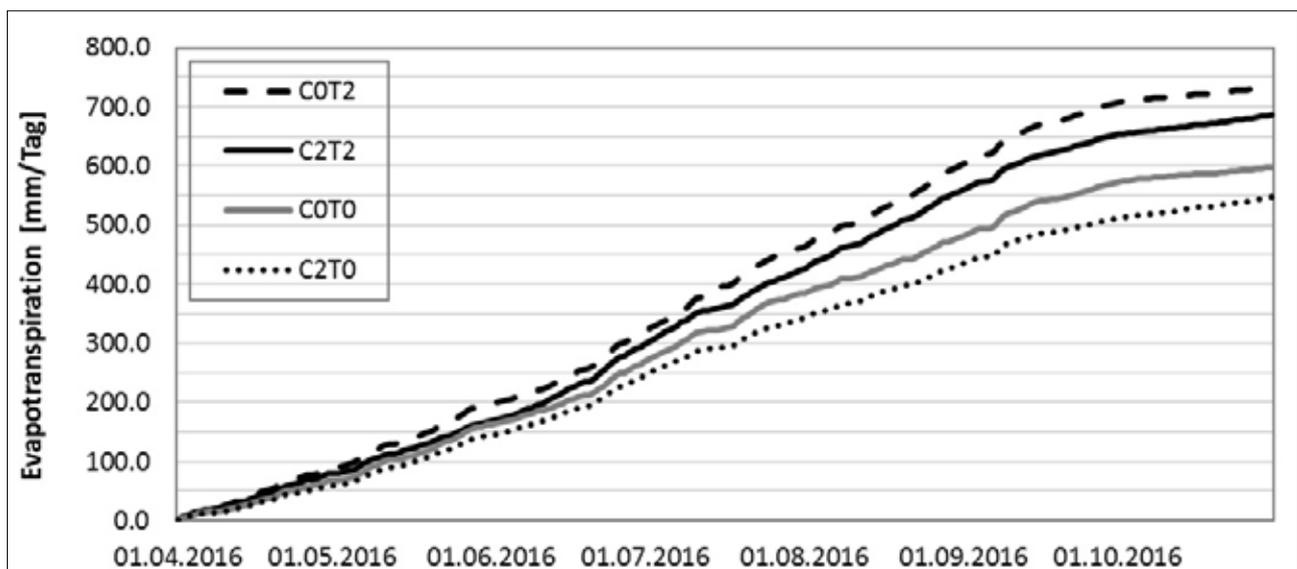


Abbildung 3: Kumulative (durchschnittliche) Evapotranspiration in der Vegetationsperiode 2016 an allen vier unterschiedlichen Behandlungsstufen (C2T2/C0T0/C0T2/C2T0).

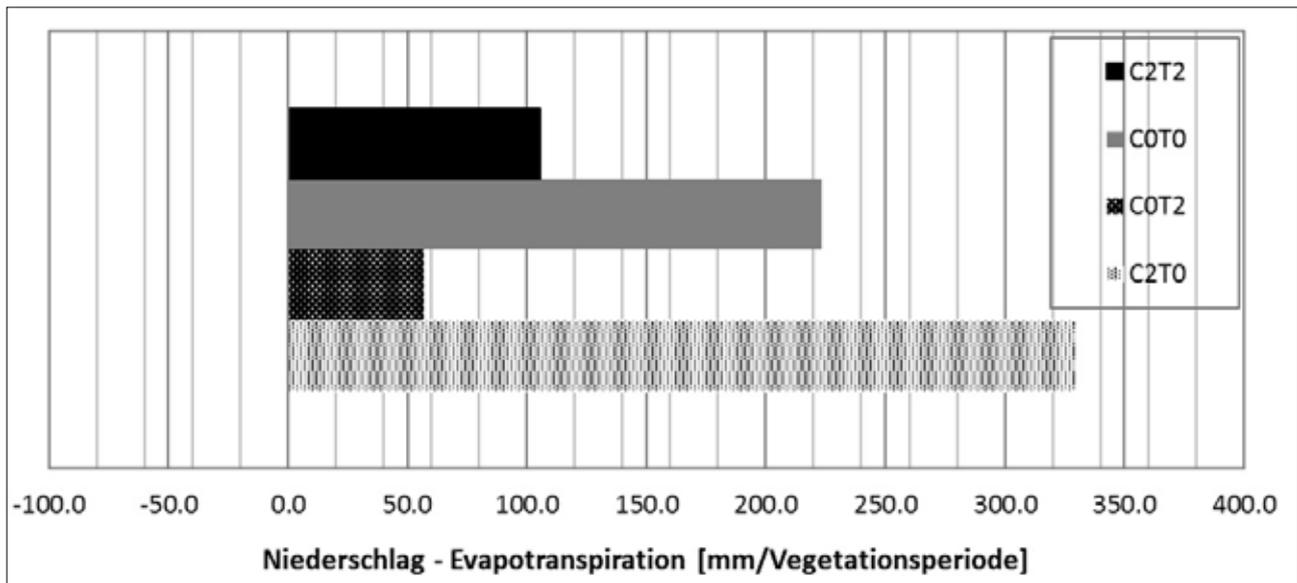


Abbildung 4: Absolute Differenz aus Niederschlag minus Evapotranspiration in der Vegetationsperiode 2016 an allen vier unterschiedlichen Behandlungsstufen (C2T2/C0T0/C0T2/C2T0).

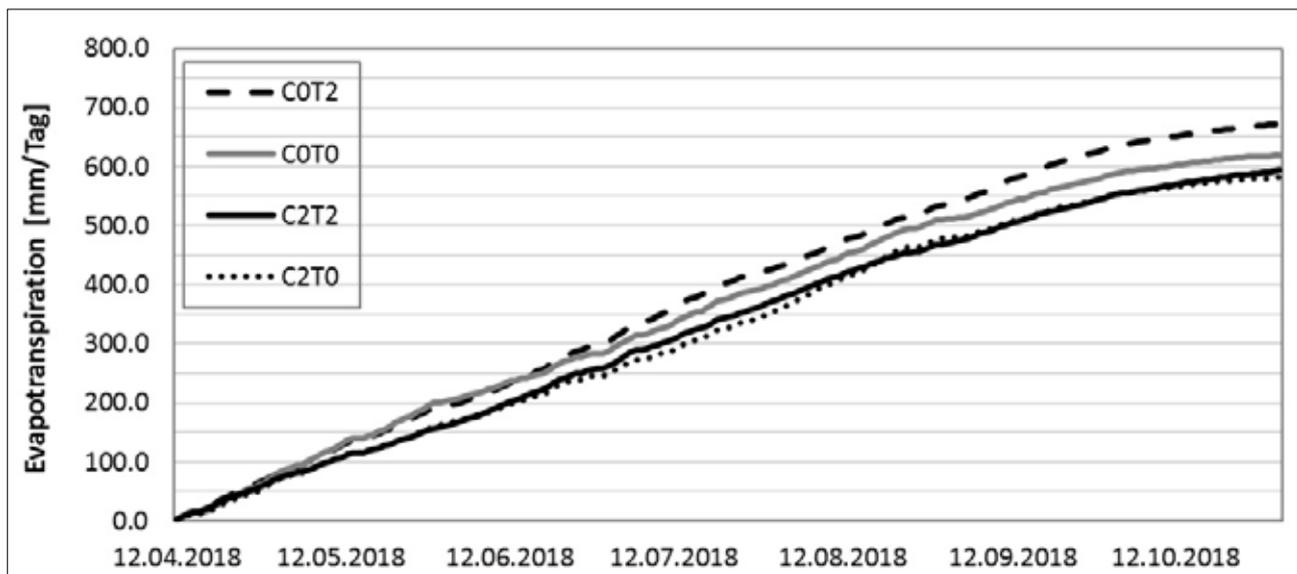


Abbildung 5: Kumulative (durchschnittliche) Evapotranspiration in der Vegetationsperiode 2018 an allen vier unterschiedlichen Behandlungsstufen (C2T2/C0T0/C0T2/C2T0).

Die für das Jahr 2016 auf den unterschiedlich behandelten Lysimetern erhaltenen Werte der Wasserbilanzgrößen verdeutlichen den Einfluss erhöhter Temperaturen und/oder erhöhter CO₂-Konzentrationen an einem alpinen Grünlandstandort unter den derzeit typischen Witterungsbedingungen. Die Temperaturerhöhung verstärkt die Evapotranspiration (bzw. auch nächtliche Evaporation) und vermindert entsprechend die Sickerwassermenge, während sich bei erhöhten CO₂-Konzentrationen die Evapotranspiration (bzw. auch nächtliche Evaporation) verringert und die Sickerwassermenge erhöht. Die Kombination beider Faktoren führt unter den 2016 gegebenen Bedingungen in Summe zu einer geringeren Wasserverfügbarkeit, das heißt der Effekt der Temperaturerhöhung scheint zu überwiegen.

Der Sommer 2018, geprägt durch seit dem Frühjahr langanhaltende Schönwetterperioden verbunden mit ungewöhn-

lich hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen speziell nördlich des Alpenhauptkammes, zeigt an der C2T2-Variante Evapotranspirationen von 594 mm, die C0T0-Variante liefert hingegen in dieser Periode etwas höhere Mengen von 620 mm (Abbildung 5).

Die von April bis Oktober 2018 gemessenen Sickerwassermengen sind aufgrund einer langanhaltenden Trockenperiode an allen Lysimetern gering. Die Sickerwassermengen betragen an der C2T2-Variante nur 1 mm, die C0T0-Variante liefert 9 mm. An der C0T2-Variante werden 2 mm, an der C2T0-Variante 16 mm ermittelt.

Für die Niederschläge werden am C2T2 behandelten Lysimeter 605 mm gemessen, wovon 85 mm allein an einem einzigen Tag im Oktober fielen. Die unbeheizte C0T0-Variante ergibt um 24 mm mehr, aufgrund des hier in den Sommernächten auftretenden abgesetzten Niederschlags in Form von Tau.

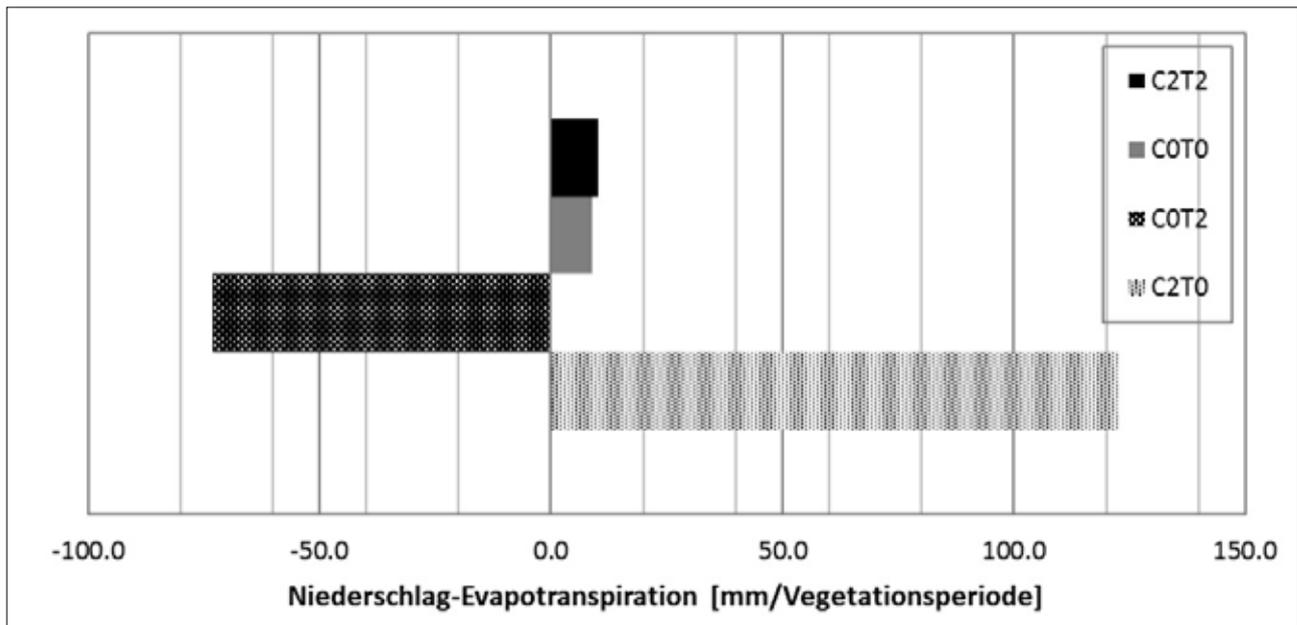


Abbildung 6: Absolute Differenz aus Niederschlag minus Evapotranspiration in der Vegetationsperiode 2018 an allen vier unterschiedlichen Behandlungsstufen (C2T2/C0T0/C0T2/C2T0).

Die Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration ist in dieser Periode äußerst knapp positiv und beträgt an der C2T2-Variante 10 mm sowie an der C0T0-Variante 9 mm. Seit Beginn der Messungen wird an der C0T2-Variante erstmals ein Defizit des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration beobachtet, sodass eine negative klimatische Wasserbilanz von -73 mm erzielt wird. Das Wasser verdunstete an dieser Parzelle also in weitaus größeren Mengen als Niederschlag fiel. Das C2T0 behandelte Lysimeter erhält dagegen einen Niederschlagsüberschuss (positive klimatische Wasserbilanz) von +123 mm (Abbildung 6).

Das Jahr 2018 unterscheidet sich von den durch das Jahr 2016 repräsentierten typischen Witterungsbedingungen an diesem alpinen Standort in zweierlei Weise. Zum einen weisen die Sommermonate von April bis Oktober 2018 eine um 2°C höhere Durchschnittstemperatur auf als im Referenzzeitraum 1981-2010. Zum anderen sind die Niederschlagsmengen 2018 ungewöhnlich gering; beispielsweise ergibt sich aus den hier beschriebenen Lysimeterdaten ein Unterschied von knapp 200 mm gegenüber den berechneten Lysimeterdaten von 2016 und gegenüber dem langjährigen Mittel (an nördlich des Alpenhauptkammes gelegenen Wetterstationen) von bis zu 300 mm. Die klimatische Wasserbilanz wird also sowohl durch eine infolge erhöhte Temperatur verstärkte Evapotranspiration als auch durch geringere Niederschläge verringert, sodass nahezu keine Sickerwasserbildung möglich ist.

Die zusätzliche Temperaturerhöhung durch Beheizung erhöht das Wasserdefizit derart, dass der Wasserbedarf der Pflanzen aus dem im Vorjahr gebildeten Bodenwasserspeicher gedeckt werden muss, was sich in ungewöhnlich niedrigen Matrixpotentialen und Bodenwassergehalten widerspiegelt. Bemerkenswerterweise ergibt sich aber bei der Kombination von Beheizung und CO₂-Begasung ein geringer Überschuss des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration, der etwa dem der Referenzparzelle entspricht. Unter den extremen Bedingungen des Jahres 2018

scheint also der Effekt der erhöhten CO₂-Konzentration jenen der Temperaturerhöhung etwa zu kompensieren. Auch der vergleichsweise hohe Niederschlagsüberschuss auf den begasten, aber unbeheizten Parzellen unterstützt dies und legt nahe, dass der verdunstungsmindernde Effekt erhöhter CO₂-Konzentrationen unter ungewöhnlich trockenen und warmen Witterungsbedingungen an Bedeutung gewinnt.

Schlussfolgerungen

Die Klimaerwärmung ist besonders in alpinen Gebieten aufgrund der vertikalen Höhengliederung, welche verschiedene Klimazonen umfasst, stark ausgeprägt. Das Jahr 2018 weist in den Monaten von April bis Oktober am Untersuchungsstandort eine um 2°C höhere Durchschnittstemperatur als im Referenzzeitraum 1981-2010 auf, zugleich werden nördlich des Alpenhauptkammes gegenüber dem langjährigen Durchschnitt bis zu mehr als 300 mm geringere Niederschlagsmengen beobachtet. Dementsprechend werden im Jahr 2018 nur Sickerwassermengen von wenigen Millimetern ermittelt, beispielsweise beim Referenzlysimeter 9 mm, beim beheizten und CO₂ begasten Lysimeter sogar nur 1 mm. Die Lysimetauswertungen zeigen sowohl durch den Vergleich des Jahres 2018 mit dem etwa typischen Witterungsbedingungen repräsentierenden Jahr 2016 als auch durch den Vergleich von beheizten und unbeheizten Varianten, dass erhöhte Temperaturen die Evapotranspiration auf alpinem Dauergrünland verstärken und damit zu einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz führen. Die Trockenheit im Jahr 2018 verstärkt diesen Effekt und führt zu ungewöhnlich niedrigen Matrixpotentialen und geringen Bodenwassergehalten.

Die Auswertung der Wasserbilanzen von Lysimetern, die mit CO₂ begast werden, zeigt, dass die negativen Effekte von Erwärmung und Trockenheit auf die klimatische Wasserbilanz durch die verdunstungsmindernde Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen zumindest teilweise kompensiert werden kann. Der Effekt erhöhter CO₂-Konzentrationen

auf die Wasserbilanz scheint besonders unter den extremen Witterungsbedingungen des Jahres 2018 ausgeprägt, ist jedoch weniger stark unter den für das derzeitige Klima eher typischen Verhältnissen des Jahres 2016.

Die möglichen negativen Auswirkungen der Klimaerwärmung in Bezug auf den Bodenwasserhaushalt werden durch die hier aufgezeigten Folgen der zuletzt beobachteten langanhaltenden Wetterlagen im Jahr 2018 mit extremen Trockenheitsperioden im Sommer veranschaulicht. Die Kombination von hohen Temperaturen und ausbleibenden Niederschlägen kann offenbar auch an grundsätzlich wasserreichen, alpinen Standorten zumindest temporär zu Defiziten in der klimatischen Wasserbilanz führen, deren Folgen für alpine Ökosysteme und die Landwirtschaft weiterer Untersuchung bedürfen.

Die aus dieser Untersuchung erhaltenen Informationen über Auswirkungen von veränderten Klimabedingungen auf Wasserbilanzgrößen alpiner Grünlandflächen sollen weiterführend verwendet werden, um auf wichtige Maßnahmen für das Pflanzenwachstum und damit der Bewirtschaftung schließen zu können. Insbesondere ist damit zu rechnen, dass sich als Folge der veränderten Klimabedingungen und der dadurch veränderten Wasserbilanz das Pflanzenwachstum und damit auch die Wasseraufnahme durch die Wurzeln sowie die bodenhydraulischen Eigenschaften ändern. Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen daher dazu bei, hydrologische Modelle zu entwickeln, welche klimainduzierte Veränderungen im Boden, in der Vegetation und Bodennutzung berücksichtigen.

Danksagungen

Die technische Anlage wurde mit Mitteln der HBLFA Raumberg-Gumpenstein bzw. des BMLFUW finanziert. Weiters danken wir METER Group AG (München, Deutschland) für die Errichtung der Lysimeterstation sowie bei der Mithilfe der Einrichtung der Infrarot- und Begasungsanlage. Das Dissertationsprojekt wurde von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften an Veronika Slawitsch verliehen.

Literatur

Allen R.G. et al. (2006) A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81(1–2), 1–22.

- APCC (2014) Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 pp.
- Groh J., Slawitsch V., Herndl M., Graf A., Vereecken H., Pütz T. (2018) Determining dew and hoar frost formation for a low mountain range and alpine grassland site by weighable lysimeter. *Journal of Hydrology*, 372–381.
- Herndl M., Pötsch E.M., Böhner A., Kandolf M. (2011) Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. *Gumpensteiner Lysimetertagung* 14, 119–126.
- IPCC (2018) Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: 1,5 °C globale Erwärmung. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, ProClim, Österreichisches Umweltbundesamt, Bonn/Bern/Wien, November 2018.
- Kimball B.A., Conley M.M., Wang S., Lin X., Luo C., Morgan J., Smith, D. (2008) Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology* 14 (2), 309–320.
- Miglietta F., Peressotti A., Vaccari F.P., Zaldei A., de Angelis P., Scarascia Mugnozza G. (2001) Free-air CO₂ enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. *New Phytologist* 150, 465–476.
- Parton W. J., Morgan J. A., Wang G., Del Grosso S. (2007) Projected ecosystem impact of the Prairie Heating and CO₂ Enrichment experiment. *New Phytologist* 174 (4), 823–834.
- 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 (6), 2309–2315.
- 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.
- Pötsch E.M., Herndl M., Schaumberger A. (2019) Produktivität von Grünland unter zukünftigen Klimabedingungen. 25. Österreichische Wintertagung, 23–25.
- Schaumberger A. (2011) Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, 264 pp.
- 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.

Auswirkungen von erhöhter Temperatur und CO₂-Konzentration im Dauergrünland auf den im Sickerwasser gelösten organischen Kohlenstoff und Stickstoff

Markus Herndl^{1*}, Veronika Slawitsch², Erich M. Pötsch¹, Martina Schink¹ und Matthias Kandolf¹

Zusammenfassung

Unter dem Aspekt des fortschreitenden Klimawandels bekommt die Untersuchung von Wasser- und Nährstoffflüssen im Dauergrünland einen neuen und wichtigen Stellenwert. Gelöster organischer Stickstoff (DON) und Kohlenstoff (DOC) stellen im Hinblick auf die Austragsmengen im Grünland den mobilen Pool dar. Um DOC und DON im Sickerwasser unter zukünftigen Klimabedingungen in einem Grünlandboden quantifizieren zu können, wurde an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein ein Dauergrünlandpflanzenbestand auf sechs Lysimetern unterschiedlicher Kombinationen von Temperatur (T) und CO₂-Konzentration (C) ausgesetzt. Ein Lysimeter repräsentiert die ambiente Situation (C0T0), zwei Lysimeter werden beheizt (+3 °C, C0T2), zwei begast (+300 ppm CO₂, C2T0) und ein Lysimeter unterliegt den prognostizierten Klimabedingungen (+3 °C und +300 ppm CO₂, C2T2). Im Laufe der Behandlungsjahre 2015/16 differenzierten sich die Sickerwassermengen zwischen den begasteten Lysimetern (C2T0), die in der Vegetationsperiode 2015 durchschnittlich 297 mm und den beheizten und begasteten (C0T2 und C2T2), die 48 und 43 mm aufwiesen. Die δ¹³C-Signaturen des DOC im Sickerwasser deuten darauf hin, dass in den letzten Jahren Kohlenstoff aus dem Oberboden nicht bis in die Tiefe von 1,4 m ausgewaschen wurde. Über beide Behandlungsjahre zeigte vor allem die Begasung (C2T0), aber auch in Kombination mit Temperaturerhöhung (C2T2), die höchsten DON-Konzentrationen. Sowohl DOC- als auch DON-Frachten korrelierten positiv mit der Sickerwassermenge, wodurch die Konzentrationen für die Beurteilung der Behandlungseffekte zweitrangig wurden. Die Behandlungen schlugen sich auf die Frachten im Wesentlichen durch die veränderte Sickerwassermenge nieder.

Schlagwörter: Klimawandel, Erderwärmung, Lysimeter, DON, DOC

Summary

Under the aspect of progressive climate change, the study of water and nutrient fluxes in permanent grassland takes on a new and important status. Dissolved organic nitrogen (DON) and carbon (DOC) represent the mobile pool with regard to the discharge rates in grassland. In order to quantify DOC and DON in the leachate under future climatic conditions in a grassland soil, a permanent grassland plant stand at six lysimeters have been exposed to different combinations of temperature (T) and CO₂ concentration (C). One lysimeter represents the ambient situation (C0T0), two lysimeters are heated (+3 °C, C0T2), two are fumigated (+300 ppm CO₂, C2T0) and one lysimeter is subject to the predicted climatic conditions (+3 °C and +300 ppm CO₂, C2T2). During the 2015/16 treatment years, the leachate volumes differed between the fumigated lysimeters (C2T0), which averaged 297 mm in the vegetation period 2015 and the heated and fumigated (C0T2 and C2T0), which had 48 and 43 mm. The δ¹³C signatures of the DOC in the leachate indicate that in recent years carbon from the topsoil has not been washed down to the depth of 1,4 m. Overall, the fumigation (C2T0) and the temperature increase (C2T2) showed the highest DON concentrations over both treatment years. Both DOC and DON loads correlated positively with the amount of leachate, which made the concentrations for the assessment of treatment effects secondary. The treatments mainly affected the loads due to the changed amount of leachate.

Keywords: climate change, global warming, lysimeter, DON, DOC

Einleitung

Kenntnis über Art und Menge von Nährstoffverlusten ist für eine effiziente und umweltverträgliche Grünlandbewirtschaftung unumgänglich. Da die meisten Grünlandökosysteme stickstofflimitiert sind, wirken sich Faktoren, die den Stickstoffverlust beeinflussen, meist auch auf das Potential Kohlenstoff (C) zu binden aus (Hunt et al. 1988, Huemreke

et al. 1990). Obwohl die jährlichen Stickstoffverluste (N) durch Auswaschung vergleichsweise nur einen kleinen Teil des gesamten N-Pools des Grünlandökosystems ausmachen, können anhaltende Auswaschungsverluste langfristig die Akkumulation von N und C in pflanzlicher Biomasse und organischer Bodensubstanz erheblich reduzieren (Vitousek et al. 1998, Rastetter et al. 2005). Gelöster organischer Stickstoff (DON) und Kohlenstoff (DOC) repräsentieren im

¹ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

² Universität Graz, NAWI Graz Geozentrum, Institut für Erdwissenschaften, Heinrichstraße 26, A-8010 GRAZ

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

Hinblick auf die Eintrags-, Umsatz- und Austragsmengen im Grünland meist nur einen geringen Teil des gesamten Stickstoff- und Kohlenstoffkreislaufs, stellen jedoch den mobilen und damit austragsgefährdeten Pool dar. Kindler et al. (2011) zeigen DOC-Austräge von 5,3 g m⁻² a⁻¹ unter Grünland und schlussfolgern daraus, dass der Austrag von gelöstem organischen Kohlenstoff insbesondere für die Kohlenstoffbilanzen landwirtschaftlich genutzter Böden relevant ist. Fu et al. (2017) dokumentieren, dass über den Sickerwasseraustrag rund 20% des gesamten Stickstoffverlustes in Form von DON in alpinen Grünland stattfindet, wobei bei intensivem Management mehr ausgewaschen wird als bei extensiver Bewirtschaftung.

Da sowohl DOC als auch DON eine hohe Sensitivität gegenüber den meteorologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen aufweisen, können sie als Indikator für Effekte anthropogener Eingriffe und klimatischer Veränderungen auf die Speicherung und den Austrag von Bodenwasser verwendet werden.

Ziel dieses Beitrages ist es, die Konzentrationen und Frachten von DOC und DON unter zukünftigen Klimabedingungen (erhöhte Temperatur und CO₂-Konzentration) in einem Grünlandboden zu quantifizieren.

Material und Methoden

Versuchsstandort

Das Versuchskonzept zur Simulation der Erderwärmung auf Lysimetern (Lysi-T-FACE) wurde auf einer Grünlandfläche an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein im Jahr 2011 er-

richtet. Der Versuch ist seit 2013 Teil der ClimGrass-Anlage wo prognostizierte Erhöhungen von Temperatur und CO₂-Konzentration sowie Trockenperioden auf insgesamt 54 Versuchspartellen in unterschiedlichen Abstufungen und Kombinationen simuliert werden (Pötsch et al. 2019). Die Versuchsfläche befindet sich in 700 m Seehöhe wobei die langjährige Jahresmitteltemperatur 8,2 °C und der durchschnittliche Jahresniederschlag 1056 mm beträgt. In den Untersuchungsjahren 2013, 2015 und 2016 waren die Unterschiede im Monatsniederschlag in der Vegetationsperiode im Juli und August am höchsten. Bei den durchschnittlichen Monatstemperaturen weist vor allem der September im Jahresvergleich die größten Unterschiede zwischen den Jahren auf (Abbildung 1).

Lysi-T-FACE

Im Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“ wird ein Dauergrünlandpflanzenbestand auf sechs Lysimetern seit dem Jahr 2014 einer Faktorkombination von einer erhöhten Temperaturstufe (+3 °C; C0T2) und einer Behandlungsstufe mit gesteigerten CO₂-Konzentrationen der Luft (+300 ppm; C2T0) ausgesetzt (Herndl et al. 2011, *Abbildung 2*). Das Lysimeter-System ergibt ein Lysimeterhexagon, welches aus Bodenmonolithen mit je 1 m² Oberfläche und 1,5 m Tiefe besteht. Die Sensorausstattung der wägbaren Lysimeter 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 (Meter Group AG) zur Bestimmung des Matrixpotentials. Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 50 Liter-Tank und eine Waage, die grammgenau

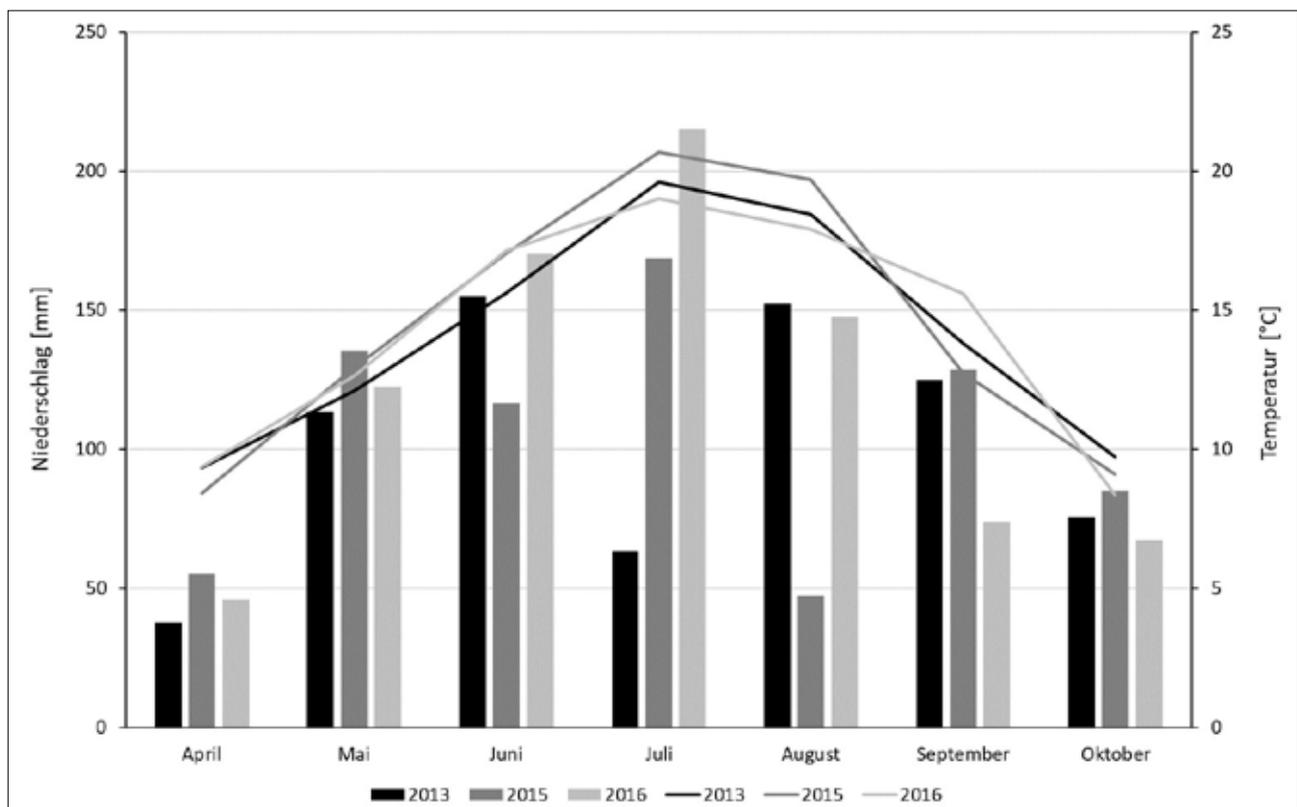


Abbildung 1: Mittlere Tagestemperatur und Niederschlagssumme für die Vegetationsperioden 2013, 2015, 2016 am Standort Raumberg-Gumpenstein.

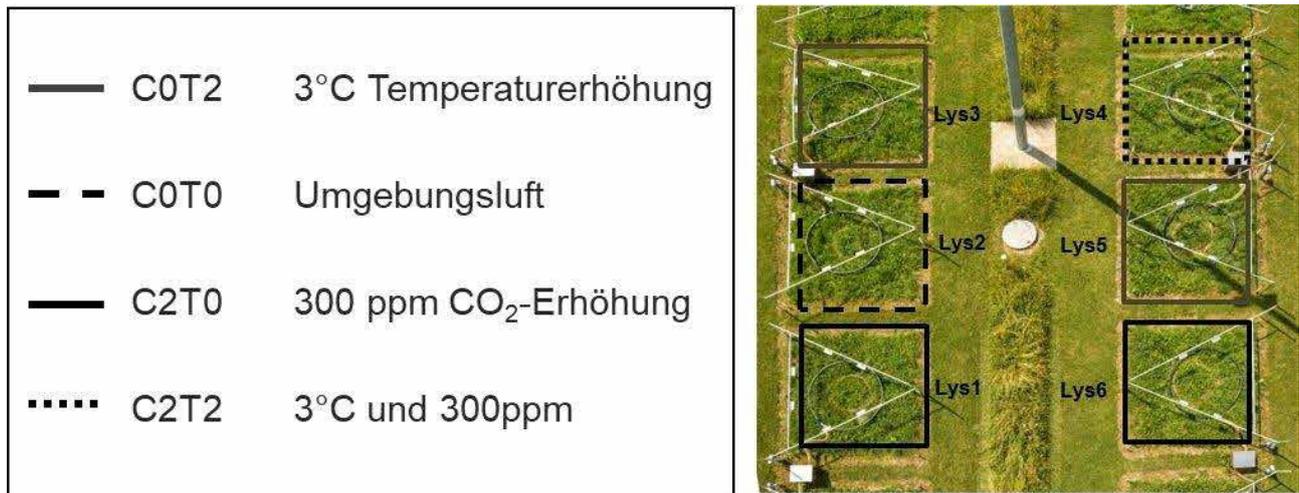


Abbildung 2: **Behandlungsvarianten im Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“** (Beschreibung siehe Herndl et al. 2011).

Tabelle 1: **Bodenkennwerte der Bodenmonolithen in den Lysimetern Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“.**

Lysimeter [Variante]	Tiefe [cm]	Horizont	ρ_b [g cm ⁻³]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	TOC [%]	TN [%]	TOC g m ⁻²	TN g m ⁻²
Lys1	0-30	A	1,40	38,3	54,2	7,5	2,43	0,21	10,21	0,88
C2T0	30-100	B	1,28	39,2	53,5	7,3	1,57	0,12	14,07	1,08
	>100	C	1,44	40,5	48,0	11,6	0,17	0,02	0,98	0,12
Lys2	0-30	A	1,41	72,2	23,1	4,7	1,93	0,16	8,16	0,68
C0T0	30-90	B	1,60	46,2	47,5	6,4	1,21	0,10	11,61	0,96
	>90	C	1,46	40,6	49,3	10,1	0,16	0,02	1,17	0,15
Lys3	0-25	A	1,35	42,6	47,6	9,8	2,01	0,17	6,78	0,57
C0T2	25-100	B	1,24	80,5	15,2	4,3	1,49	0,11	13,86	1,02
	>100	C	1,27	42,9	50,3	6,8	0,20	0,02	1,02	0,10
Lys4	0-25	A	1,38	38,9	51,1	10	2,11	0,18	7,28	0,62
C2T2	25-100	B	1,18	42,4	47,7	9,9	1,33	0,14	11,77	1,24
	>100	C	1,44	68,8	24,0	7,2	0,25	0,03	1,44	0,17
Lys5	0-25	A	1,38	42,8	50,1	7,2	1,87	0,15	6,45	0,51
C0T2	25-100	B	1,33	38,0	53,1	8,9	0,78	0,06	7,78	0,60
	>100	C	1,43	39,1	49,6	11,3	0,36	0,04	2,06	0,23
Lys6	0-25	A	1,39	72,4	23,7	3,9	1,57	0,13	5,46	0,45
C2T0	25-105	B	1,24	40,2	52,0	7,8	0,81	0,07	8,04	0,69
	>105	C	1,63	40,7	48,4	10,9	0,25	0,03	1,43	0,17

ρ_b Lagerungsdichte
 TOC Totaler organischer Kohlenstoff
 TN Gesamtstickstoff

den Sickerwasseraustrag erfassen kann. Der Einsatz einer bidirektionalen Pumpe sowie eines Saugkerzenrechs an der Unterseite des Lysimeters und Tensiometer im Freiland in gleicher Tiefe, ermöglichen feldidentische Wasserflüsse an der Unterkante der Bodensäule (von Unold 2008).

Bodenkennwerte

Die Bodenmonolithen in den Lysimetern wurden nahe der Versuchsfläche im Jahr 2009 entnommen und sind damit mit der sehr homogenen restlichen Versuchsfläche vergleichbar. Der Bodentyp ist eine Braunerde mit einem A-Horizont von 0-30 cm, einem B-Horizont bis ca. 100 cm und einem C-Horizont >100 cm. Die vorherrschende Bodenart ist über alle Horizonte sandiger Lehm mit einem TOC-Gehalt im Oberboden von durchschnittlich 2% und einer Lagerungsdichte von 1,39 g/cm³ (Tabelle 1). Die Nährstoffversorgung liegt bei allen Makronährstoffen im Bereich der Versorgungsstufe C (= ausreichend).

Bodenwasserhaushaltskennwerte

Die Auswertung der Bodenwasserhaushaltskennwerte Sickerwassermenge sowie reduzierte Gewichts Differenz (RGD = Niederschlag minus aktuelle Evapotranspiration) erfolgt über eine technisch als auch manuelle Datenkorrektur (Slawitsch et al. 2016) sowie mit der kürzlich entwickelten Filtermethode AWAT (Peters et al. 2016).

Laboranalyse und Auswertung

Die Sickerwasserproben wurden im Labor der HBLFA Raumberg-Gumpenstein und der Universität Wien analysiert. Mittels multi N/C 2100S-Analyzler wurde mit Hilfe thermokatalytischer Hochtemperaturoxidation der gesamte organische Kohlenstoff und der gesamte gebundene Stickstoff erfasst. DOC entspricht dem gesamten organischen Kohlenstoff nach Probenfiltration durch einen 0,45µm Filter. DON wird durch Subtraktion des NO₃-N, NH₄-N und NO₂-N vom gesamt gebundenen löslichen Stickstoff ermit-

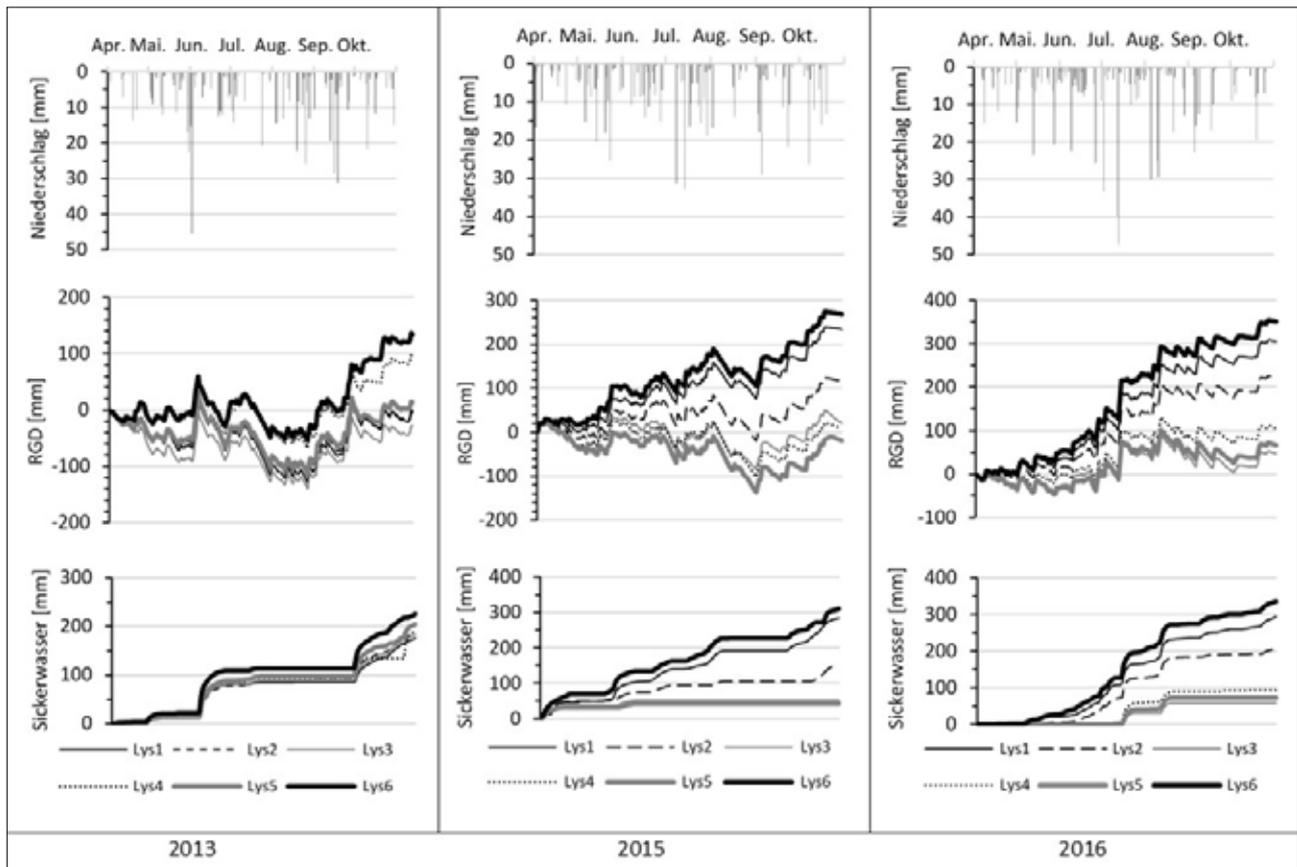


Abbildung 3: Niederschlag (Lys2), reduzierte Gewichts-differenz (RGD) und Sickerwasser ermittelt aus den Lysimetern über die Vegetationsperioden 2013, 2015 und 2016.

telt. Die Kohlenstoffisotopenzusammensetzung ($\delta^{13}\text{C}$) von DOC wurde nach Ansäuern mit HCl auf eine Konzentration von 50 mM zur Entfernung vom gelösten anorganischem Kohlenstoff quantifiziert. DOC wurde durch Online-Säure-Persulfat-Spaltung mittels einer an ein Isotopenverhältnis-Massenspektrometer gekoppelten LC-Isolink-Vorrichtung (Delta V Advantage, Thermo Fisher, Wien, Österreich) in CO₂ umgewandelt. Die natürliche Häufigkeit von ¹³C wurde wie folgt berechnet:

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰ vs. V-PDB}) = (R_{\text{Probe}}/R_{\text{Standard}} - 1) \times 1000$$

wobei R das Verhältnis von ¹³C / ¹²C ist. Die Standardabweichung wiederholter Messungen eines Laborstandards betrug <0,1 ‰ für ~ ¹³C.

Die statistische Analyse erfolgte mittels Allgemeinem linearen Modell im Statistikpaket SAS 9.4 (SAS Institute, Cary, NC, USA).

Ergebnisse und Diskussion

Sickerwassermengen

Die Sickerwassermengen aus den Lysimetern in der Vegetationsperiode 2013 (ohne Behandlungsvarianten) war im Mittel 193(18) mm (Abbildung 3). Der Verlauf der kumulativen Mengen war im Wesentlichen geprägt von starken Niederschlägen Anfang Juni und Mitte September. Im ersten Versuchsjahr 2015, differenzierten sich die Sickerwassermengen zwischen den begasten Lysimetern (C2T0) die in der Vegetationsperiode durchschnittlich 297(18) mm und

den beheizten und begasten (C0T2 und C2T0) die 46(6) mm aufwies. Die Kontrollvariante (C0T0) hatte im Vergleichszeitraum 215 mm. Ein ähnliches Bild zeigt sich im Versuchsjahr 2016 wobei hier die Evapotranspiration bei den temperaturerhöhten Varianten eine größere Rolle spielte als 2015 (siehe RGD).

DOC-Konzentration im Sickerwasser

Die DOC-Konzentrationen im Sickerwasser im Ausgangsjahr 2013 schwankten über alle Lysimeter (Varianten) im Mittel von 1,9(0,4) im Juli bis 29,0(51,6) mg l⁻¹ im August (Abbildung 4). Der Mittelwert über die Vegetationszeit war 10,8(18) mg l⁻¹ was mit Vergleichswerten im Unterboden aus der Zusammenstellung von Kindler et. al. 2011 vergleichsweise gut übereinstimmt. Die statistische Analyse der Konzentrationen in den Behandlungsjahren 2015/2016 ergab signifikante ($p < 0,0001$) Wechselwirkungen zwischen der Behandlung und dem Jahr. Darüber hinaus konnten die DOC-Konzentrationen in den Vegetationsperioden fachlich nur teilweise mit den Dynamiken in den Behandlungsvarianten in Beziehung gesetzt werden. Diese Tatsache veranlasste die Vermutung, dass der Kohlenstoff aus dem Oberboden möglicherweise nicht in das Sickerwasser ausgewaschen wurde. Zur Bestätigung dieser Hypothese wurden $\delta^{13}\text{C}$ -Signatur der DOC-Sickerwasserproben durchgeführt.

$\delta^{13}\text{C}$ DOC

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen im Sickerwasser über die Behandlungsjahre 2015/16 hinweg lagen zwischen -21,9 und -28,7‰ und

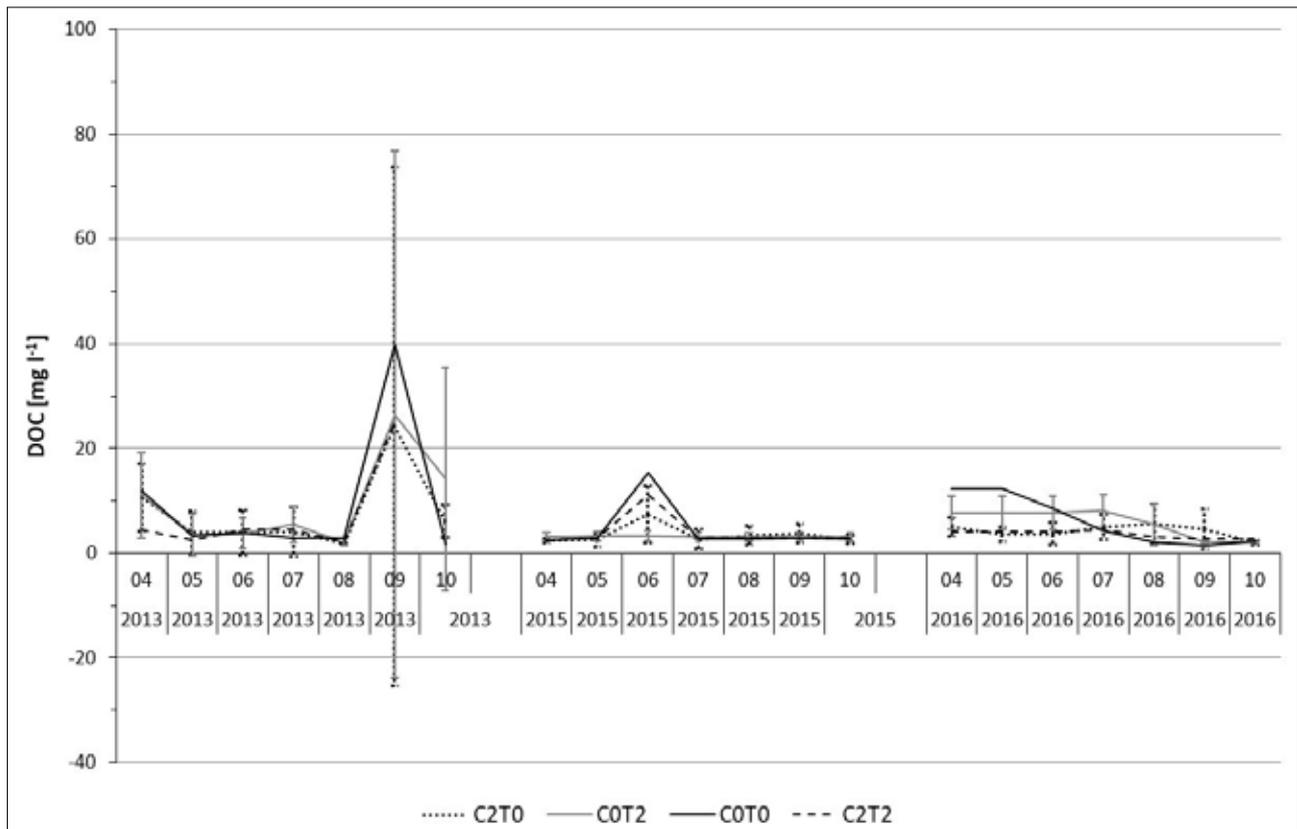


Abbildung 4: Mittlere DOC-Konzentrationen im Sickerwasser der Behandlungsvarianten in den Vegetationsperioden 2013, 2015 und 2016.

Tabelle 2: Varianzanalyse von δ¹³C im DOC des Sickerwassers über die Behandlungen und die Untersuchungsjahre 2016-2017.

Ursache	Quadratsumme	Freiheitsgrad	mittl. Abweichungsquadr.	F-Quotient	p-Wert
Behandlung	231,879	3	77,293	3,06	0,0492
Beprobungszeitpunkt	475,425	5	95,085	3,77	0,0129
Residuen	554,796	22	25,218		
Total (Korrigiert)	1353,15	30			

wurden durch Beprobungszeitpunkt (Saison- und Jahreseffekt, $p=0,013$) und Behandlung ($p=0,049$) beeinflusst (Tabelle 2). Der Behandlungseffekt folgte jedoch nicht dem CO₂-Effekt, da atmosphärisches CO₂ und pflanzlicher Kohlenstoff bei der C2T0-Variante um 12 ‰ isotopisch abgebaut wurde (Abbildung 5). Im Gegensatz dazu zeigten sich bei C0T0 und C0T2 die negativsten δ¹³C-Werte, die derzeit nicht erklärt werden können, möglicherweise aber in späteren Behandlungsjahren. Insgesamt deuten die Daten darauf hin, dass es in jüngster Zeit zu keiner Auswaschung von aus dem Oberboden stammenden Kohlenstoff gekommen zu sein scheint. Die Isotopensignatur von DOC ähnelt eher älteren C-Quellen für DOC, was auf Desorption/Auflösung von organischem C aus tieferen Bodenschichten hinweist. Die Isotopensignatur von DOC ähnelt eher älteren C-Quellen für DOC, höchstwahrscheinlich Desorption/Auflösung von organischem C im Boden in der Tiefe.

DON-Konzentration im Sickerwasser

Die durchschnittliche DON-Konzentration im Zeitraum April-November 2013 betrug über alle Lysimeter (Vari-

anten) hinweg 0,34(0,07) mg N l⁻¹ (Abbildung 6). Dijkstra et. al. 2007 fanden unter künstlich angelegtem Grünland in der Vegetationsperiode 0,57 mg l⁻¹ wohingegen Fu et al. 2017 eine mittlere jährliche DON-Konzentration im Sickerwasser je nach Management und Klima von 0,04 – 1,4 mg l⁻¹ fand. Über beide Behandlungsjahre zeigte vor allem die Begasung (C2T0) aber auch in Kombination mit Temperaturerhöhung (C2T0) signifikant ($p=0,05$) die höchsten DON-Konzentrationen (Tabelle 3). eCO₂ kann prinzipiell zu vermehrter Wurzelbildung führen, welche die unterirdische Kohlenstoffzuteilung inkl. Wurzelexudation und Wurzelumsatz stimuliert. Dieser erhöhte Wurzelinput kann im Oberboden (Hauptwurzelhorizont) einen „Rhizosphären-Primingeffekt“ auslösen, was bedeutet dass der labile C Input einen verstärkten Abbau von Humus induziert (z.B. Nie & Pendall 2016). Letzterer könnte eine Mobilisierung von gelösten organischen N Formen (Aminosäuren, Peptide) aber auch anorganischen N Formen (Ammonium, Nitrat) auslösen. Ob solche Prozesse vom Oberboden bis in die Sickerwasser langfristig durchschlagen kann bis dato nicht geklärt werden.

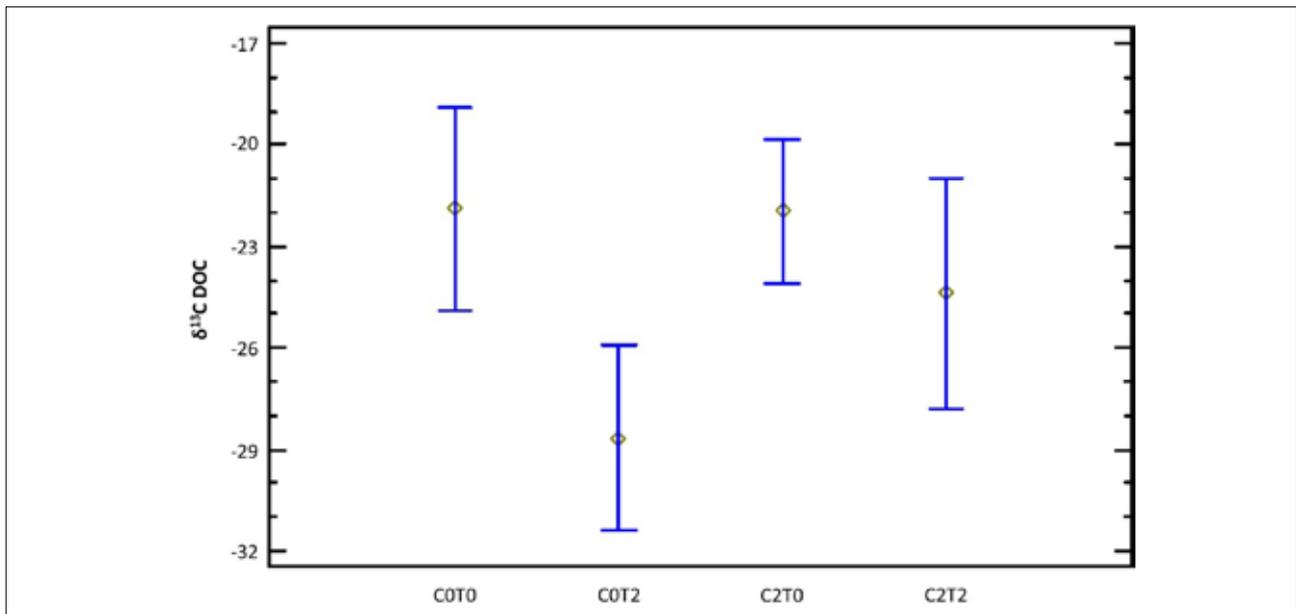


Abbildung 5: δ¹³C im DOC des Sickerwassers über die einzelnen Behandlungsvarianten in den Versuchsjahren 2016 und 2017.

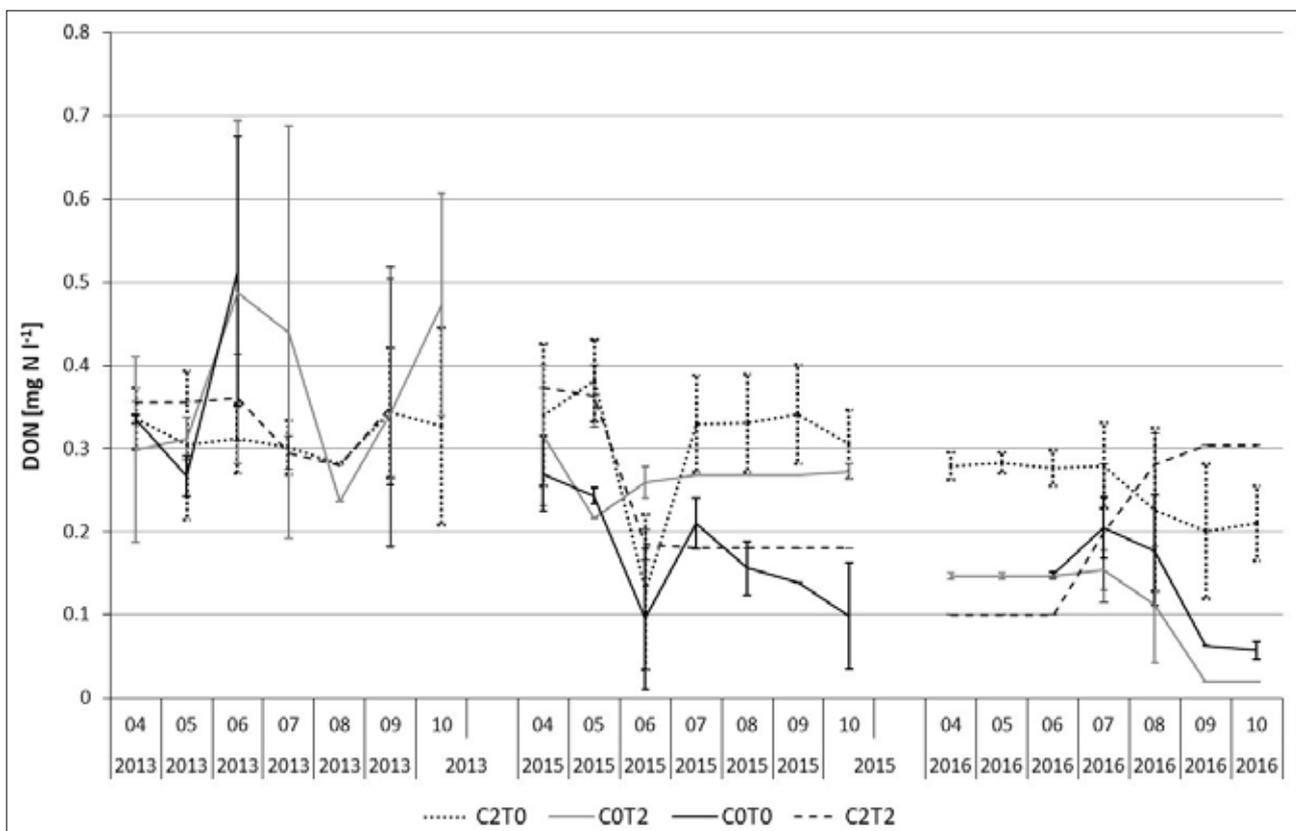


Abbildung 6: Mittlere DON-Konzentrationen im Sickerwasser der Behandlungsvarianten in den Vegetationsperioden 2013, 2015 und 2016.

DOC-DON-Frachten im Sickerwasser

Die DOC-Fracht im Sickerwasser in der Vegetationsperiode 2013 lag durchschnittlich bei 3,19(1,13) g m⁻², wobei sie im ganzen Versuchsjahr 3,96(0,1) g m⁻² betrug (Tabelle 4). Kindler et al. 2011 errechnete eine durchschnittliche DOC-Auswaschung aus dem Unterboden für Grünland im

Sommer von 2,6(1,0) bzw. 5,3(2,0) g m⁻² ganzjährig, was mit den Werten aus dieser Studie weitgehend übereinstimmt.

Die mittlere DON-Fracht in der Vegetationsperiode bzw. im ganzen Versuchsjahr 2013 betrug 0,05(<0,01) bzw. 0,09(<0,01) g N m⁻². Fu et al. 2017 fanden je nach Klima zwischen 0,03-0,07 g N m⁻² wobei über 2/3 im Zeitraum

Tabelle 3: Mittlere DON-Konzentrationen der Behandlungsvarianten in den Vegetationsperioden 2013, 2015 und 2016. Werte mit dem gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (p=0,05) voneinander.

Variante	Jahr													
	2015							2016						
	4	5	6	7	8	9	10	4	5	6	7	8	9	10
C0T0	0,27a	0,24a	0,10a	0,21b	0,16a	0,14a	0,10a	-	-	0,15ab	0,21ab	0,18b	0,06b	0,06b
C0T2	0,31ab	0,21a	0,26d	0,27c	0,27c	0,27c	0,27c	0,15a	0,15b	0,15ab	0,15a	0,11a	0,02a	0,02a
C2T0	0,34ab	0,38c	0,13b	0,33d	0,33d	0,34d	0,31d	0,28c	0,28c	0,28b	0,28b	0,23c	0,20c	0,21c
C2T2	0,37b	0,36b	0,18c	0,18a	0,18b	0,18b	0,18b	0,10b	0,10a	0,10a	0,20ab	0,28d	0,30d	0,30d

Tabelle 4: Sickerwassermengen (SW), mittlere DOC- und DON_N-Frachten der Behandlungsvarianten über das Sommer- (April-Oktober) und Winterhalbjahr (November-März).

Variante	2013/2014				2015/2016				2016/2017			
	Apr. - Okt.		Nov. - Mrz.		Apr. - Okt.		Nov. - Mrz.		Apr. - Okt.		Nov. - Mrz.	
	SW	DOC	SW	DOC	SW	DOC	SW	DOC	SW	DOC	SW	DOC
	[mm]	[g m^{-2}]	[mm]	[g m^{-2}]	[mm]	[g m^{-2}]	[mm]	[g m^{-2}]	[mm]	[g m^{-2}]	[mm]	[g m ⁻²]
C0T0	184	4,15	210	0,58	152	0,62	193	0,99	209	0,96	258	0,70
C0T2	194	3,01	223	0,47	48	0,14	184	0,63	66	0,47	210	0,60
C2T0	200	2,87	226	0,74	297	0,96	268	0,84	315	1,38	291	0,87
C2T2	192	3,24	206	0,51	43	0,16	182	0,60	93	0,37	244	0,78
		0,04		0,03		0,01		0,05		0,02		0,08

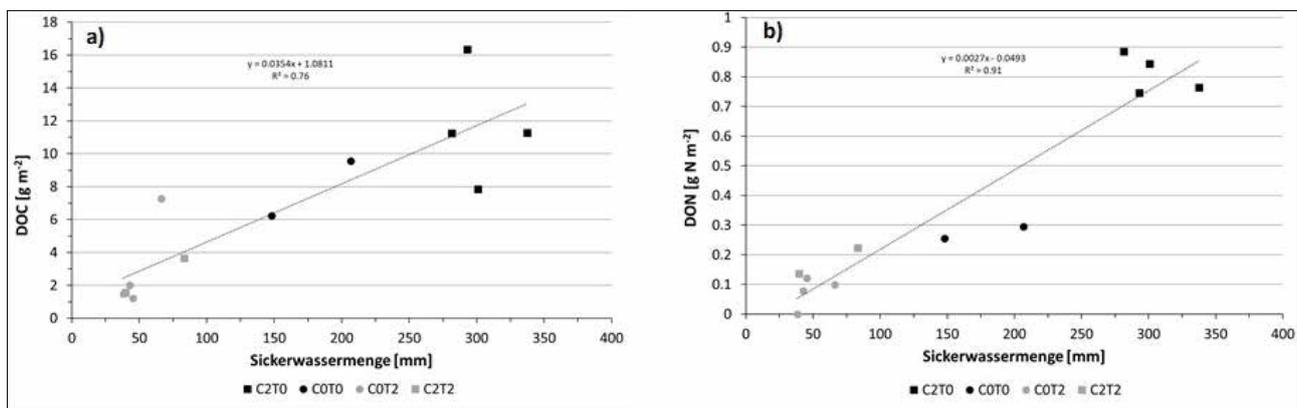


Abbildung 7: Beziehung zwischen Sickerwassermenge und a) DON-Frachten und b) DOC-Frachten der Behandlungsvarianten in den Vegetationsperioden 2013, 2015 und 2016.

September bis Februar ausgewaschen wurde, was sich auch in den Ergebnissen aus den Behandlungsjahren 2015/16 zeigt. In diesen Jahren korrelierten sowohl DOC- als auch DON-Frachten mit der Sickerwassermenge (Abbildung 7). Bei den DON-Frachten schlägt zwar auch der CO₂-Effekt durch, jedoch werden die Konzentrationen durch diese starke Beziehung zum Sickerwasser zweitrangig. Die Behandlungen schlagen sich auf die Frachten im Wesentlichen durch die hydrologischen Effekte nieder.

Stellt man abschließend den potentiell auswaschbaren organischen Kohlenstoff aus dem Boden (Tabelle 1) der DOC-Fracht gegenüber, zeigt sich im Falle der höchsten C-Facht 4,63 g m⁻² a⁻¹ (Tabelle 3), dass unabhängig von der Behandlung in gewissen Jahren bis zu 1/3 des organischen Kohlenstoffs aus dem Unterboden (B und C-Horizont) ausgewaschen werden können. Natürlich wird dieser C-Pool

langfristig vom Oberboden her aufgefüllt, die Dynamik ist aber langsam wie die Analyse der δ¹³C-Werte im Sickerwasser zeigt.

Bei der Betrachtung von Stickstoff im Boden kann die Auswaschung über DON rund 10% betragen wobei zum bodengebundenen-N in der Praxis auch noch die N-Düngung und der atmosphärische Eintrag hinzukommt.

Literatur

- Dijkstra F.A., West J.B., Hobbie S.E., Reich P.R., Trost J. (2007) Plant diversity, CO₂, and N influence inorganic and organic N leaching in grasslands. *Ecology* 88, 490-500.
- Fu J., Gasche R., Wang N., Lu H., Butterbach-Bahl K., Kiese R. (2017) Impacts of climate and management on water balance and nitrogen leaching from montane grassland soils of S-Germany. *Environmental Pollution* 229, 119-131

- 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 2011, LFZ Raumberg-Gumpenstein.
- Huenneke L.F., Hamburg S.P., Koide R., Mooney H.A., Vitousek P.M. (1990) Effects of soil resources on plant invasion and community structure in Californian serpentine grassland. *Ecology* 71, 478-491.
- Hunt H.W., Ingham E.R., Coleman D.C., Elliott E.T., Reid C.P.P. (1988) Nitrogen limitation of production and decomposition in prairie, mountain meadow, and pine forest. *Ecology* 69, 1009-1016.
- Kindler R., Siemens J., Kaiser K., Walmsley D.C., Bernhofer C., Buchmann N., Cellier W., Eugster P., Gleixner G., Grunwald T., Heim A., Ibrom A., Jones S.K., Jones M., Klumpp K., Kutsch W., Steenberg Larsen K., Lehuger S., Loubet B., McKenzie R., Moors E., Osborne B., Pilegaard K., Rebmann C., Saunders M., Schmidt M.W., Schrupp M., Seyfferth J., Skiba U., Soussana J.-F., Sutton M.A., Tefs C., Vowinckel B., Zeeman M.J., Kaupenjohann M. (2011) Dissolved Carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem Carbon balance. *Global Change Biology* 17, 1167-1185.
- Nie M., Pendall E. (2016) Do rhizosphere priming effects enhance plant nitrogen uptake under elevated CO₂? *Agriculture Ecosystems Environment* 224, 50-55.
- 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.
- Pötsch E.M., Herndl M., Schaumberger A. (2019) Produktivität von Grünland unter zukünftigen Klimabedingungen. 25. Österreichische Wintertagung, 23-25.
- 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.

Tau - ein bedeutsamer Bestandteil des Wasserhaushaltes eines Grünlandstandortes - Eine lysimeterbasierte Studie

Max Brunke¹, Jannis Groh^{1,2}, Jan Vanderborght¹, Harry Vereecken¹ und Thomas Pütz^{1*}

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Lysimeterstudie mit 9 Lysimetern mit 1m² Oberfläche und 1,5 m Tiefe befüllt auf einem Grünlandstandort des Mittelgebirges Eifel wurden während der Jahre 2015 – 2017 Untersuchungen zur Taubildung durchgeführt. Hierbei wurden sechs Lysimeter am Originalstandort Rollesbroich (511m über N.N. / 11 °C / 754 mm) untersucht und drei Lysimeter zum 30 km entfernten Standort Selhausen (104 m über N.N. / 8 °C / 1127 mm) versetzt. Ein jährlicher Vergleich der Häufigkeit der Tauereignisse pro Jahr zeigte nur geringfügige Unterschiede zwischen den Lysimetern der Standorte Selhausen und Rollesbroich. Die Tauverteilung lässt an beiden Standorten eine deutliche Saisonalität erkennen. In den Jahren 2015 bis 2017 waren die Tausummen in den Wintermonaten am Höchsten und in den Sommermonaten am Niedrigsten. Die jährlichen Tau-Monatssummen betragen in Rollesbroich 7,2 mm (2015), 6,8 mm (2016) und 13,4 mm (2017). In Selhausen lagen diese bei 5,6 mm (2015), 5,5 mm (2016) und 6,4 mm (2017). Ursächlich dafür war auch die Dauer der Tauereignisse, die in Rollesbroich durchschnittlich länger dauerten als in Selhausen.

Schlagwörter: Lysimeter, Tau, Taubildungsrate, Saisonalität

Summary

Within the framework of a lysimeter study with 9 lysimeters with a surface area of 1m² and a depth of 1.5 m filled on a grassland site of the Eifel low mountain range, dew formation investigations were carried out during the years 2015 - 2017. Six lysimeters were investigated at the original site Rollesbroich (511m above sea level / 11 °C / 754 mm) and three lysimeters were transferred to the site Selhausen 30 km away (104 m above sea level / 8 °C / 1127 mm). An annual comparison of the frequency of dew events per year showed only minor differences between the lysimeters of the sites Selhausen and Rollesbroich. The distribution of dew showed a clear seasonality at both sites. In the years 2015 to 2017 the dew sums were highest in the winter months and lowest in the summer months. The annual dew monthly amounts in Rollesbroich were 7.2 mm (2015), 6.8 mm (2016) and 13.4 mm (2017). In Selhausen these were 5.6 mm (2015), 5.5 mm (2016) and 6.4 mm (2017). This was also due to the duration of the dew events, which lasted on average longer in Rollesbroich than in Selhausen.

Keywords: Lysimeter, dew, dewfall rate, seasonality

Tau – Definition und ökologische Relevanz

Die Klimaveränderung verlangt nach einer vollständigen Betrachtung der Süßwasserressourcen zur Sicherung des Trinkwassers und auch der landwirtschaftlichen Erträge (Tomaszkiewicz et al. 2016, XU et al. 2015). Besonders in semi-ariden und ariden Regionen besitzt Tau eine hohe ökologische Relevanz und die jährlichen Tauerträge haben dort einen erheblichen Anteil am Jahresniederschlag (Hanisch et al. 2015). In den Wasserbilanzen der nördlich-humiden Klimazonen wird Tau aufgrund seines geringen Gesamtanteils, sowie seiner aufwändigen Quantifizierbarkeit oft vernachlässigt (Jacobs et al. 2006). Aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen aber welche hohe ökologische Relevanz Tauwasser auch in humiden Regionen besitzt (Groh et al. 2018, Tomaszkiwicz et al. 2016, XIAO et al. 2009).

Lauer & Bendix (2006) definieren Hydrometeore, wie Regen, Schnee, Hagel, Graupel etc. als „fallenden Niederschlag“ und grenzen von Niederschlagstypen ab, die sich erst an Oberflächen bilden. Abgesetzte Niederschläge

entstehen, wenn die Oberflächentemperatur von z.B. Boden, Blätter etc. soweit absinkt, dass der Sättigungsdampfdruck an der Grenzfläche zur Atmosphäre überschritten wird. Niederschlag, der als Kondensat auf Oberflächen gebildet wird, wird je nach Oberflächentemperatur als Tau ($T_{\text{surface}} > 0^{\circ}\text{C}$) oder als Raureif ($T_{\text{surface}} < 0^{\circ}\text{C}$) bezeichnet (Agam & Berliner 2006, Groh et al. 2018, Meissner et al. 2007). Die Klassifizierung von Niederschlägen in „fallende“ oder „abgesetzte“ Formen ist nicht ausreichend, da diese Niederschlagstypen, wie Nebel, Wasserdampfadsorption im Boden nicht berücksichtigt.

Das Tauwasser hat eine Bedeutung als „Puffer“, um den Wasserverlust durch Evapotranspiration zu verringern (Tomaszkiewicz et al. 2015). Besonders der Wasserverlust durch die stomatären Pflanzenöffnungen (Transpiration) wird durch die Verfügbarkeit von Interzeptionswasser reguliert (Gerlein-Safdi et al. 2018, Larsson 1981). Dieses wird der Pflanze unter anderem durch die Taubildung zur Verfügung gestellt, die eine regelrechte „transpiration sup-

¹ Institut für Bio- und Geowissenschaften IBG-3: Agrosphäre, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 JÜLICH

² Programmbereich 1 „Landschaftsprozesse“, Arbeitsgruppe „Hydropedologie“, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.

* Ansprechpartner: Dr. Thomas Pütz, t.puetz@fz-juelich.de

pression“ bewirken kann und die Photosyntheseleistung verbessert (Gerlein-Safdi et al. 2018, Tomaszkiwicz et al. 2015). Ben-Asher et al. (2010) sprechen von einer Erhöhung der Wassernutzungseffizienz von Pflanzen im Mittelmeer-raum unter Taueinfluss.

Diese pflanzenökologischen Tauereffekte bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen bewirken einen ertragssteigernden Effekt (Agam & Berliner 2006). Dem gegenüber steht das erhöhte Risiko von Pflanzenkrankheiten und die geringere Effizienz applizierter Pflanzenschutzmittel, die durch eine erhöhte Blattfeuchtedauer begünstigt werden (Groh et al. 2018, Abi Saab et al. 2017, Tomaszkiwicz et al. 2015).

Die Taubildung hängt stark von dem Temperaturabfall natürlicher Oberflächen ab. Die Luft- wie auch Oberflächentemperatur ist im Tagesverlauf meist zwischen Sonnenuntergang und -aufgang minimal.

Die Dauer von Tauereignissen wird durch die Blattfeuchtedauer erfasst und kann schon mit geringem Aufwand gemessen werden (Agam & Berliner 2006), z.B. mit elektrischen Impedanzgittern (Pedro & Gillespie 1981) oder durch kommerzielle elektrische Blattfeuchtesensoren (Scherer & van Bruggen 1993).

Tauwassermengen

Die Erfassung der Tauwassermenge ist im Vergleich zur Messung der Dauer komplizierter und meistens mit einem höheren Aufwand verbunden. Eine der ersten Methoden wurde von Duvdevani (1947) vorgestellt, der die optische Auswertung seiner Duvdevani-Taumesser und deren Vergleich mit Referenzfotografien vorschlug. Auf einem speziell behandelten Holzblock kann Tau kondensieren und lässt sich in seinem Erscheinungsbild nach Intensität klassifizieren sowie von Regenereignissen unterscheiden. Da die Taubildung allerdings stark von den physikalischen Eigenschaften der Holzblöcke abhängt, ist nur der relative Vergleich von Standorten möglich, nicht jedoch die Erfassung absoluter Tauwassermengen (Agam & Berliner 2006). Kidron (1999) stellte eine optimierte Methode zur Bestimmung der Tauwassermengen vor, welche die Verwendung hoch adsorptiver synthetischer Textilien beinhaltet. Diese ermöglichen, positioniert zwischen zwei Glasplatten, die Aufnahme hoher Mengen an Tauwasser. Auf diese Weise können absolute Tauwassermengen pro Nacht, aber keine Informationen über Dauer und Taubildungsraten bestimmt werden (Agam & Berliner 2006).

Wägbare Präzisionslysimeter können die Tauwassermengen kontinuierlich erfassen, haben eine höhere Messgenauigkeit und ermitteln zusätzlich die Dauer von Tauereignissen. Durch die hohe Präzision und die zeitliche Auflösung der Wägedaten können vermeintlich kleine Bestandteile der Wasserbilanz – wie Tau – erfasst werden (Groh et al. 2018). Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Verwendung eines Bodenmonoliths samt Vegetation, der realitätsnahe Feldbe-

dingungen garantiert. Auf diese Weise können auch weitere Formen des atmosphärischen Wassereintrags berücksichtigt werden, wie etwa die direkte Adsorption von Wasserdampf im Oberboden (Agam & Berliner 2006, Groh et al. 2018).

Die Erfassung von Tauereignissen mit Lysimetern ist die wohl aufwändigste und kostenintensivste Form der Taumesung. Des Weiteren sind Lysimeter wegen ihrer sehr hohen Messgenauigkeit von 10 g (entspricht ca. 0,01 mm) anfällig für Störfaktoren wie etwa Wind, sodass eine zeitintensive Datenprozessierung obligatorisch ist (Pütz et al. 2016).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Quantifizierung von Tauereignissen und –mengen für die Jahre 2015 bis 2017 durchgeführt. Unsere Arbeitshypothesen lauteten:

- Unter den wärmeren und trockeneren Klimabedingungen in Selhausen sind geringere Taumengen zu erwarten, als unter den kühleren und feuchteren Klimabedingungen in Rollesbroich.
- Die Unterschiede in Häufigkeit und Menge der Tauereignisse der beiden Standorte sind charakteristisch und lassen sich in allen drei untersuchten Jahren erkennen.

Material und Methoden

Im Rahmen von TERENO wurde das SOILCan-Lysimeternetzwerk mit insgesamt 126 Lysimetern an 13 verschiedenen Standorten aufgebaut. Die SOILCan-Lysimeter wurden innerhalb und außerhalb der einzelnen TERENO-Observatorien nach dem „Space-for-time“-Prinzip versetzt, welches eine Imitierung des prognostizierten Klimawandels ermöglichte (Pütz 2013, Pütz et al. 2016, Pütz et al. 2011). Die runden, monolithisch befüllten Lysimeter mit 1,0 m² Oberfläche und einer Tiefe von 1,5 m sind um einen zentralen Wartungsschacht angeordnet. Die Lysimetersohle ist mit einem Saugkerzenrechen ausgestattet, der das Sickerwasser des Lysimeters in einem separaten Tank im Wartungsschacht sammelt. Sowohl die Wassertanks als auch die Lysimeter sind mit Präzisionswaagen ausgestattet. Die Lysimetergewichte wurden mit 10 g Genauigkeit und die Tankgewichte mit 1 g Genauigkeit erfasst (Pütz et al. 2016). An den Lysimeterstandorten wurde eine Wetterstation WXT510 [Vaisala Oyj, Helsinki, Finnland] betrieben, die Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit erfasste. Selhausen (50°52'9.89"N / 6°27'1.66"E) und Rollesbroich (50°37'20.45"N / 6°18'21.70"E) liegen ca. 30 km voneinander entfernt im TERENO-Observatorium Eifel/Niederrheinische Bucht. *Tabelle 1* fasst weitere relevante Standortfaktoren der Untersuchungsgebiete zusammen. In Rollesbroich befinden sich sechs Lysimeter (RO_11 bis RO_16) und in Selhausen drei versetzte Lysimeter (SE_021, SE_25, SE_26) des Standortes Rollesbroich. Alle Lysimeter wurden entsprechend dem Grünlandstandort Rollesbroich bewirtschaftet. Die Bodenmonolithen sind als pseudovergleyte Braunerden („stagnic cambisol“ nach FAO) klassifiziert und zeichnen sich durch einen geringmächtigen, humosen Oberboden aus (Ah 0 – 9 cm; Pütz et al. 2016).

Tabelle 1: Standortfaktoren Selhausen und Rollesbroich.

Untersuchungsstandort	Anzahl der Lysimeter	Durchschnittswerte Lufttemperatur / Niederschlag			Höhe über N.N.
		2015	2016	2017	
Selhausen (SE)	3	11 °C / 754 mm	11 °C / 705 mm	11 °C / 643 mm	104 m
Rollesbroich (RO)	6	8 °C / 1127 mm	8 °C / 1070 mm	8 °C / 1091mm	511 m

Die vereinfachte Wasserbilanz für die Lysimeter lautet:

$$\Delta W = P - ET - S - SC \quad \text{Gl.1}$$

- ΔW = Änderung des Wasserspeichers
- P = Gesamtniederschlag
- ET = Evapotranspiration
- S = Sickerwasser
- SC = Saugkerzenproben

Für die Zeit vom 01.01.2015 bis 31.12.2017 wurden Messungen von neun Lysimetern in Selhausen und Rollesbroich zur Quantifizierung von Tauereignissen verwendet. Nach abgeschlossener Qualifizierung der Gewichtsdaten erfolgte eine Rauschreduzierung mit dem AWAT-Filter (Peters et al. 2014). Abschließend wurden die minutlichen Niederschlags- und Evapotranspirationsmengen nach Gleichung 2 bestimmt (Schrader et al. 2013):

$$\Delta W = \Delta W_{\text{lys}} + \Delta W_{\text{drain}}$$

$$\Delta P = \begin{cases} \Delta W, & \Delta W > 0 \\ 0, & \Delta W \leq 0 \end{cases} \quad \text{Gl.2}$$

$$\Delta ET = \begin{cases} 0, & \Delta W \geq 0 \\ \Delta W, & \Delta W < 0 \end{cases}$$

Aus der Gewichtsänderung des Lysimeters (ΔW_{lys}) und des Lysimetertanks (ΔW_{drain}) ergibt sich abzüglich S und SC die Änderung des Wasserspeichers (ΔW) durch Niederschlagsereignisse (ΔP für $\Delta W > 0$), bzw. durch Evapotranspiration (ΔET für $\Delta W < 0$). Um zwischen Tau und weiteren Niederschlagstypen zu differenzieren, wurden

Referenzniederschlagsmessungen berücksichtigt (Nolz et al. 2014). Es wurde angenommen, dass Niederschlag und Evapotranspiration innerhalb 1-minütiger Zeitintervalle nicht gleichzeitig auftraten bzw. man ist mit dem Set-up nur in der Lage die Nettoänderung zu bestimmen. Eine nächtliche bzw. morgendliche Zunahme des Lysimetergewichtes wurde als Tauereignis angesprochen, wenn andere Ursachen der Gewichtszunahme ausgeschlossen werden konnten. Ombrometer (OTT Pluvio, OTT HydroMet GmbH, Kempten) an den Standorten Selhausen und Rollesbroich wurden als Referenzen verwendet. Es wurden nur die Niederschlagsdaten der Lysimeter für die Zeit zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang als Tauwasser klassifiziert, wenn während eines Tauereignisses $P_{\text{rain}} = 0$ mm war. Für die Bestimmung des täglichen Sonnenauf- und Sonnenunterganges wurden die Funktionen „sunrise“ und „crepscule“ des R-Softwarepakets „mappro“ V0.9-4 verwendet (Bivand & Lewin-Koch 2018). Die Saugkerzenwasserproben mit einem Anteil an der Gesamtwasserbilanz von $< 0.5\%$ waren vernachlässigbar. Monteith & Unsworth (2013) geben $0,07 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ als physikalisches Maximum der nächtlichen Taubildung an. Stundenwerte, die die maximale Taubildungsrate in klaren Nächten von $0,07 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ überschritten, wurden auf diesen Wert reduziert. Potentielle Tauerträge wurden mit der FAO56 Penman-Monteith-Gleichung nach Allen et al. (1998) kalkuliert.

Um die Intensität von Tauereignissen unabhängig von der Nachtlänge bewerten zu können, wurden durchschnittliche nächtliche Taubildungsraten ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) bestimmt. Um den Einfluss der Nebelbildung auf die Gesamtmenge abgesetzter Niederschläge bewerten zu können und mögliche

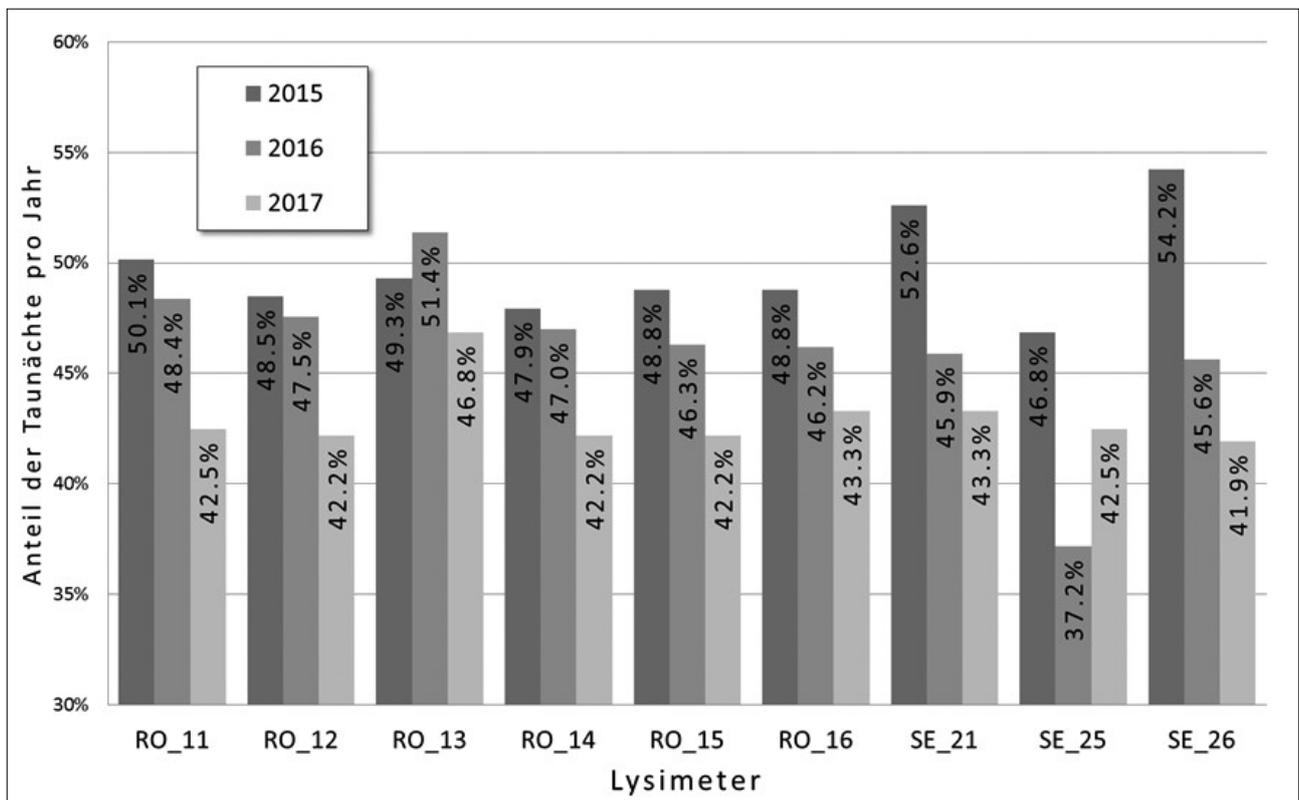


Abbildung 1: Häufigkeit von Tauereignissen in Rollesbroich und Selhausen in den Jahren 2015 bis 2017 (% - Anteil der Nächte eines Jahres).

standortsspezifische Unterschiede festzustellen, wurden an beiden Standorten Bilder der Überwachungskameras ausgewertet. Die Klassifizierung der Kamerabilder orientiert sich an der Studie von Pavlic et al. (2013). Nebelereignisse mit einer deutlich erkennbaren Sichtweitenreduzierung (< 100 m) wurden als nässender Nebel eingeordnet. Anhand der Kamerabilder wurde außerdem die Anzahl der Schneetage in Selhausen bestimmt. In Rollesbroich wurden zu diesem Zweck Daten einer nahegelegenen, privaten Wetterstation genutzt (Holz 2018).

Darstellung der Ergebnisse

Häufigkeit von Tauereignissen

Der Anteil der Taunächte am gesamten Jahr bildet eine Maßzahl zur Bewertung der jährlichen Tauhäufigkeit (*Abbildung 1*).

Ein jährlicher Vergleich der Häufigkeit von Tauereignissen pro Jahr, zeigt das es nur geringfügige Unterschiede zwischen den Lysimetern der Standorte Selhausen und Rollesbroich gibt. Im Jahr 2015 wurden die größten Tauhäufigkeiten mit 54 % und 53 % bei Lysimeter SE_26 bzw. SE_21 gemessen. Die Lysimeter in Rollesbroich erreichten alle Tauhäufigkeiten von 48 - 50 %. Im Jahr 2016 war kein Unterschied zwischen den Lysimetern in Selhausen und Rollesbroich erkennbar. Die Lysimeter in Rollesbroich RO_11 bis RO_16 erreichten im Schnitt 48 %. Lediglich RO_13

erreichte mit 51 % einen höheren Wert. Die Tauhäufigkeiten für SE_21 und SE_26 lagen im selben Jahr bei 46 %. SE_25 erreichte mit 37 % die niedrigste Tauhäufigkeit, die während des gesamten Beobachtungszeitraums für eines der neun Lysimeter ermittelt wurde. Im Jahr 2017 lagen die Tauhäufigkeiten der Lysimeter in Selhausen und Rollesbroich erneut nah beieinander. Die Tauhäufigkeiten der Lysimeter in Selhausen und in Rollesbroich lagen durchschnittlich bei 43 %. Nur Lysimeter RO_13 wies mit 47 % eine höhere Tauhäufigkeit auf, als die fünf angrenzenden Lysimeter.

Die Tauhäufigkeiten zeigten über die Jahre 2015, 2016 und 2017 für fast alle neun Lysimeter einen deutlichen Rückgang. Lediglich die Lysimeter RO_13, sowie SE_25 wichen im Jahr 2016 von diesem Trend ab. SE_26 erreichte die höchste Differenz der Tauhäufigkeiten von 2015 bis 2017.

Tauwassermengen

Anhand der Tauwassermengen, die aus den Lysimetergewichten berechnet und durch die nach Penman-Monteith modellierten potentiellen Tauwassermengen ergänzt wurden, wurden monatliche und jährliche Bilanzen erstellt. Die Lysimeter in Selhausen wiesen mit ca. 2 % einen geringen Anteil fehlender Daten auf. Dieser Anteil war mit durchschnittlich 7 % in Rollesbroich etwas höher. Der höhere Anteil fehlender Lysimeterdaten in Rollesbroich ist bedingt durch die längeren Phasen mit einer geschlossenen Schneedecke, die zur Brückenbildung am Lysimeterrand

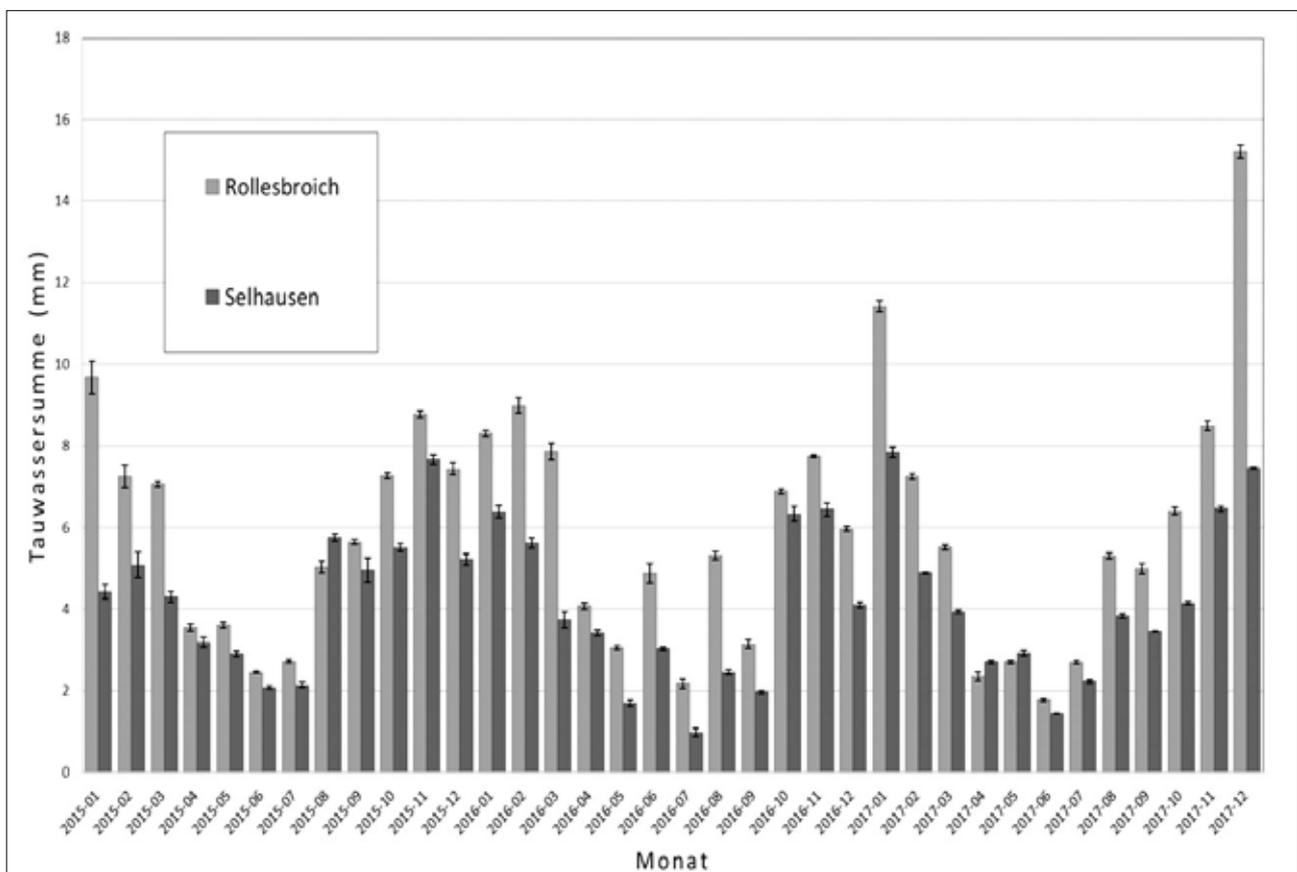


Abbildung 2: Verteilung der monatlichen Tauwassermengen in Selhausen und Rollesbroich über die Jahre 2015 bis 2017 inklusive Standardabweichung der Lysimeter.

Tabelle 2: Die monatlichen Tauwassermengen und der Gesamtniederschlag für die Standorte Rollesbroich und Selhausen.

Zeit	Niederschlag		Tau		SE Standardabweichung (mm)	RO	SE	RO
	SE in mm	RO in mm	SE Durchschnitt (mm)	RO				
Jan. 15	84.92	128.17	4.42	9.67	0.70	1.56	5.20	7.55
Feb. 15	42.62	60.86	5.08	7.25	1.24	1.06	11.91	11.91
Mrz. 15	49.16	93.56	4.30	7.06	0.47	0.25	8.74	7.55
Apr. 15	43.10	63.05	3.18	3.55	0.49	0.36	7.38	5.62
Mai 15	34.98	48.45	2.90	3.60	0.26	0.29	8.28	7.43
Jun. 15	38.92	81.02	2.08	2.45	0.16	0.10	5.33	3.02
Jul. 15	82.09	102.03	2.13	2.72	0.22	0.13	2.60	2.66
Aug. 15	109.05	89.34	5.74	5.04	0.34	0.57	5.26	5.64
Sep. 15	92.71	140.24	4.96	5.64	1.20	0.22	5.35	4.02
Okt. 15	42.91	39.76	5.50	7.28	0.37	0.29	12.82	18.30
Nov. 15	78.02	174.66	7.66	8.76	0.45	0.35	9.82	5.02
Dez. 15	55.08	105.88	5.22	7.44	0.53	0.55	9.48	7.03
Σ Jahr 2015	753.57	1127.02	53.16	70.45	6.45	5.74	7.05	6.25
Jan. 16	69.64	113.91	6.39	8.31	0.59	0.33	9.17	7.30
Feb. 16	90.08	143.25	5.61	8.99	0.49	0.77	6.23	6.27
Mrz. 16	42.60	103,77	3.73	7.85	0.78	0.79	8.77	7.57
Apr. 16	45.87	73.99	3.41	4.08	0.29	0.30	7.43	5.51
Mai 16	59.30	103.14	1.69	3.06	0.29	0.20	2.86	2.96
Jun 16	138.09	192.36	3.03	4.88	0.16	0.96	2.19	2.54
Jul. 16	27.23	50.22	0.98	2.17	0.42	0.44	3.59	4.33
Aug. 16	37.84	58.48	2.45	5.31	0.22	0.37	6.46	9.08
Sep. 16	40.27	19.07	1.97	3.14	0.15	0.39	4.89	16.48
Okt. 16	73.94	81.81	6.33	6.88	0.72	0.21	8.57	8.41
Nov. 16	63.18	97.61	6.43	7.74	0.65	0.12	10.19	7.93
Dez. 16	16.59	32.55	4.10	5.96	0.28	0.23	24.72	18.32
Σ Jahr 2016	704.62	1070.16	46.13	68.38	5.04	5.10	6.55	6.39
Jan. 17	35.06	37.23	7.83	11.42	0.51	0.55	22.34	30.67
Feb. 17	37.86	94.12	4.89	7.26	0.05	0.27	12.91	7.71
Mrz. 17	65.67	119.51	3.93	5.51	0.15	0.23	5.99	4.61
Apr. 17	27.73	33.78	2.71	2.34	0.14	0.42	9.76	6.93
Mai 17	57.78	66.94	2.93	2.70	0.26	0.16	5.07	4.04
Jun. 17	30.06	50.74	1.43	1.78	0.07	0.16	4.76	3.51
Jul. 17	84.03	156.71	2.22	2.70	0.16	0.14	2.65	1.72
Aug. 17	68.40	106.39	3.83	5.30	0.17	0.25	5.60	4.99
Sep. 17	65.39	102.32	3.44	4.99	0.06	0.51	5.27	4.87
Okt. 17	36.81	101.17	4.15	6.40	0.15	0.36	11.26	6.33
Nov. 17	65.89	118.86	6.46	8.49	0.24	0.44	9.80	7.14
Dez. 17	68.38	103.66	7.45	15.21	0.07	0.65	10.89	14.67
Σ Jahr 2017	643.04	1091,42	51.27	74.10	2.05	4.16	7.97	6.79

und somit zu Fehlmessungen führte. Während des gesamten Untersuchungszeitraums bildete sich in Selhausen an 16 Tagen eine geschlossene Schneedecke, in Rollesbroich hingegen an 88 Tagen.

Die Verteilung der Monatssummen lässt an beiden Standorten eine deutliche Saisonalität erkennen (*Abbildung 2*). In den Jahren 2015 bis 2017 nahmen die Tausummen in den Wintermonaten maximale Werte an und waren in den Sommermonaten am niedrigsten. Somit liegen die jährlichen Spannweiten der Monatssummen in Rollesbroich bei 7,2 mm (2015), 6,8 mm (2016) und 13,4 mm (2017). In Selhausen lagen diese bei 5,6 mm (2015), 5,5 mm (2016) und 6,4 mm (2017, *Tabelle 2*).

In nahezu allen Monaten überstiegen die Taumengen in Rollesbroich jene in Selhausen. Vor allem in den Wintermonaten lagen die Werte in Rollesbroich deutlich über den Werten in Selhausen (*Abbildung 2* vgl. Jan. 2015; vgl. Dez. 2017). In den Sommermonaten hingegen, wenn sich an beiden Standorten wenig Tau bildete, fiel die Differenz geringer aus (*Abbildung 2* vgl. Jun. 2015; vgl. Jun. 2017).

Die höchste Differenz wurde im Dezember 2017 beobachtet (7,5 mm in Selhausen, 15,2 mm in Rollesbroich). August 2015, April 2017 und Mai 2017 waren die einzigen Monate im Untersuchungszeitraum, in denen sich in Selhausen geringfügig mehr Tau (ca. 1 mm) bildete als in Rollesbroich.

Erhöhte Standardabweichungen traten vorwiegend in Monaten mit mittlerer bis hoher Taubildung auf. Im Jahr 2015 traten sowohl in Selhausen, als auch in Rollesbroich die höchsten Standardabweichungen auf. Auch beim Vergleich der jährlichen Tausummen der Jahre 2015, 2016 und 2017 wird ein Standortunterschied in der Taubildung deutlich. Es bildeten sich in allen Jahren ca. 20 mm mehr Tau in Rollesbroich als in Selhausen.

Werden die Tausummen an beiden Standorten in Relation zum Gesamtniederschlag gesetzt, ergibt sich ein gänzlich anderes Verteilungsmuster. In allen Jahren entsprach die Tauwassermenge in Selhausen einem größeren Anteil am Gesamtniederschlag als in Rollesbroich. Besonders in den Wintermonaten bildete sich in Rollesbroich zwar mehr Tauwasser als in Selhausen, jedoch fiel dort in jenen Mo-

naten auch deutlich mehr Niederschlag. Die Taumengen in Selhausen hatten in mehreren Monaten einen höheren Anteil am Gesamtniederschlag, als in Rollesbroich. Mit 24,7 % war der Tauanteil im Dezember 2016 in Selhausen am höchsten, während er mit 30,7 % im Januar 2017 in Rollesbroich am höchsten war. In den Sommermonaten lag der Tauanteil an beiden Standorten häufig unter 5 %.

Zusammenhang von Tauwassermenge und Taudauer

Zur Prüfung inwiefern der Ertrag der Tauereignisse von ihrer Länge abhängt, wurden beide Faktoren miteinander verglichen. Auf Grund der teils hohen Variabilität einzelner Tauereignisse, wurden monatliche Tausummen sowie die durchschnittliche Taudauer eines jeden Monats berechnet und gegeneinander geplottet. Auf Basis einer einfachen linearen Regression wurden zudem für beide Standorte Regressionsgeraden bestimmt (Abbildung 3). Hierbei wurden sowohl die Taumenge, als auch die Taudauer ausschließlich anhand der Lysimeterdaten bestimmt. Für die Bilanzierung der Tauwassermengen hingegen wurden zusätzlich die nach Penman-Monteith modellierten potentiellen Tauerträge berücksichtigt. Die in *Abbildung 3* dargestellten monatlichen Taumengen sind daher niedriger als in *Tabelle 1* angegeben.

Die Wertepaare zeigen für Rollesbroich ebenso wie für Selhausen einen positiven Zusammenhang. Dieser wird am besten durch eine lineare Regression vom Typ $f(x) = mx + b$ abgebildet, mit x als durchschnittliche Taudauer (h) und $f(x)$ als monatliche Taumenge (mm). Mit $m = 0.99$ und $b = -0.27$ erreichte Rollesbroich ein Bestimmtheitsmaß von 0.53, während Selhausen mit $m = 0.7$ und $b = 0.82$ ein Bestimmtheitsmaß von 0.47 erreichte. Da die Streuung der Wertepaare besonders mit höherer Taudauer und -menge zunimmt und dennoch keine erheblichen Abweichungen auftreten, können die Bestimmtheitsmaße als akzeptabel angenommen werden.

Die Tauereignisse in Rollesbroich dauerten durchschnittlich länger als in Selhausen. So wurde in Rollesbroich in mehreren Monaten eine durchschnittliche Taudauer von über acht Stunden erreicht. Eine besonders große Taumenge bildete sich im Dezember 2017 in Rollesbroich. Die durchschnittliche Dauer eines einzelnen Tauereignisses lag in diesem Monat bei ca. acht Stunden. In Monaten mit wenig Tau war die durchschnittliche Dauer einzelner Tauereignisse hingegen deutlich niedriger und lag teilweise unter drei Stunden. Die durchschnittliche nächtliche Taumenge lag in Selhausen bei 0,10 mm und in Rollesbroich bei 0,12 mm. Die beobachteten nächtlichen Taumengen lagen sowohl in Selhausen als auch in Rollesbroich stets unter 0.5 mm.

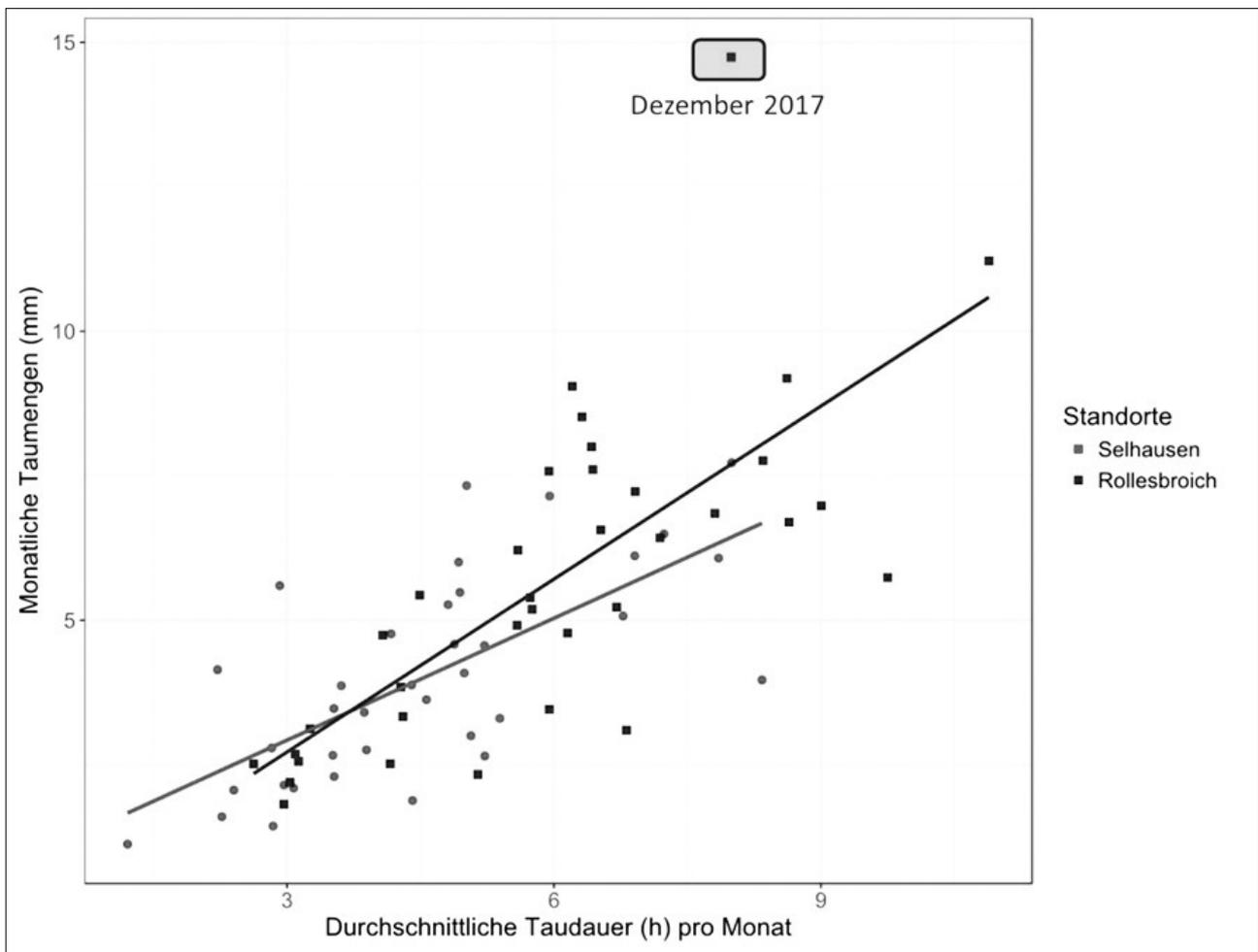


Abbildung 3: Korrelation von monatlichen Taumengen (mm) und durchschnittlicher monatlicher Taudauer (h) basierend auf Lysimeterdaten von 2015 bis 2017.

Einfluss durch Nebel

Die Auswertung der Kamerabilder hinsichtlich der Nebelbildung beschränkte sich wegen Defekten und Wartungsarbeiten an den Kameras auf die Jahre 2016 und 2017. Im Jahr 2016 wurden in Rollesbroich 39 Nebelereignisse gezählt. Davon wurden 18 mit einer Sichtweite von unter 100 m als dichter Nebel klassifiziert. In Selhausen wurden in demselben Jahr 23 Nebelereignisse gezählt, wovon 11 als dichter Nebel klassifiziert wurden. Im Jahr 2017 wurde in Rollesbroich 26 Mal Nebel beobachtet und dieser 8 Mal als dicht klassifiziert. In Selhausen wurden im selben Jahr 20 Nebelereignisse gezählt, davon sechs mit dichtem Nebel. Nebel trat an beiden Standorten ganzjährig auf und ließ keine deutliche Saisonalität erkennen.

In Selhausen lieferte die Überwachungskamera über den gesamten Zeitraum zuverlässige Daten. Es gilt folglich in jedem Fall als sicher, dass sich in Selhausen 2016 wie auch 2017 weniger Nebel bildete als in Rollesbroich.

Diskussion

Über die beobachteten Jahre 2015 bis 2017 lag der durchschnittliche Anteil der Taunächte am gesamten Jahr (Tauhäufigkeit) zwischen 43 % und 51 % in Selhausen sowie zwischen 43 % und 49 % in Rollesbroich. Die jährlichen Tauwassermengen entsprachen einem Anteil am Jahresniederschlag von 7,1 % (2015), 6,6 % (2016) und 8,0 % (2017) in Selhausen sowie 6,3 %, 6,4 % und 6,8 % in Rollesbroich. Damit zeigen die Ergebnisse der Lysimeterstudie eine hohe Übereinstimmung mit vergleichbaren, aktuellen Studien. Heusinger & Weber (2015) untersuchten die Taubildung auf begrünten Dachflächen im städtischen wie auch ländlichen Raum in Niedersachsen. Der durchschnittliche Anteil des Taus am Jahresniederschlag lag bei 4,1 % auf begrünten Dachflächen im städtischen Raum und bei 9,3 % im ländlichen Raum. Xiao et al. (2009) quantifizierten Tau ebenfalls anhand von Lysimetern auf der Station Falkenberg. Auf Grasland-Lysimetern wurden in den Jahren 2004 und 2005 Taumengen von durchschnittlich 31,8 mm und 29,9 mm beobachtet, entsprechend einem Anteil von 6,9 % (2004) und 5,7 % (2005) am gesamten Jahresniederschlag. 43-53 % der Nächte wurden pro Jahr als Taunächte klassifiziert. Auch Jacobs et al. (2006) und Groh et al. (2018) beobachteten vergleichbare durchschnittliche Anteile der Tauwassermengen am gesamten Jahresniederschlag.

Zeitliche und räumliche Variabilität von Tau

Die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen der beiden Standorte können als Erklärungsansatz für die beobachtete Differenz der Taumenge herangezogen werden. Mit durchschnittlich 400 mm weniger Niederschlag und 3°C höheren Temperaturen im Jahr waren die Lysimeter in Selhausen wärmeren und trockeneren Klimabedingungen ausgesetzt als in Rollesbroich (vgl. *Tabelle 1*).

Neben der Abkühlung von Boden- und Pflanzenoberflächen entscheidet die Menge an verfügbarem atmosphärischem Wasserdampf darüber, ob der spezifische Taupunkt erreicht wird und wie viel Tau sich bilden kann. Die beiden Standorte liegen relativ nah beieinander und erfahren daher (ca.) die gleichen Großwetterlagen und Luftmassenbewegungen. Allerdings führt die Höhenlage von Rollesbroich (511 m

über N.N.) dazu, dass Luftmassen stärker angehoben werden, als in Selhausen (104 m über N.N.) und intensivere orographische Niederschläge in Erscheinung treten.

Im Gegensatz zur Tauwassermenge zeigte die Tauhäufigkeit keine signifikanten Unterschiede der beiden Standorte. Ausgehend von ca. gleich vielen Tauereignissen in Selhausen und Rollesbroich haben sich diese in ihrer Intensität (= Taubildungsrate in $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) und/oder Dauer unterschieden. Sowohl die durchschnittliche Dauer als auch die Bildungsrate der Tauereignisse war in Rollesbroich höher als in Selhausen. Für die Dauer der Studie (2015-2017) lag die durchschnittliche Taubildungsrate in Rollesbroich bei ca. $0.015 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ und in Selhausen bei ca. $0.011 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Tauereignisse dauerten in Selhausen durchschnittlich ca. 4,5 Stunden und in Rollesbroich ca. sechs Stunden.

Wenn die höhere Luftfeuchtigkeit in Rollesbroich die primäre Ursache für höhere Tauwassermengen war, ist allerdings unklar, warum der Taupunkt nicht häufiger erreicht wurde und mehr Tauereignisse beobachtet werden konnten. Ein systematischer Fehler der Referenzniederschlagsmesser könnte ursächlich dafür sein. Da die Auflösung der verwendeten Niederschlagskippswaagen auf 0,1 mm beschränkt war, könnten sehr kleine Niederschlagsmengen von unter 0,1 mm fälschlicherweise als Tau interpretiert worden sein. Dieser Fall ist jedoch als unwahrscheinlich anzunehmen, da Referenzniederschläge über die gesamte Nacht summiert wurden und alle Ergebnisse eine hohe Übereinstimmung mit vergleichbaren Studien zeigten. Vielmehr lassen die Tauhäufigkeiten in Selhausen und Rollesbroich vermuten, dass der klimatische Standortunterschied die Intensität sowie die Dauer von Tauereignissen beeinflusste, jedoch – aufgrund der zu geringen Entfernung der Standorte – nicht stark genug war, um Unterschiede in der Tauhäufigkeit zu bewirken.

Sowohl in Selhausen als auch in Rollesbroich zeigten die Tauhäufigkeiten einen abnehmenden Trend von 2015 bis 2017, der von insgesamt sieben Lysimetern abgebildet wurde. Zwei Lysimeter (RO_13 und SE_25) zeigten Abweichungen im Jahr 2015. Im Jahr 2016 bildete sich an beiden Standorten weniger Tau als im vorangegangenen Jahr, was den besagten Trend zunächst bestätigt (vgl. *Tabelle 3*). Während die Tauhäufigkeiten im Jahr 2017 weiter abfielen, stieg die Tauwassermenge jedoch an beiden Standorten wieder an.

Der gewählte Untersuchungszeitraum von drei Jahren ist nicht ausreichend lang, um Aussagen über den Einfluss möglicher Klimaveränderungen zuzulassen.

Nebel

Wenngleich die Datenverfügbarkeit der Überwachungskameras in Selhausen und Rollesbroich eingeschränkt war, konnte gezeigt werden, dass sich in Rollesbroich häufiger Nebel bildete als in Selhausen. Dies erscheint vor dem Hintergrund der bereits angesprochenen unterschiedlichen Klimabedingungen der Standorte als plausibel, da die Bildung von Nebel ähnliche Bildungskriterien voraussetzt wie Tau (hohe Luftfeuchtigkeit, Erreichen des Taupunkts).

Mehrere Studien verweisen auf den positiven Einfluss von Nebel auf die Gesamtmenge abgesetzter Niederschläge durch die Deposition von Nebeltropfen an der Pflanzen- bzw. Bodenoberfläche (Meissner et al. 2007, Price & Clark 2014). Dieser Effekt konnte sowohl in Rollesbroich als

auch in Selhausen beobachtet werden, da Nebelereignisse meist mit vergleichsweise hohen beobachteten Taumengen einhergingen. An beiden Standorten wurden erhöhte Tauwassermengen (meist über 0.1 mm) an Tagen mit Nebel beobachtet. Wenngleich keine genaue Quantifizierung des Wassereintrags durch Nebeltropfen möglich war, könnten häufigere Nebelereignisse in Rollesbroich mitverantwortlich sein für die höheren Tauwassermengen im Vergleich zu Selhausen.

Taudauer

Die Regressionsanalyse der monatlichen Tauwassermengen und der durchschnittlichen monatlichen Taudauer ließ als einzige einen deutlichen positiven Zusammenhang erkennen. Demnach spielt die Dauer von Tauereignissen eine zentrale Rolle für die Tauwassermenge. Ritter et al. (2018) nutzten Radiometer, um die Tauhäufigkeiten in den USA zu untersuchen und konnten ebenfalls einen positiven Zusammenhang zwischen Taudauer und Taumenge feststellen. Der steilere Verlauf der Regressionsgrade für Rollesbroich suggeriert höhere durchschnittliche Tauraten in Rollesbroich als in Selhausen (*Abbildung 3*). Die berechneten Tauraten bestätigten diese Annahme.

Die durchschnittlich höhere Dauer der Tauereignisse in Rollesbroich deckte sich mit den beobachteten höheren Taumengen. In den Monaten Januar 2017 und Dezember 2017 wurden in Rollesbroich die höchsten beobachteten monatlichen Taumengen dokumentiert (*Tabelle 2*). In diesen zwei Monaten lag die durchschnittliche Taudauer über 7.5 Stunden und damit deutlich über dem Durchschnitt.

Saisonalität der Taubildung

Die jährliche Verteilung der Nebelereignisse ließ keine Saisonalität erkennen und kann daher nicht als Erklärung für das saisonale Verteilungsmuster der Tauwassermengen herhalten.

Die Regressionsanalyse von Vegetationshöhen und Taubildungsraten konnte keinen deutlichen Zusammenhang abbilden. Des Weiteren war der Jahresgang der Vegetationshöhe durch mehrere Grasschnitte bestimmt und wies daher keine charakteristischen Höhen für Sommer- und Winterperioden auf (Ergebnisse hier nicht berichtet).

Es konnte gezeigt werden, dass die Tauwassermenge stark abhängig von der Dauer eines Tauereignisses ist. Die Dauer von Tauereignissen wiederum ist eine Funktion aus strahlungsbedingter Abkühlung und günstigen Witterungsbedingungen, sodass längere Nächte generell mit höheren Taumengen korrelieren (Tomaszkiewicz et al. 2015). Folglich ließe sich das charakteristische Verteilungsmuster der Taumengen als Resultat variabler Nachtlängen erklären. Während der Winterperioden führten die längeren Nächte von teils über 15 Stunden dazu, dass Tauereignisse bei günstigen Bedingungen länger dauern konnten als in Monaten mit kürzeren Nächten. Der Jahresverlauf der monatlichen Taumengen zeigte über den gesamten Untersuchungszeitraum an beiden Standorten eine hohe Übereinstimmung mit der variablen Nachtlänge.

Fazit und Aussicht

Die Ergebnisse dieser Lysimeterstudie stimmen im hohen Maße mit vergleichbaren Taustudien überein. Es wurde über den gesamten Untersuchungszeitraum von 2015 bis 2017 ein deutlicher Standortunterschied in der Tauwassermenge beobachtet. Die Differenz ließ sich vor dem Hintergrund unterschiedlicher Klima- und Höhenbedingungen der beiden Standorte anhand verschiedener meteorologischer Faktoren – z.B. der relativen Luftfeuchtigkeit – gut erklären. Sowohl in Selhausen, als auch in Rollesbroich wurde ein charakteristisches Verteilungsmuster der Taumengen beobachtet. So waren die monatlichen Taumengen während Winterperioden am höchsten und erreichten in den Sommermonaten minimale Werte. Beide Standorte ließen einen abnehmenden Trend der Tauhäufigkeiten über den Untersuchungszeitraum erkennen. Die Dauer der Studie über drei Jahre wurde jedoch als zu kurz erachtet, um Aussagen über langzeitige Klimatrends zuzulassen.

Weiterführende Studien über mögliche transpirationsmindernde Effekte von Tauwasser auf verschiedene Pflanzenarten könnten helfen die tatsächliche ökologische Relevanz von Tau besser zu bewerten. Außerdem sind weitere Untersuchungen der Pflanzeigenschaften (z.B. Vegetationshöhe und LAI) mit einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung nötig, um deren Einfluss auf die Taubildung näher zu erfassen.

Die Lysimeterstudie ließ keine Klassifizierung der gemessenen abgesetzten Niederschläge zu, die daher als Tau verallgemeinert wurden. Somit gilt es zu berücksichtigen, dass alle gemessenen Taumengen (zumindest anteilig) auch das Resultat von Nebel und direkter Wasserdampfadsorption darstellen können. Diese Einschränkung erscheint akzeptabel, da Lysimeter grundsätzlich nur abgesetzte Niederschläge messen. Umverteilungen von Wasser innerhalb des Systems – wie etwa Guttation oder „dewrise“ – wurden nicht abgebildet, sodass die Ergebnisse der Lysimeterstudie wichtige Informationen über den atmosphärischen Wasser-eintrag durch abgesetzte Niederschläge liefern konnten.

Danksagungen

Wir bedanken uns für die Förderung von TERENO und SOILCan bei der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Literatur

- Abi Saab O.J.G., Griesang F., Alves K.A., Higashibara L.R., Genta W. (2017) Pesticides deposition in vineyards on different conditions of leaf wetness. *Engenharia Agricola* 37, 286-291.
- Agam N., Berliner P.R. (2006) Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments – a review. *Journal of Arid Environments*, 65 (4), 572-590. doi: 10.1016/j.jaridenv.2005.09.004.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Ventura F., Snyder R., Itenfisu D., Steduto P., Berengena J., Yrisarry J.B., Smith M., Pereira L.S., Raes D., Perrier A., Alves I., Walter I., Elliott R. (2006) A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manage.* 81 (1–2), 1–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>.

- Ben-Asher J., Alpert P., Ben-Zvi A. (2010) Dew is a major factor affecting vegetation water use efficiency rather than a source of water in the eastern Mediterranean area. *Water Resources Research*, 46 (10). doi: 10.1029/2008wr007484.
- Beysens D. (1996) The formation of dew. *Atmospheric Research*, 39 (1), 215-238.
- Bivand R., Lewin-Koch N. (2018) Maptools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects. R package version 0.9-4. <https://CRAN.R-project.org/package=maptools>, 2018-11-06.
- Duvdevani S. (1947) An optical method of dew estimation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73 (317-318), 282-296.
- Gerlein-Safdi C., Gauthier P.P.G., Caylor K.K. (2018) Dew-induced transpiration suppression impacts the water and isotope balances of *Colocasia* leaves. *bioRxiv*, 1-24. doi: 10.1101/178293.
- Groh J., Slawitsch V., Herndl M., Graf A., Vereecken H., Pütz T. (2018) Determining dew and hoar frost formation for a low mountain range and alpine grassland site by weighable lysimeter. *Journal of Hydrology*, 563, 372-381.
- Hanisch S., Lohrey C., Buerkert A. (2015) Dewfall and its ecological significance in semi-arid coastal south-western Madagascar. *Journal of Arid Environments*, 121, 24-31. doi: 10.1016/j.jaridenv.2015.05.007.
- Holz A. (2018) Hürtgenwaldwetter. <https://www.huertgenwaldwetter.de>, 2018-11-09.
- Jacobs A.F.G., Heusinkveld B.G., Wichink Kruit R.J., Berkowicz S.M. (2006) Contribution of dew to the water budget of a grassland area in the Netherlands. *Water Resources Research*, 42 (3). doi: 10.1029/2005WR004055.
- Kidron G.J. (1999) Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96 (1), 1-8. doi: 10.1016/S0168-1923(99)00043-X.
- Klose B. (2016) *Meteorologie: eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Springer, Luxemburg.
- Küpper W., Groh L., Fürst L., Meulendick P., Vereecken H., Pütz T. (2017) TERENO-SOILCan - Management eines deutschlandweiten Lysimeternetzwerkes. 17. Gumpensteiner Lysimetertagung. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 175-180.
- Larsson S. (1981) Influence of intercepted water on transpiration and evaporation of *Salix*. *Agricultural Meteorology*, 23, 331-338. doi: 10.1016/0002-1571(81)90118-7.
- Lauer W., Bendix J. (2006) *Klimatologie*. 2. Auflage Bildungshaus Schulbuchverlag, Braunschweig, ISBN 978-3-14-160284-5.
- Meissner R., Seeger J., Rupp H., Seyfarth M., Borg H. (2007) Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170 (3), 335-344. doi: 10.1002/jpln.200625002.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. (2013) Chapter 13 - Steady-State Heat Balance: (i) Water Surfaces, Soil, and Vegetation. *Principles of Environmental Physics*, 217-247. Academic Press, Boston.
- Nolz R., Cepuder P., Kammerer G. (2014) Determining soil water-balance components using an irrigated grass lysimeter in NE Austria. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177 (2), 237-244.
- Pavlic M., Rigoll G., Ilic S. (2013) Classification of images in fog and fog-free scenes for use in vehicles. *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013 IEEE.
- Pedro M.J., Gillespie T.J. (1981) Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agricultural Meteorology*, 25, 283-296. doi: 10.1016/0002-1571(81)90081-9.
- 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.
- Price J., Clark R. (2014) On the measurement of dewfall and fog-droplet deposition. *Boundary-Layer Meteorology*, 152 (3), 367-393.
- Pütz T. (2013) TERENO-SOILCan - Ein Lysimeternetzwerk zur Untersuchung des Klimawandels. 15. Gumpensteiner Lysimetertagung. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 57-62.
- Pütz T., Kiese R., Wollschläger U., Groh J., Rupp H., Zacharias S., Priesack E., Gerke H.H., Gasche R., Bens O., Borg E., Baessler C., Kaiser K., Herbrich M., Munch J.C., Sommer M., Vogel J.H., Vanderborght J., Vereecken H. (2016) TERENO-SOILCan: a lysimeter-network in Germany observing soil processes and plant diversity influenced by climate change. *Environmental Earth Sciences*, 75 (18), 1241-1244. doi: 10.1007/s12665-016-6031-5.
- Pütz T., Kiese R., Zacharias S., Bogena H., Priesack E., Wollschläger U., Schwank M., Papen H., Unold G., Vereecken H. (2011) TERENO-SOILCan – Ein Lysimeter Netzwerk in Deutschland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 5-9.
- Ritter F., Berkelhammer M., Beysens D. (2018) Dew frequency across the US from a network of in situ radiometers. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2018, 1-35. doi: 10.5194/hess-2018-450.
- RStudio Team (2015) RStudio: Integrated Development for R. <http://www.rstudio.com/>, 2018-11-09.
- Scherm H., Van Bruggen A. (1993) Sensitivity of simulated dew duration to meteorological variations in different climatic regions of California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 66 (3-4), 229-245.
- 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 Environmental Sciences*, 19, 543-552. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.06.
- Tomaszkiewicz M., Abou Najm M., Beysens D., Alameddine I., Bou Zeid E., El Fadel M. (2016) Projected climate change impacts upon dew yield in the Mediterranean basin. *Science of the Total Environment*, 566-567, 1339-1348. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.195.
- Tomaszkiewicz M., Abou Najm M., Beysens D., Alameddine I., El-Fadel M. (2015) Dew as a sustainable non-conventional water resource: a critical review. *Environmental Reviews*, 23 (4), 425-442.
- Xiao H., Meissner R., Seeger J., Rupp H., Borg H. (2009) Effect of vegetation type and growth stage on dewfall, determined with high precision weighing lysimeters at a site in northern Germany. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2), 43-49. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.006.
- Xu Y.Y., Yan B.X., Tang J. (2015) The Effect of Climate Change on Variations in Dew Amount in a Paddy Ecosystem of the Sanjiang Plain, China. *Advances in Meteorology*. doi: 10.1155/2015/793107.

Einfluss unterschiedlicher Formen der Bewirtschaftung der Brache auf die Verdunstung ackerbaulich genutzter Böden im mitteldeutschen Trockengebiet

Steffi Knoblauch^{1*}

Zusammenfassung

Anhand langjähriger Messreihen der Lysimeteranlage Buttelstedt wird über den Einfluss verschiedener Formen der Brachebewirtschaftung auf die Verdunstung berichtet. Ein nach Ernte aufwachsender Bewuchs aus Ausfallraps bzw. –Winterweizen kann bis Mitte/Ende September den in diesem Zeitraum fallenden Niederschlag bis in die Größenordnung des normalen Niederschlagswertes verdunsten. Eine Bedeckung des Bodens mit Stroh hilft am meisten den Bodenwasservorrat nach Aberntung der Hauptkulturen zu schonen. Im Vergleich zum flachen Stoppelsturz war die Verdunstung um signifikant 0,5 mm/d geringer. Flacher Stoppelsturz eines mit Stroh bedeckten Bodens hingegen minderte im Vergleich zu einem unbedeckten und unbearbeiteten Boden die Verdunstung um signifikant 0,4 mm/d. Im Vergleich zu flachem Stoppelsturz war die Verdunstung einer tiefen Stoppelpflanzung in den folgenden 13 bis 17 d um signifikant 0,42 mm/d höher. Daraus wurden verschiedene Schlussfolgerungen für die Stoppelpflanzung abgeleitet.

Schlagwörter: Ausfall-Winterraps, Ausfall-Getreide, Strohbdeckung, flache und tiefe Stoppelpflanzung

Summary

The influence of various forms of fallow land management on evaporation is reported on the basis of many years of measurement series of the Lysimeters in Buttelstedt in the Central German dry region. A vegetation of volunteer rape or winter wheat growing after harvest can evaporate the precipitation falling until mid/end September up to the order of magnitude of the normal precipitation value in this period. Covering the soil with straw helps most to conserve the soil water supply after harvesting the main crops. Compared to the shallow stubble fall, the evaporation was significantly 0.5 mm/d lower. A flat stubble fall of a soil covered with straw, on the other hand, significantly reduced evaporation by 0.4 mm/d compared to an uncovered and untreated soil. Compared to a flat stubble fall, the evaporation of a deep stubble cultivation was significantly 0.42 mm/d higher in the following 13 to 17 d. From this, different conclusions for stubble cultivation were derived.

Keywords: Volunterr rape, volunteer winter rape, straw covering, shallow and deep stubble fall

Einleitung

In niederschlagsarmen Gebieten ist Wasser häufig der ertragsbegrenzende Faktor. Dabei geht es nicht nur um die Wasserversorgung der Kulturpflanzen während der Hauptwachstumszeit, sondern auch um ein ausreichendes Wasserangebot für das Auflaufen der Winterkulturen im Spätsommer und Herbst. Aufgrund sehr trockener Verhältnisse im Sommer 2018 blieb beispielweise in Thüringen der Aufgang von Winterraps auf einem Teil der Schläge aus und mussten die Ackerflächen umgebrochen werden. Hinzu kommt, dass der Bodenwasserspeicher mittel- bis tiefgründiger Lehmböden in den mitteldeutschen Trockengebieten bis zum Frühjahr häufig nicht vollständig aufgefüllt wird. Insofern steht die Frage, wieviel Wasser ein nach der Ernte aufwachsender Bestand aus Ausfallraps oder –getreide verbraucht. Mit Hilfe langjähriger Messreihen der wägbaren Feldlysimeter in Buttelstedt soll im folgenden Beitrag über den Wasserverbrauch der Brache in Abhängigkeit vom Bewuchs mit ausgefallenem Winterweizen oder Winterraps und verschiedener Varianten der Stoppelpflanzung bzw. –bedeckung berichtet werden.

Material und Methoden

Der Versuchsstandort Buttelstedt befindet sich am südöstlichen Rand des Thüringer Beckens im mitteldeutschen Trockengebiet. Die vieljährige Niederschlagssumme beträgt 535 mm je Jahr und das vieljährige Temperaturmittel 9,0 °C (1981...2000). Während der Vegetationszeit von April bis September bemisst sich der Niederschlag auf 329 mm, davon 73 mm im Juli, 56 mm im August und 48 mm im September.

Im Vergleich zum vieljährigen Mittelwert von 1951 bis 1980 hat es bereits eine Abnahme des Jahresniederschlags um 17 mm und eine Zunahme der Jahrestemperatur um 0,8 °C gegeben.

Die Witterung der Versuchsjahre in den Monaten Juli bis September geht aus *Tabelle 1* hervor. In den Versuchsjahren mit der Prüfung verschiedener Stoppelpflanzung folgt im Jahr 2010 auf einen zu warmen und trockenen Juli ein niederschlagsreicher und kühler August. Im Jahr 2015 herrscht im Juli und August eine überdurchschnittlich warme und etwas zu feuchte Witterung vor. In den Jahren 2016 und 2018 ist es im Juli und August zu warm und zu trocken.

¹ Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Referat 31 - Pflanzenbau und Ökologischer Landbau, Postfach 100262, D-07702 JENA

* Ansprechpartner: Dr. Steffi Knoblauch, steffi.knoblauch@tillr.thueringen.de

Tabelle 1: Witterung in den Monaten Juli bis September in den Versuchsjahren.

Jahr	Niederschlag						Lufttemperatur					
	Jul. mm	Abw. ¹ in %	Aug. mm	Abw. in %	Sept. mm	Abw. in %	Jul. °C	Abw. in K	Aug. °C	Abw. in K	Sept. °C	Abw. in K
2007	128	176	54	96	150	310	17,3	-0,9	16,5	-1,3	12,3	-1,5
2008	69	95	33	59	30	63	18,1	-0,1	17,9	+0,1	11,9	-2,0
2010	65	89	127	226	64	134	20,1	+1,9	16,4	-1,4	12,3	-1,5
2011	115	158	44	79	33	69	16,0	-2,2	17,7	-0,1	15,2	+1,4
2012	75	104	53	95	32	66	17,3	-0,9	18,6	+0,8	13,8	0,0
2015	72	100	67	119	24	51	19,4	+1,2	20,3	+2,5	12,9	-0,9
2016	56	77	20	36	32	67	18,8	+0,6	18,3	+0,4	17,4	+3,6
2018	70	97	26	47	79	164	20,1	+1,9	20,1	+2,3	14,9	+1,1

¹ Abweichung vom vieljährigen Mittel

Tabelle 2: Ausgewählte Bodeneigenschaften der Versuchsböden.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Tongehalt	FK pF 2,5 Vol.%	nFK pF 2,5 Vol.%	C _{org} %	pH CaCl ₂	CaCO ₃ %
	cm		%					
Braunerde-Tschernosem aus Löß (lö)								
Ap	0...25	Lu	26,6	29,3	11,7	1,7	6,6	0,3
Ah	...43	Lu		31,9	7,2	1,2	6,5	0,3
Ah-Bv	...65	Lu	29,4	34,2	9,5	0,8	6,7	0,2
Ckc	...195	Lu	20,9	31,4	10,3	0,8	7,6	15,5
Para-Rendzina aus unterem Keuper (k)								
Ap/Ah	0...30	Lt3	39,0	36,8	9,5	1,6	7,5	7,2
II e/Cv	...65	Ls2	24,6	28,8	8,6	0,3	7,6	16,8
III e/Cv	...72	Lt2	27,3	31,3	5,0	0,4	7,6	1,1
Cv	...200	Lu, Ls3, Tu3, Lt2	18...35	27...35	5...12	0,03..0,3	7,3..7,7	0,5...13

Bei den Versuchsböden handelt es sich um einen tiefgründigen Braunerde-Tschernosem aus Löß (lö) und eine Para-Rendzina aus unterem Keuper (k). Ausgewählte Bodeneigenschaften enthält Tabelle 2. Der tiefgründige Lößboden ist durch einen 43 cm mächtigen Humushorizont gekennzeichnet. Die Bodenart ist bis in 200 cm Tiefe durchgängig schluffiger Lehm. Die Para-Rendzina ist aus carbonathaltigen, lockeren und festen Mergelgesteinen hervorgegangen. Der Humushorizont reicht bis in 30 cm Tiefe und ist der Bodenart stark tonigem Lehm zuzuordnen. Darunter folgen lehmige, schluffige und tonige Verwitterungsprodukte des unteren Keupers mit stark wechselnden Korngrößen-, Skelett- und Carbonatanteilen.

Die Lysimeter in Butteltstedt weisen eine Oberfläche von 2 m² und eine Tiefe von 2,5 bzw. 2 m auf. Sie sind monolithisch befüllt und befinden sich zur Vermeidung von Oaseneffekten inmitten eines 30 ha-großen Feldes, das ebenso wie die Lysimeter bewirtschaftet wird. Die Lysimeter sind kontinuierlich wägbare mit einer Genauigkeit von 100 g, entsprechend einer Niederschlags- bzw. Verdunstungshöhe von 0,05 mm. Das Sickerwasser wird teils gravitativ über eine körnungsabgestufte Filterstrecke aus Quarzschluff-, sand und -kies, teils tensionsgesteuert mit Hilfe von Saugkerzen aus Keramik und Borosilikatglas gewonnen.

Die Bewirtschaftung der Lysimeter erfolgt ackerbaulich. In der Fruchtfolge wechseln seit 2005 die Kulturen Silomais/Sorghum bicolor, Sommergerste, Winterraps, Winterweizen und Wintergerste. Es werden im Hinblick auf die Höhe der

unvermeidbaren N-Auswaschung eine mineralische und eine mineralisch-organische Düngungsvariante geprüft. Das Stroh bleibt auf dem Feld. Für die Erfassung des Ertrages wird die Ganzpflanze geerntet und kommt das Stroh einige Tage nach der Ernte in gehäckselter Form auf den Lysimeterboden zurück. Die Wiederholungszahl beträgt bei der mineralischen Variante 4 je Boden und bei der mineralisch-organischen Variante 3 je Boden. Zwei weitere Lysimeter, die mit einem Lößboden befüllt sind, erhalten während der Hauptwachstumszeit Zusatzwasser für die Bestimmung der potenziellen Verdunstung des Pflanzenbestandes. Im Jahr 2005 waren vier Lysimeter wägbare, im Jahr 2010 zehn. Ab dem Jahr 2012 sind alle Lysimeter wägbare. Dementsprechend stehen für die Bestimmung der Verdunstung der Brache von den 16 Feldlysimetern 4 bis 16 zur Verfügung.

Die Varianten der Brachebewirtschaftung sind in Tabelle 3 erläutert. Im Jahr 2010 wurde ein flacher Stoppelsturz mit einer Strohecke auf einem unbearbeiteten Boden verglichen. Im Jahr 2015 erfolgte der Vergleich eines flachen Stoppelsturzes mit einem von Stroh beräumten baren Boden. In den Jahren 2016 und 2018 kamen eine flache und eine tiefe Stoppelbearbeitung zur Prüfung.

In den Jahren 2007 und 2011 gelangte Winterraps zum Anbau und in den Jahren 2008 und 2012 Winterweizen. Nach der Ernte erfolgte jeweils eine flache Stoppelbearbeitung, um das aus ackerbaulicher Sicht erwünschte Auflaufen des Winterrapses bzw. Getreides zu fördern. Im Einzelnen sind die Bewirtschaftungsmaßnahmen der Brache in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 3: Beschreibung der Versuchsvarianten in den Jahren 2010, 2015, 2016 und 2018.

Var.	2010 22.7.2010	23.-25.7.2010	26.7.2010	4.8.2010
1	Ernte incl. Strohabfuhr, TM-Ertrag Stroh ¹ (dt/ha): 37	ohne Stroh und ohne Stoppelbearbeitung	Stroh breit verteilt: 100 % BG Stroh	flache Stoppelbearb., 5 cm tief: 37 % BG Stroh, mittleres bis grobes (<10...40 mm, k) bzw. feines (<5 mm, lö) Bröckelgefüge
2			Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 5 cm tief: 50 % BG Stroh, mittleres bis grobes (<20...40 mm, k) bzw. feines bis mittleres (<5...20 mm, lö) Bröckelgefüge	
2015				
	27.7.2015	28.-31.7.2015	1.8.2015	8.8.2015
1	Ernte incl. Strohabfuhr, TM-Ertrag Stroh ² (dt/ha): 73 (dar. 86 k, 63 lö)	ohne Stroh und ohne Stoppelbearbeitung	Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 6 cm tief u. mit Harken angedrückt: 62 % BG Stroh, feines bis mittleres (2...20, vereinz. 50 mm, lö u. k) Bröckelgefüge	
2		ohne Stroh und ohne Stoppelbearbeitung		Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 6 cm tief u. mit Harken angedrückt: 47 % BG Stroh, feines bis mittleres (2...20, vereinz. 50 mm, lö u. k) Bröckelgefüge
2016				
	12.7.2016	13.-20.7.2016	21.7.2016	
1	Ernte ³ incl. Strohabfuhr TM-Ertrag Stroh ³ (dt/ha): 68 (dar. 70 k, 66 lö)	ohne Stroh und ohne Stoppelbearbeitung	Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 5 cm tief u. mit Harken angedrückt	
2			Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 14 cm tief u. mit Harken angedrückt	
2018				
	19.7.2018	20.-21.7.2018	23.7.2018	
1	Ernte incl. Strohabfuhr TM-Ertrag Stroh ⁴ (dt/ha): 65 (dar. 67 k, 63 lö)	Stroh breit verteilt: 100 % BG Stroh	flache Stoppelbearbeitung, 5 cm tief u. mit Harken angedrückt: 70 % BG Stroh, überw. feines (>70 %) bis mittleres Bröckelgefüge (<5...30 mm, lö u. k)	
2			tiefe Stoppelbearbeitung, 14 cm tief u. mit Harken angedrückt: 20 % BG Stroh, feines bis mittleres (30 %, lö bzw. 60 % k) Bröckelgefüge (<5...50 mm)	

BG...Bedeckungsgrad, ¹Braugerste-Stroh, ^{2,4}Winterweizenstroh, ³Wintergerstestroh

Tabelle 4: Bewirtschaftung der Brache in den Jahren 2007, 2008, 2011 und 2012.

	12.7.2007	13.7.2007	16.8.2007	16.8.2007
Ernte incl. Strohabfuhr		ohne Stroh Stoppelbearbeitung, 5 cm tief	Bewuchs mit Ausfallraps: BBCH 15, BH 8 cm, BG 74% (k), BBCH 15, BH 14 cm, BG 100% (lö)	Stroh breit verteilt u. Stoppelbearbeitung, 6 cm tief
1.8.2008		26.8.2008	8.10.2008	
Ernte incl. Strohabfuhr		Stroh breit verteilt u. Stoppelbearbeitung, 5 cm tief	Bewuchs mit Ausfallweizen: BBCH 21, BH 7 cm, BG 8% (k), BBCH 22, BH 12 cm, BG 42% (lö)	
14.7.2011			11.8.2011	11.-14.8.2011
Ernte incl. Strohabfuhr			Bewuchs mit Ausfallraps: BH 8 cm, BG 45% (k), BH 11cm, BG 70% (lö)	Stoppelbearbeit., 7 cm tief u. Stroh eingearbeitet
26.7.2012		10.8.2012	10.9.2012	
Ernte incl. Strohabfuhr		Stroh breit verteilt u. Stoppelbearbeitung, 8 cm tief	Bewuchs mit Ausfallweizen: BBCH 21, BH 11cm, BG 23% k), BBCH 21, BH 11cm, BG 53% (lö)	

Ergebnisse

Wasserverbrauch von Ausfallraps und Ausfallgetreide

Der sich nach Ernte aus ausgefallenem Winterraps etablierte Bestand verbrauchte von Beginn der 2. Julidekade bis Ende der 2. Septemberdekade im Mittel der beiden Böden insgesamt 159 mm im Jahr 2007 und 144 mm im Jahr 2011, wobei im Jahr 2007 der Wasserverbrauch auf dem Lößboden mit 170 mm am höchsten ausfiel (Tabelle 5).

In beiden Jahren war es im Juli und August überdurchschnittlich feucht, was die pflanzliche Entwicklung des Ausfallraps vorantrieb. Der Pflanzenbestand hatte Mitte August eine Bestandeshöhe von 8 bis 14 cm erreicht und einen Bedeckungsgrad von 74 bis 100 % im Jahr 2007 sowie 45 bis 70 % im Jahr 2011. Ein 2. Stoppelsturz Mitte August 2007 senkte die Evapotranspiration (ET) von 3 bis 4 mm/d auf 1 bis 1,5 mm/d bei anhaltend hoher Globalstrahlung (Abbildung 1). Die Wasserbilanz des betrachteten Zeitraumes fiel aufgrund der überdurchschnittlichen Niederschläge positiv aus. Die ET lag in beiden Jahren über dem vieljährigen Durchschnittswert des Niederschlages von 137 mm, so dass unter normalen Niederschlagsverhältnissen

bei unkontrolliertem Aufwuchs mit Ausfallraps in diesem Zeitraum keine Auffüllung des Bodenwasserspeichers zustande kommen würde.

Die ET eines Bewuchses mit Ausfall-Winterweizen lag demgegenüber deutlich niedriger. Bei vergleichbaren Bedingungen der Globalstrahlung im Jahr 2012 blieb die ET im Pentadenmittel unter 3 mm/d (Abbildung 2), während beim Ausfall-Winterraps im Jahr 2007 ein Anstieg bis auf 4,5 mm/d zu verzeichnen war. Im Juli und August der Jahre 2008 und 2012 war es trocken bis niederschlagsnormal. Erst nach einem flachen Stoppelsturz Mitte August begann sich ein Bestand aus Ausfall-Winterweizen zu entwickeln. Anfang Oktober 2008 war eine Bestandeshöhe von 8 bis 14 cm und ein Bedeckungsgrad von 8 bis 42 % festzustellen und Mitte September 2012 eine Bestandeshöhe von 11 cm und ein Bedeckungsgrad von 23 bis 53 %. Der üppigere Wuchs im Jahr 2012 ist im Zusammenhang mit den im Vergleich zu 2008 höheren Niederschlägen zu sehen. Insgesamt verdunstete der Ausfallweizen von Anfang August bis Ende September 66 mm im Jahr 2008 und 104 mm im Jahr 2012. In beiden Jahren war die Wasserbilanz in etwa ausgeglichen. Das bedeutet, dass auch bei einem Aufwuchs von Ausfall-Winterweizen der im August und September im Normaljahr fallende Niederschlag vollständig verdunstet werden kann.

Tabelle 5: Evapotranspiration von Brache mit Bewuchs von Ausfallraps und –weizen.

Boden/Jahr	Evapotranspiration											Nieder-schlag	Wasser-bilanz
	Juli/ Dek.			August/ Dek.				September/ Dek.					
	2.	3.	Σ	1.	2.	3.	Σ	1.	2.	3.	Σ	ΣΣ	ΣΣ
	mm/d			mm/d				mm/d				mm	mm
Ausfall-Winterraps													
k/ 2007	2,0	2,6	50	2,7	2,5	1,4	68	1,4	1,6		30	313	+165
lö/ 2007	1,8	3,2	53	4,0	3,2	1,3	86	1,4	1,7		31		+143
k/ 2011	2,1	1,6	44	2,6	1,5	1,8	61	1,8	2,0		36	194	+53
lö/ 2011	2,3	1,6	47	2,7	1,5	1,9	64	1,8	2,0		37		+46
Ausfall-Winterweizen													
k/ 2008				1,5	1,6	1,4	46	1,1	0,4	0,8	24	74	+4
lö/ 2008				1,1	1,3	1,2	38	1,1	0,5	0,9	25		+11
k/ 2012				1,6	1,2	1,9	49	1,4	1,8	1,6	49	93	-5
lö/ 2012				1,5	1,1	2,2	50	1,8	1,9	1,6	53		-10

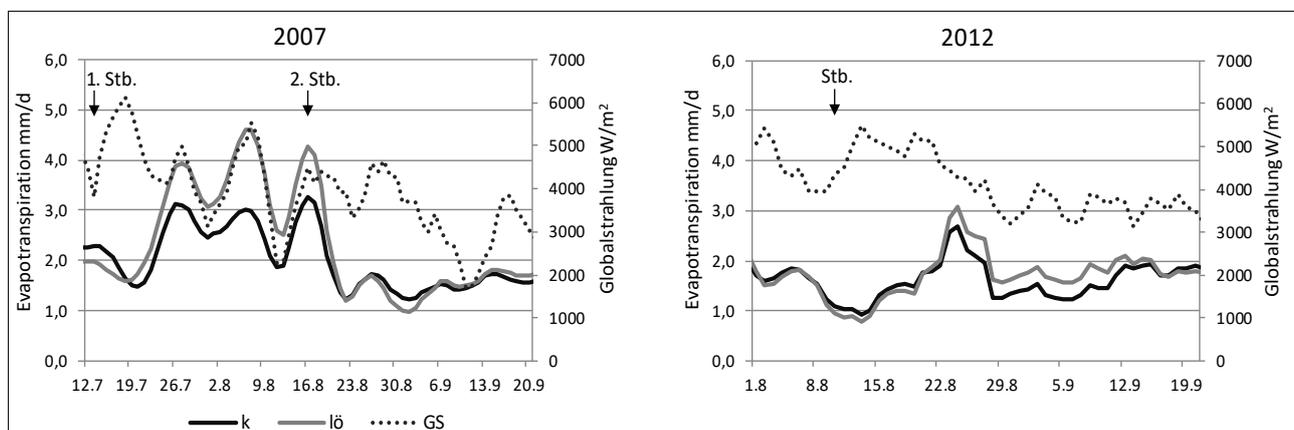


Abbildung 1: Evapotranspiration von Brache mit Bewuchs von Ausfallraps (2007) und Ausfallweizen (2012) im zeitlichen Verlauf (gleitendes Pentadenmittel).

Tabelle 6: Evaporation von Stroh breit im Vergleich zu flachem Stoppelsturz mit Stroh (2010).

Var.		Evaporation			Niederschlag		
		23.-25.7. mm/d	27.7.-3.8. mm/d	5.-22.8. mm/d		23.7.-22.8. mm/d	
1	ohne Stroh +	2,13 ^a	Stroh breit	1,27 ^a	Stroh breit + flache Stb. (6cm)	1,68 ^a	4,7
2	ohne Stb	1,94 ^a	Stroh breit + flache Stb (6cm)	1,79 ^b	Stroh breit + flache Stb. (Forts.)	1,62 ^a	
Differenz		-0,19		+0,52		-0,06	
GD _{Tukey, 5%}		0,25		0,16			

Stb...Stoppelbearbeitung, Wiederholungszahl der Var.: 5

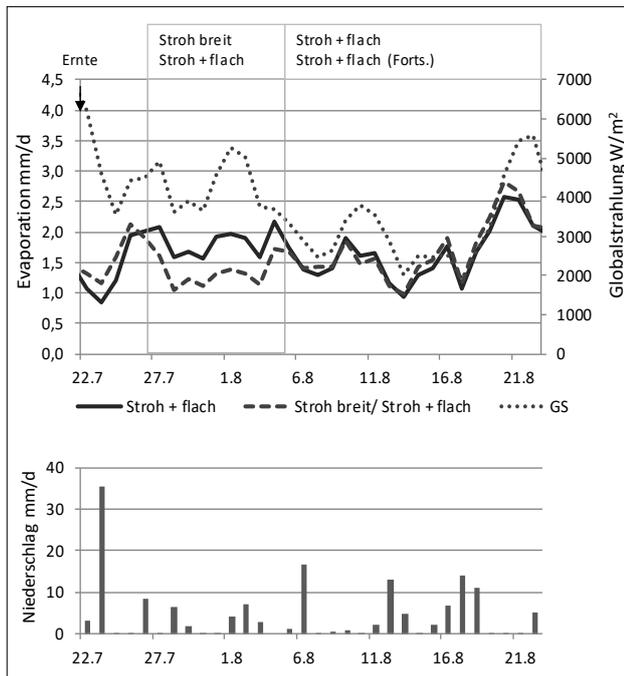


Abbildung 2: Evaporation von Stroh breit verteilt im Vergleich zu flachem Stoppelsturz mit Stroh (2010) im zeitlichen Verlauf (gleitendes Dreitagewittel).

Wasserverbrauch von Strohbdeckung und verschiedener Varianten der Stoppelbearbeitung

Wasserverbrauch von Stroh breit im Vergleich zu flacher Stoppelbearbeitung

Der Wasserverbrauch einer mit Stroh häcksel bedeckten Bodenoberfläche lag im Vergleich zu einem flachen Stoppelsturz eines zuvor mit Stroh häcksel bedeckten Bodens um 0,52 mm/d niedriger im Mittel der folgenden 8 Tage (Tabelle 6). Der Unterschied war signifikant.

In einer sich daran anschließenden Periode, in der der mit Stroh häcksel bedeckte Boden ebenfalls einem flachen Stoppelsturz unterzogen wurde, glichen sich die Verdunstungswerte der beiden Varianten an und bestätigten die signifikante Minderung der Evaporation durch eine Strohecke im Vergleich zu einem flachen Stoppelsturz (Abbildung 2). Das Niederschlagsaufkommen von 4,7 mm/d war während des Untersuchungszeitraumes überdurchschnittlich. Der

Normalwert liegt bei 2,1 mm/d. Der Wasserverbrauch des nicht mit Stroh bedeckten und nicht bearbeiteten Bodens wenige Tage nach der Ernte von Winterweizen lag bei 2,0 mm/d. Während der nachfolgenden 8 Tage mit Strohbdeckung betrug die Verdunstung im Mittel 1,3 mm/d, wobei auch die Globalstrahlung etwas niedriger lag als unmittelbar nach der Ernte. Dennoch wird deutlich, dass der Wasserverlust von barem Boden unmittelbar nach der Ernte höher ausfällt als bei nachfolgender Strohbdeckung.

Wasserverbrauch von Strohabfuhr im Vergleich zu flacher Stoppelbearbeitung

Der nach der Ernte ohne Strohbdeckung und ohne Bearbeitung zurückgebliebene Boden verbrauchte im Vergleich zu einem mit Stroh häcksel bedeckten und flach bearbeiteten Boden 0,4 mm/d mehr Wasser über einen Zeitraum von 6 Tagen (Tabelle 7). Der Unterschied war signifikant.

Nachdem der Boden mit Stroh häcksel bedeckt und ebenfalls einem flachen Stoppelsturz unterzogen wurde glichen sich die Verdunstungswerte der beiden Varianten wieder an (Abbildung 3). Die höchsten Werte der Verdunstung traten mit durchschnittlich 2,4 mm/d während der viertägigen Periode nach der Ernte auf, in der der Boden keine Strohbdeckung hatte und nicht bearbeitet worden war. Während der Periode mit differenzierter Bewirtschaftung regnete es kaum und wurde durch einen flachen Stoppelsturz mit Stroh der Bodenwasservorrat im Vergleich zu einem unbedeckten Boden geschont. Die Niederschläge im Juli und August 2015 waren mit 2,3 mm/d etwas überdurchschnittlich.

Wasserverbrauch unterschiedlich tiefer Stoppelbearbeitung

Bei einem Stoppelsturz mit einer Bearbeitungstiefe von 14 cm lag die Evaporation in den folgenden 4 Tagen in beiden Versuchsjahren um etwa 0,3 mm/d höher als bei einem 6 cm tiefen Stoppelsturz (Tabelle 8). In beiden Jahren gab es in diesen ersten 4 Tagen kaum Niederschlag und wurde der zu Beginn vorhandene Bodenwasservorrat für die Verdunstung in Anspruch genommen.

In den darauffolgenden 13 bzw. 9 Tagen regnete es im Jahr 2016 durchschnittlich 4 mm/d und im Jahr 2018 2,8 mm/d. Die Verdunstung stieg daraufhin bei flacher Bearbeitung um 0,6 mm/d im Jahr 2016 und 0,7 mm/d im Jahr 2018 an. Bei tiefer Stoppelbearbeitung war die Zunahme um jeweils 0,2 mm/d stärker ausgeprägt (Abbildung 4). Im Mittel dieses niederschlagsreichen Abschnittes lag die Verdunstung bei tiefer Stoppelbearbeitung um 0,47 mm/d

Tabelle 7: Evaporation von Strohabfuhr im Vergleich zu flachem Stoppelsturz mit Stroh (2015).

Var.		Evaporation			Niederschlag		
		28.-31.7. mm/d	2.-7.8. mm/d	5.-22.8. mm/d	23.7.-22.8. mm/d		
1	ohne Stroh +	2,32 ^a	Stroh breit + flache Stb (6cm)	0,80 ^a	Stroh breit + flache Stb. (Forts.)	1,02 ^a	2,3
2	ohne Stb	2,40 ^a	ohne Stroh + ohne Stb	1,21 ^b	Stroh breit + flache Stb. (6cm)	1,01 ^a	
Differenz		+0,08		+0,41		-0,01	
GD _{Tukey, 5%}		0,28		0,14		0,06	

Stb...Stoppelbearbeitung, Wiederholungszahl der Varianten: 8

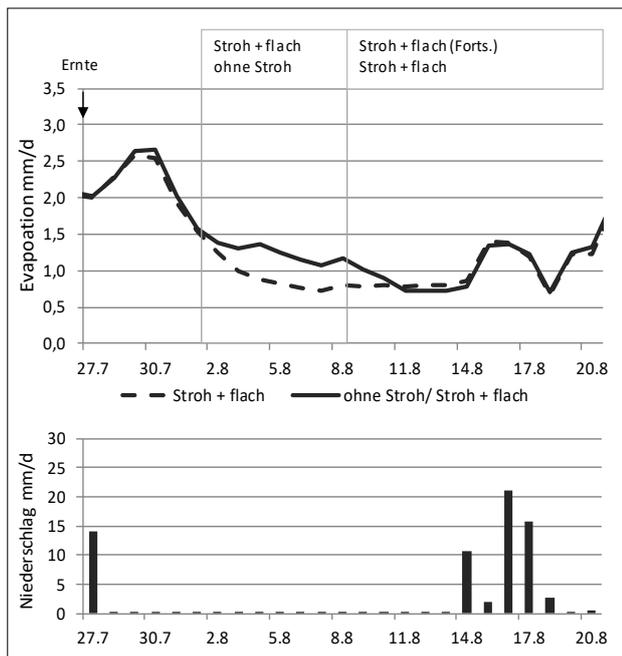


Abbildung 3: Evaporation von flachem Stoppelsturz mit Stroh im Vergleich zu einem unbedeckten und unbearbeiteten Boden (2015) im zeitlichen Verlauf (gleitendes Dreitagsgemittel).

im Jahr 2016 und um 0,48 mm/d im Jahr 2018 höher als bei flacher Bearbeitung.

Daran schloss sich in den folgenden 10 d in beiden Jahren eine sehr trockene Periode an mit 0,2 mm Niederschlag/d. Zwischen tiefer und flacher Bearbeitung war kein Unterschied mehr erkennbar.

Im Untersuchungszeitraum vom 22.7. bis 17.8.2016 regnete es insgesamt 58 mm. Davon wurden bei flacher Stoppelbearbeitung 39 mm und bei tiefer Stoppelbearbeitung 48 mm für die Verdunstung verbraucht. Somit blieben bei flacher Stoppelbearbeitung 9 mm mehr Wasser im Bodenwasserspeicher zurück.

Im Versuchsjahr 2018 betrug der Niederschlag vom 24.7. bis 16.8. insgesamt 28 mm und unterschied sich die Evaporation zwischen flacher und tiefer Stoppelbearbeitung um 7 mm, in etwa vergleichbar mit dem Jahr 2016.

Auffällig ist, dass in beiden Jahren in den ersten 4 d nach der tiefen Stoppelbearbeitung die Verdunstung bei der tonreicheren Para-Rendzina deutlich höher ausfiel als beim Löß. Einer Ansprache des Bodengefüges im Jahr 2018 zu-

folge wies die Para-Rendzina bei tiefer Stoppelbearbeitung ein überwiegend mittleres Bröckelgefüge auf, während beim Lößboden ein überwiegend feines Bröckelgefüge zu verzeichnen war. Vermutlich war der größere Luftanteil im größeren Bröckelgefüge der Para-Rendzina für die höhere Verdunstung verantwortlich. In der darauffolgenden niederschlagsreicheren Periode lag die Verdunstung beim Lößboden bei beiden Bearbeitungstiefen etwas höher als bei der tonreicheren Rendzina. Insgesamt fiel der Unterschied zwischen flacher und tiefer Stoppelbearbeitung beim Lößboden weniger stark aus als bei der Rendzina.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Nach der Ernte aufwachsender Bewuchs mit Ausfall-Winterraps hat in zwei Versuchsjahren bis Ende der 2. Septemberdekade, d.h. vor Grundbodenbearbeitung und Aussaat einer Folgekultur 141 bis 170 mm Wasser verbraucht. Das entsprach in etwa dem in diesem Zeitraum normalen Niederschlag. Durch eine zweite Stoppelbearbeitung, die in einem der beiden Jahre Mitte August durchgeführt wurde, konnte eine erhebliche Minderung der Evapotranspiration erreicht werden. Für den Bewuchs mit Ausfall-Winterweizen wurde in zwei Versuchsjahren von Anfang August bis Ende September ein Wasserverbrauch von 66 bis 100 mm ermittelt. Die Witterung war trocken bis niederschlagsnormal und die Evapotranspiration reichte auch in diesem Zeitraum bis an den Normalwert heran. In Trockengebieten, in denen der Bodenwasservorrat mittel- bis tiefgründiger Lehmböden häufig nicht vollständig aufgefüllt wird, kann dieser hohe Wasserverbrauch den Ertrag der folgenden Hauptkultur schmälern. Diesem unproduktiven Verdunstungsverlust sollte deshalb durch mehrmaliges Mulchen oder flache Bodenbearbeitung entgegengewirkt werden.

Im Versuchsjahr 2010 führte die Bedeckung des Bodens mit Stroh im Vergleich zu einem flachen Stoppelsturz eines zuvor mit Stroh bedeckten Bodens zu einer signifikanten Minderung der Evaporation um 0,5 mm/d. Im Versuchsjahr 2015 zeigte sich andererseits, dass im Vergleich zu einem unbedeckten, unbearbeiteten Boden ein flacher Stoppelsturz eines zuvor mit Stroh bedeckten Bodens die Evaporation um 0,4 mm/d zu senken vermochte.

Die Evaporation wird maßgeblich beeinflusst von der Einstrahlungsenergie und dem Albedo der Bodenoberfläche. Der Albedo entscheidet darüber, wieviel von der eingestrahelten Energie an die Atmosphäre zurückgestrahlt wird. Je höher der Albedo, desto weniger steht für die Umsetzung der Energie in Verdunstung und die Ableitung fühlbarer

Tabelle 8: Evaporation von flachem im Vergleich zu tiefem Stoppelsturz mit Stroh (2016, 2018).

Var.	Evaporation										Niederschlag
	13.-20.7.16		22.7.-25.7.16			26.7.-7.8.16			8.-17.8.16		13.7.-17.8.16
	mm/d		Nied.: 0,8 mm/d mm/d			Nied.: 4,0 mm/d			Nied.: 0,2 mm/d		mm/d
	Ø	k	lö	Ø	k	lö	Ø	k	lö	Ø	
1	ohne Stroh 1,49 ^a	Stroh + flache Stb. (6 cm) 1,24 1,04 1,18 ^a			1,69	2,01	1,80 ^a	1,05	1,11	1,07 ^a	2,0
2	ohne Stroh 1,48 ^a	Stroh + tiefe Stb. (14 cm) 1,77 1,17 1,47 ^b			2,17	2,38	2,28 ^b	1,20	1,05	1,12 ^a	
Diff.	-0,01	+0,53 +0,13 +0,29			+0,48	+0,37	+0,48	+0,15	-0,06	+0,05	
GD	0,21	0,27					0,18			0,14	
	20.-22.7.18		24.-27.7.18			28.7.-5.8.18			6.-16.8.18		20.7.-16.8.18
	mm/d		Nied.: 0,04 mm/d mm/d			Nied.: 2,8 mm/d			Nied.: 0,2 mm/d		mm/d
	Ø	k	lö	Ø	k	lö	Ø	k	lö	Ø	
1	Stroh breit 0,73 ^a	Stroh + flache Stb. (6 cm) 1,02 ^a 0,96 ^a 0,99 ^a			1,52 ^a	1,94 ^a	1,73 ^a	0,86 ^a	0,80 ^a	0,83 ^a	1,2
2	Stroh breit 0,72 ^a	Stroh + tiefe Stb. (14 cm) 1,48 ^a 1,19 ^a 1,30 ^b			2,09 ^a	2,26 ^a	2,20 ^b	1,05 ^a	0,73 ^a	0,85 ^a	
Diff.	-0,01	+0,46 +0,23 +0,31			+0,57	+0,33	+0,47	+0,19	-0,07	+0,02	
GD	0,03	0,10 0,11 0,10			0,11	0,16	0,16	0,14	0,10	0,11	

Stb...Stoppelbearbeitung GD...Grenzdifferenz, Tukey, Diff...Differenz zwischen Var. 2 und 1, Wiederholungszahl der Varianten: 6 (2016) und 8 (2018)

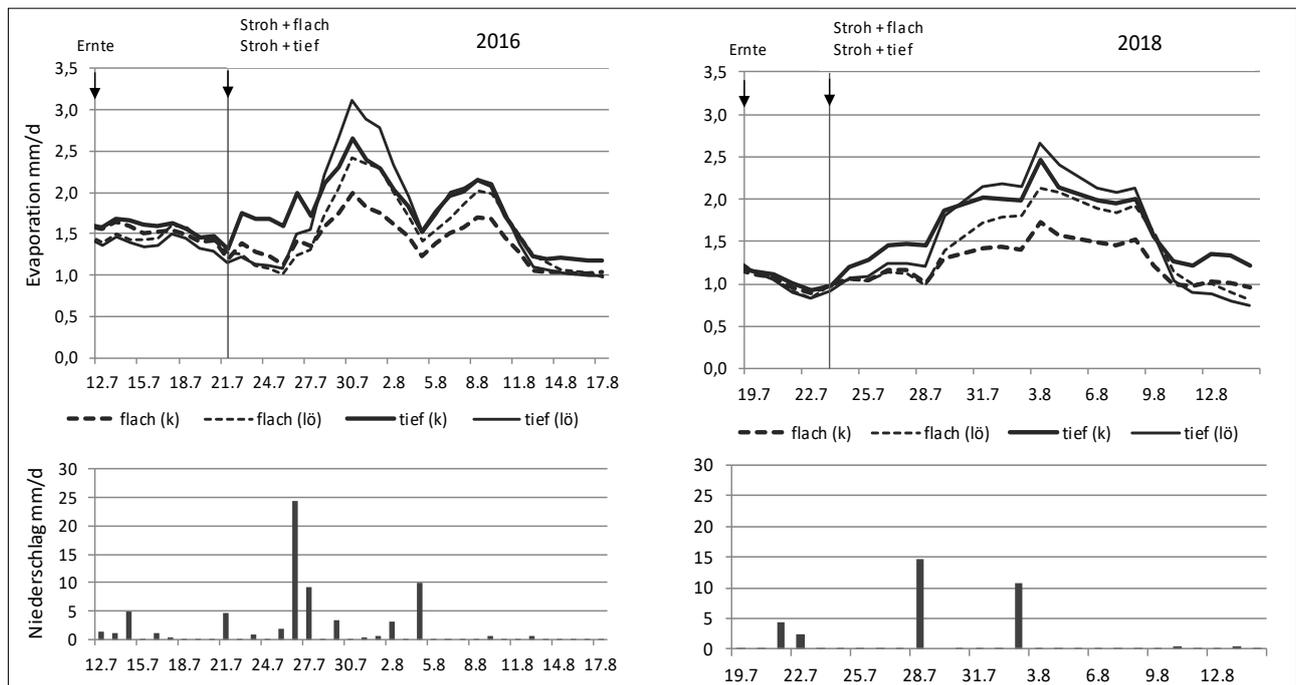


Abbildung 4: Evaporation von flachem Stoppelsturz mit Stroh im Vergleich zu tiefem Stoppelsturz mit Stroh (2016, 2018) im zeitlichen Verlauf (gleitendes Pentadenmittel).

Wärme an die Atmosphäre zur Verfügung (Scheffer & Schachtshabel 2010). Bei einer geschlossenen Strohecke ist der Albedo höher als bei einer durch flachen Stoppelsturz erzeugten Mischschicht aus Boden und Stroh, die im Versuchsjahr 2010 einen Stroheckegrad von etwa 50 % aufwies. Durch eine vollständig mit Stroh bedeckte Bodenoberfläche wird somit der Anteil der für die Verdunstung des Bodenwassers wirksamen Energieeinstrahlung

stärker vermindert als bei einem Gemisch aus Stroh und Boden. Die Evaporation wird des Weiteren bestimmt vom Sättigungsdefizit der oberflächennahen Luft, dem Potenzialgradienten zum oberflächennahen Bodenwasser, der ungesättigten Wasserleitfähigkeit des Bodens und der Windgeschwindigkeit. Durch eine Strohecke wird der sich in der bodennahen Luftschicht ansammelnde Wasserdampf vor dem Abtransport durch den Wind länger geschützt, wo-

durch der den Wasserdampffluss antreibende Gradient zum oberflächennahen Bodenwasser länger geringer gehalten wird. Die bei einem flachen Stoppelsturz erzeugte dickere und mit Bodenteilchen vermischte Schicht kann mehr Niederschlagswasser speichern. Gleichzeitig begünstigen die durch Lockerung hergestellten Hohlräume Luftturbulenzen, die den aus den Bodenaggregaten austretenden Wasserdampf schneller zur Atmosphäre abtransportieren können. Das bedeutet der vergrößerte Bodenwasserspeicher der Stroh-Boden-Schicht wird auch schnell wieder entleert bei entsprechenden Bedingungen der Einstrahlung. Begünstigt wird dieser Prozess durch eine verminderte Wärmeleitfähigkeit der gelockerten Schicht (Bachmann 1997). Hohe Temperaturen werden weniger in den Unterboden übertragen, verbleiben in der gelockerten Schicht und erhöhen die Evaporation.

Der höhere Wasserverbrauch eines nach der Ernte baren und unbearbeiteten Bodens im Vergleich zum flachem Stoppelsturz mit Stroh kann einerseits mit dem geringeren Albedo und der dadurch höheren Einstrahlungsenergie, andererseits mit dem schnelleren Abtransport des aus dem Boden austretenden Wasserdampfes durch den Wind erklärt werden.

Zwischen flacher und tiefer Stoppelbearbeitung eines mit Stroh bedeckten Bodens zeigte sich in den Versuchsjahren 2016 und 2018 unter dem Einfluss niederschlagsnormaler und trockener Witterung ein signifikanter Unterschied. Tiefere Bearbeitung führte in den folgenden 17 bzw. 13 Tagen zu einer um 0,44 bzw. 0,42 mm/d höheren Verdunstung. Ein Aspekt dafür ist der bei tieferer Bearbeitung geringere Bedeckungsgrad mit Stroh und der daraus folgenden höheren Einstrahlungsenergie.

In den ersten 4 Tagen war das Niederschlagsaufkommen sehr gering und resultierte der Wasserverbrauch vor allem aus dem zuvor vorhandenen Bodenwasservorrat. Der Unterschied zwischen flacher und tiefer Bearbeitung war in diesen Tagen bei der lehmig-tonigen Rendzina deutlich stärker ausgeprägt als beim lehmig-schluffigen Lössboden. Die Rendzina wies nach der Bearbeitung ein mittleres bis grobes Bröckelgefüge auf, während beim Lössboden ein feinbröckeliges Gefüge festzustellen war. Das bei der Rendzina gröbere Gefüge hatte offenbar stärker als beim Lössboden Luftturbulenzen begünstigt, wodurch es zu einer höheren Verdunstung kam.

In der darauffolgenden niederschlagsreichen Phase stieg die Verdunstung des tiefer bearbeiteten Lössbodens besonders stark an und lag etwas über dem Wert der tief bearbeiteten Rendzina. Vermutlich war nun die bessere ungesättigte Wasserleitfähigkeit des sehr feinen bis feinen Bröckelgefüges des Lössbodens für den starken Anstieg der Verdunstung des bis in 14 cm Tiefe bearbeiteten Bodens ausschlaggebend. Überraschenderweise fiel in dieser niederschlagsreichen Periode auch die Verdunstung des flach bearbeiteten Lössbodens höher aus als die der flach bearbeiteten Rendzina. Dem Lössboden ist nicht nur wegen seines schluffig-lehmigen Substrates, sondern auch wegen seines Nadelstichporengefüges eine im Vergleich zur lehmig-tonigen Rendzina bessere Wasserleitfähigkeit zuzuordnen. Möglicherweise haben beide Eigenschaften den höheren Wasserverlust über Evaporation auch aus dem unbearbeiteten, oberflächennahen Bodenhorizont begünstigt. Ein weiterer Aspekt für die Verdunstungsunterschiede zwischen flacher und tiefer Bearbeitung ist auch hier die geringere Wärmeleitfähigkeit einer gelockerten Schicht, wodurch die Temperatur in dieser Schicht höher bleibt. Bei tieferer Bearbeitung wird dadurch ein größerer Bodenwasserspeicher einer höheren Temperatur ausgesetzt und die Verdunstung dadurch begünstigt.

Schlussfolgernd ist festzustellen, dass eine Strohecke nach Aberntung der Kulturen den Wasserverlust aus dem Boden am stärksten mindern kann. Eine Stoppelbearbeitung, die aus ackerbaulicher Sicht eine wichtige Maßnahme darstellt (Begünstigung des Aufwuchses von Ausfallgetreide, Förderung der Umsetzung der organischen Substanz, Zurückdrängen von Schaderregern etc.) sollte zur Vermeidung hoher Verdunstungsverluste so flach wie möglich ausgeführt werden. Bei Trockenheit kann es zur Vermeidung hoher Verdunstungsverluste günstig sein, die tiefere Bodenbearbeitung soweit wie möglich in eine strahlungsärmere Periode hinauszuzögern. Das dabei hergestellte Gefüge sollte nicht zu grob sein, um den Abtransport des Wassers durch Luftturbulenzen zu fördern und die nach oben abschließende Schicht nicht zu fein, um die kapillare Wassernachlieferung zu begünstigen.

Literatur

- Bachmann J. (1997) Wärmefluss und Wärmehaushalt. In Blume et al.: Handbuch der Bodenkunde, Kap. 2.7.5.
Scheffer/ Schachtschabel (2010) Lehrbuch der Bodenkunde. S. 239 ff.

Lysimeteruntersuchungen als Schlüssel zum Verständnis der differenzierten Dürreauswirkungen und potentieller Langzeitfolgen

Stefan Werisch^{1*}, Anke Winkler¹, Ulrike Haferkorn¹, L. Jäkel¹ und G. Beeck¹

Zusammenfassung

Im Rahmen der langfristigen Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen der Lysimeterstation Brandis an acht verschiedenen Böden, können die heterogenen Ausprägungen der sommerlichen Dürreperiode 2018 exzellent beobachtet und mit ihren Ursachen und Auswirkungen im Bodenwasserhaushalt beleuchtet werden. Der ortsüblichen Bewirtschaftung folgend wurden in diesem Jahr alle Lysimeter mit Mais bepflanzt. Die gesamte Vegetationsperiode war dabei durch ein geringes Niederschlagsangebot, bei gleichzeitig hohem Verdunstungsanspruch, gekennzeichnet. Bedingt durch den geringen Bodenwasservorrat leichter Böden, waren die ersten Auswirkungen der Dürre bereits Ende Juni auf diesen Lysimetern sichtbar. Ende Juli, verzeichneten alle Lysimeter, außer den Lößstandorten, Transpirationsreduktionen von mehr als 80%. In der Folge ergaben sich bodenspezifische Dürreauswirkungen, die auf leichten Standorten in hohen Ertragsdefiziten sowie N-Überschüssen resultierten und auf schweren Böden zu besonders intensiven Ausschöpfungen des Bodenwasserspeichers führten. Somit wird auf leichten Böden vor allem die Sickerwasserqualität negativ beeinträchtigt, während auf schwereren Böden mit langfristigen Folgen im Bodenwasserhaushalt zu rechnen ist.

Summary

The long term investigations in water- and solute balances of 8 different soils under agricultural land use in the lysimeter station Brandis provide a sophisticated foundation to study the heterogeneous effects and causes of the 2018 drought on regional yield levels and water balances. Following regional cropping schemes, the lysimeters were planted with corn. Low water availability and high levels of potential evapotranspiration were characteristic for the growing period. First indications of the drought conditions in corn became visible on light soils in the end of June. In the end of July all lysimeters, except the heavy soils containing loess, showed reductions of transpiration of more than 80%. Consequently, the drought effects were highly soil specific and resulted in high yield gaps and according nitrogen excess on light soils, while the heavy soils show historic soil water storage depletions. Consequently, in the long term the drought will have negative impacts on the seepage water quality on light soils, while on heavy soils the long term effects will affect the soil water budget.

Einleitung

Als direkte Effekte ausgeprägter Trockenphasen oder Dürren treten häufig Ertragseinbußen als unmittelbare Folgen auf. Welche konkreten standortspezifischen Auswirkungen eine solche Dürreperiode hat, hängt allerdings von mehreren Faktoren ab. Insbesondere bodenspezifische Eigenschaften welche die Wasserverfügbarkeit und Wasserverteilung innerhalb der Wurzelzone beeinflussen sind von entscheidender Rolle für die konkreten Auswirkungen lang anhaltender Trockenperioden. Neben den häufig diskutierten und medial wirksamen direkten Folgen, bergen solche Extremereignisse auch das Potential für langfristige Folgen. Nachfolgend soll anhand der Lysimeteruntersuchungen in der Lysimeterstation Brandis gezeigt werden, wie differenziert und vor allem bodenspezifisch sich die außergewöhnliche Trockenperiode 2018 ausgewirkt hat und mit welchen potentiellen Langzeitfolgen zu rechnen ist.

Material und Methoden

In der Lysimeterstation Brandis werden seit November 1981 Langzeituntersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung

durchgeführt. Zur Beobachtung des Wasserhaushaltes verschiedener, typisch sächsischer Ackerböden wurden dazu 1978/79 insgesamt 24 monolithische Lysimeter mit 3m Tiefe und 1m² Oberfläche auf 8 verschiedenen Herkunftsfleichen gewonnen. Die Erfassung der Lysimetergewichte erfolgte seit Inbetriebnahme der Station über eine Hebelwaage und wird mittlerweile digital aufgezeichnet. Die messtechnische Auflösung der Wägeeinheit beträgt ±0.1mm. Bei allen Lysimetern handelt es sich um klassische Sickerwasserlysimeter bei denen das Sickerwasser im unteren Teil (~2.75m) der Lysimeter gefasst wird. Die Erfassung der Sickerwassermengen erfolgt täglich durch Wägung. Der zur Berechnung der Evapotranspiration benötigte Niederschlag wird ebenfalls täglich ermittelt. Die Niederschlagsmessung erfolgt dabei auf Bodenniveau und die täglichen Niederschlagssummen werden einer Richterkorrektur unterzogen (Richter 1995).

Böden

Die zur Untersuchung in der Lysimeterstation ausgewählten Böden sind typisch für die Region um Leipzig und entstammen landwirtschaftlichen Nutzflächen, später

¹ Lysimeterstation Brandis, Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Kleinsteiberger Str. 13, D-04821 BRANDIS

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

Tabelle 1: Eigenschaften von 7 landwirtschaftlich genutzten Böden der Lysimeterstation Brandis. Die Sickerwassermengen (Q), sowie die nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum (nFK_w) sind Mittelwerte aus Beobachtungen von 1981 – 2016, die Austauschrate (AR) gibt die mittlere theoretische Austauschrate des Bodenwassers in der Wurzelzone an. Zusätzlich sind die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit (V_v) und das daraus abgeleitete Verlagerungsrisiko (VR) angegeben (DVWK, 1994).

Lysimeter- gruppe	Bodenart	$\sum Q$ [mm a ⁻¹]	nFK_w [mm] (max.)	AR [%]	\bar{V}_v [dm a ⁻¹]	VR
5	IS/D3	189	53 (75)	356	15	groß
8	sL/D3	151	89 (142)	169	11	mittel
4	sL/D5	146	93 (142)	157	9	niedrig
1	sL/D6	125	105 (167)	119	7	niedrig
7	sL/D4	111	117 (178)	95	5	sehr niedrig
9	L/Lö3	58	170 (450)	34	2,5	sehr niedrig
10	L/Lö1	47	192 (490)	25	2,1	Sehr niedrig

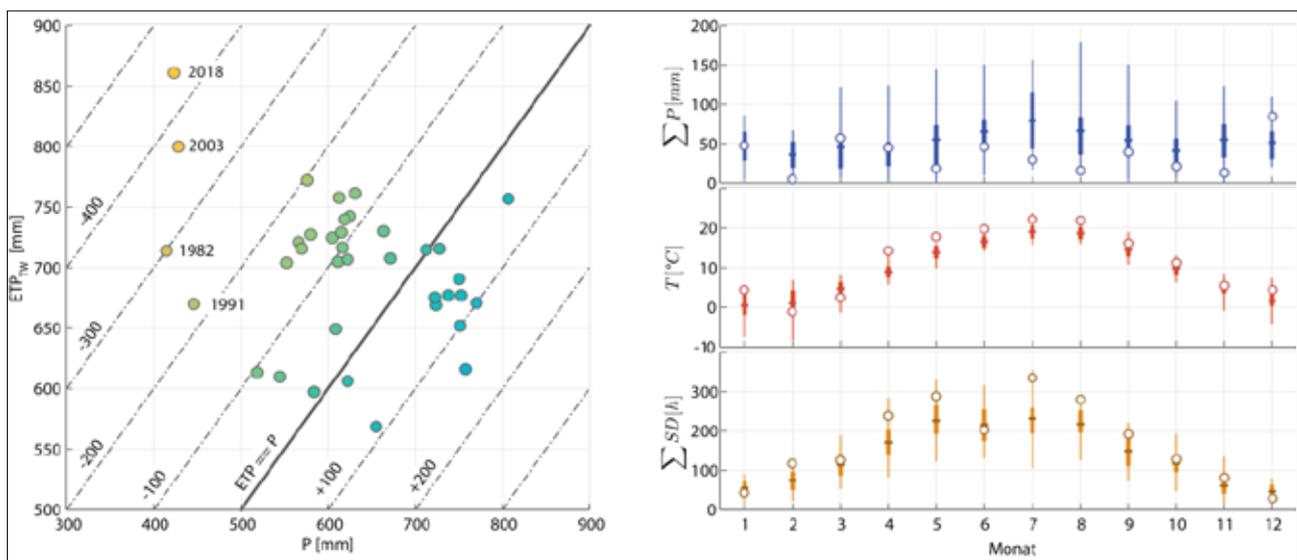


Abbildung 1: Einordnung des Jahres 2018 anhand der klimatischen Wasserbilanz ($P-ETP_{TW}$) in den Beobachtungszeitraum 1981-2018 der Lysimeterstation Brandis (links), sowie die monatlichen Statistiken (1981-2017) der Größen Niederschlag (rechts-oben), Temperatur (rechts-mitte) und der Sonnenscheinstunden (rechts-unten) im Vergleich zum Jahr 2018 (Kreise).

wurden einzelne Lysimeter durch Böden von rekultivierten Tagebauflächen ersetzt. Eine detaillierte Beschreibung der Böden der einzelnen Lysimetergruppen kann *Tabelle 1* entnommen werden. Die Böden sind, ihren Herkunftsflächen entsprechend, durch zunehmende Tiefgründigkeit und Wasserspeicherfähigkeit gekennzeichnet. Es handelt sich dabei um Standorte mit erodierter Braunerde (Gr.5/D3), (Parabraunerde-) Braunerde (Gr.4/D5, Gr.8/D3), Braunerde-Pseudogley (Gr.1/d6, Gr.7/D4) und eine Löß-Parabraunerde (Gr.9/Lö3), sowie um eine Löß-Schwarzerde (Gr.10/Lö1).

Bewirtschaftung

Seit Inbetriebnahme der Lysimeterstation werden nahezu alle Lysimeter hinsichtlich Fruchtfolge, Düngung und dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln einheitlich und in regional typischer Weise bewirtschaftet (Haferkorn 2013). Nach der Ernte des Winterweizens im letzten Jahr wurden auf nahezu allen Lysimetern Phacelia als Zwischenfrucht ausgesät, welche erst Mitte Februar umgebrochen wurde. Im Mai (02.05.2018) erfolgte anschließend die Aussaat von Silomais der Sorte „Katari CS“ auf allen Lysimetern. Auf einigen Lysimetern waren zur anfänglichen Bestandesetablierung Bewässerungsgaben von 20 mm notwendig. Bedingt

durch die extreme Trockenheit und die Orientierung an der regionaltypischen Bewirtschaftung erfolgte am 09.08.2018 die frühzeitige Ernte um ausreichende Pflanzenwassergehalte für die Biogasnutzung gewährleisten zu können.

Ergebnisse

Eine Einordnung der außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen des Jahres 2018 in den historischen Beobachtungszeitraum erfolgt in *Abbildung 1*. Das vergangene Jahr sticht dabei durch seine stark negative klimatische Wasserbilanz (~ -437 mm) hervor, welche sich als Differenz aus der potentiellen Evapotranspiration (Turc-Wendling Verfahren, Wendling et al. (1991)) und beobachtetem Niederschlag berechnet. Obwohl es bereits Jahre mit einem ähnlichen geringen Niederschlagsniveau gab (1982, ~ 424 mm), ist 2018 vor allem durch die sehr hohe potentielle Evapotranspiration von 861 mm einzigartig in der Brandiser Beobachtungsreihe. Der Großteil des Niederschlags entfällt dabei auf die Monate Januar, März, April und Dezember. Hingegen ist die Hauptvegetationsperiode (April bis September) durch unterdurchschnittliche und teils extreme geringe monatliche Niederschlagssummen gekennzeichnet, die sich bis Ende November fortsetzten. Ein Ende der meteorologischen Tro-

ckenperiode war erst im Dezember zu verzeichnen indem mit ~89mm ein Fünftel des Jahresniederschlags fielen.

Gleichzeitig wurden in Brandis seit April überdurchschnittliche Monatsmitteltemperaturen, Sonnenscheindauern und damit verbunden auch Strahlungssummen erfasst. In der Folge waren die Monate Mai bis November durch sehr hohe Verdunstungsansprüche bei gleichzeitig minimaler atmosphärischer Wassernachlieferung gekennzeichnet.

Auswirkung auf die Evapotranspiration

Die Verläufe der täglichen Evapotranspirationsraten (ET_r) der verschiedenen Lysimeter sind in *Abbildung 2* zusammen mit den täglichen Niederschlägen dargestellt. Um die Reduktion der realen Evapotranspiration auf den verschiedenen Böden besser sichtbar zu machen ist zusätzlich für jeden Boden der prozentuale Anteil der Transpiration in Bezug auf eine Referenztranspiration (T_r) dargestellt. Die Referenztranspiration berechnet sich dabei aus der Differenz der aktuellen Evapotranspiration von L10/3 und eines Brachelysimeters. Das Lysimeter L10/3 dient dabei als Referenz, da es die ganze Vegetationsperiode hindurch die höchsten Evapotranspiration aufwies. Unter der Annahme, dass die Verdunstungsverluste auf dem Brachelysimeter mangels Vegetation rein durch Evaporation getrieben sind und diese auf den bewachsenen Lysimetern in einer ähnlichen Größenordnung liegt jedoch keinesfalls größer ist, berechnet sich der Transpirationsterm zu:

$$T_r = ET_a^{10/3} - ET_a^{Brache}$$

Aufgrund der ausreichenden Wasserversorgung, des geringen atmosphärischen Verdunstungsanspruchs (ET_p), der anfänglichen Brache auf den Lysimetern und dem anschließenden Aufwuchs der jungen Maispflanzen sind in den Monaten April und Mai keine wesentlichen Unterschiede in

den täglichen Verdunstungsraten ersichtlich. Erste Reduktionen der ET_r werden Mitte Juni auf dem leichtesten Boden (L5/5) sichtbar. Parallel dazu sind ebenso geringere Transpirationsraten auf dem Lößboden von L9/1 sichtbar, die jedoch durch einen Entwicklungsrückstand der Vegetation bedingt sind. Diese sind vor allem durch die geringe Bodenfeuchte des Oberbodens zum Aussaatzeitpunkt auf diesem Lysimeter begründet. Anfang Juni gab es ein einzelnes Niederschlagsereignis mit ~36mm Niederschlag das zu einer Befuchtung der Oberböden aller Lysimeter führte, wodurch sich die Transpirationsraten der Lysimeter temporär wieder angleichen. Diese vorübergehende Auffüllung war Mitte Juni (20.06.) bereits aufgezehrt, wodurch die Vegetation auf dem leichtesten Boden (L5/5) in Trockenstress geriet, welcher binnen 10 Tagen zu Transpirationsreduktionen von ca. 70% führte (30.06). Ebenfalls Ende Juni wurden auch die ersten Trockenstressindikatoren, in Form von Blattrollen, auf den Lysimetern L4/7 und L8/5 sichtbar, welche sich in Reduktionen der Transpiration von 20% manifestierten und damit erste Reaktionen der Pflanzen auf einen limitierten Bodenwasservorrat darstellen. Durch ausbleibenden Niederschlag und den hohen Verdunstungsanspruch konnten im Verlaufe des Juli zunehmende Reduktionen der Transpirationsleistung auf allen drei Lysimetergruppen beobachtet werden, welche Ende Juli in einer kompletten Einstellung der Transpiration auf L5/5 und Reduktionen von bis zu 80% auf L4/7 und L8/5 führten. Diese drastischen Reduktionen führten erstaunlicherweise kaum zu zeitlichen Verschiebungen der Pflanzenentwicklung, in Bezug auf die Erreichung spezifischer Wachstumsstadien, aber zu kleinerem und spärlicherem Wuchs.

Anfang Juli gerieten auch die Lysimeter der Gruppen 1 und 7 in Trockenstress wodurch die Transpiration Mitte Juli bereits um 50% reduziert war und kurz vor der Ernte am

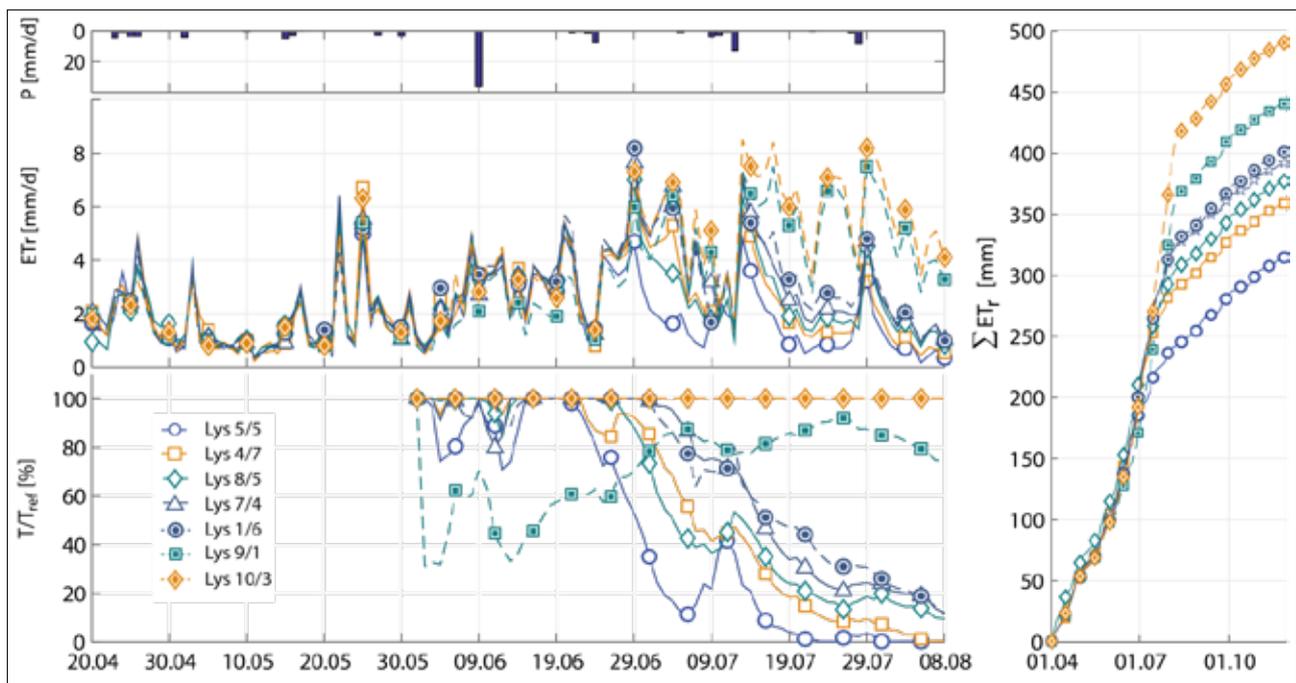


Abbildung 2: Zeitreihen des Niederschlags (P - links oben), der Evapotranspiration (ET_r - links Mitte), dem Verhältnis der Transpirationsleistung des Maisbestandes auf den individuellen Lysimetern im Vergleich zum Referenzlysimeter (T/T_{ref} - links unten) und der Evapotranspirationssumme über den Zeitraum 01.01.2018 - 30.11.2018.

08.08. über 80% Reduktion aufwies. Einzig die schweren Lößböden konnten den Pflanzen ausreichend Wasser zur Verfügung stellen um Evapotranspirationsraten oberhalb der Gras-Referenzverdunstung zu ermöglichen, obwohl auch auf diesen Lysimetern erste Trockenstressindikatoren ab Ende Juli sichtbar waren.

Das versetzte Einsetzen von Trockenstress induzierten Transpirationsreduktionen ist ebenfalls deutlich in den kumulierten Evapotranspirationssummen (Abbildung 2, rechts) ersichtlich. Trotz der trockenen Oberböden wurden in der Zeit nach der Ernte auf allen Lysimetern noch ca. 70mm Wasser durch Evaporation entzogen, was in etwa der kumulierten Niederschlagssumme (77mm) dieses Zeitraumes entspricht. Dabei zeigten sich keine spezifischen Unterschiede zwischen den einzelnen Lysimetergruppen.

Bodenwasservorrat

Bedingt durch den Zwischenfruchtanbau und die damit verbundenen Evapotranspirationsverluste waren die Bodenwasserspeicher zu Jahresbeginn nur in der Lysimetergruppe 8 gefüllt, da auf dieser kein Zwischenfruchtanbau stattfand. Alle anderen Böden starteten bereits mit einem Defizit, welches auch auf keinem Lysimeter zum Zeitpunkt der Maisansaat komplett aufgefüllt werden konnte. In der Folge fand auf keiner dieser Lysimeter eine nennenswerte Sickerwasserbildung statt, was insbesondere für die leichten Böden ungewöhnlich ist. Genauere Angaben zu den Füllungen der Bodenwasserspeicher zum Jahresanfang (01.01.), zur Aussaat der Hauptfrucht (02.05.) und zur Ernte (09.08.) kann Tabelle 2 entnommen werden. Unter Berücksichtigung der teils massiven Reduktion der Evapotranspiration kurz vor der Ernte kann davon ausgegangen werden, dass die Zehrung der Bodenwasserspeicher zu diesem Zeitpunkt, zumindest auf den leichten Böden in etwa der nutzbaren Feldkapazität in der Wurzelzone entspricht.

Die zeitliche Entwicklung der Bodenwasserpeicherung ist zusätzlich in Abbildung 3 dargestellt. Es sind sowohl die bereits diskutierten, unvollständigen Füllungszustände zu Beginn der Vegetationsperiode ersichtlich, sowie die fast simultanen Anstiege der Zehrungen im Juni. Insbesondere die mangelnde Auffüllung der Bodenwasserspeicher nach der Ernte ist durch nahezu identische Niveaus der Bodenwasserspeicherausschöpfung zur Ernte und zum 30.11. sichtbar. Die Konsequenz dieser starken Zehrung der Bodenwasservorräte wird sich wahrscheinlich bodenspezifisch

Tabelle 2: Zustand des Bodenwasserspeichers (BWS) ausgewählter Lysimeter für drei charakteristische Zeitpunkte: (1) Jahresanfang (01.01.), (2) Aussaat der Hauptkultur (02.05), (3) Ernte (09.08.) und die Zehrung des Bodenwasserspeichers während des Pflanzenaufwuchses (Δ BWSA).

Lys.	BWS (01.01.) [mm]	BWS (02.05.) [mm]	BWS (09.08.) [mm]	Δ BWSA [mm]
5/5	-48	-34	-125	77
4/7	-112	-80	-219	107
8/5	0	-32	-173	141
7/4	-118	-79	-250	171
1/6	-158	-130	-310	180
9/1	-673	-632	-843	211
10/3	-571	-543	-808	265

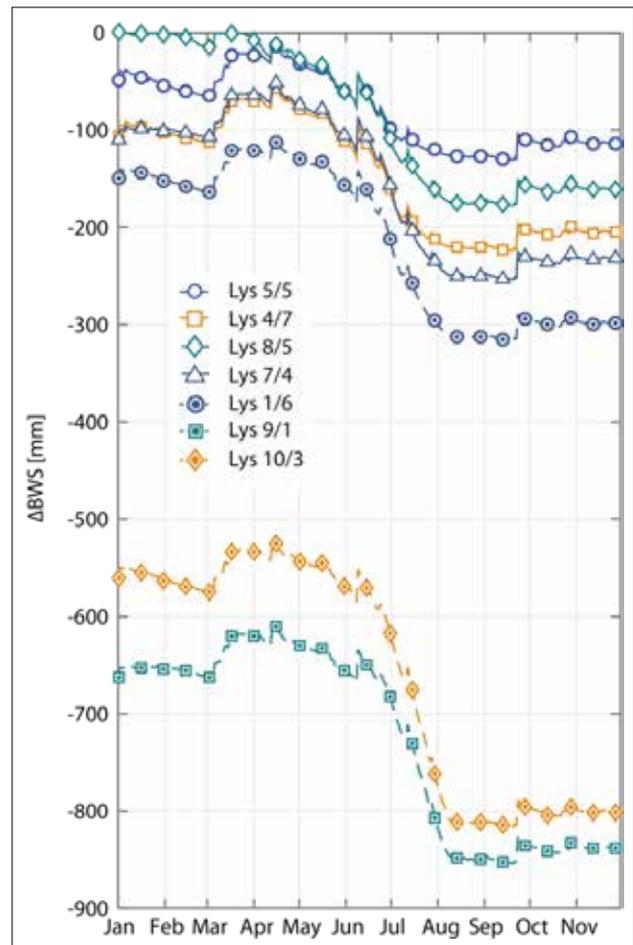


Abbildung 3: Zeitliche Verläufe der Bodenwasserspeicherausschöpfung von 01.01.18 bis 30.11.18.

ausprägen. Auf den sehr leichten Böden (L5/5) und leichten Böden (L4/7, L8/5) ist eine Auffüllung durch die Winterniederschläge wahrscheinlich, da 89mm dieses Defizits bereits im Dezember aufgefüllt wurden und die durchschnittlichen, kumulierten Niederschlagssummen von Januar bis inklusive April 170mm betragen. Eine vollständige Auffüllung der Speicher der mittleren Böden (L1, L7) ist möglich, hängt aber stark von den tatsächlichen Höhen der Winterniederschläge und dem Verdunstungsanspruch der Folgefrucht im Frühjahr ab. Auf den schweren Böden ist eine vollständige Auffüllung der Speicher extrem unwahrscheinlich. In der Folge ist nur auf den leichteren Böden eine Sickerwasserbildung wahrscheinlich. Auf den mittleren Böden ist, wenn überhaupt, nur eine kurze Sickerwasserperiode mit geringer Sickerwasserbildung zu erwarten.

Erträge und N-Bilanzen

Einhergehend mit den außergewöhnlichen meteorologischen Randbedingungen sind die entsprechenden Folgen auf die Ertragsniveaus und Stickstoffbilanzen verbunden. Wie bodenspezifisch diese Folgen allerdings ausfallen, ist in Abbildung 4 dargestellt. Die kumulierte Summe der Evapotranspiration zwischen dem 01.04 und 08.08 (Ernte), war in diesem Sommer linear abhängig vom ausschöpfbaren Bodenwasserspeicher in der Wurzelzone. Dieser Effekt tritt selten so deutlich hervor, da in Jahren mit normalem

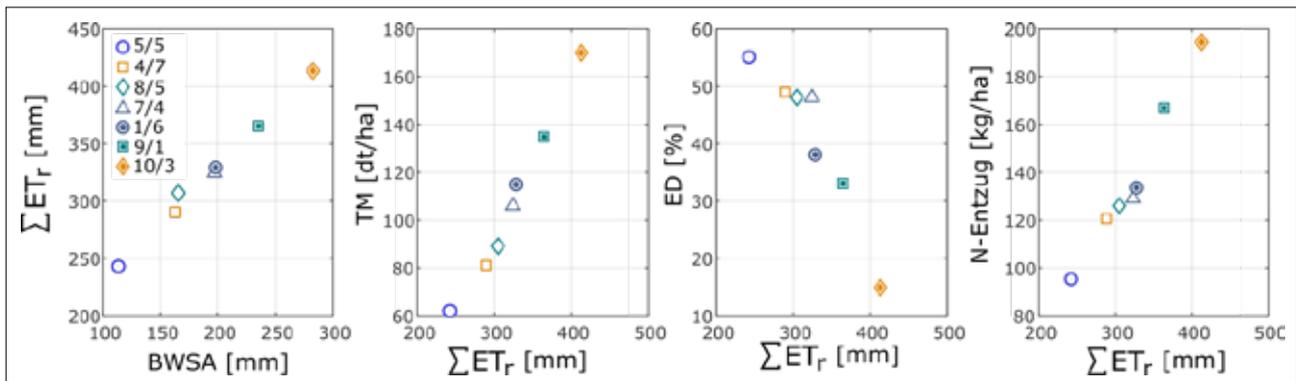


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Bodenwasserspeicherausschöpfung (BWSA) und realer Evapotranspirationssumme (ET_r) (links), sowie zwischen ET_r und den Trockenmasseerträgen (TM) (mitte links), dem Ertragsdefizit zwischen den tatsächlichen und Zielerträgen (mitte rechts), sowie dem pflanzengebundenen N-Entzug (rechts).

Niederschlagsverhalten nur die Böden der Gruppen 5, 4 und 8 auf nahezu den kompletten Bodenwasserspeicher zurückgreifen müssen.

Da die Photosyntheseleistung und damit verbunden das Pflanzenwachstum direkt von der Evapotranspiration abhängig ist, ergibt sich ebenfalls ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der kumulierten Summe der Evapotranspiration und den Trockenmasseerträgen. Trotz der vorzeitigen Ernte, wurden auf den Lößstandorten fast die Zielerträge erreicht, während hingegen auf den anderen Standorten teils deutliche Ertragseinbußen eintraten. Je leichter der Boden, desto geringere Erträge konnten erzielt werden und desto größer war die Differenz zu den bodenspezifischen Zielerträgen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ernte vorzeitig erfolgte, was natürlich zu dieser Situation beigetragen hat. Nichtsdestotrotz kann aus der Einstellung der Transpiration auf L5 und den starken Reduktionen auf L4, L8, L7 und L1 von bis 80% davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt der Ernte bereits irreversible Trockenschäden bestanden, weshalb auch eine längere Standzeit vermutlich nicht zu höheren Erträgen geführt hätte. Hingegen hätten auf den Lößstandorten die Ertragsdifferenzen vermutlich noch geschmälert werden können.

Ebenfalls eine direkt vom Ertrag, und damit indirekt von der Evapotranspiration, abhängige Größe ist der pflanzengebundene Stickstoffentzug. In der Folge ist auch zwischen N-Entzug und Evapotranspirationssumme ein nahezu perfekt linearer Zusammenhang zu verzeichnen. Bedingt durch die lange Trockenphase haben sich in diesem Jahr die Zusammenhänge zwischen Bodenwasserspeichervermögen, Evapotranspiration, Trockenmasseerträgen und den damit verbundenen N-Entzügen besonders deutlich herausgebildet.

Potentielle Langzeitfolgen der Dürre

Neben den bereits aufgezeigten unmittelbaren Folgen des Trockensommers besteht auch die konkrete Gefahr potentieller Langzeitfolgen, welche wiederum bodenspezifisch ausfallen können. Bedingt durch die geringe Evapotranspirationssumme auf leichten Standorten und den damit verbundenen Ertragseinbußen verbleiben insbesondere auf diesen Standorten hohe Stickstoffmengen im Boden (Abbildung 5, oben). Konkret liegen die N-Salden für die Lysimeter L5, L4, L8 und L7 > 50kg/ha, wobei dafür lediglich die

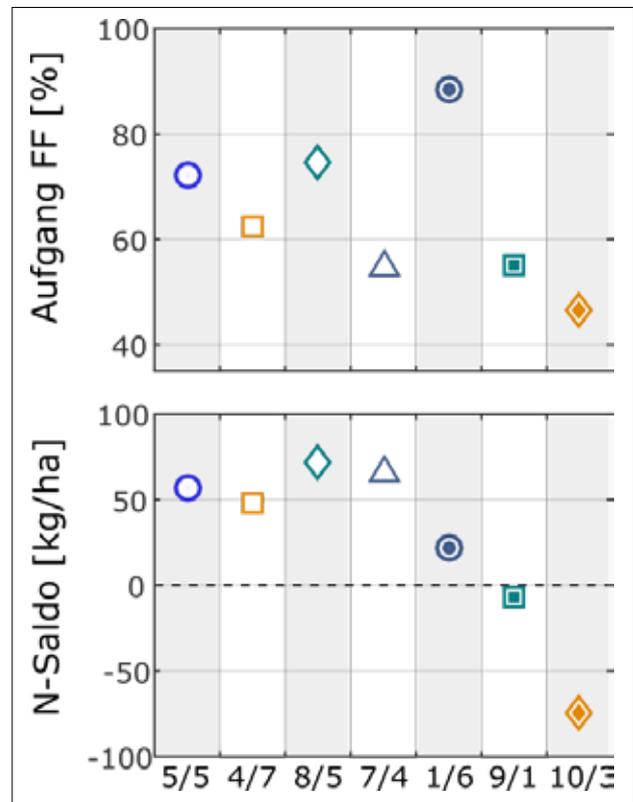


Abbildung 5: Bereits sichtbare Langzeitfolgen der Dürre 2018 durch verminderte Keimraten des Winterweizens (Aufgang FF), sowie den N-Salden in Abhängigkeit der Lysimeter.

mineralisch verfügbare Stickstoffmenge im Frühjahr, die Düngemenge und der Ernteentzug miteinander verrechnet werden. Weitere potentielle N-Quellen wie Depositionen aus dem Niederschlag und Mineralisierungsprozesse sind dabei nicht berücksichtigt. Hingegen ist das N-Saldo für L1 zwar positiv aber kleiner 50kg/ha. Für die schweren Böden L9 und L10, fielen die N-Salden trotz der Dürrebedingungen negativ aus.

Die Ursachen dafür liegen in der Wasserverfügbarkeit der Standorte. Während auf den Lysimetern L5, L4, L8 und L7 zwar historische Speichertiefststände zum Ende des hydrologischen Jahres erreicht wurden, sind diese nur geringfügig größer als die 75% Perzentile aus dem Zeitraum

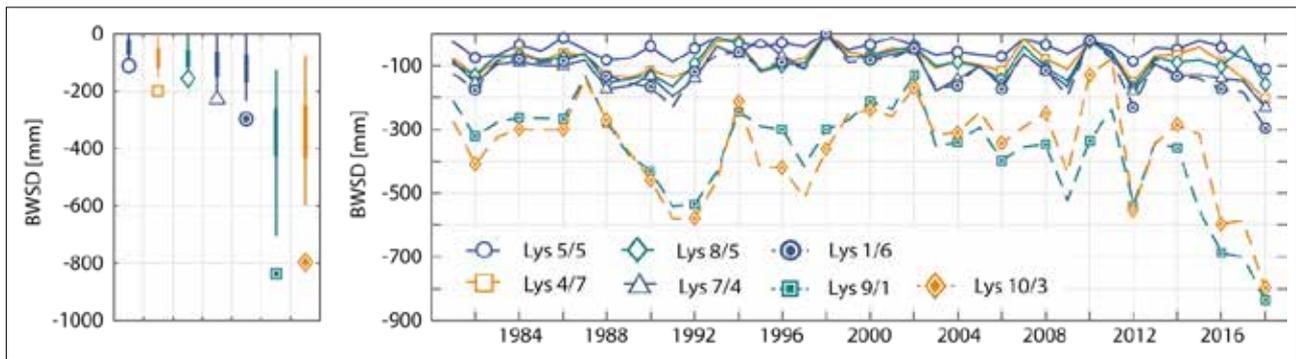


Abbildung 6: Bodenwasserspeicherdefizit am Ende des hydrologischen Jahres (30.10.) 2018 im Verhältnis zu den historischen Beobachtungen (1981 – 2017) (links), sowie die Entwicklung dieses Speicherdefizits über den gesamten Beobachtungszeitraum (rechts).

1981- 2017. In der Konsequenz ist auf diesen Standorten, unter Annahme mittlerer Winterniederschläge, mit einer Verlagerung der N-Überschüsse in tiefere Bodenschichten zu rechnen, jedoch nicht mit langfristigen Folgen für den Wasserhaushalt dieser Standorte.

Umgekehrt sind auf den schwereren Böden ebenfalls historische Tiefststände der Bodenwasserspeicher zu verzeichnen, diese weisen aber zusätzlich noch deutliche Differenzen zu den historischen Extremen (100% Perzentile des Zeitraumes 1981 - 2017) auf. Insbesondere auf den Lysimetern L9 und L10 sind mit Ausschöpfungen <-800mm Defizite entstanden die selbst eine mittlere Jahressumme des Niederschlags nicht auffüllen würde. *Abbildung 6* zeigt, dass diese Defizite zwar nicht nur durch die Trockenperiode 2018 ausgelöst bedingt sind, sondern ebenfalls die Folge einer längeren Phase (~5 Jahre) mit negativen klimatischen Wasserbilanzen (ETP > P) und den aktuellen Bewirtschaftungsmaßnahmen ist, die Trockenperiode jedoch einen maßgeblichen Anteil hat. Nichtsdestotrotz ist es wahrscheinlich, dass die extremen meteorologischen Bedingungen auf den schweren Böden zwar die Sickerwasserqualität nicht negativ prägen werden, jedoch im Wasserhaushalt auch über die Dürreperiode hinaus spürbar sein werden.

Es stellt sich noch die Frage, welche Auswirkungen für die Folgefrucht zu erwarten sind. In Brandis, wurde nach dem Mais Winterweizen angebaut, welcher im Oktober (11.10) ausgesät wurde. *Abbildung 5* zeigt den Anteil der aufgegangenen Weizenkeimlinge 8 Wochen nach der Aussaat. Dabei sind zwei Effekte deutlich: (1) Der Aufgang der Folgefrucht ist auf allen Lysimetern deutlich unter den Erwartungen (98% Aufgang) geblieben und (2) die geringsten Keimraten sind auf den schweren Lößböden zu beobachten. In der Folge ist zu erwarten, dass die vorangegangene Trockenperiode nicht nur die aktuellen Erträge beeinträchtigt hat, sondern

sich vielmehr auf allen Böden auch auf die Erträge der Folgefrucht auswirken wird und dies wahrscheinlich stärker auf den schweren, als auf leichten Standorten.

Zusammenfassend muss davon ausgegangen werden, dass sich die Dürreperiode 2018 auch längerfristig bemerkbar machen wird. Vor allem durch: (1) hohe Nitratreinträge in die Perkolationszone leichter Böden, (2) starke Beanspruchungen der Bodenwasservorräte auf schweren Böden mit potentiellen Limitierungen für die Fruchtfolge und (3) suboptimale Erträge durch die niedrige Keimraten der Folgefrucht.

Literatur

- DWVK Schriften 106 (1994) Verminderung des Stickstoffaustrages aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in das Grundwasser – Grundlagen und Fallbeispiele, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), ISBN 3-922671-43-8 .
- Haferkorn U. (2013) N-Auswaschung unter Ackernutzung auf Böden der sächsischen Lößgefilde. In: Knoblauch, S., Albert, E., Haferkorn, U., Heyn, J., Herold, L., Lippold, T., Lehmann, E., Lorenz, J., Zachow, B., Meißner, R., Seeger, J., Schrödter, M., Strauß, C. (2013): Kooperation Lysimeter - Wirkung landwirtschaftlicher Nutzung auf die N-Auswaschung anhand langjähriger Lysimetermessungen in Mittel- und Nordostdeutschland und Schlussfolgerungen für die Minimierung der N-Befrachtung der Gewässer. Broschüre, BfUL, Brandis, 2013, S. 117 - 142, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/20214>.
- Richter D. (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, Offenbach.
- Wendling U., Schellin H.-G., Thomä M. (1991) Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. Zeitschrift für Meteorologie, 41, 468-475.

Langzeituntersuchungen zum Sickerwasser- und Stickstoffaustrag in Abhängigkeit von Bodenart, Nutzung und Mineraldüngung

Janine Köhn^{1*}, Ralph Meißner^{2,3}, Holger Rupp³ und Frido Reinstorf¹

Zusammenfassung

Ein Wandel des Klimas ist schon heute zu beobachten. Besonders Veränderungen von Temperatur und Niederschlag können sich auf den Bodenwasser- und Boden-nährstoffhaushalt auswirken. Mithilfe der langjährigen Messungen des Sickerwasser- und des Stickstoffaustrags an der UFZ-Lysimeterstation Falkenberg wurden Analysen zum Trendverhalten dieser Größen durchgeführt. Durch einen speziellen Versuchsaufbau wurde zudem untersucht, ob sich die Trends hinsichtlich der Landnutzung, Bodenarten oder Düngemenge unterscheiden.

Die Trendanalysen zeigten, dass die Sickerwasserrate stark von der Beregnung im Versuchszeitraum abhängig und tendenziell -jedoch noch nicht signifikant- ansteigend war. Sandböden reagierten eindeutiger auf die Änderung der klimatischen Parameter als die anderen Bodenarten. Die Menge an Dünger hatte keinen nachweisbaren Effekt auf die Größe des Sickerwassertrends. Zum Teil konnten gegensätzliche Trends bei den unterschiedlichen Landnutzungen festgestellt werden, die jedoch auf eine unterschiedliche Beregnungshöhe zurückzuführen waren. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für den Stickstoffaustrag herausgearbeitet; jedoch konnten hier häufiger Signifikanzen nachgewiesen werden. Auch wiesen die Stickstoffausträge der Grünlandlysimeter mit einer höheren Düngestufe häufiger einen signifikanten Trend auf.

Schlagwörter: Klimawandel, Langzeittrends, Lysimeter, Düngung, Bewässerung

Summary

Climate change can already be observed. In particular, changes in temperature and precipitation can influence soil water and soil nutrient balance. By using long-term measurements of seepage water and nitrogen leaching at the UFZ Falkenberg lysimeter station, the trend of these parameters was analysed. With a special experimental set-up was also investigated whether the trends differ regarding to land use, soil types or fertiliser quantity.

The trend analyses showed that the seepage water rate was strongly affected by irrigation during the study period. In total, the seepage water tends to increase (but not significantly). Sandy soils were more sensitive to changes in climatic parameters than other soil types. The amount of fertilizer had no noticeable effect on the seepage water trend. In some cases contradictory trends were observed for different types of land use, but these were caused by different amounts of irrigation. Similar results were also noticed for nitrogen leaching, whereby changes in nitrogen leaching were more often significant. Nitrogen leaching of Grassland lysimeters with a higher fertilisation level also showed a significant trend more frequently.

Keywords: climate change, long term trend analysis, lysimeter, fertilization, irrigation

Einleitung

Um die Folgewirkungen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt zu erfassen, wurden langjährig vorliegende meteorologische Messreihen ausgewertet (Kreienkamp et al. 2012) und mithilfe von Klimamodellen zukünftige Entwicklungsszenarien simuliert (Kropp & Roithmeier et al. 2009). Die Änderung von Temperatur und Niederschlag wirken sich auch auf den Bodenwasserhaushalt aus. Studien deuten darauf hin, dass die Entwicklung der Grundwasserneubildung in starkem Maße von der Niederschlagsänderung und -verteilung abhängig ist (Pfützner et al. 2012). Kropp et al. (2009) vermuten eine Zunahme der Sickerwasserrate im

Winterhalbjahr, wobei die Phasen in denen Sickerwasser gebildet wird, sich verkürzen werden. Gleichzeitig wird angenommen, dass durch die Zunahme der Temperatur und dem Abbau organischer Substanz Nährstoffe, insbesondere die Stickstoffverbindungen, verstärkt ausgetragen werden (Davidson & Janssens 2006, Kirschbaum 2006, Labo 2010). Generell sind die Veränderungen im Bodenwasser- und Stoffhaushalt jedoch schwer abschätzbar und häufig nur spekulativ. Untersuchungen an Grünlandlysimetern an der Lysimeterstation Falkenberg (Köhn et al. 2017) zeigten ein deutliches Änderungsverhalten der Sickerwasserrate im Frühjahr. Durch die signifikant abnehmenden Temperaturen und sinkenden Niederschläge konnte hier ein

¹ Hochschule Magdeburg Stendal, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit, Lehrgebiet Hydrologie und Geographische Informationssysteme, Breitscheidstraße 2, D-39114 MAGDEBURG

² Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Naturwissenschaftliche Fakultät III, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Julius-Kühn-Straße 23, D-06112 HALLE (SAALE)

³ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Lysimeterstation, Falkenberg 55, D-39615 ALTMÄRKISCHE WISCHE

* Ansprechpartner: M.Eng. Janine Köhn, janine.koehn@hs-magdeburg.de

Rückgang der Rate beobachtet werden, welche sich auf das Pflanzenwachstum auswirkte. In den Wintermonaten nahm die Sickerwasserrate dagegen zu. Untersuchungen im Fläming (östlicher Teil Sachsen-Anhalts), die mithilfe von Klimamodellen durchgeführt wurden, deuteten demgegenüber auf einen generellen Rückgang der Sickerwasserrate hin (Paul 2014).

Mithilfe der seit mehr als 30 Jahren durchgeführten Messungen an 24 Lysimetern der vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ am Standort Falkenberg betriebenen Lysimeterstation, im folgenden Lysimeterstation Falkenberg genannt, wurde eine Trendanalyse durchgeführt. Die Lysimeter wurden dabei unter verschiedenen Aspekten betrieben und unterschieden sich hinsichtlich Bodenart, Nutzung und Düngung. Mithilfe der Auswertung der Lysimeterdaten sollte sowohl der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich Sickerwasser- und Stickstoffaustrag durch den beobachteten Klimawandel verändern, als auch geprüft werden, ob sich diese Trends hinsichtlich Bodenart, Landnutzung und Düngung unterscheiden.

Material und Methoden

Für die Auswertung und Trendanalyse wurden die Daten der Lysimeterstation Falkenberg in Sachsen-Anhalt (52°51'N, 11°48'E) verwendet. Hier werden seit 1982 Versuche an 24 nicht wägbaren Vollmantellysimetern (Oberfläche = 1 m²; Tiefe = 1,25 m) durchgeführt (Abbildung 1). Davon wurden jeweils 6 Lysimeter zweischichtig mit einer der Hauptbodenarten Sand (S), Sandiger Lehm (IS), Lehm (L) und Tonigem Schluff aus Löss (SIL) gefüllt. Die Bodenarten sind dabei repräsentativ für landwirtschaftliche genutzte Böden im Flachlandbereich des Elbeinzugsgebietes der neuen Bundesländer (Meißner et al. 1995, Godlinski 2005). Für jede Bodenartgruppe werden noch einmal je 3 Lysimeter in einer Grünlandnutzung (GL) und 3 Lysimeter in einer Ackernutzung (AL) bewirtschaftet, welche wiederum jeweils mit einer von drei Düngevarianten angelegt worden sind. Die ackerbaulich genutzten Lysimeter werden in einer Getreide-Feldfutter-Fruchtfolge (Klee gras – Winterweizen – Wintergerste – Hafer mit einer Mais/Sonnenblumen-Zwischenfrucht) genutzt. Die mineralische Düngung staffelt sich

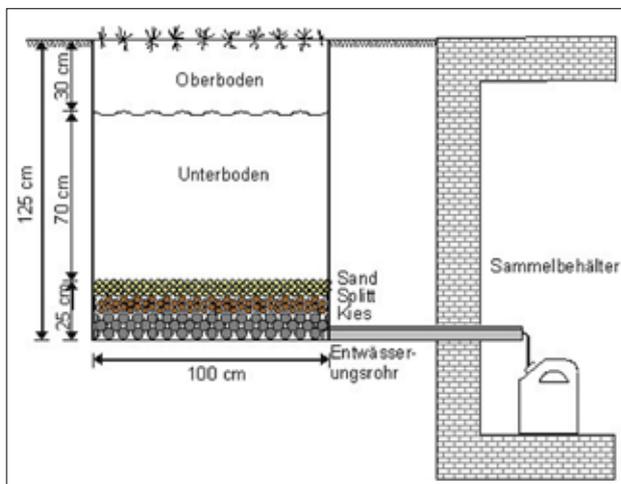


Abbildung 1: Schema eines Grünlandlysimeters (Godlinski 2005).

in 3 Varianten, wobei die 100%-Variante der fruchtartspezifischen empfohlenen Menge entspricht (angelehnt an die in der frühen DDR genutzten Beratungssysteme) und die Varianten 50% und 150% jeweils durch Zu- bzw. Abschläge erhalten werden. Die GL-Lysimeter werden einer Vierschnittnutzung unterzogen und seit 1982 bedarfsgerecht beregnet (seit 1982 im Durchschnitt 202 mm/a, Beregnung erfolgte i.d.R. von April bis September). Bei den AL-Lysimetern setzte eine Beregnung 1987 ein (seit 1987 durchschnittlich 153 mm/a, Beregnung erfolgte i.d.R. von April bis September). Nach 2003 wurde die Beregnung bei beiden Nutzungsvarianten eingestellt (Notbewässerung im Mittel ca. 3 mm/a). Bewirtschaftungsdaten können Meißner et al (1995) oder Godlinski (2005) entnommen werden.

Für die Sickerwasser- und Stickstoffausträge lagen monatliche Daten seit 1982 vor, die Auswertung wurde jedoch für den Zeitraum von 1984 bis 2015 vorgenommen, um störende Effekte der Bodenkonsolidierung in den ersten beiden Jahren nach der Befüllung der Lysimeter auszuschließen. Die aufgeführten Jahre stellen jeweils ein Lysimeterjahr dar, das sich von Mai bis April des Folgejahres erstreckt. Als Parameter für die statistischen Untersuchungen wurden die Sickerwassermenge und der Austrag von Gesamtstickstoff (N_{ges} = Summe aus Nitrat- ($\text{NO}_3\text{-N}$), Nitrit- ($\text{NO}_2\text{-N}$), Ammonium- ($\text{NH}_4\text{-N}$)) ausgewertet. Parallel dazu wurden die meteorologischen Daten der nahegelegenen DWD-Wetterstation Seehausen hinzugezogen, welche als Tageswerte von 1977 bis 2018 vorliegen. Aufgrund der systematischen Messfehler, wurden die Niederschlagshöhen von der DWD-Wetterstation Seehausen nach dem Verfahren nach Richter (1995) bzw. nach ATV-DVWK-M 504 korrigiert (Annahme einer leicht geschützten Lage). Die potenzielle Verdunstung ist als FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) gemäß ATV-DVWK-M 504 berechnet worden.

Um zu gewährleisten, dass die Effekte der Beregnung sich nicht auf die Ergebnisse der Trendanalyse auswirken,

Tabelle 1: Mittelwerte und Trends ausgewählter Klimaparameter an der DWD-Wetterstation Seehausen (tägliche Zeitreihe von 1977 bis 2017).

DWD-Wetterstation Seehausen (1977-2017)			
	Lufttemp. [°C]	Niederschlag [mm]	Verdunstung [mm]
Jahr	9,3 (++++)	641 (+)	654 (+++)
SommerHJ	15,1 (++++)	352 (+)	510 (+++)
WinterHJ	3,9 (+++)	289 (+/-)	144 (+++)
Frühjahr	5,1 (++++)	125 (-)	193 (+++)
Sommer	16,3 (++++)	189 (+)	321 (+++)
Herbst	13,9 (+++)	162 (+)	106 (+)
Winter	2,7 (+)	164 (+)	35 (+)

Frühjahr – März, April, Mai; **Sommer** – Juni, Juli, August; **Herbst** – September, Oktober, November; **Winter** – Dezember, Januar, Februar

- nicht signifikant sinkend (Trend)
- signifikant sinkend
- hoch signifikant sinkend
- höchst signifikant sinkend
- + nicht signifikant steigend (Trend)
- ++ signifikant steigend
- +++ hoch signifikant steigend
- ++++ höchst signifikant steigend

wurden die Zeiträume mit und ohne Beregnung für die Sickerwasserrate und den Stickstoffaustrag getrennt ausgewertet. Der Zeitraum mit Beregnung lag zwischen 1984 bis 2003, der Zeitraum ohne Beregnung ist von 2006 bis 2018 definiert worden. Die Jahre 2004 und 2005 (2 Jahre) blieben im Zeitraum ohne Beregnung unberücksichtigt, um rückwirkende Effekte (wie ein erhöhter Bodenwasservorrat) ausschließen zu können. 2 Jahre wurden als ausreichend eingeschätzt, da Tracerexperimente gezeigt haben, dass die mittlere Verweilzeit von Sickerwasser im Lysimeter ca. 1,5 Jahre beträgt (Meißner & Ollesch et al. 2010).

Für die Trendanalyse wurde der Mann-Kendall-Signifikanztest mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit α von 0,05 verwendet. Die Ergebnisse wurden in Signifikanzbereiche unterteilt: Eine berechnete Überschreitungswahrscheinlichkeit $p \geq 0,05$ wurde mit „nicht signifikant“, $0,05 > p > 0,01$ mit „signifikant“, $0,01 > p > 0,001$ mit „hoch signifikant“ und $p < 0,001$ mit „höchst signifikant“ bezeichnet (nach Kropp & Roithmeier et al. 2009).

Ergebnisse und Diskussion

Meteorologische Trends

Ergebnis: *Tabelle 1* zeigt Mittelwerte und Trends von ausgewählten Klimaparametern an der DWD-Wetterstation

Seehausen. Besonders für die Temperatur, welche im Jahresmittel bei 9,3°C lag, waren in fast allen untersuchten Zeitschritten bis zu höchst signifikante positive Trends zu beobachten. Auch für die Verdunstung (im Mittel 654 mm/a) ist ein hoch signifikanter Trend festgestellt worden. Weniger deutlich waren die Veränderung der Temperatur und Verdunstung im Winter. Im Gegensatz dazu konnte für den Niederschlag kein signifikanter Trend nachgewiesen werden. Der Niederschlag, welcher im Jahresmittel 641 mm betrug, war generell zunehmend, mit Ausnahme des Frühjahrs.

Diskussion: Grundsätzlich deutet die Trendanalyse darauf hin, dass sich Temperatur und Verdunstung in den untersuchten 41 Jahren deutlich verändert haben. Für den Niederschlag konnte zwar kein signifikanter Trend ermittelt werden, da dieser i.d.R. auch deutlich stärkeren Schwankungen unterliegt als die Temperatur. Die generelle Zunahme beider Parameter hat jedoch insgesamt zu einem zunehmend heißeren und feuchteren Klima geführt.

Trends der Sickerwasserrate

Ergebnis: Vergleicht man die mittleren Sickerwasserraten aus *Tabelle 2*, so wird deutlich, dass sich die Messungen der Lysimeter zum Teil deutlich voneinander unterscheiden. Vor allem zwischen den GL und den AL-Lysimetern lagen Diffe-

Tabelle 2: Mittelwerte und Trends der Sickerwassermenge im Beregnungszeitraum (1984-2003) und im Zeitraum ohne Beregnung (2006-2018) sowie Monate mit signifikanten Trends und Grad der Signifikanz im Beregnungszeitraum.

Lysimeterstation Falkenberg (1984-2018)						
Bodenart	Nutzung	Düngung	Nr. Lys.	SW (Jahr) mit Bereg. [mm]	SW (Jahr) ohne Bereg. [mm]	Monat mit sig. Trend und Grad der Signifikanz (1984-2003)
Lehmiger Sand (LS)	GL	50%	L 70	190 (+)	176 (-)	-
		100%	L 71	180 (-)	159 (-)	-
		150%	L 72	155 (+)	141 (-)	-
	AL	50%	L 73	90 (+)	109 (+)	-
		100%	L 74	105 (+)	134 (+)	Juli (++) / Nov. (++)
		150%	L 75	101 (+)	122 (+)	Nov. (++)
Sand (S)	GL	50%	L 76	232 (-)	210 (+)	Juni (---) / Dez. (--)
		100%	L 77	211 (-)	213 (-)	Juni (---) / Dez. (--)
		150%	L 78	194 (-)	214 (-)	Juni (---) / Dez. (--)
	AL	50%	L 79	157 (+)	175 (+)	Okt. (++)
		100%	L 80	138 (+)	160 (+)	Sep. (++) / Okt. (++)
		150%	L 81	134 (+)	147 (+)	Okt. (++)
Lehm (L)	GL	50%	L 82	225 (+)	174 (-)	-
		100%	L 83	204 (+)	167 (-)	Juni (---)
		150%	L 84	200 (-)	173 (-)	Juni (--)
	AL	50%	L 85	127 (+)	119 (+)	-
		100%	L 86	98 (+)	114 (+)	Nov. (++)
		150%	L 87	85 (+)	87 (+)	-
Toniger Schluff aus Löss (SIL)	GL	50%	L 88	230 (+)	196 (-)	-
		100%	L 89	199 (-)	160 (-)	-
		150%	L 90	200 (+)	162 (-)	-
	AL	50%	L 91	79 (+)	121 (-)	-
		100%	L 92	66 (+)	102 (+)	-
		150%	L 93	49 (+)	62 (o)	Dez. (++)

o	keine Tendenz erkennbar (Steigung der linearen Trendgeraden ~0mm)		
-	nicht signifikant sinkend (sink. Tendenz)	+	nicht signifikant steigend (Trend)
--	signifikant sinkend	++	signifikant steigend
---	hoch signifikant sinkend	+++	hoch signifikant steigend
----	höchst signifikant sinkend	++++	höchst signifikant steigend

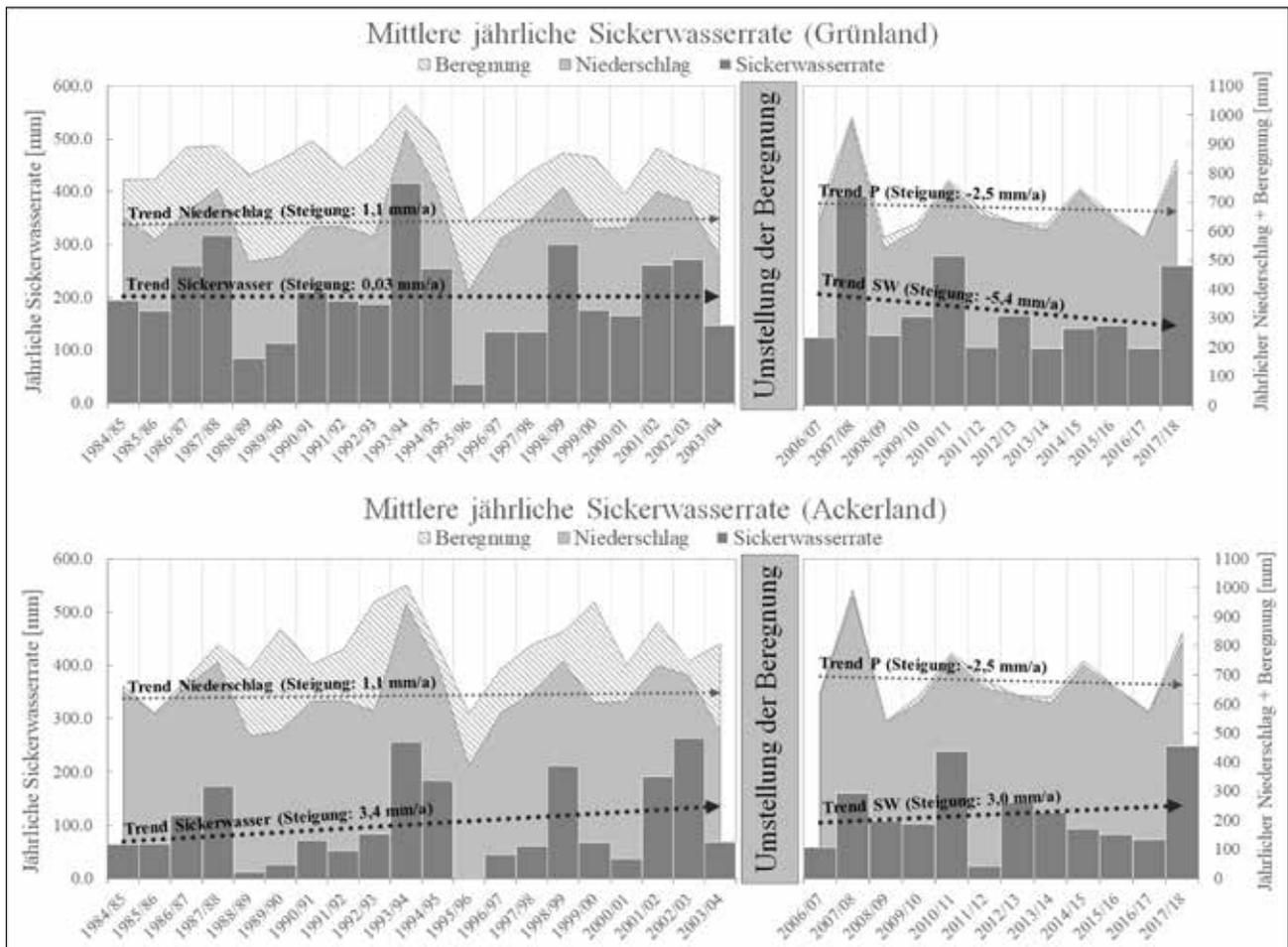


Abbildung 2: Mittlere jährliche Sickerwasserrate aller Grünlandlysimeter (oben) und aller Ackerlandlysimeter (unten) sowie mittlerer jährlicher Niederschlag (mit Beregnung) im Untersuchungszeitraum mit Trendgeraden und Steigung der Trendgeraden.

renzen von bis zu 100 mm vor (vgl. Lys. 70 und 73), wobei die Sickerwasserrate bei den GL-Lysimetern häufig höher war. Mit zunehmender Düngestufe war die Sickerwasserrate abnehmend. Dagegen war zwischen dem Zeitraum mit und ohne Beregnung kein eindeutiger Unterschied festzustellen.

Für die jährliche Sickerwasserrate konnte in keinem Zeitraum und für kein Lysimeter ein signifikanter Trend festgestellt werden. Hinsichtlich der Trendrichtung waren jedoch deutliche Unterschiede zu erkennen. Dabei war die Sickerwasserrate für AL-Lysimeter grundsätzlich ansteigend. Bei den GL-Lysimetern war diese dagegen häufiger sinkend (Abbildung 2). Besonders bei den GL-Lysimetern fielen die teilweise gegensätzlichen Tendenzen zwischen den Zeiträumen mit und ohne Beregnung auf. In der Regel waren hier die Sickerwasserraten im Beregnungszeitraum ansteigend, im Zeitraum ohne Beregnung abnehmend. Ausgenommen davon waren die Lysimeter mit Sandböden (S), bei denen ein umgekehrtes Verhalten zu beobachten war. Für die verschiedenen Düngestufen konnte kein Unterschied hinsichtlich der Trendrichtung herausgearbeitet werden.

Bei Betrachtung der monatlichen Sickerwasserraten konnten zum Teil signifikante Trends ermittelt werden. Die Sickerwasserraten waren im April, Juni und Juli sinkend (zum Teil auch signifikant, vgl. Tabelle 2). Im Oktober, November und Februar waren die Sickerwasserraten dagegen tendenziell

steigend. Des Weiteren ist aus Tabelle 2 ersichtlich, dass am häufigsten signifikante Veränderungen der Sickerwasserrate für die S-Lysimeter ermittelt wurden. GL-Lysimeter wiesen grundsätzlich seltener signifikante Trends auf als AL-Lysimeter. Zudem war die Trendrichtung bei GL-Lysimetern meist sinkend, bei AL-Lysimetern dagegen steigend. Generell waren die Änderungen im Sommer (Juni/ Juli) und im Winter (November/Dezember) am deutlichsten (bzw. im Oktober bei S-Lysimetern). Der nicht beregnete Zeitraum war für eine Trenduntersuchung mit 12 Jahren zu kurz, die Ergebnisse werden für eine Auswertung als nicht robust genug eingeschätzt.

Diskussion: Die Auswertung hat gezeigt, dass bei den Sickerwasserraten je nach Bodenart und Bewirtschaftung deutliche Differenzierungen bestanden. Zum Großteil waren diese Unterschiede auf natürliche Ursachen (wie den Feinkornanteil, klimatische Bedingungen, Pflanzenwachstum) zurückzuführen (Meißner & Schonert et al. 1995). Die deutlich größere Sickerwasserrate bei den GL-Lysimetern wurde durch die höhere Beregnung begründet. Zusätzlich begannen die jährlichen Sickerwasserperioden bei GL-Lysimetern früher (Godlinski 2005). Bei der Auswertung der Trends konnten die Lysimeter daher nicht zusammengefasst werden, sondern mussten einzeln betrachtet werden. Somit wurden die Zeiträume mit und ohne Beregnung sowie GL- und AL-Lysimeter gesondert betrachtet.

Der Trend der Sickerwasserrate war trotz eindeutig steigender Temperaturen bzw. Verdunstung nicht signifikant. Auffällig waren jedoch die teilweise gegensätzlichen Trendrichtungen einzelner Lysimeter, die auf den Einfluss Beregnung zurückzuführen waren. So hatte für GL die Beregnungsmenge bis 2003 abgenommen (zwischen 1984 bis 1992 ca. 104 mm/a, zwischen 1993 bis 2003 ca. 66 mm/a). Dies war der Grund für die teilweise abnehmenden Trends der Sickerwasserrate, z.B. der S-Lysimeter. Gleichzeitig war der Niederschlag zunehmend (*Abbildung 2*), sodass für die GL-Lysimeter insgesamt ein nicht eindeutiges Bild entstand. Die Beregnungsmenge bei AL hatte im Gegensatz dazu zugenommen, da die Beregnung erst nach 1987 einsetzte. Zusammen mit den tendenziell zunehmenden Niederschlägen konnte ein zunehmender Trend bei fast allen Lysimetern beobachtet werden. Die Auswertung hat somit gezeigt, dass die Beregnung die klimatisch verursachten Veränderungen des Sickerwassers beeinflussen konnte. Trends im Zeitraum ohne Bewässerung waren dagegen aufgrund der geringen Anzahl an Jahren (insgesamt 12) wenig robust. Die sinkenden Trends einiger GL-Lysimeter ließen sich z.B. auf ein Extremwert-Jahr 2007/08 zurückführen, der Anstieg der AL-Lysimeter dagegen auf einen hohen Austrag im Jahr 2017/18 (vgl. *Abbildung 2*).

Die vier untersuchten Bodenarten zeigten hinsichtlich des jährlichen Sickerwassertrends keine eindeutigen Unterschiede. Monatlich betrachtet fiel jedoch auf, dass vor allem Sandböden häufiger einen signifikanten Trend

aufwiesen, als andere Bodenarten. Sandböden reagieren aufgrund der hohen Durchlässigkeit schneller bzw. sensibler auf Änderungen als andere Bodenarten. So war im Juni und Dezember ein Rückgang der Sickerwassermenge aufgrund der stark rückgängigen Niederschläge in denselben Monaten zu beobachten. Es wurde jedoch auch deutlich, dass die GL-Lysimeter und AL-Lysimeter bei denselben Monaten ein unterschiedliches Verhalten aufzeigten. Ein Zusammenhang mit dem Bewuchs sowie dem Schnitt bzw. die Erntezeitpunkte waren hier wahrscheinlich. Bei den 3 Düngegraden war kein eindeutiger Unterschied hinsichtlich der Trendentwicklung erkennbar. Bei den monatlichen Trends konnte man jedoch erkennen, dass Lysimeter mit einer 100%- und 150%-Düngegrad häufiger signifikante Trends zeigten, als die 50%-Variante; Ursache hierfür sind erhöhte Ernteerträge, was wiederum auf das unterschiedliche Pflanzenwachstum zurückzuführen war.

Im Vergleich zur Langzeitanalyse zweier GL-Lysimeter (Köhn et al. 2017), waren ähnliche Ergebnisse festzustellen. Auch in dieser Untersuchung konnten sinkende Sickerwasserausträge im Frühjahr und steigende Raten im Winter beobachtet werden. Die Veränderung des Niederschlags wirkte sich damit, trotz Beregnung, in gleicher Weise auf die monatliche Sickerwasserrate aus.

Trends des Stickstoffaustrags

Ergebnis: Die Stickstoff(N-)austragsmengen (*Tabelle 3*) der einzelnen Lysimeter unterschieden sich zum Teil stark

Tabelle 3: Mittelwerte und Trends des jährlichen Stickstoffaustrags im Beregnungszeitraum (1984-2003) und im Zeitraum ohne Beregnung (2006-2018) sowie Monate mit signifikanten Trends und Grad der Signifikanz im Beregnungszeitraum.

Lysimeterstation Falkenberg (1984-2018)						
Bodenart	Nutzung	Düngung	Nr. Lys.	N (Jahr) mit Bereg. [kg/ha]	N (Jahr) ohne Bereg. [kg/ha]	Monat mit sig. Trend und Grad der Signifikanz (1984-2003)
Lehmiger Sand (LS)	GL	50%	L 70	5,2 (-)	3,6 (-)	-
		100%	L 71	11,2 (+)	42,5 (-)	-
		150%	L 72	8,5 (o)	116,5 (-)	März (-)
	AL	50%	L 73	35,6 (+)	33,5 (+)	-
		100%	L 74	45,2 (++)	51,4 (-)	Juli (++) / Nov. (++)
		150%	L 75	43,2 (+)	65,6 (-)	Feb. (++) / Nov. (++)
Sand (S)	GL	50%	L 76	11,1 (-)	20,4 (++)	Juni (----)
		100%	L 77	11,0 (-)	84,40 (-)	Juni (----)
		150%	L 78	30,7 (+++)	186,9 (-)	Feb. (++) / Juni (---)
	AL	50%	L 79	47,4 (+)	42,6 (-)	Okt. (++)
		100%	L 80	47,7 (+)	51,8 (-)	Sep. (++) / Okt. (++)
		150%	L 81	42,8 (+)	63,9 (+)	-
Lehm (L)	GL	50%	L 82	8,5 (---)	2,2 (o)	Jan. (--) / Feb. (---) / März. (--) / Apr. (---) / Jun. (--) / Dez. (---)
		100%	L 83	8,9 (+)	25,8 (-)	Jun. (---)
		150%	L 84	14,9 (+)	110,0 (-)	Feb. (++)
	AL	50%	L 85	40,5 (+)	15,1 (-)	-
		100%	L 86	33,9 (+)	14,6 (-)	Nov. (++)
		150%	L 87	30,1 (+)	23,0 (-)	Feb. (++)
Toniger Schluff aus Löss (SIL)	GL	50%	L 88	20,7 (++++)	16,9 (--)	Jan. (++) / Feb. (++) / Sep. (++)
		100%	L 89	27,7 (++++)	58,0 (-)	Jan. (++)
		150%	L 90	70,7 (++++)	143,5 (-)	Jan. (+++) / Feb. (+++) / März (++) / Mai (++)
	AL	50%	L 91	25,6 (+)	22,2 (-)	-
		100%	L 92	26,8 (-)	33,8 (-)	Feb. (++)
		150%	L 93	21,6 (+)	19,7 (-)	Dez. (++)

Legende siehe Tabelle 2

voneinander. Vor allem im nicht berechneten Zeitraum waren deutliche größere N-Austragsmengen zu beobachten, als im berechneten Zeitraum (z.B. L 72 und 78). Grundsätzlich wurde in der Betrachtung monatlicher Werte (hier nicht dargestellt) ein vermehrtes Auftreten von Extremwerten im nicht berechneten Zeitraum deutlich. Diese Extremwerte lagen hierbei häufig in den Wintermonaten (z.B. Dezember, Januar, Februar) und stiegen mit jeder Düngestufe an. Weiterhin fiel auf, dass die N-Austragsmengen der GL-Lysimeter im Berechnungszeitraum häufig kleiner waren als bei AL-Lysimetern (Tabelle 3).

Der Trend der N-Austragsmengen war zum Teil unterschiedlich. Im Berechnungszeitraum war der Trend generell zunehmend. Einige Lysimeter zeigten zudem eine signifikante Zunahme (L 74, L 78, L 88, L 89, L 90). Im Gegensatz dazu war im nicht berechneten Zeitraum die N-Austragsmenge im Mittel aller Lysimeter sinkend. In der Trendauswertung fielen besonders die SIL-Lysimeter auf, welche am häufigsten signifikante Trends aufwiesen. Hinsichtlich der Landnutzung und Düngestufe waren keine deutlichen Unterschiede im Trendverhalten zu erkennen. Signifikante Monate im Berechnungszeitraum lagen häufig im Juni und Anfang des Jahres (Januar, Februar). Grundsätzlich konnte eine Tendenz zu sinkenden monatlichen N-Austrägen bei den GL-Lysimetern sowie eine Tendenz zu steigenden N-Austrägen bei den AL-Lysimetern beobachtet werden. Ausnahme bildeten hier die Lysimeter mit den SIL-Böden, die insgesamt einen zunehmenden monatlichen N-Austrag aufwiesen.

Diskussion: Die teilweise stark abweichenden Stickstoffaustragsmengen zwischen dem berechneten und nicht berechneten Zeitraum waren auf einen Rückgang des Pflanzenertrags nach Einstellung der Beregnung zurückzuführen (mit Beregnung: 1342 g/m²; ohne Beregnung: 950 g/m²; hier nicht dargestellt). Hinzu kamen hohe Niederschlagsmengen in den Wintermonaten 2010, welche ursächlich für das Auftreten von extremen N-Austrägen war.

Der Trend des N-Austrags wies Ähnlichkeiten zum Trend des Sickerwassers auf. So konnten die zunehmenden N-Austragsmengen bei den AL-Lysimetern auf eine Zunahme der Sickerwasserrate zurückgeführt werden. Im Gegensatz zum Sickerwasser sind jedoch für einige Lysimeter signifikante Trends des N-Austrags festgestellt worden, vor allem bei GL-Lysimetern sowie Lysimeter mit einem SIL-Boden. Dies war zum Teil auf größere Beregnungsmenge sowie auf eine Zunahme der Düngemenge nach 1990 zurückzuführen. Besonders aber die hoch signifikanten Zunahmen der N-Austragsmengen bei den SIL-Lysimetern konnten nicht hinreichend geklärt werden. Für die übrigen Bodenarten sowie auch für die Düngestufen kann jedoch kein eindeutiger Unterschied hinsichtlich des Trendverhaltens festgestellt werden.

Schlussfolgerungen

Die Auswertung langjähriger Messreihen verschiedenartiger Lysimeter zeigte, dass sich trotz erhöhter Verdunstung die Sickerwasserrate nur in bedingtem Maß und nicht signifikant verändert hat. Vielmehr war die Änderung des Niederschlags bestimmend für die Entwicklung der Sickerwasserrate. Bedeutend für die Tendenzen des Sickerwassers war neben der Niederschlagsveränderung auch die Beregnung. Hinsichtlich der Bodenart konnte eine höhere Sensibilität der S-Böden festgestellt werden. Verschiedene

Landnutzungen und Düngemengen hatten dagegen keinen eindeutigen Effekt auf den Trend der Sickerwasserrate.

Der Trend der N-Austragsmenge war ähnlich wie der Trend der Sickerwasserrate von der Veränderung der klimatischen Verhältnisse sowie von der Beregnung abhängig. Hierbei traten jedoch deutlich häufiger signifikante Trends einzelner Lysimeter und in einzelnen Monaten auf. Zum Teil war dies auf eine größere Beregnungsmenge zurückzuführen (bei GL-Lysimetern), die eine Verlagerung des Stickstoffs in tiefere Schichten verursachten. Zum anderen waren jedoch auch die Erntemenge und damit der Nährstoffentzug (bzw. der Entzug der Pflanzen) ein nicht zu vernachlässigender Faktor. Hinsichtlich der Bodenarten zeigten die SIL-Lysimeter das eindeutigste Änderungsverhalten. Die Veränderungen können jedoch nicht hinreichend auf eine klimatische Ursache zurückgeführt werden. Auch die anderen Bodenarten zeigen zum Teil signifikante Veränderungen. Grundsätzlich war eine eindeutigere Reaktion des N-Austrags auf die Änderungen der klimatischen Parameter zu beobachten.

Zusammenfassend hatten die Bodenart, die Landnutzung und die Düngung nur geringen und höchstens indirekten (z.B. durch die Ernteerträge) Einfluss auf den Trend des Sickerwasser- und N-Austrags. Im Gegensatz dazu hatte die Beregnung eine sehr große Auswirkung auf die Größe und Ausrichtung des jeweiligen Trends. Die Beregnung wäre damit ein mögliches Mittel, zukünftig sinkende Sickerwasserraten bzw. Trockenheit zu vermindern.

Die in den Lysimetern gemessenen Sickerwassermengen und Stickstoffausträge wurden stark von der Beregnung geprägt. Die Ergebnisse des nicht berechneten Zeitraums waren dagegen aufgrund der wenigen Jahre nicht robust. Um genauere Aussagen zum Trendverhalten, insbesondere zwischen den zwei Landnutzungen treffen zu können, soll die Auswertung in einigen Jahren wiederholt und mit den jetzigen Ergebnissen verglichen werden.

Literatur

- Arbeitsblatt ATV-DVWK-M 504 (2002) Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden, S. 45.
- Davidson E.A., Janssens I.A. (2006) Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*. 2006 Mar 9;440(7081):165-73.
- Godlinski F. (2005) Abschätzung der Phosphorausträge aus der ungesättigten Bodenzone anhand numerischer Interpretationen von Lysimeterversuchen. Dissertation. Universität Rostock.
- Kirschbaum, M. (2006) The temperature dependence of organic-matter decomposition - still a topic of debate. *Soil Biology and Biochemistry* 38 (9), 2510-2518.
- Köhn J., Meißner R., Rupp H., Reinstorf F. (2017) Sind die Wirkungen des Klimawandels auf den Boden anhand von Langzeit-Lysimeteruntersuchungen nachweisbar? 17. Gumpensteiner Lysimetertagung, 09.-10.05.2017, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein 2017.
- Kreienkamp F., Spekat A., Enke W. (2012) Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Teilbericht Los 1.1 und 1.2: Klima und Extreme. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Kropp J., Roithmeier O., Hattermann F., Rachimow C., Lüttger A., Wechsung F., Lasch P., Christiansen E.S., Reyer C., Suckow F., Gutsch M.,

- Holsten A., Kartschall T., Wodinski M., Hauf Y., Conrad T., Österle H., Walther C., Lissner T., Lux N., Tekken V., Ritchie S., Kossak J., Klaus M., Costa L., Vetter T., Klose M. (2009) Klimawandel in Sachsen-Anhalt - Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK).
- Meißner R., Rupp H., Seeger J., Schonert P. (1995) Langjährige Lysimeteruntersuchungen über den Einfluss einer gestaffelten Mineraldüngung auf den Nährstoffhaushalt. Arch. Acker-Pfl. Boden., Vol. 39 pp. 197-219.
- 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.
- Paul G., Meißner R., Ollesch G. (2014) Abschätzung von Auswirkungen des Klimawandels auf den Landschaftswasserhaushalt im Fläming. WasserWirtschaft 10/2014: 23-28.
- Positionspapier der LABO (2010) Klimawandel - Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes. Zur Kenntnis genommen zur 74. Umweltministerkonferenz am 11. Juni 2010 in Bad Schandau; URL: https://www.labo-deutsch-land.de/documents/LABO_Positionspapier_Boden_und_Klimawandel_090610_aa8_bf5.pdf; Letzter Zugriff: 06.04.2018.
- Pfützner B., Klöcking B., Schumann A., Hesse P. (2012) Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Teilbericht Los 1.3: Wasser. Büro für Angewandte Hydrologie im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Richter D. (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zu Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.

Lysimeter- und Parzellenversuche zur Verlagerung von Pflanzenschutzmittel(PSM)-Wirkstoffen bei konventioneller Bewirtschaftung und Erarbeitung von PSM-Reduktionsstrategien

Nadine Tauchnitz^{1*}, Holger Rupp², Florian Kurzius³, Christian Wolff¹, Elke Bergmann¹, Rainer Haupt⁴, Matthias Schrödter¹ und Ralph Meissner²

Zusammenfassung

Einträge von Pflanzenschutzmittel(PSM)-Wirkstoffen können erheblich zur Belastung von Grundwasser und Oberflächengewässern beitragen. Die Eintragsquellen sind oft schwer identifizierbar, da PSM-Wirkstoffe sowohl aus der Landwirtschaft als auch aus Siedlungen stammen können (=duale Wirkstoffe).

Schwerpunkt des vorliegenden Projektes ist die Untersuchung der Verlagerung von PSM-Wirkstoffen mit dem Sickerwasser bei konventioneller PSM-Anwendung und die Erarbeitung von Strategien zur Minderung des PSM-Einsatzes auf einem sandigen Lehmboden in der Altmark (Nordostdeutsches Tiefland) anhand von Lysimeter- und Parzellenversuchen. In den Versuchen wurden drei Versuchsvarianten 1) ohne PSM, 2) reduzierter und 3) konventioneller PSM-Einsatz auf relevante Parameter untersucht. Parallel wurde ein PSM-Abbau-Versuch im Labor durchgeführt, um Aussagen zur Sorption und Persistenz der Wirkstoffe zu erhalten.

Im bisherigen Versuchszeitraum wurde bei allen Versuchsvarianten keine Verlagerung der applizierten PSM ins Sickerwasser nachgewiesen. Der PSM-Abbauversuch zeigte bei fast allen berücksichtigten Wirkstoffen eine hohe Sorption an die Bodenmatrix und keinen nennenswerten Abbau der Wirkstoffe nach 71 Versuchstagen.

Schlagwörter: Biozid, EU-Wasserrahmenrichtlinie, Gewässerqualität, Sorption, Umweltqualitätsnormen

Summary

The input of pesticides from diffuse sources may affect the quality of ground water and surface waters substantially. In addition, input pathways are known to be very complex and due to different uses of the active substances, both for agricultural purposes as well as biocides in urban areas, the identification is often challenging.

Aim of the present study was the quantification of pesticide leaching by seepage water at conventional pesticide application and the preparation of reduction measures on a loamy sandy soil in northern Germany (northeastern lowland) by lysimeter and field trials. Trials with three treatments (1) without pesticide application, 2) reduced pesticide application and 3) conventional pesticide application) were performed. Above this a laboratory study of pesticide degradation was performed to gain information about sorption and persistence of the considered pesticide substances.

The previous results showed no leaching of the applied pesticides in the lysimeter trial. The laboratory study showed a high sorption on soil matrix at most of the studied pesticide substances. After 71 study days no significant degradation of pesticides was observed.

Keywords: biocides, environmental quality standards, EU-Water Framework Directive, sorption, water quality

Einleitung

Einträge von PSM-Wirkstoffen in die Gewässer können durch vielfältige Eintragspfade aus punktuellen (z.B. Hofabläufe, Kläranlagen) sowie diffusen Quellen (z.B. Dränagen, Oberflächenabfluss, Drift, atmosphärische Deposition, u.a.) erfolgen (Götz et al. 2010, Wittmer et al. 2014) und zu einer Belastung der Gewässer führen. Im Zuge der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurden für Oberflächengewässer Umweltqualitätsnormen (UQN) für bestimmte PSM-Wirkstoffe festgelegt, die für die Erreichung eines guten chemischen Zustandes einzuhalten sind (OGewV 2016). In zahlreichen Gewässern Deutschlands

werden diese UQN überschritten (UBA 2017). Daher sind gezielt Maßnahmen zur Reduktion von PSM-Einträgen umzusetzen. Eine Identifizierung der Eintragsquellen ist oft problematisch, da zahlreiche Wirkstoffe sowohl in der Landwirtschaft als auch in Siedlungsbereichen eingesetzt werden (=duale Wirkstoffe). Mehrere Untersuchungen in Schweizer Gewässern bestätigten, dass auch Siedlungen Quellen für PSM-Einträge in die Gewässer darstellen können (Burkhardt et al. 2009, Wittmer et al. 2010). Eigene Untersuchungen in einem abgegrenzten Einzugsgebiet (Mitteldeutschland, Pilotgebiet Querne/Weida) zeigten in den meisten Fällen keine Übereinstimmung zwischen der PSM-Anwendung in der Landwirtschaft und Wirkstoff-

¹ Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt, Strenzfelder Allee 22, D-06406 BERNBURG

² Helmholtz Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Department für Bodenphysik, Falkenberg 55, D-39615 ALTMÄRKISCHE WISCHE/FALKENBERG

³ BGD Ecosax GmbH, Tiergartenstraße 48, D-01219 DRESDEN

⁴ Amt für Landwirtschaft, Flurneuordnung und Forsten Altmark, Akazienweg 25, D-39576 STENDAL

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

Funden im Oberflächengewässer (Tauchnitz et al. 2018). Die Ursache hierfür ist der Einfluss von Siedlungseinträgen (Punktquellen, Abwasser) sowie der lange Verbleib vieler Wirkstoffe im Boden.

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 ist die Quantifizierung der sickerwassergebundenen Verlagerung von PSM-Wirkstoffen sowie die Erarbeitung von Strategien zur Minderung des PSM-Einsatzes. Neben der Verlagerung von PSM sollen auch die Auswirkungen einer intensiveren Bodenbearbeitung bei reduziertem PSM-Einsatz auf die Nährstoffausträge erfasst werden. Dabei werden die Versuchsvarianten 1) Null ohne PSM-Einsatz (mechanische Unkrautbekämpfung), 2) Reduzierter PSM-Einsatz und 3) Konventionell (ortsüblicher PSM-Einsatz) auf folgende Parameter untersucht: PSM- und Nährstoff-Austräge mit dem Sickerwasser, PSM-Konzentrationen im Boden, Erträge und PSM-Konzentrationen im Erntegut sowie Unkrautbesatz, Schädlings- und Krankheitsbefall und Wirksamkeit chemischer und mechanischer Pflanzenschutzmaßnahmen.

Parallel zu den Lysimeter- und Parzellenversuchen wurde ein PSM-Abbau-Versuch durchgeführt, um Aussagen zur Sorption und Persistenz ausgewählter umweltrelevanter PSM-Wirkstoffe zu erhalten.

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 lehmi-ger 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 Praxisschlag der Agrargenossenschaft Altmärkische Höhe e.G. angelegt (*Abbildung 1*).

Tabelle 1: Versuchsvarianten.

Variante	Null	Reduziert	Konventionell
Beschreibung	kein PSM-Einsatz, mechanische Unkrautbekämpfung	Reduzierter PSM-Aufwand	Orts- bzw. betriebsüblicher PSM-Einsatz
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)

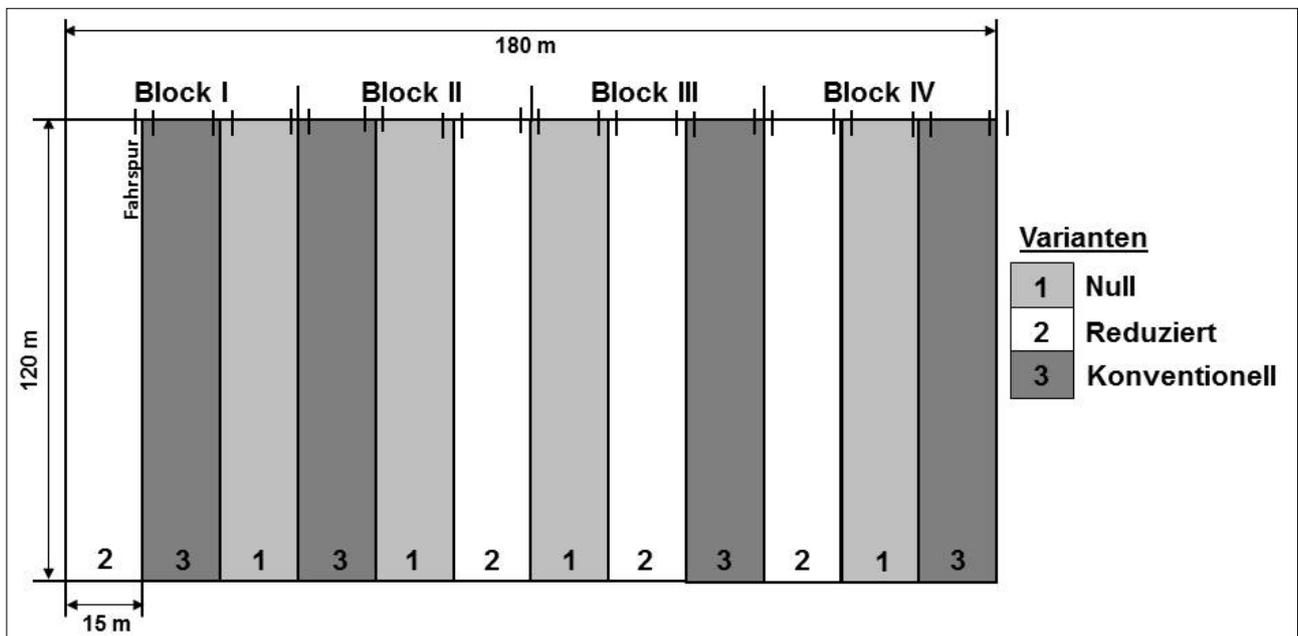


Abbildung 1: Versuchsaufbau Parzellenversuch.

Die Aussaat (Winterweizen) erfolgte am 24.09.2018 und die erste PSM-Maßnahme (Herbizide) am 18.10.2018. Appliziert wurden 1,5 l/ha Trinity (Wirkstoffe Chlortoluron, Pendimethalin, Diflufenican), 0,25 l/ha Herold SC (Wirkstoffe Diflufenican, Flufenacet) und Pointer SX (Wirkstoff Tribenuron). Als fungizides Saatgutbehandlungsmittel des Winterweizens wurde Celest M mit dem Wirkstoff Fludioxonil angewandt. Folgende Parameter werden im Versuch 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.

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 Aussaat des Winterweizens und PSM-Anwendung erfolgte analog zum Parzellenversuch. Die PSM-Applikation auf den Lysimetern wurde mittels Handspritze realisiert.

PSM-Abbauversuch

Im Labor der BGD-Ecosax GmbH wurden Bodensättigungsextraktionsversuche (BSE) gemäß LfUG (2014) sowie klassische Batchversuche durchgeführt, um die mikrobiellen Abbauraten ausgewählter PSM-Wirkstoffe unter kontrollierten Bedingungen sowie die Sorption der Wirkstoffe an die Bodenmatrix zu ermitteln. Dabei wurden

die umweltrelevanten und in vorhergehenden Untersuchungen häufig nachgewiesenen Wirkstoffe Glyphosat, MCPA, Diflufenican, Epoxiconazol, Terbutylazin, Metazachlor und Imidacloprid berücksichtigt

Ergebnisse und Diskussion

PSM-Wirkstoffe im Sickerwasser (Lysimeterversuch)

Das PSM-Screening des Sickerwassers vor Anlage des Lysimeterversuches zeigte mit Ausnahme des Wirkstoffes Tebuconazol keine Positivbefunde der analysierten 54 Wirkstoffe. In der Lysimeterstation Falkenberg wurden bisher keine PSM-Maßnahmen auf den Lysimetern durchgeführt. Daher war auch der Nachweis von PSM-Wirkstoffen aus vergangenen Versuchen nicht zu erwarten. Die Positivbefunde des fungiziden Wirkstoffes Tebuconazol (0,079 µg/l) sind vermutlich auf den Einsatz von gebeiztem Saatgut aus vergangenen Versuchen zurückzuführen. Tebuconazol ist derzeit in 6 fungiziden Saatgutbehandlungsmitteln zur Bekämpfung von diversen Pilzkrankheiten in Getreide zugelassen (BVL 2019). Zudem zählt Tebuconazol zu den sogenannten dualen Wirkstoffen, welche auch als Biozid, z.B. in Holzschutzmitteln (BAUA 2016) sowie im Klein- und Hausgartenbereich (BVL 2019) angewendet werden. Die Analysen des Sickerwassers nach PSM-Applikation zeigten im bisherigen Versuchszeitraum keinen Nachweis der applizierten Wirkstoffe (Tabelle 2). Auch hier waren bei einem der 9 Lysimeter Positivbefunde von Tebuconazol im Sickerwasser nachweisbar. Die Sickerwassermengen im bisherigen Versuchszeitraum (09/2018 bis 12/2018) lagen im Bereich von 44 bis 68 mm. Die reduzierte Variante wies die höchsten Sickerwassermengen auf. Die NO₃⁻-Konzentrationen waren mit 132 bis 163 mg L⁻¹ auf einem hohen Niveau und unterschieden sich nicht deutlich zwischen den Varianten. Im bisherigen Versuch wurden allerdings auch noch keine Bodenbearbeitungsmaßnahmen (mechanische Unkrautbekämpfung) durchgeführt, die Einfluss auf Mineralisationsprozesse und damit die NO₃⁻-Dynamik haben können.

Tabelle 2: Sickerwasser(SW)-Mengen, Pflanzenschutzmittelwirkstoff- sowie Stickstoff(N)- und Kohlenstoff(C)-Konzentrationen im Sickerwasser [Mittelwert (±Standardabweichung)] im bisherigen Versuchszeitraum (09/2018 bis 12/2018).

Parameter	Null	Varianten Reduziert	Konventionell
SW-Menge (mm)	44 (±5)	49 (±7)	68 (±5)
Chlortoluron (µg L ⁻¹)	<BG	<BG	<BG
Diflufenican (µg L ⁻¹)	<BG	<BG	<BG
Fludioxonil (µg L ⁻¹)	<BG	<BG	<BG
Flufenacet (µg L ⁻¹)	<BG	<BG	<BG
Pendimethalin (µg L ⁻¹)	<BG	<BG	<BG
Tebuconazol (µg L ⁻¹)	<BG	<BG	0,016 (max. 0,054)
Tribenuron-Methyl (µg L ⁻¹)	<BG	<BG	<BG
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)

BG: Bestimmungsgrenze, TN: Total Nitrogen, TC: Total Carbon, DOC: Dissolved Organic Carbon

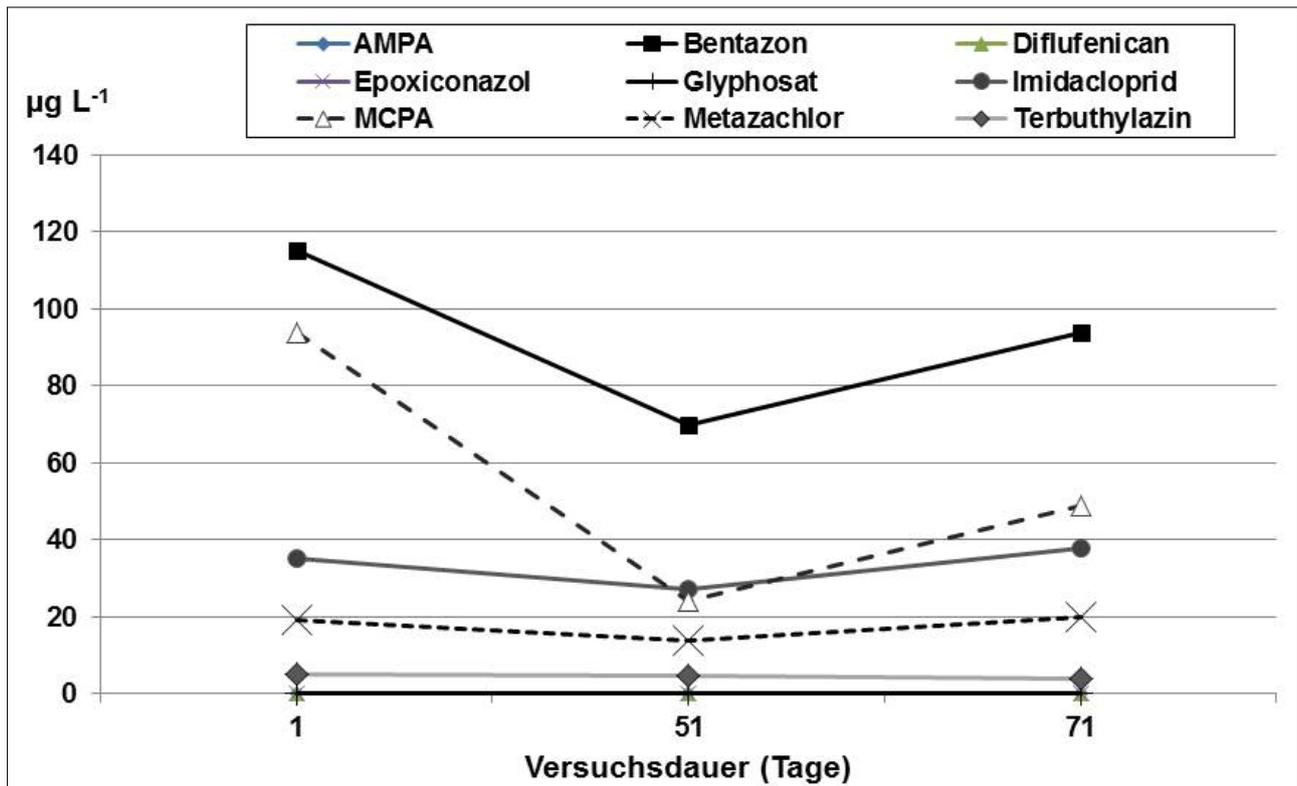


Abbildung 2: PSM-Konzentrationen im Bodensättigungsextrakt (Porenwasser) im PSM-Abbauversuch.

Tabelle 3: PSM-Wirkstoffkonzentrationen im Boden und Sorption.

PSM-Wirkstoffe	Konzentration Boden (mg kg ⁻¹ TS)	Sorption ¹ (%)	Sorptionskoeffizienten nach PPDB (2019) (mL g ⁻¹)	Beurteilung Mobilität
AMPA	1,23	-	-	-
Bentazon	0,04	52,4	K _f : 0,97 (0,02-3,06) K _{loc} : 59,6 (3,0-158,0)	mobil
Diflufenican	<BG	-	K _f : 65,9 (7,87-267,5) K _{loc} : 2.215 (1.532-7.431)	leicht mobil
Epoxiconazol	0,09	100	K _f : 12,2 (4,79-21,78) K _{loc} : 1.073 (280-2.641)	leicht mobil
Glyphosat	0,16	100	K _f : 226,3 (9,4-700) K _{loc} : 16.331 (1.600-60.000)	nicht mobil
Imidacloprid	0,07	86,8	K _f : 2,23 (0,96-4,18) K _{loc} : 225 (109-411)	mäßig mobil
MCPA	<BG	0	K _f : 0,94 (0,05-1,99) K _{loc} : 74 (38-157)	mobil
Metazachlor	0,03	82,2	K _f : 1,02 (0,37-2,20) K _{loc} : 79,6 (72,5-83,5)	mäßig mobil
Terbutylazin	0,05	97,2	K _f : 5,1 (2,1-10,49) K _{loc} : 231 (151-333)	mäßig mobil

BG: Bestimmungsgrenze, ¹berechnet auf Grundlage der zugegebenen Menge und nachgewiesene Konzentration im Boden

PSM-Abbau und Sorption

Der PSM-Abbau-Versuch zeigte, dass die Wirkstoffe Glyphosat und Diflufenican nach Zugabe einer hohen Konzentration des jeweiligen Wirkstoffes nicht im Bodensättigungsextrakt (Porenwasser) nachweisbar waren (Abbildung 2). In den begleitenden Bodenuntersuchungen wurden hohe Konzentrationen an Glyphosat nachgewiesen, die darauf hinweisen, dass Glyphosat an die Bodenmatrix gebunden vorliegt (Tabelle 3). Ein hohes Sorptionsvermögen von Glyphosat an Tonpartikel und organische Substanz

und damit verbunden eine verzögerte mikrobielle Degradation wird auch in der Literatur bestätigt (Van Bruggen et al. 2018). Die Sorptionskoeffizienten werden mit K_f: 226 mL g⁻¹ (9,4-700) und K_{loc}: 16.331 mL g⁻¹ (1.600-60.000) angegeben (PPDB 2019). Die ebenfalls nachgewiesene hohe Konzentration des Metaboliten AMPA deutet auf einen beginnenden Abbau hin. Der Wirkstoff Diflufenican war weder im Boden noch im Bodensättigungsextrakt nachweisbar. Das ist vermutlich auf die sehr geringe Löslichkeit der Reinsubstanz zurückzuführen, so dass in der applizierten Stammlösung nicht die gewünschte Konzentration erreicht

werden konnte. Die Bodenuntersuchungen ergaben zudem eine vollständige Sorption von Epoxiconazol im Boden und hohe Sorptionsraten von 97 % bei Terbuthylazin, 87 % bei Imidacloprid und 82 % bei Metazachlor (*Tabelle 3*). Keine Sorption im Boden hingegen wurde bei dem PSM-Wirkstoff MCPA ermittelt. Mit Ausnahme von Epoxiconazol, das als leicht mobil eingestuft wird, stimmen die ermittelten Sorptionsraten überwiegend mit den in der Literatur angegebenen Sorptionseigenschaften überein (PPDB 2019)

Ein signifikanter Abbau im Versuchszeitraum von 71 Tagen konnte lediglich bei den Wirkstoffen MCPA und Bentazon beobachtet werden. Bei allen anderen Wirkstoffen ist bisher kaum eine Änderung der Konzentrationen feststellbar. Das bestätigt bisherige Ergebnisse im Pilotgebiet Querne/Weida, bei denen die Wirkstoffe lange Zeit nach Applikation noch bis zum Teil in 5 m Tiefe in Tiefenprofilen im Boden nachgewiesen wurden (Tauchnitz et al. 2018).

Schlussfolgerungen

Die bisherigen Versuchsergebnisse zeigten keine Auswaschung der applizierten Wirkstoffe nach der ersten PSM-Maßnahme im Winterweizen. Positivbefunde von Tebuconazol im Sickerwasser im Vorab-Screening und den ersten Messungen nach Versuchsbeginn weisen auf den Einsatz fungizider Saatgutbehandlungsmittel in vergangenen Versuchen hin. Die im PSM-Abbauversuch unter kontrollierten Bedingungen nachgewiesene hohe Sorption der meisten PSM-Wirkstoffe und eine eventuell damit verbundene verzögerte mikrobielle Degradation im Boden deuten darauf hin, dass die Wirkstoffe eine höhere Persistenz aufweisen als aus der Literatur bekannt. Es ist demzufolge anzunehmen, dass PSM-Austräge aus dem Boden auch stark zeitlich verzögert erfolgen können. Diese Erkenntnis sollte beim Gewässermonitoring und der Umsetzung von Reduzierungsmaßnahmen beachtet werden.

Literatur

- BAUA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) (2016) www.baua.de/de/.../Biozidverfahren/Biozide/Zulassungsstelle-Biozide.html
- BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) (2019) Zugelassene Pflanzenschutzmittel. Stand 08.01.2019:

https://www.bvl.bund.de/DE/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/01_ZugelPSM/01_OnlineDatenbank/psm_onlineDB_node.html;jsessionid=B76620943F913A6C0DE6702590CA7D04.2_cid332.

- Burkhardt M., Junghans M., Zuleeg S., Schoknecht U., Lamani X, Bester K., Vonbank R., Simmler H., Boller M. (2009) Biozide in Gebäudefassaden – ökotoxikologische Effekte, Auswaschung und Belastungsabschätzung für Gewässer. *Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung* 21, 36-47.
- Götz C., Kase R., Hollender J. (2010) Mikroverunreinigungen - Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser, Eawag, Dübendorf.
- LFUG (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE) (2004) Materialienband zur Altlastenbehandlung. Musterleistungsbeschreibung/ Musterleistungsverzeichnis: Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailerkundung.
- 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.
- OGEWV (2016) Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung), 20.06.2016.
- PPDB (Pesticide Properties DataBase), University of Hertfordshire (2019) <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>. (29.01.2019).
- Tauchnitz N., Schrödter M., Schmidt G., Hauser G. (2018) Pflanzenschutzmittelwirkstoffe in Oberflächengewässern – Eintragspfade und Reduzierungsmaßnahmen. *Julius-Kühn-Archiv*, 461,P 364.
- UBA (Umweltbundesamt) (2017) Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung. Dessau-Rosslau.
- Van Bruggen A.H.C., He M.M., Shin K., Mai V., Jeong K.C., Finckh M.R., Morris J.G.JR. (2018) Review: Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. *Science of the Total Environment* 616-617, 255-268.
- Wittmer I.K., Bader H.P., Scheidegger R., Singer H., Lück A., Hanke I., Carlsson C., Stamm C. (2010) Significance of urban and agricultural land use for biocide and pesticide dynamics in surface waters. *Water Research* 44, 2850-2862.
- Wittmer I., Junghans M., Singer H., Stamm C. (2014) Mikroverunreinigungen – Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus diffusen Einträgen. Studie im Auftrag des BAFU. Eawag, Dübendorf.

Präzise Bestimmung von Niederschlags- und Verdunstungsereignissen aus Lysimetermessungen mit Hilfe eines verbesserten Datenfilters

Andre Peters^{1*} und Wolfgang Durner¹

Zusammenfassung

Moderne wägbare Lysimeter mit hoher Auflösung der Gewichtsmessung bieten ideale Informationen für eine präzise Quantifizierung von Evapotranspirations- (ET) und Niederschlagsraten (P). In der Praxis bestehen allerdings Schwierigkeiten bei Interpretation der Wägesignale, da die durch N und ET hervorgerufenen Gewichtsänderungen durch Störungen (z.B. durch Wind induziert) überlagert werden. Da sowohl die Signale als auch das Rauschen stark variabel in der Zeit sein können, ist es eine Herausforderung, sie möglichst gut voneinander zu trennen.

In diesem Beitrag stellen wir die AWAT3.0-Software (Adaptive Window and Adaptive Threshold) vor, die mit dem Ziel erstellt wurde, eine Auswertung mit maximaler Präzision bei gleichzeitiger Vermeidung von systematischen Fehlern (Bias) zu erlangen. Signale werden in vier Schritten von Rauschen getrennt: (i) Glättung der Daten durch einen gleitenden Mittelwert mit adaptivem Mittelungsfenster, (ii) Einführung eines adaptiven Schwellenwertes, als Maß für die Messungenauigkeit, der signifikante von nicht signifikanten Masseänderungen trennt, (iii) Anwendung der sogenannten „Snap-Routine“ um systematische Unterschätzungen der Flüsse bei jedem Wechsel in der Fließrichtung (von P zu ET oder ET zu P) als Folge der Schwellenwertberechnung zu vermeiden und (iv) eine Interpolation der so gewonnenen Daten, um einen stufenförmigen Verlauf der berechneten Flüsse nach der Schwellenwertberechnung zu vermeiden. Anhand synthetischer und realer Messdaten wird die Leistung der Routine gezeigt.

Summary

Modern weighable lysimeters with high resolution of the weight measurement provide ideal information for a precise quantification of evapotranspiration (ET) and precipitation rates (P). In practice, however, there are difficulties in interpreting the weighing signals because the weight changes caused by N and ET are superimposed by disturbances (e.g., induced by wind). Since both the signals and the noise can be highly variable in time, it is a challenge to separate them with minimum error.

In this paper, we introduce the AWAT3.0 (Adaptive Window and Adaptive Threshold) software, which was created with the goal of obtaining maximum precision in the data evaluation while avoiding systematic bias. Signals are separated from noise in four steps: (i) smoothing the data through a moving average with adaptive window width, (ii) introducing an adaptive threshold, as measure of noise-induced measurement inaccuracy, separating significant from non-significant mass changes, (iii) applying the so-called „snap-routine“ to avoid systematic underestimation of the flows at each change in the flow direction (from P to ET or ET to P) if changes are smaller than the threshold value, and (iv) an interpolation of the data to obtain smoothly changing N and ET data. The performance of the AWAT 3.0 filter is shown for synthetic and real data and is compared to the previous versions of the filter.

Einleitung

Eine möglichst genaue Quantifizierung der Wasserflüsse zwischen dem System Boden-Pflanze und der Atmosphäre ist für viele Fragen hinsichtlich des Wasser- Energie- und Stofftransportes von großer Bedeutung. Alle Wasserflüsse in Richtung Boden werden als Niederschläge (N [cm d^{-1}]) zusammengefasst, alle Flüsse zur Atmosphäre als Evapotranspiration (ET [cm d^{-1}]). Die klassischen Messungen der Niederschläge haben teilweise große systematische Fehler (Michelson 2004, Hoffmann et al. 2016). Die potenzielle ET wird häufig basierend auf meteorologische Daten berechnet (Allen et al. 1998). Die reale ET kann nur durch vereinfachte Rechenverfahren (ungenau) oder über die numerische Simulation des Wasserhaushaltes im System-Boden-Pflanze-Atmosphäre (aufwändig) abgeschätzt werden.

Durch ihre ebenerdige Lage und eine identische Beschaffenheit der Oberflächen der Lysimeter und ihrer Umgebung

lassen sich die geringsten systematischen Fehler bei den Messungen dieser Größen durch moderne wägbare Lysimeter erzielen (von Unold und Fank 2008). Jede Zunahme der Gesamtmasse von Lysimeter und Abflussbehälter wird als Niederschlag, jede Abnahme als Evapotranspiration interpretiert. Allerdings sind diese Messungen oft überlagert von Rauschen, verursacht z.B. durch Erschütterungen oder Wind (Nolz et al. 2013). In den letzten Dekaden wurde die Messauflösung der Waagen immer genauer, so dass der Einfluss des Rauschens immer deutlicher wurde. Um die wirklichen Signale vom Rauschen zu trennen, müssen die Messdaten gefiltert werden.

Gemessen werden Zeitreihen von Massen ($M(t)$), die Zielgrößen sind dagegen die Flüsse ($F(t)$), also die erste Ableitung dieser Zeitreihen ($F(t) = \Delta M / \Delta t$). Jede Fluktuation in $M(t)$ wird im Resultat somit als Fluss interpretiert. Einfache Glättungs-Filter, wie z.B. der gleitende Mittelwert oder der

¹ Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

* Ansprechpartner: Dr. Andre Peters, a.peters@tu-braunschweig.de

Savitzky-Golay-Filter (Savitzky und Golay 1964) sind zur Elimination des Rauschens nicht ausreichend, da auch nach der Mittelung immer noch kleine Fluktuationen auftreten, die den realen N oder ET-Verlauf nicht widerspiegeln.

Fank (2013) schlug deshalb vor, die Filterung der Daten in zwei Schritten durchzuführen: (i) Glättung der Daten (z.B. gleitender Mittelwert) mit einem bestimmten Mittelungsfenster w [min] und (ii) Einführung eines Schwellenwertes δ [mm] als Maß für die Messgenauigkeit, der signifikante von nicht signifikanten Masseänderungen trennt. Eine Analyse von Schrader et al. (2013) mit synthetischen Daten zeigte, dass für eine Zeitreihe mit unterschiedlich starkem Rauschen (z.B. durch Wind) keine konstanten Werte für w und δ existieren, die für jedes Ereignis optimal wären. So wird für ein starkes Signal (schnelle, starke Veränderung der Masse M) ein kleiner Wert für w benötigt, während für ein schwaches Signal ein größerer Wert für w erforderlich sein kann. Analog sollte bei geringem Rauschen (z.B. Schwachwindphase) der Schwellenwert δ klein sein, während er bei starkem Rauschen größer sein muss.

Peters et al. (2014, 2015) entwickelten daraufhin den AWAT1.0 (Adaptive Window Adaptiv Threshold)-Filter. Diese Routine errechnet mithilfe eines gleitenden Polynoms Maße für Signalstärke (B) und Rauschen (s) und passt w und δ in Abhängigkeit von B und s an. Peters et al. (2016) und Peters et al. (2017) entwickelten diese Routine weiter, um einen stufenförmigen Verlauf der berechneten Flüsse nach der Schwellenwertberechnung zu glätten (AWAT2.0) und systematische Unterschätzungen der Flüsse bei jedem Wechsel in der Fließrichtung (von P zu ET oder ET zu P) als Folge der Schwellenwertberechnung zu vermeiden (AWAT3.0). Eine schematische Übersicht der Routine ist in *Abbildung 1* gegeben. Eine genaue Beschreibung der mathematischen Implementierung des Filters ist den Originalpublikationen von Peters et al. (2014, 2016, 2017) gegeben.

Ziel dieses Beitrags ist die AWAT3.0-Routine auf synthetische und reale Messdaten anzuwenden, und die Ergebnisse mit der ursprünglichen Version (Peters et al. 2015) zu vergleichen.

Material und Methoden

Die Softwareroutinen AWAT1.0 bis AWAT3.0 wurden an drei Datensätzen getestet und verglichen:

- Daten eines Grasreferenz-Lysimeters in Berlin Marienfelde (nähere Erläuterungen finden sich in Peters et al. 2016),
- Synthetische Daten mit zeitlich variablem Messrauschen aus Schrader et al. (2013) und modifiziert in Peters et al. (2017),
- Daten eines Großlysimeters aus Rollesbroich (Eifel) als Teil des TERENO-Netzwerkes (Terrestrial Environmental Observatories, Zacharias et al. 2011).

Bei synthetischen Daten sind, anders als bei realen Daten, die wahren Flüsse bekannt. Sie eignen sich deshalb besonders gut um zu testen ob der Filter in der Lage ist das Messrauschen vom Signal zu trennen. Reale Messdaten hingegen enthalten Messrauschen von fast beliebiger Komplexität. Die wahren Flüsse sind dabei naturgemäß unbekannt, aber ein visueller Vergleich der Glättung der Routine mit den Rohdaten erlaubt in der Regel eine gute Beurteilung, ob

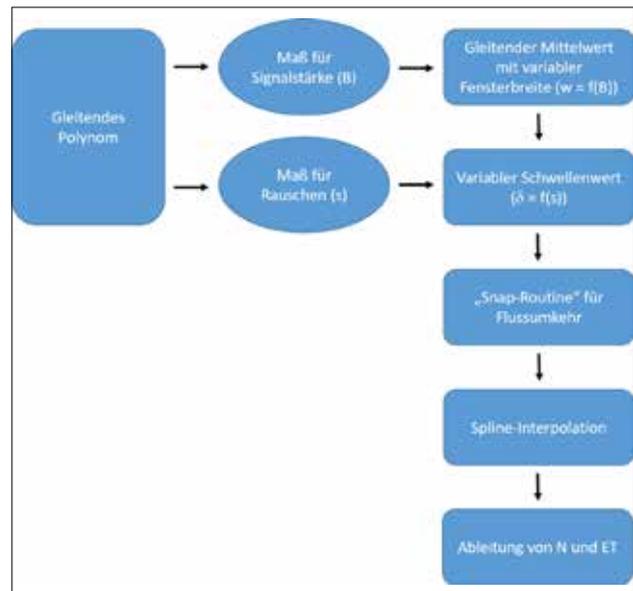


Abbildung 1: Schematische Darstellung der AWAT3.0-Routine zur Berechnung von Niederschlägen (N) und Evapotranspiration (ET) aus Lysimeterdaten.

die Charakteristik des Grundsignals gut erfasst wurde und somit die abgeleiteten Flüsse realistisch sind.

Bei den Tests sollte untersucht werden ob der Filter in der Lage ist Daten ohne systematische Über- oder Unterschätzungen der daraus errechneten Flüsse zu filtern. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf (i) sehr kleinen Signalen, die durch moderate Verdunstungsereignisse und Taufall hervorgerufen werden, und (ii) auf schnell aufeinander folgenden Flussumkehrungen, wie sie an einem Tag mit multipen kleinen Schauern auftreten.

Ergebnisse und Diskussion

Vergleich AWAT1.0 und AWAT2.0 (Interpolation)

In *Abbildung 2* (oben) sind mit dem Grasreferenzlysimeter aus Berlin Marienfelde gemessene Rohdaten für zwei unterschiedliche Evapotranspirationsereignisse ohne Niederschlag und die mit AWAT1.0 und AWAT2.0 errechneten Verläufe zu sehen. Mit der ursprünglichen Version wird die Routine nach der Schwellenwertberechnung beendet (steps). Daraus lassen sich durch einfache Differenzbildung die Flüsse für bestimmte Zeitintervalle berechnen. Bei einer zeitlichen Auflösung von 1 d ergeben sich sinnvolle Werte (*Abbildung 2*, unten). Oft werden die Flüsse aber in höherer zeitlicher Auflösung benötigt (z.B. stündlich oder 10-minütlich). Dann können die resultierenden Flüsse sehr unrealistisch sein: Immer wenn in einem Zeitintervall eine oder mehrere Stufen durch den Filter errechnet wurde ergibt sich ein Fluss, sonst wird kein Fluss errechnet. Dieser Verlauf von Flüssen ist unrealistisch. Weiterhin ist die Größe eines solchen Flusses abhängig von der zeitlichen Auflösung (siehe *Abbildung 2*, unten). AWAT2.0 behebt dieses Problem indem an den Punkten mit signifikanten Änderungen ein Ankerpunkt gesetzt wird (*Abbildung 2*, oben). Zwischen diesen Ankerpunkten wird im Anschluss durch hermitesche Splines

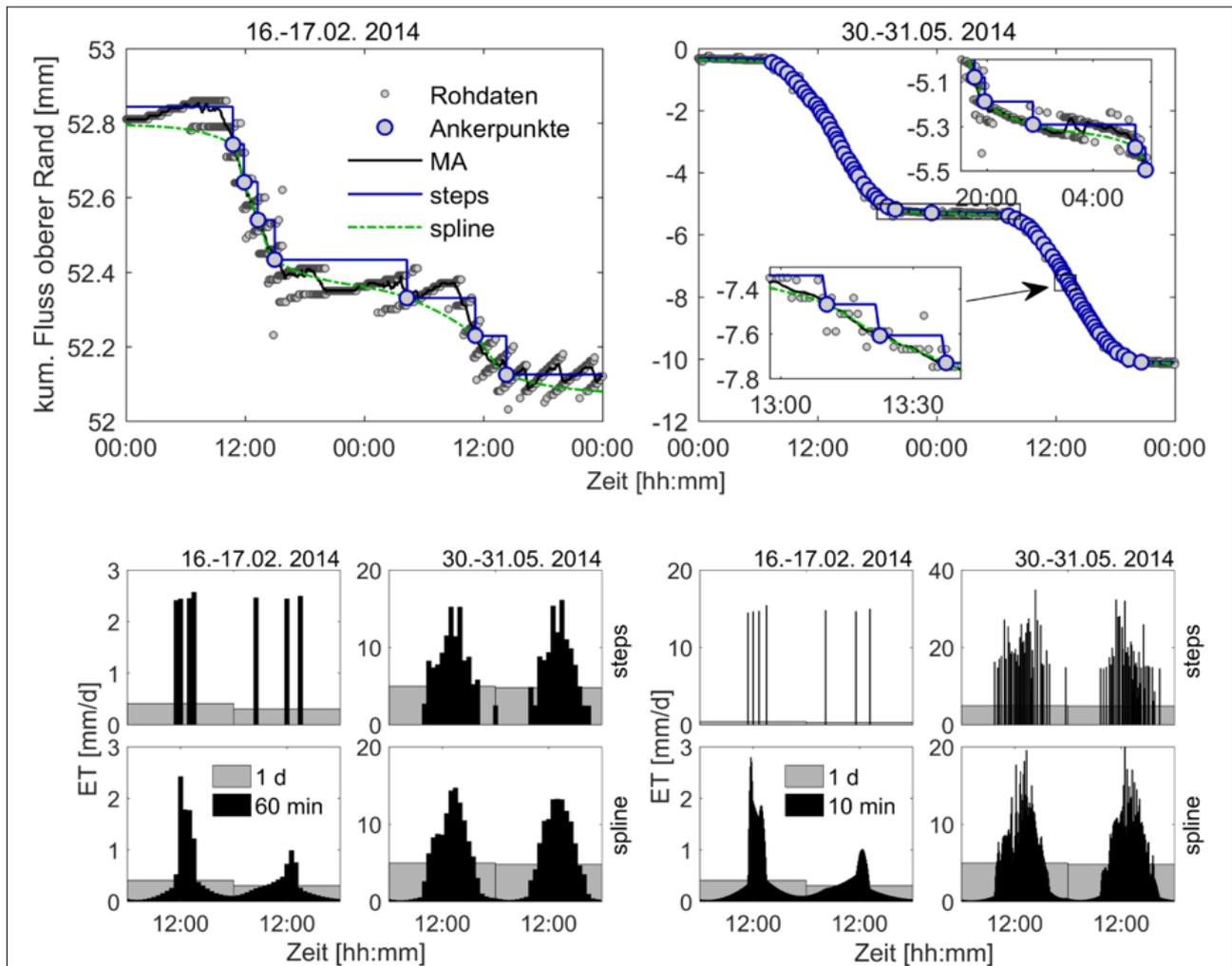


Abbildung 2: Daten und Auswertungsergebnisse eines Grasreferenzlysimeters aus Berlin Marienfelde für jeweils zwei Tage im Februar und Mai 2014. Oben: Gemessene Rohdaten und gefilterte Verläufe. MA: gleitender Mittelwert; steps: gefiltert mit AWAT1.0; Ankerpunkte: Punkte an denen eine Schwellenwertüberschreitung stattfand und deshalb die gefilterte Kurve wieder auf den MA fällt; spline: Spline-Interpolation mit AWAT2.0. Unten: Abgeleitete Flussdichten in täglicher (graue Balken) und stündlicher (links) bzw. 10-minütlicher (rechts) Auflösung für ET anhand der unterschiedlichen Interpolationen. AWAT2.0 bildet die Tagesdynamik plausibel ab.

interpoliert und aus diesen Werten werden schließlich die Flüsse berechnet (Abbildung 2, unten). Die Flüsse können damit in beliebiger Auflösung realistisch berechnet und z.B. für Simulationen von Wasser-, Energie- und Stoffflüssen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre genutzt werden.

Vergleich von AWAT2.0 und AWAT3.0

(„Snap-Routine“)

Untersuchungen an Realdaten zeigen, dass der AWAT2.0-Filter („nosc“) teilweise nicht in der Lage ist, bei relativ starkem Rauschen sehr kleine Signal korrekt zu quantifizieren. In Abbildung 3 (oben) ist ein synthetisches Taufallerereignis mit unterschiedlich starken Störungen zu sehen. Der „wahre“ Taufall (grüne gestrichelte Linie) betrug in Summe 0.1 mm. Bei jeder Umkehr der Fließrichtung kommt es zu einer leichten Unterschätzung der Flüsse, die bei größerer Auflösung der Waage naturgemäß gravierender ausfällt. Bei der größten Störung (Abbildung 3, rechts) ergab sich eine Unterschätzung von fast 20%. Mit dem AWAT3.0-Filter

(„snap“) werden diese systematischen Unterschätzungen durch Anwendung der Snap-Routine weitgehend vermieden. Der Fehler für die dargestellten synthetischen Daten beträgt nur noch 1%, d.h. das Tau-Ereignis ist mit einer absoluten Genauigkeit von 0.001 mm quantifiziert. In Abbildung 3 (unten) sind die Residuen zwischen den wahren und errechneten Verläufen aufgetragen.

In Abbildung 4 sind drei unterschiedliche mit dem TERE-NO-Großlysimeter gemessene reale Tauereignisse zu sehen. Die Intensität des Taufalls nimmt von links nach rechts zu. Mit AWAT3.0 (snap) wird das Rauschen plausibel von den Grunddaten entfernt.

Da jede Umkehr des Wasserflusses (ET zu N und umgekehrt) aufgrund der Glättung der Daten potenziell zu einer Unterschätzung der Flüsse führen kann, summiert sich dieser Fehler mit der Häufigkeit der Flussumkehrungen auf. Abbildung 5 zeigt, wiederum für reale Messdaten des TERE-NO-Großlysimeters, Rohdaten sowie die mit AWAT2.0 (nosc) und AWAT 3.0 (snap) errechneten Verläufe für einen

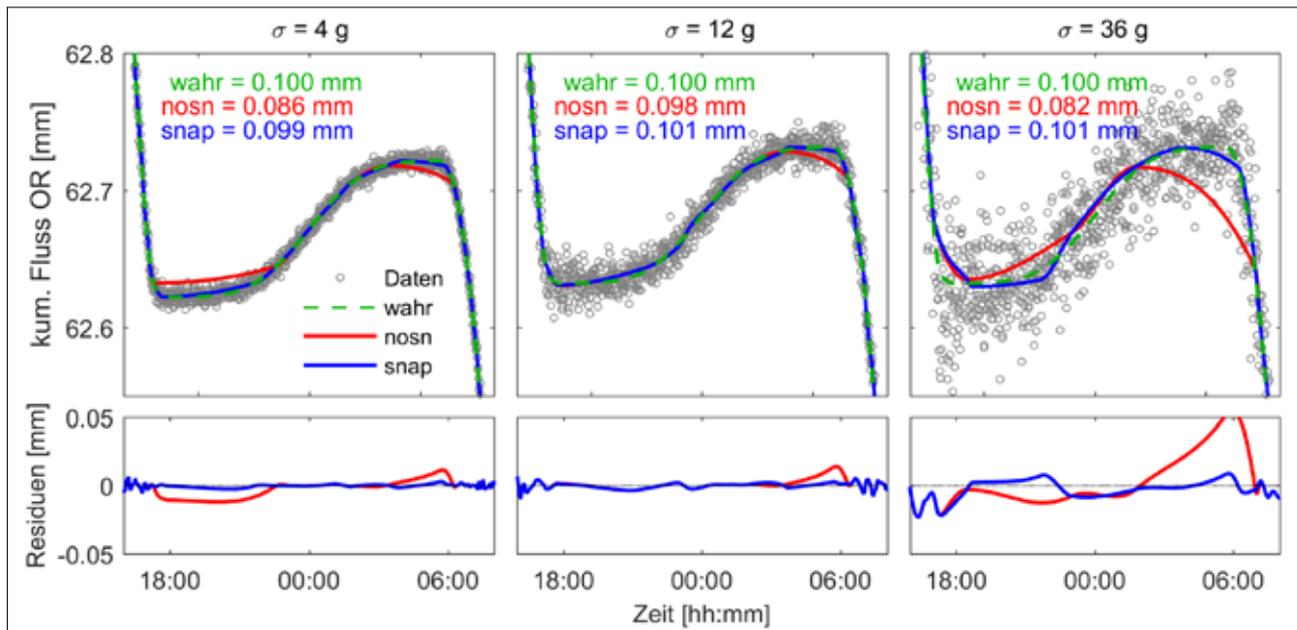


Abbildung 3: Oben: synthetische Daten für ein bestimmtes Taufallereignis mit unterschiedlich starkem Rauschen in den Daten und durch AWAT gefilterte Verläufe. True: Wahre Verläufe; nosn: mit AWAT2.0 ermittelte Werte; snap: mit AWAT3.0 mit „snap-Routine“ ermittelte Verläufe. Unten: Residuen zwischen den wahren und errechneten Verläufen.

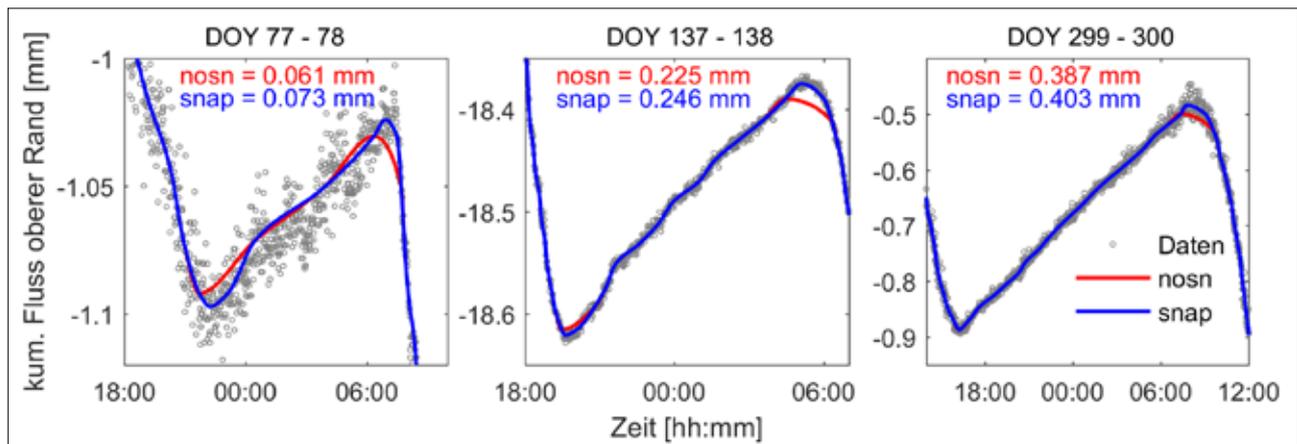


Abbildung 4: Drei unterschiedliche Tauereignisse aus dem Jahr 2014 gemessen mit dem TERENO-Großlysimeter und durch AWAT2.0 (nosn) und AWAT 3.0 (snap) ermittelte Verläufe.

wechselhaften Tag, der geprägt war durch häufige Wechsel von leichten Regenschauern und Evapotranspiration. Es ist zu erkennen, dass jede Flussumkehr zu einer systematischen Abweichung zwischen Daten und errechneten Verlauf führt. Diese wird durch Verwendung der Snap-Routine weitgehend vermieden, die ET und N-Berechnungen erscheinen realistisch. Eine Quantifizierung des eventuell noch verbleibenden Fehlers kann für real gemessene Daten allerdings nicht vorgenommen werden, da kein alternatives Messsystem mit vergleichbarer Präzision existiert.

Fazit

Reale Wasserflüsse am oberen Rand von Lysimetern können sehr starke (z.B. kurzer Starkregen) oder sehr kleine (z.B. Evapotranspiration oder Taufall) Signale in Form von Massenänderungen hervorrufen. Diese Signale sind grundsätzlich von Störungen (Rauschen) überlagert, die aufgrund unter-

schiedlichster Gegebenheiten sowohl groß als auch sehr klein sein können. Um aus verrauschten Daten ohne Verfälschung die „wahren“ Signale zu filtern bedarf es eines mehrstufigen Verfahrens. Mit dem ursprünglichen AWAT-Filter (Peters et al. 2014) lassen sich Ereignisse mit sehr unterschiedlicher Signalcharakteristik vom Rauschen trennen. Allerdings gab es Probleme durch die Schwellenwertberechnung mit dem stufenförmigen zeitlichen Verlauf der Lysimetermassen und daraus resultierenden Berechnungen von N und ET. Mit AWAT2.0 wurde dieses Problem erfolgreich gelöst. Ein weiteres Problem lag darin, dass die Schwellenwertberechnung bei Umkehr der Fließrichtung zu einer kleinen aber systematischen Unterschätzung der Flüsse führt. Dieser systematische Fehler kann bei kleinen Ereignissen (z.B. Taufall) und häufigem Fließrichtungswechsel (Tag mit mehreren kleinen Schauern) zu erheblichen Unterschätzungen der aufaddierten ET und N führen. Dieses Problem wurde mit der Snap-Routine (AWAT3.0) behoben, sodass eine Quan-

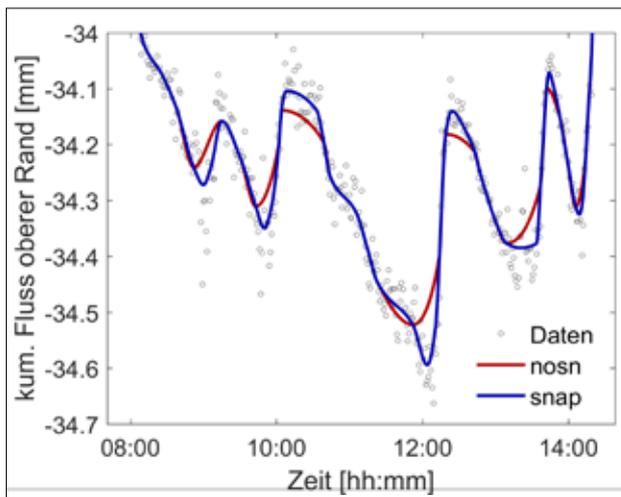


Abbildung 5: Reale Messungen mit dem TERENO-Großlysimeter an einem wechselhaften Tag mit häufigem Wechsel der Flussrichtung und durch AWAT2.0 (nosn) und AWAT 3.0 (snap) ermittelte Verläufe.

tifizierung der Wasserflüsse am oberen Rand der Lysimeter nun ohne systematische Fehler und in herausragender Auflösung vorgenommen werden kann. Wägbare Großlysimeter sind damit die präzisen Messgeräte für die Messung von Flüssen zwischen Boden und Atmosphäre. Eine Herausforderung für die Übertragbarkeit in die Fläche liegt darin, dass Evapotranspirationsflüsse vom Lysimeter zur Atmosphäre identisch zur Umgebung sein müssen, Lysimeter also genau die Eigenschaften sowie die hydrologischen und thermischen Verhältnisse des Freilandbodens reflektieren müssen.

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 56, 300 pp.

Fank J. (2013) Wasserbilanzauswertung aus Präzisionslysimeterdaten. In: 15. Gumpensteiner Lysimetertagung 2013, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Österreich, 85-92.

Hoffmann M., Schwartengraber R., Wessolek G., Peters A. (2016) Comparison of simple rain gauge measurements with precision lysimeter data. Atmos. Res. 174-175, 120-123.

Michelson D.B. (2004) Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables. J. Hydrol., 290, 161-177.

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

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, 1189-1198.

Peters A., Nehls T., Schonsky H., Wessolek G. (2015) Ein neuer Filter zur Trennung von Niederschlägen, Evapotranspiration und Messrauschen aus Lysimetermessungen. In: 16. Gumpensteiner Lysimetertagung 2015, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Österreich, 101-106.

Peters A., Nehls T., Wessolek G. (2016) Technical note: improving the AWAT filter with interpolation schemes for advanced processing of high resolution data. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20, 2309-2315.

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.

Savitzky A., Golay M. (1964) Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. Analytical Chemistry 36, 1627-1639.

Schrader F., Durner W., Fank J., Gebler S., Pütz T., Hannes M., Wollschläger U. (2013) Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements. In: Four Decades of Progress in Monitoring and Modeling of Processes in the Soil-Plant-Atmosphere System: Applications and Challenges, editiert von: Romano, N., D'Urso, G., Severino, G., Chirico, G., und Palladino, M., Procedia Environmental Sciences, 543-552.

Von Unold G., Fank J. (2008) Modular design of field lysimeters for specific application needs. Water, Air, & Soil Pollution: Focus 8, 233-242.

Zacharias S., Bogena H., Samaniego L., Mauder M., Fuss R., Pütz T., Frenzel M., Schwank M., Baessler C., Butterbach-Bahl K., Bens O., Borg E., Brauer A., Dietrich P., Hajsek I., Helle G., Kiese R., Kunstmann H., Klotz S., Munch J.C., Papen H., Priesack E., Schmid H.P., Steinbrecher R., Rosenbaum U., Teutsch G., Vereecken H. (2011) A Network of terrestrial environmental observatories in Germany. Vadose Zone J. 10, 955-973.

Versuche zur Verminderung des Oaseneffekts auf Lysimetern

Ernst Spiess^{1*}, Clay Humphrys¹ und Volker Prasuhn¹

Zusammenfassung

Auf Lysimetern treten oftmals Oaseneffekte auf, die zu höheren Pflanzenerträgen und geringeren Sickerwassermengen als in der landwirtschaftlichen Praxis führen. Auf der Lysimeteranlage in Zürich-Reckenholz wurden deshalb Maßnahmen getestet, um den Oaseneffekt zu reduzieren. Im ersten Versuch mit Winterweizen führte die Beschattung der Pflanzen mit zwei Netztypen sowie der Anbau von Getreide um die Lysimeter herum nicht zum gewünschten Ergebnis. Der zweite Versuch mit *Triticale* ergab, dass eine Kürzung der gesamten Länge aller Saatzeilen um 14-31% ein effektiveres Mittel zur Zielerreichung ist. In Jahren mit unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen ist nun zu prüfen, welche Kürzung der Saatzeilen optimal ist.

Schlagwörter: Ertrag, Sickerwasser, *Triticale*, Weizen

Summary

On lysimeters, oasis effects often occur leading to higher crop yields and lower seepage volumes than in farmer's fields. For this reason, measures to decrease these effects were tested on the lysimeter facility at Zurich-Reckenholz. In the first experiment with winter wheat, shading of the plants with two plastic meshes or cereal cropping around the lysimeter did not yield promising results. In the second trial with *triticale*, the reduction of the total length of seed rows by 14-31% turned out to be more effective. The optimal rate of reduction has now to be determined in years differing in climatic conditions.

Keywords: seepage volume, *triticale*, wheat, yield

Einleitung

Die Sickerwassermenge und die Auswaschung von im Sickerwasser gelösten Stoffen kann mit Lysimetern am zuverlässigsten quantifiziert werden (Goulding und Webster 1992, Meissner et al. 2010, Böhner & Eder 2011). Wägbare Lysimeter sind zudem die genaueste Methode zur direkten Messung aller Komponenten der Wasserbilanz (Meissner et al. 2007, Hannes et al. 2015). Lysimeter, die in einer Anlage stehen und von einem kurz gehaltenen Rasen umgeben sind, weisen jedoch den Nachteil auf, dass Oaseneffekte auftreten (Zenker 2003). Wenn sich die Höhe des Pflanzenbestandes auf einem Lysimeter wesentlich von jenem der Umgebung unterscheidet, werden schräg einfallende Niederschläge seitlich aufgefangen, so dass die gesamte Niederschlagsmenge, welche auf den Lysimeter fällt, höher ist als im freien Feld (AG Lysimeter 1989). Zudem ist der Lichteinfall am Lysimeterrand infolge der geringeren oder sogar fehlenden Beschattung durch Nachbarpflanzen stärker (Bender & van der Heijden 2014), was das Pflanzenwachstum fördert und die Evapotranspiration durch die erhöhten Temperaturen auf der Boden- und Pflanzenoberfläche steigert (Czeratzki & Schulze 1976, Roth et al. 1994). Die Evapotranspiration wird auch durch die höhere Windgeschwindigkeit im Pflanzenbestand gesteigert. Die Pflanzen auf der kleinen Lysimeterfläche trocknen schneller ab und sind weniger anfällig für ertragsreduzierende Pilzkrankheiten als im freien Feld. Die fehlenden Nachbarpflanzen ermöglichen eine Ausbreitung des Bestands über den Lysimeterrand hinaus. Dies alles trägt dazu bei, dass die Erträge in Lysimeterversuchen häufig bedeutend höher ausfallen als im Freiland (Spiess et al. 2011, Bender & van der Heijden 2014, Oberholzer et

al. 2017). In einem zypriotischen Versuch mit verschiedenen Kulturen betragen die Erträge der äußeren Reihen 64 - 484% der Erträge der inneren Reihen (Hadjichristodoulou 1993). Durch die gesteigerte Evapotranspiration wird zudem weniger Sickerwasser gebildet und eine geringere Stickstoff(N)-Menge ausgewaschen.

Lysimeter weisen meistens eine Oberfläche von 1 m² auf. Durch die Vergrößerung der Oberfläche kann der Oaseneffekt vermindert oder sogar beseitigt werden. Becker (1994) betrachtet eine Oberfläche von 7 m² als ausreichend, um Randeffekte zu minimieren und um freilandtypische Pflanzenerträge zu erzielen. Diese Empfehlung kann aber in der Praxis aus finanziellen Gründen kaum umgesetzt werden. Durch die Einbettung der Lysimeter in ein Feld kann der Oaseneffekt ebenfalls beseitigt werden (Eder et al. 2004, Klammler & Fank 2014). Bei einer großen Anzahl Lysimetergefäße lässt sich dies aber aus finanziellen Gründen und dem beträchtlichen Flächenbedarf ebenfalls nicht umsetzen. In zwei einjährigen Versuchen untersuchten wir deshalb alternative Methoden, um den Oaseneffekt zu verringern.

Material und Methoden

Lysimeter

Der Versuch wurde während zwei Jahren auf zwölf monolithischen Lysimetern der neuen Anlage in Zürich-Reckenholz (47°25'41"N, 8°31'05"E; 444 m ü.M.) durchgeführt (Prasuhn et al. 2009). Die Gefäße weisen eine Oberfläche von 1 m² und eine nutzbare Tiefe von 1,35 m auf (sowie eine zusätzliche Quarzsandschicht von 0,15 m über dem

¹ Agroscope, Fachgruppe Gewässerschutz und Stoffflüsse, Reckenholzstraße 191, CH-8046 ZÜRICH

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



Abbildung 1: Winterweizen mit feinem Netztyp (links) bzw. groben Netztyp (rechts) am 19. April 2016.

Auslass, die als Sickerhilfe dient). Sie befinden sich auf dem Anlagenteil mit den nicht wägbaren Lysimetern. Die Sickerwassermenge wird mit 100 ml-Kippwaagen erfasst, wobei der exakte Zeitpunkt jeder Kippung von einem Datenlogger aufgezeichnet wird. Bei jeder Kippung fließen zudem etwa 1-2 ml Wasser in eine Probenflasche, was eine abflussproportionale Entnahme einer kleinen Probe erlaubt. Die Wasserproben werden 14-täglich entnommen und mittels segmentierter Fließinjektionsanalyse (s-FIA) kolorimetrisch auf Nitrat (NO_3^-) und Ammonium untersucht.

Boden, Verfahren und Kulturmaßnahmen

Die Monolithen wurden im Sommer 2008 im schweizerischen Mittelland auf einem Acker in Grafenried bei Bern gefräst. Der Boden ist eine Braunerde mit 16% Ton, 32% Schluff und 52% Sand sowie einem Gehalt an organischem Kohlenstoff von 1,0% und an Gesamtstickstoff (N) von 0,11% (0-20 cm Bodentiefe). Da die Lysimeter zwischen 2009 und 2014 in verschiedenen Versuchen verwendet worden waren, wurden am 22. April 2015 als Ausgleichskultur Sonnenblumen gesät, welche am 24. August 2015 geerntet wurden.

Der erste Versuch wurde mit Winterweizen (Bodenbearbeitung am 20. Oktober 2015; Saat am 27. Oktober 2015; Ernte am 19. Juli 2016) durchgeführt. Der Boden wurde beim Umbruch jeweils 20 cm tief bearbeitet. Die N-Düngung mit Ammoniumnitrat (140 kg N ha^{-1}) erfolgte im Frühjahr in drei Gaben. In diesem Versuch wurde der Weizen mit zwei Netztypen unterschiedlicher Maschenweite, die Mitte April 2016 um die Lysimetergefäße herum aufgestellt wurden, beschattet, wobei die Höhe des Netzes regelmäßig der Höhe des Pflanzenbestands angepasst wurde (Verfahren „grob“ und „fein“; *Abbildung 1*). In einer dritten Variante wurde Winterweizen auch außerhalb der Lysimetergefäße angesät, um einen Zustand wie im Feld zu simulieren (Verfahren „Umgebung“). Im Kontrollverfahren wurde keine Maßnahme ergriffen. Alle Verfahren wurden in dreifacher Wiederholung durchgeführt; zur Erleichterung der Versuchsdurchführung wurden sie aber nicht randomisiert. Die Sickerwassermengen und die ausgewaschene N-Menge wurde in diesem Versuch vom April 2016 bis März 2017 erfasst, d.h. im Jahr nach der Installation der Netze.

Nachdem der Ertrag im ersten Versuch nicht wesentlich durch die Beeinflussung der klimatischen Bedingungen gesenkt werden konnte, wurde in einem zweiten Experiment auf den gleichen Lysimetern versucht, ihn mit agronomischen Mitteln zu reduzieren. Dieser Versuch wurde mit *Triticale* (Bodenbearbeitung am 11.-12. Oktober 2016; Saat am 17. Oktober 2016; Düngung von 108 kg N/ha in drei Gaben mit Ammoniumnitrat; Ernte am 10. Juli 2017) durchgeführt, indem drei neue Verfahren und eine Kontrolle zufällig angeordnet und dreifach wiederholt wurden. In den verschiedenen Verfahren wurde am 13. März 2017 jeweils ein Teil der noch kleinen Getreidepflanzen entfernt. Im Verfahren „Rand 1“ wurden die beiden äußersten, kurzen Saatzeilen entfernt (-14% der gesamten Länge aller Saatzeilen; *Abbildung 2*). In zwei weiteren Verfahren wurden zusätzlich noch die verbleibenden Saatzeilen an beiden Enden um 10 cm (-23%; „Rand 2“) bzw. 20 cm (-31%; „Rand 3“) eingekürzt. Wir entschieden uns für die Verkürzung der Saatzeilen und nicht für die Reduktion der Bestandesdichte, weil die Getreidepflanzen bei ersterer Methode die Anzahl Triebe und damit den Ertrag weniger gut durch eine bessere Bestockung erhöhen können. Als Nachkultur von *Triticale* wurden am 9. August 2017 Chinakohlrüben (*Brassica chinensis x Brassica rapa*), eine winterharte Kreuzung von Chinakohl und Winterrüben, gesät. Die Sickerwassermengen und die ausgewaschene N-Menge wurde in diesem Versuch vom April 2017 bis März 2018 erfasst.

Klima

Die Klimadaten stammten von der 20 m entfernten Station von MeteoSchweiz. In beiden Versuchsjahren lagen die Niederschläge mit $1007 \text{ mm Jahr}^{-1}$ (2015/16) bzw. 976 mm Jahr^{-1} (2016/17) unter dem langjährigen Mittel (1981-2010) von $1054 \text{ mm Jahr}^{-1}$. Die Temperatur überstieg mit 9,9 bzw. $10,2^\circ\text{C}$ in beiden Jahren das langjährige Mittel von $9,4^\circ\text{C}$.

Resultate und Diskussion

Erträge im Versuch 1

Die Körnererträge von Winterweizen lagen in allen Verfahren etwas unter dem Referenzwert der Grundlagen für die Düngung (60 dt ha^{-1} ; Sinaj et al. 2017) und den Praxiser-

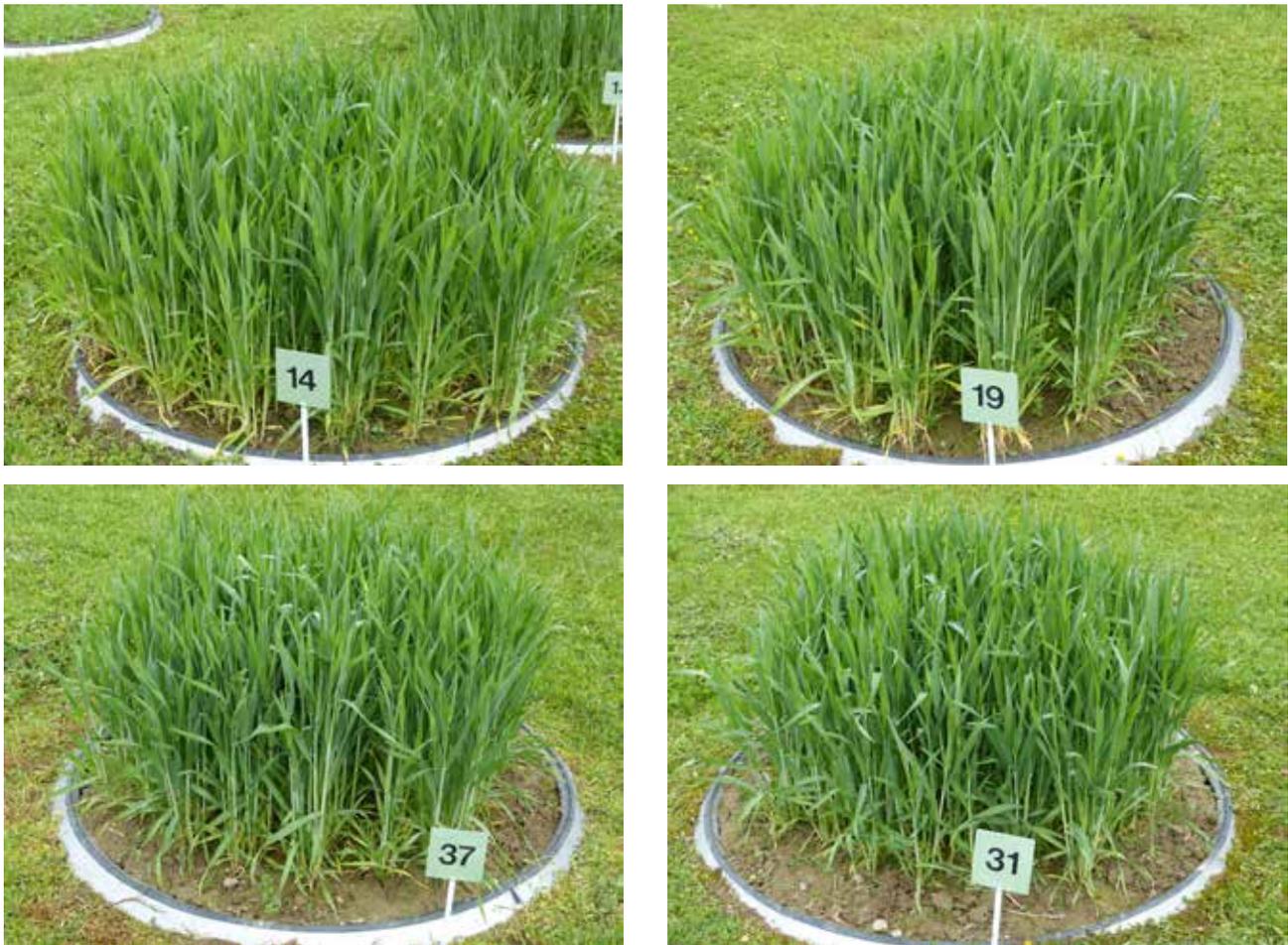


Abbildung 2: Die vier Verfahren des zweiten Versuchs mit Triticale am 4. Mai 2017: Kontrolle (oben links) sowie die Verfahren ohne die zwei äußersten Randreihen und keiner Einkürzung der verbleibenden Saatzeilen (Rand 1; oben rechts), einer Einkürzung um 10 cm (Rand 2; unten links) bzw. 20 cm (Rand 3; unten rechts).

trägen der schweizerischen Landwirtschaft. Da jedoch die Stroherträge bedeutend höher als der Referenzwert (70 dt ha^{-1}) ausfielen, lag auch der Trockensubstanz(TS)-Ertrag der oberirdischen Biomasse darüber. Mit den beiden Netztypen sowie mit der Ansaat von Weizen um die Lysimeter herum konnte keine wesentliche Ertragsreduktion erreicht werden. Die Körnererträge waren in diesen Verfahren sogar höher als in der Kontrolle, während die Stroherträge etwas niedriger ausfielen (Abbildung 3). Beim TS-Ertrag der oberirdischen Biomasse waren die Unterschiede zur Kontrolle gering. Es scheint, dass die drei Methoden den Lichteinfall auf die Pflanzen im Lysimeter nur wenig verringert haben. Beim Verfahren „Umgebung“ wurde wahrscheinlich ein zu schmaler Ring mit Weizen angesät. Zudem entwickelten sich die Pflanzen ausserhalb der Lysimeter infolge der geringen Bodenmächtigkeit von nur 50 cm über dem Lysimeterkeller nicht optimal. Alle drei Verfahren dürften im Weiteren wenig Einfluss auf die Windverhältnisse ausgeübt haben.

Sickerwassermenge und Nitratauswaschung im Versuch 1

Die Sickerwassermenge war beim groben Netz leicht niedriger als in der Kontrolle, dagegen fiel sie beim feinen Netz sowie beim Verfahren „Umgebung“ deutlich höher

aus (Abbildung 4). Sie wies eine negative Korrelation mit dem Biomasse- und dem Strohertrag auf. Angesichts der geringen Ertragsunterschiede können aber die stark variierenden Sickerwassermengen nur teilweise dadurch erklärt werden. Zudem dürfte sich die fehlende Randomisierung ungünstig auf die Versuchsergebnisse ausgewirkt haben. Die ausgewaschene Nitratmenge war in den Verfahren mit den Netzen aus unbekanntem Grund 20% geringer als in den beiden anderen Verfahren.

Erträge im Versuch 2

Sowohl die Körner- als auch die Stroherträge von *Triticale* lagen in allen Verfahren bedeutend über den Referenzwerten der Grundlagen für die Düngung ($60 \text{ dt Körner ha}^{-1}$; $75 \text{ dt Stroh ha}^{-1}$; Sinaj et al. 2017) sowie den Praxiserträgen der schweizerischen Landwirtschaft. Durch die Verkürzung der Saatzeilen konnte eine Ertragsreduktion erreicht werden, welche umso stärker ausfiel, je kürzer die gesamte Länge aller Saatzeilen war (Abbildung 5). Der Ertrag nahm beim Stroh stärker ab als bei den Körnern. Der TS-Ertrag der Biomasse nahm eine Mittelstellung ein. Beim Verfahren mit den kürzesten Saatzeilen lag hier der Ertrag mit $145 \text{ dt TS ha}^{-1}$ immer noch deutlich über dem Referenzertrag von $115 \text{ dt TS ha}^{-1}$.

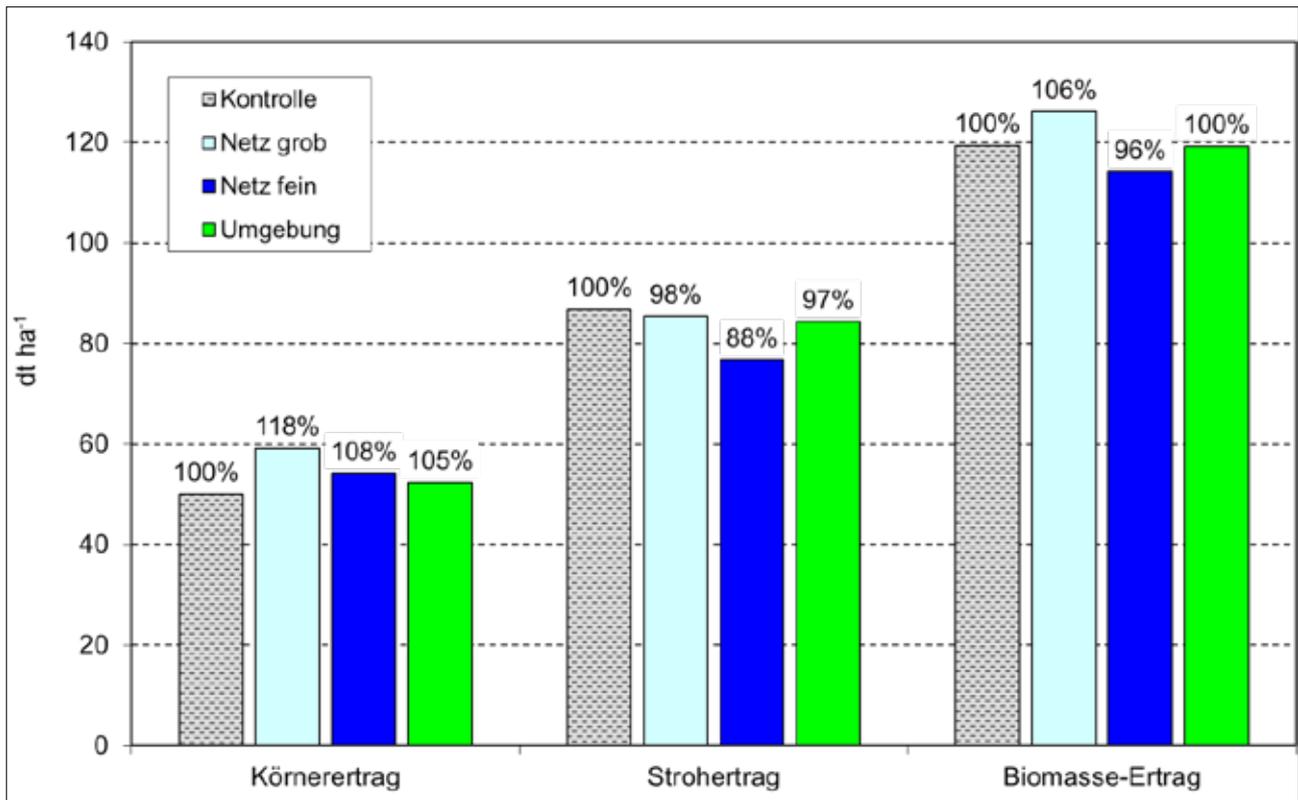


Abbildung 3: Körner- und Stroherträge sowie TS-Ertrag der oberirdischen Biomasse von Winterweizen der verschiedenen Verfahren im Versuch 1.

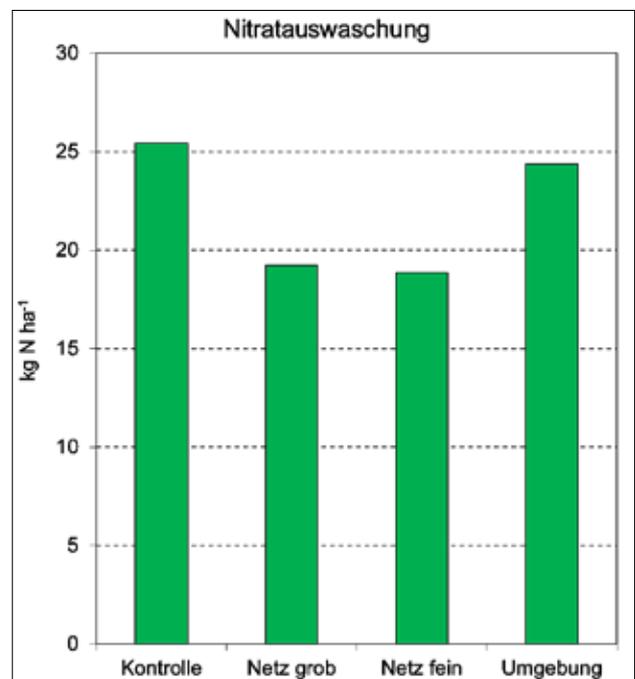
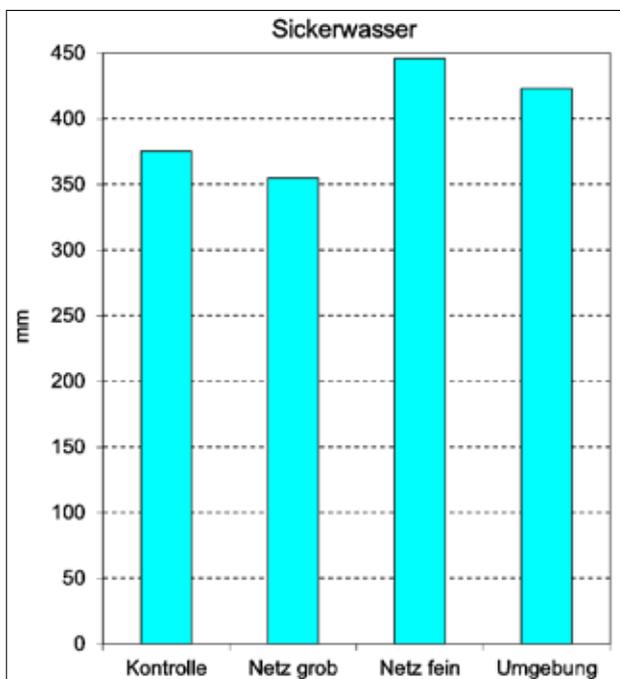


Abbildung 4: Sickerwassermenge und Nitratauswaschung der verschiedenen Verfahren im Versuch 1.

Sickerwasser und Nitratauswaschung im Versuch 2

Durch die Kürzung der gesamten Länge aller Saatreihen nahm die Sickerwassermenge leicht, aber nicht stetig zu (Abbildung 6). Im Verfahren „Rand 3“ war sie über 20 mm

höher als in der Kontrolle. Tendenzmässig stieg somit die Sickerwassermenge bei sinkenden TS-Erträgen der oberirdischen Biomasse. Die ausgewaschene N-Mengen waren in diesem Jahr mit 1-2 kg N ha⁻¹ sehr gering. Nur in vier Monaten fielen grössere Sickerwassermengen an und die Zwischenfrucht scheint effizient Wasser und Stickstoff

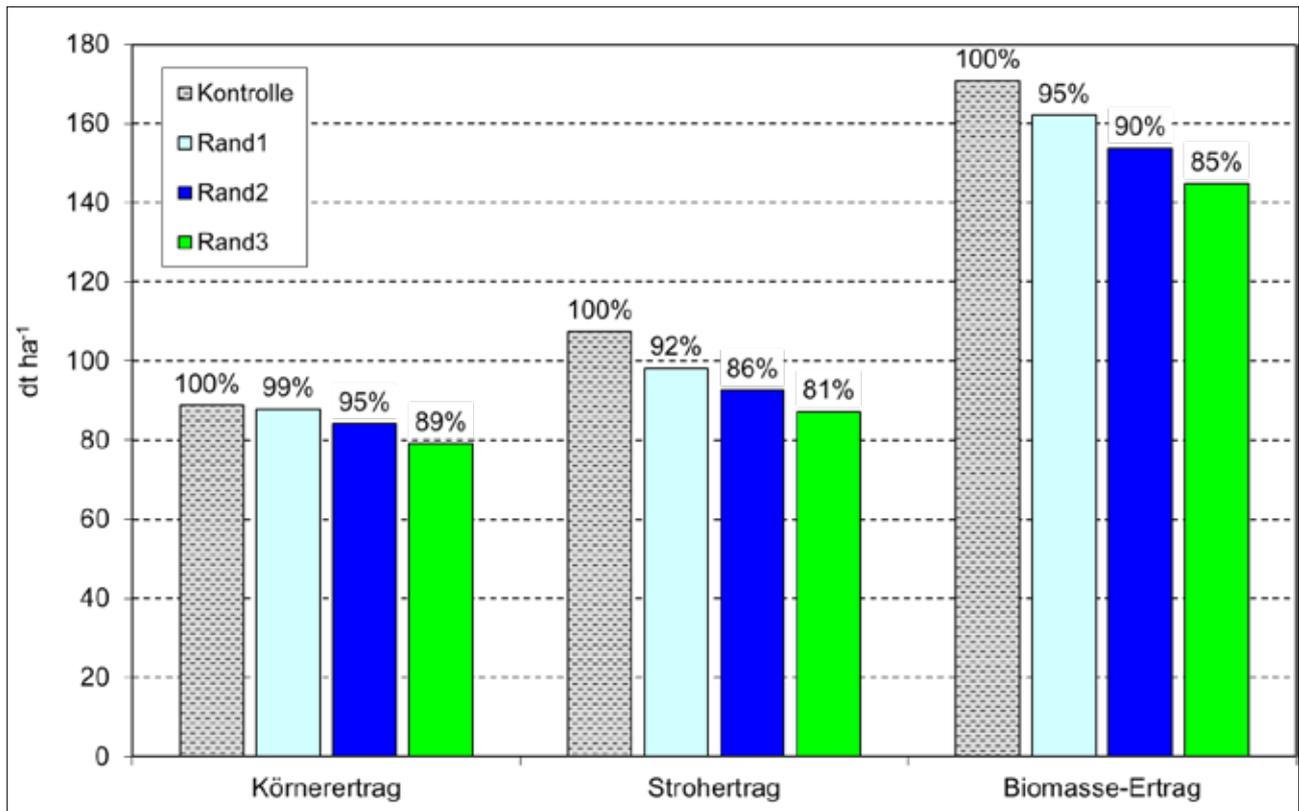


Abbildung 5: Körner- und Stroherträge sowie TS-Ertrag der oberirdischen Biomasse von Triticale der verschiedenen Verfahren im Versuch 2.

entzogen zu haben. Deshalb wurde auf eine Auswertung dieses Parameters verzichtet.

Schlussfolgerungen

Der erste Lysimeterversuch mit Weizen hat gezeigt, dass eine Senkung von überdurchschnittlich hohen Erträgen und die Erhöhung der Sickerwassermenge nur schwer durch die Beschattung mit Netzen oder die Ansaat von Getreide ausserhalb der Lysimeter erreicht werden kann. Beide Maßnahmen sind zudem mit großem Aufwand verbunden, insbesondere wenn sie bei hohen Kulturen wie Mais oder Sonnenblumen angewandt werden. Der zweite Versuch mit *Triticale* ergab, dass eine Kürzung der Saatzeilen ein effektiveres Mittel zur Zielerreichung ist. In Jahren mit unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen ist nun zu prüfen, welche Kürzung der Saatzeilen optimal ist.

Literatur

AG Lysimeter (1989) Lysimeterdaten von schweizerischen Messstationen. Dokument Nr. 4 der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz.

Becker K.-W. (1994) Der klimatologische und pedohydrologische Vergleich Lysimeter - Freiland als Grundlage der Datenübertragung. Bericht über die 4. Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, 87-93.

Bender S.F., van der Heijden M.G.A. (2014) Soil biota enhance agricultural sustainability by improving crop yield, nutrient uptake and reducing nitrogen leaching losses. *J. Appl. Ecol.* 52, 228-239.

Bohner A., Eder G. (2011) Auswirkung steigender Gaben von Rindergülle auf den Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasser im Grünland - eine

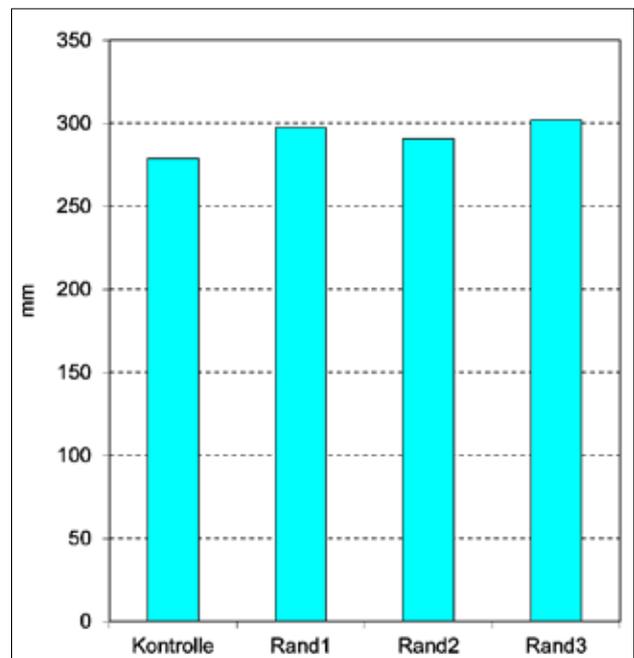


Abbildung 6: Sickerwassermenge der verschiedenen Verfahren im Versuch 2.

Zusammenfassung verschiedener Untersuchungsergebnisse. In: Elsässer M., Diepolder M., Huguenin-Elie O., Pötsch E., Nussbaum H. und Messner J. (Eds.) Gülle 11 - Gülle- und Gärrestdüngung auf Grünland. Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg, Aulendorf, 245-249.

- Czeratzki W., Schulze F. (1976) Einfluss der Bodenwasserspannung in Unterdrucklysimetern bei unterschiedlichen Bodenarten auf die Trockensubstanzproduktion von Mais im Trockenjahr 1975. *Landbauforschung Völkenrode* 26, 122-130.
- Eder G., Stichler W., Stenitzer E., Bohner A., Kandolf M. (2004) Sickerwassermenge in monolithischen Feldlysimetern anhand von Isotopenuntersuchungen. Bericht über das Seminar Landwirtschaft und Grundwasserschutz. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irndning, 53-56.
- Goulding K.W.T., Webster C.P. (1992) Methods for measuring nitrate leaching. *Aspects of Applied Biology* 30 (Nitrate and farming systems), 63-74.
- Hadjichristodoulou A. (1993) Edge effects on yield, yield components and other physiological characteristics in cereals and oilseed crops. *J. agric. Sci., Camb.* 120, 7-12.
- Hannes M., Wollschläger U., Schrader F., Durner W., Gebler S., Pütz T., Fank J., von Unold G., Vogel H.-J. (2015) A comprehensive filtering scheme for high-resolution estimation of the water balance components from high-precision lysimeters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 3405-3418.
- Klammler G., Fank J. (2014) Determining water and nitrogen balances for beneficial management practices using lysimeters at Wagna test site (Austria). *Science of The Total Environment* 499, 448-462.
- Meissner R., Prasad M.N.V., Du Laing G., Rinklebe J. (2010) Lysimeter application for measuring the water and solute fluxes with high precision. *Current Science* 99, 601-607.
- Meissner R., Seeger J., Rupp H., Xiao H., Borg H. (2007) Sickerwasserforschung mit Lysimetern und ihre Eignung zur Messung von „Climate Change“ Effekten. Bericht über die 12. Gumpensteiner Lysimetertagung. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irndning, 63-66.
- Oberholzer S., Prasuhn V., Hund A. (2017) Crop water use under Swiss pedoclimatic conditions – Evaluation of lysimeter data covering a seven-year period. *Field Crops Research* 211, 48-65.
- Prasuhn, V., Spiess E., Seyfarth M. (2009) Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. Bericht über die 13. Gumpensteiner Lysimetertagung. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irndning, 11-16.
- Roth D., Günther R., Knoblauch S. (1994) Technische Anforderungen an Lysimeteranlagen als Voraussetzung für die Übertragbarkeit von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftliche Nutzflächen. Bericht über die 4. Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irndning, 9-21.
- Sinaj S., Charles R., Baux A., Dupuis B., Hiltbrunner J., Levy L., Pellet D., Blanchet G., Jeangros B. (2017) Düngung von Ackerkulturen. In Richner W. & Sinaj S.: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz* 8(6), Spezialpublikation, 8/1-8/45.
- Spiess E., Prasuhn V., Stauffer W. (2011) Einfluss von organischer und mineralischer Düngung auf die Nährstoffauswaschung. *Agrarforschung Schweiz* 2, 376-381.
- Zenker T. (2003) Verdunstungswiderstände und Gras-Referenzverdunstung. Dissertation Technische Universität Berlin.

Baum-Lysimeter - ein Beitrag zur natürlichen Klimatisierung der Stadt?

Erwin Murer^{1*} und Stefan Schmidt²

Zusammenfassung

Funktionsfähige Stadtbäume und Stadtböden werden in Zukunft eine wesentliche klimatische Ausgleichsfunktion in den Städten übernehmen. Bäume mit entsprechender Größe sind Voraussetzungen, um diese klimatische Ausgleichsfunktion wie Schatten, Verdunstung, Filter etc. zu gewährleisten. Ein ausreichender Wurzelraum ist dafür die Grundvoraussetzung. Der Baumwurzelraum wird jedoch zunehmend durch Gehwege und Straßen begrenzt und wird im Winter durch Salzstreuung belastet. Daher sinkt die Lebenserwartung der Stadtbäume, da sie anfälliger für Krankheiten werden. Um aktiv auf diese Herausforderung zu reagieren, wurde ein neues Substrat für Stadtbäume entwickelt und getestet. Das neue Substrat sollte billig, leicht, einfach herzustellen und gut mischbar sein. Daher wurden leicht verfügbare regionale Materialien (fluviatiles Sediment der Donau, städtischer Kompost sowie Sand und Dolomit-Splitt aus Steinbrüchen in der Nähe von Wien) verwendet. Nach der Entwicklung des neuen Substrats unter Laborbedingungen wurde das Substrat in drei verschiedenen Arten von Feldversuchen (6 Lysimeter, 2 Wasserhaushaltsmessstellen und 20 Baumstandorte im Straßenraum) getestet.

Schlagwörter: Baumsubstrat, Stadtbäume, Lysimeter, Wasserhaushalt, Chlorid, Nitrat

Summary

Functioning urban trees and city soils will contribute an important climatic compensation function in the cities of the future. Trees of appropriate size are prerequisites to ensure this climatic compensation function such as shadows, evaporation, filters, etc. The basic requirement for this is a sufficient root space. But tree root space is more and more limited by pavements and roads and is polluted by salt application during winter time. Thus, the life expectancy of the city trees is likely to decrease because they become more susceptible to diseases. To actively react upon this challenge a new soil substrate for city trees has been developed and tested. The new substrate should be cheap, easy, simple to produce and well miscible. Therefore, easily available regional materials (river sediment of the Danube, city owned compost, sand and dolomite chippings from quarries near Vienna) have been used. After development of the new substrate under laboratory conditions, it is presently tested in three different types (6 lysimeters, 2 water balance and pollutants measuring sites and 20 street tree sites to monitor growth) of field experiments.

Keywords: Tree substrate, City trees, Lysimeter, Water balance, Chloride, Nitrate

Einleitung

Die Bäume nehmen Wasser mit ihren Wurzeln aus dem Boden auf und geben es über die Spaltöffnungen der Blätter als Wasserdampf an die Atmosphäre wieder ab. Ist im Boden nur noch wenig Wasser vorhanden, regulieren die Bäume ihren Stoffwechsel und die Verdunstung herunter. Damit nimmt auch der Kühleffekt ab. Der Boden ist damit eine wichtigste Stellschraube in dieser natürlichen Klimaanlage. Denn die Bäume können nur so viel verdunsten, wie vom Boden gespeichert und ihnen zur Verfügung gestellt wird. Nach etwa 20 Jahren erreicht ein Baum eine Größe um die geplanten Funktionen einer ausreichenden Beschattung und Verdunstung zu erfüllen. Dafür benötigt er eine entsprechend große Krone, aber auch genügend großen Wurzelraum. Pro Quadratmeter Kronenprojektionsfläche braucht ein Baum 0,75 m³ Wurzelraum (Faustregel). In der *Abbildung 1* ist das optimale Verhältnis von Kronenprojektionsfläche zu Wurzelraum im Lebenszyklus eines Baumes dargestellt. Erst nach etwa 20 Jahren ist die Funktionserfüllung gegeben. Im Straßenraum sind großflächige und großvolumige Standorte oft nicht vorhanden. Solche Standorte befinden

sich häufig in befestigten Flächen, entlang von Verkehrsflächen, in Flächen mit Bodenauftrag, deren Boden bei Baumaßnahmen verdichtet wurde. Durch die Anlage tieferer Pflanzgruben und die Verwendung von Pflanzensubstraten mit definierten Eigenschaften und Bauweisen die den Bodenraum unter Verkehrsflächen teilweise erschließen kann dieser Mangel zum Teil ausgeglichen werden. An Wiens Straßen sind ca. 90.000 Bäume gepflanzt, davon stehen ca. 2000 alleine entlang der Ringstraße. Während ein Straßenbaum zwischen 25 und 50 Jahre alt wird, hätte derselbe Baum in einem Park eine Lebenserwartung von mindestens 100 bis sogar 200 Jahren. Um die 1800 bis 2000 Bäume müssen daher jährlich dem Baumschutzgesetz gemäß, das eine Nachpflanzung von zu fällenden Bäumen vorschreibt, ersetzt werden. Die Stadt Wien setzt bei Neupflanzungen von Bäumen auf definierte, optimierte Baumsubstrate aus Materialien aus dem nahen Umfeld der Stadt (Splitt und Sand) und der Verwertung von Stoffen aus dem eigenen Bestand (Kompost und fluviatiles Sediment der Donau). Aus diesen Materialien wurden ein nicht überbaubares und ein überbaubares Baumsubstrat entwickelt (Murer & Schmidt 2018).

¹ Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik & Bodenwasserhaushalt, Pollnbergstraße 1, A-3252 Petzenkirchen

² HBLFA Gartenbau Schönbrunn, WIEN

* Ansprechpartner: DI Erwin Murer, erwin.murer@baw.at

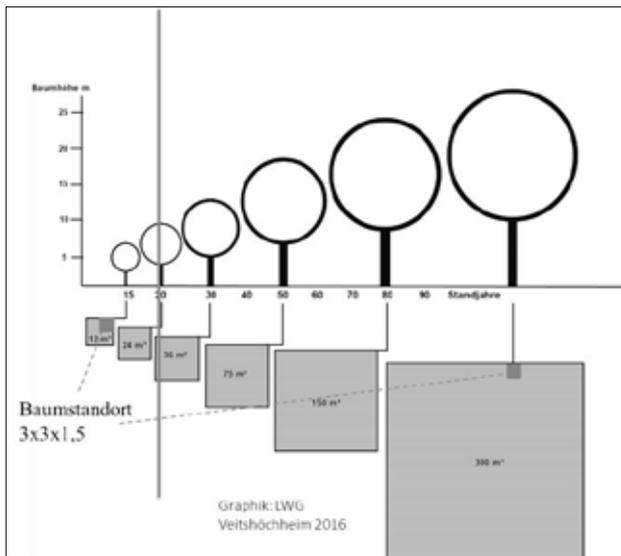


Abbildung 1: Wurzelraum von Straßenbäumen nach SCHÖNFELD 2016: 12m³ ist die Anforderung nach FLL, das kleine dunkelgraue Quadrat stellt die häufig anzutreffende Realität von 3m³ dar.

Figure 1: Root space of street trees according to SCHÖNFELD 2016: 12m³ is the requirement in accordance of FLL, the small dark gray square represents the frequently encountered tree pits of 3m³.

Material und Methoden

Die beiden neu entwickelten Baumsubstrate (überbaubar und nicht überbaubar) wurden drei Jahre lang auf ihre Eignung in Lysimetern (Lysimeteranlage-Jägerhausgasse) und Freilandstandorten (Freilandstandorte-Börse) und (Freilandstandorte-Sonnwendviertel) untersucht. Die Bäume wurden im April 2015 in der Pflanzgröße 18-20 cm gepflanzt und hinsichtlich des Stammumfangs an der 1 m

Markierung sowie des Triebzuwachses an jeweils 3 markierten Trieben im unteren, mittleren und oberen Kronenbereich regelmäßig vermessen.

Lysimeteranlage-Jägerhausgasse

Die Lysimeteranlage besteht aus 6 Lysimetern mit je 12 m³ Bodenvolumen (3x3m Oberfläche und 1,5m Tiefe). An allen Lysimetern wurde die Baumart *Celtis Australis* (Zürgelbaum) gepflanzt. Das Volumen der einzelnen Lysimeter entspricht dem vorgeschlagenen Mindestvolumen einer Baumscheibe (FLL 2010). Vier Lysimeter wurden mit einem nicht überbaubarem Substrat mit einer 10 cm starken Rindenmulch Schicht an der Oberfläche und zwei Lysimeter mit überbaubarem Substrat mit einer 5 cm starken wassergebundenen Decke an der Oberfläche eingebaut. Es wurde Sickerwasser aus dem Freilauf in 150 cm und Bodenwasser über Saugkerzen in 30 und 70 cm Tiefe mit ca. 250 hPa Saugspannung entnommen und auf Chlorid, Nitrat und TOC untersucht. Die Bäume wurden in praxisüblichem Zeitraum und Menge bewässert. In die Lysimeter wurden auch Fühler zur kontinuierlichen Erfassung des Wasserhaushalts-, Matrixpotentialregimes und der Bodentemperatur eingebaut.

Freilandstandorte-Börse

An der Ringstraße im Bereich der Börse wurden zwei Freilandstandorte, einer mit hohem (Haltestellenbereich) und einer mit geringem Salzeintrag (Nebenfahrbahn) angelegt. Beide Messstellen wurden mit der gleichen Baumart *Celtis Australis* bepflanzt. Die Versuche wurden als Bodenwasserhaushaltsmessstelle mit Fühlern zur Erfassung des Matrixpotentials und Wassergehalts, der Bodentemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit in 10, 20, 40, 70 und 90 cm Tiefe angelegt und zusätzlich mit einer Saugkerzenanlage mit keramischen Saugkerzen in 10, 40 und 90 cm Tiefe ausgestattet.



Abbildung 2: Ansicht der Lysimeteranlage mit der Baumart *Celtis Australis*, aufgenommen am 06.11.2015 (die linken 4 Zürgelbäume stehen im nicht überbaubaren Substrat mit Rindenmulch Abdeckung und die beiden rechten Bäume im überbaubaren Substrat mit wassergebundener Decke).

*Figure 2: View of the lysimeter plant with the tree species *Celtis Australis*, taken on 06.11.2015 (the left 4 *Celtis* trees are in the non-buildable substrate with bark mulch cover and the two right trees in the buildable substrate with water-bound cover).*



Abbildung 3: Ansicht der Baum-Lysimeteranlage, aufgenommen am 13.09.2018.

Figure 3: View of the tree lysimeter plant, taken on 13.09.2018.

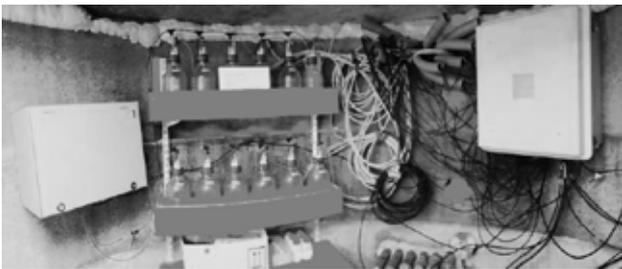


Abbildung 4: Saugkerzenanlage für die Gewinnung von Bodenwasser in 30 und 70 cm Tiefe.

Figure 4: Suction cup sampler system for the extraction of pore water at depths of 30 and 70 cm.

Freilandstandorte-Sonnwendviertel

Im neu errichteten Sonnwendviertel nahe dem Hauptbahnhof wurden im November 2014 zwanzig Baumstandorte zur Beobachtung der Baumentwicklung bepflanzt. Davon wurden zehn Baumstandorte in der Alfred-Adler-Straße mit dem nicht überbaubaren Substrat hergestellt und die Hälfte davon mit Ektomykorrhiza beimpft. Zehn weitere Baumstandorte wurden in der Sonnwendgasse mit dem nicht überbaubaren Substrat hergestellt und auch wieder die Hälfte mit Ektomykorrhiza beimpft.

Ergebnisse

Lysimeteranlage-Jägerhausgasse

Die Ergebnisse der Lysimeterversuche bestätigen die angestrebten bodenphysikalischen Eigenschaften der beiden Baumsubstrate hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften wie Luftkapazität, Wasserspeicherfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit (Tabelle 1 und 2).

Bei der Pflanzung hatten die Bäume im Durchschnitt einen Stammumfang von ca. 19 cm. Nach geringeren Zuwächsen im ersten Standjahr hatten die Bäume im nicht überbaubaren Substrat etwa ein Viertel höheren Zuwachs gegenüber dem überbaubaren Substrat (Abbildung 7). Auch beim Astwachs-



Abbildung 5: Wippen mit Probenahme Flaschen für die Erfassung von Sickerwasser.

Figure 5: Tipping counter with sampling bottles for detection of leachate.

tum zeigt sich ein größerer Zuwachs im nicht überbaubaren Substrat (Abbildung 8).

Die beiden Substrate (überbaubar und nicht überbaubar) unterscheiden sich sehr deutlich in ihrer Wasserhaushalts- und Stoffdynamik. Im Beobachtungszeitraum von 3 Jahren (05 2015 – 06 2018) wurden aus den Lysimetern mit überbaubarem Substrat 890 kg/ha Nitratstickstoff ($\bar{\sigma}$ 1117 mg NO_3/l), 83 g/m² Chlorid ($\bar{\sigma}$ 232 mg Cl/l) und 15 g/m² TOC ($\bar{\sigma}$ 43 mg TOC/l) ausgetragen. Die Nitratstickstofffracht war in den ersten beiden Jahren etwa auf gleich hohem Niveau, im dritten Jahr reduzierte sie sich auf ein Drittel der Vorjahre. Die Nitratkonzentration liegt auch nach 3 Jahren über dem Grundwasserswellenwert von 45 mg/l (Abbildung 9). Die Chlorid Fracht war im ersten Jahr am höchsten mit etwa dreiviertel der Gesamtmenge, im dritten Jahr waren die Austräge nur mehr sehr gering. Der Grundwasserswellenwert für Chlorid von 180 mg/l wurde im Sickerwasser nach ca. 20 Monaten unterschritten (Abbildung 10). Aus den Lysimetern mit nicht überbaubarem Substrat wurden im Beobachtungszeitraum insgesamt 141 kg/ha Nitratstickstoff ($\bar{\sigma}$ 78 mg NO_3/l), 237 g/m² Chlorid ($\bar{\sigma}$ 294 mg Cl/l) und 150 g/m² TOC ($\bar{\sigma}$ 186 mg TOC/l) ausgetragen. Die TOC-Konzentration im Sickerwasser war im überbaubaren Substrat am höchsten mit bis zu 400 mg/l im ersten Standjahr, sie reduzierte sich kontinuierlich im 3. Jahr auf ein Niveau von ca. 70 mg/l (Abbildung 11). Aus den Lysimetern mit nicht überbaubarem Substrat und Rindenmulch-Abdeckung wurde nur ein Viertel der Nitratstickstofffracht gegenüber dem überbaubaren Substrat



Abbildung 6: Die Standorte an der Ringstraße im Bereich der Börse mit *Celtis Australis* (linkes Bild „Stationsbereich“, rechtes Bild „Nebenfahrbahn“, aufgenommen 09. 12. 2014).

Figure 6: The sites on the Ring Street in the near of the Vienna Stock Exchange with *Celtis Australis* (left image tree-pit “tram station”, right picture tree-pit “by-road”, taken on 09. 12. 2014).

Tabelle 1: Eigenschaften des neuen Wiener Baumsubstrats für offene, nicht überbaute Pflanzgruben.

Table 1: Properties of the New Viennese Tree Substrate for open, non-buildable tree pits.

Parameter	Zu erwartende Eigenschaften	Anforderungen der FLL (2010)
Verdichtungsgrad	84%	83% - 87%
Wasserdurchlässigkeit	$\geq 5,0 \cdot 10^{-6}$ m/s	$\geq 5,0 \cdot 10^{-6}$ m/s
Wasserkapazität	≥ 40 Vol.-%	≥ 25 Vol.-%
Luftkapazität (pF1,8)	≥ 15 Vol.-%	≥ 15 Vol.-%
pH-Wert	$\leq 8,0$	5,0 – 8,5
Salzgehalt	< 91 mg/100 g	150 mg/100 g
Nutzbare Feldkapazität	> 17 mm/dm	keine
Porenvolumen	> 43 Vol.-%	keine

Tabelle 2: Eigenschaften des neuen Wiener Baumsubstrats für überbaute Pflanzgruben.

Table 2: Properties of the New Viennese Tree Substrate for buildable tree pits.

Parameter	Zu erwartende Eigenschaften	Anforderungen der ZTV-Vegtra-Mü (2008)
Verdichtungsgrad	95%	95% - 100%
Gesamtporenvolumen	24 Vol.-%	> 20 Vol.-% bei $DPr=95\%$
Wasserdurchlässigkeit	0,002 cm/s	$\geq 0,001$ cm/s bei $DPr=95\%$
Wasserkapazität	8 Vol.-% FK	$\geq 35\%$ des GPV
Luftkapazität (pF1,8)	16 Vol.-%	≥ 10 Vol.-% bei $DPr=95\%$
pH-Wert	$\leq 7,8$	5,0 – 8,5
Salzgehalt	107 mg/100 g	150 mg/100 g
Nutzbare Feldkapazität	5 mm/dm	keine

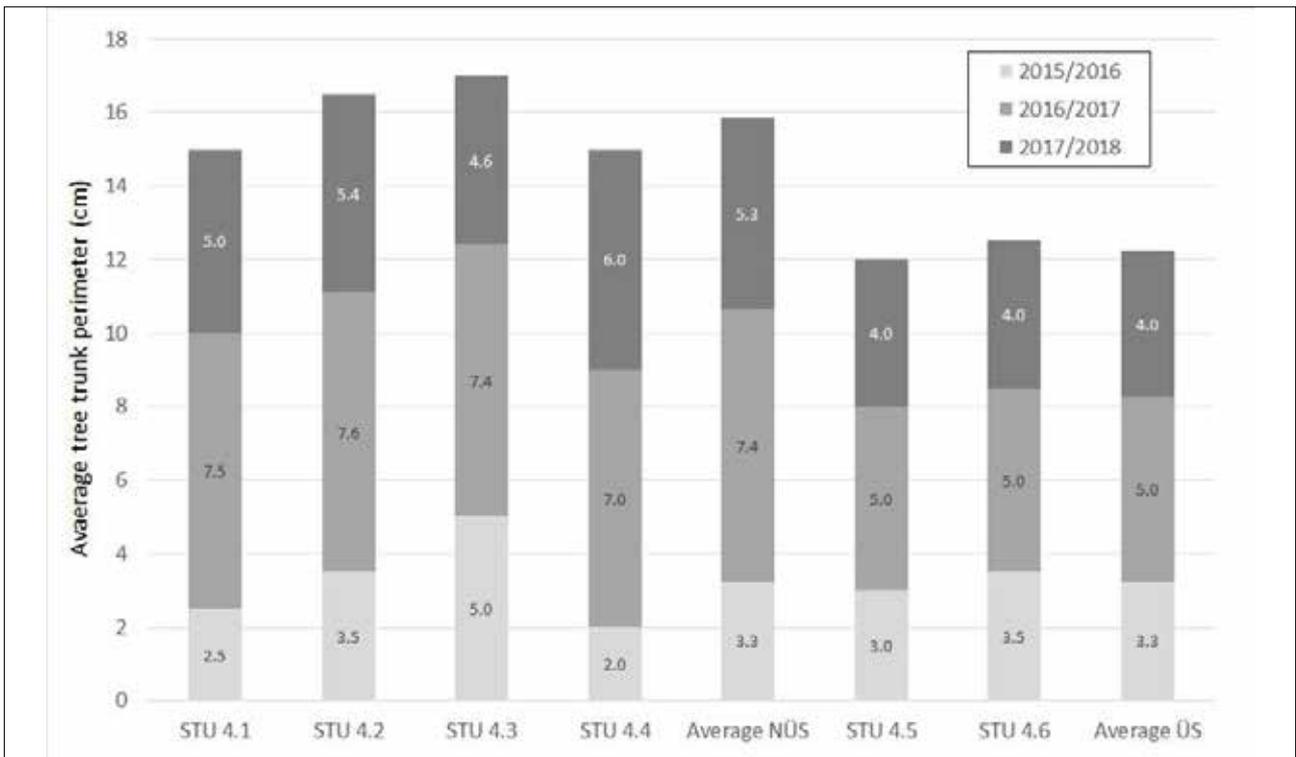


Abbildung 7: Stammumfangs seit 2015 in cm (4.1 bis 4.4 Lysimeter mit nicht überbaubarem Substrat (NÜS), 4.5 und 4.6 Lysimeter mit überbaubarem Substrat (ÜS).

Figure 7: Tree trunk perimeter since 2015 in cm (4.1 to 4.4 lysimeter with non-buildable substrate (NÜS), 4.5 and 4.6 lysimeter with buildable substrate (ÜS).

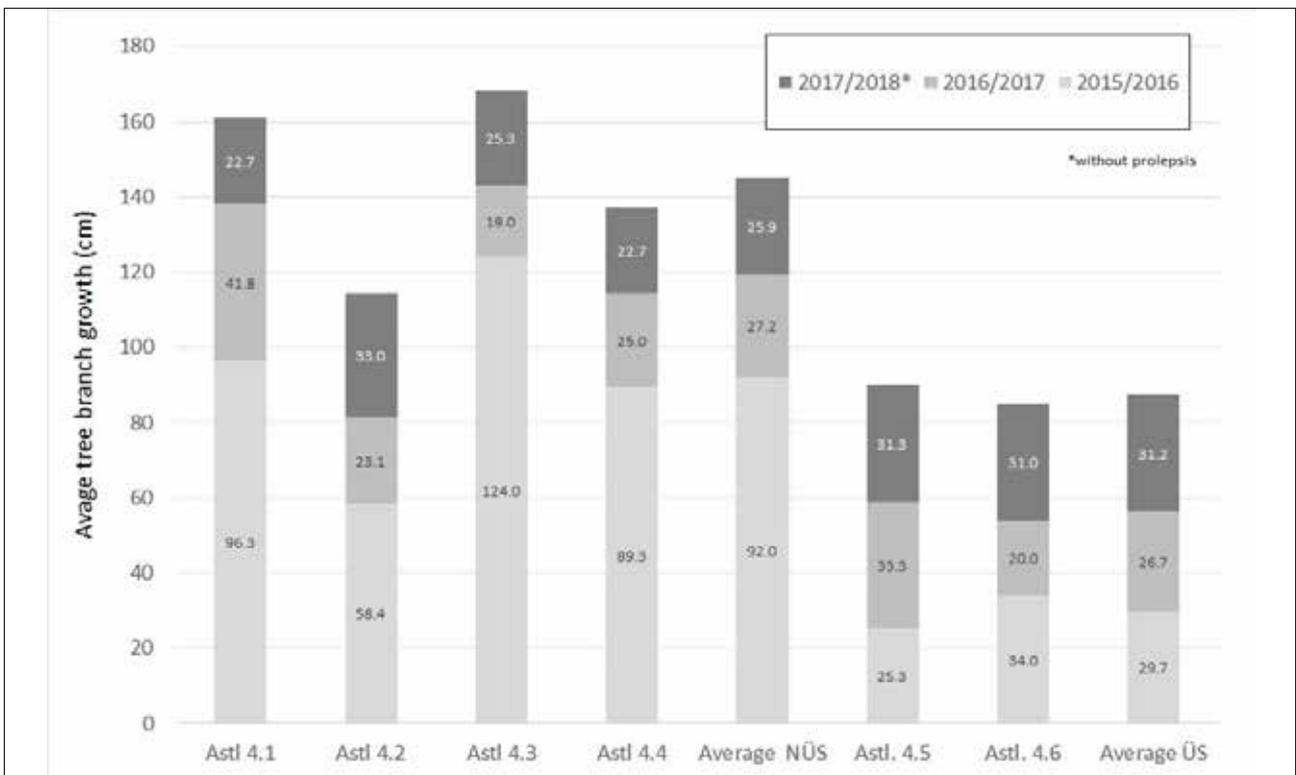


Abbildung 8: Astzuwachs seit 2015 in cm (4.1 bis 4.4 Lysimeter mit nicht überbaubarem Substrat (NÜS), 4.5 und 4.6 Lysimeter mit überbaubarem Substrat (ÜS).

Figure 8: Tree branch growth in cm since 2015 (4.1 to 4.4 lysimeter with non-buildable substrate, 4.5 and 4.6 lysimeter with buildable substrate).

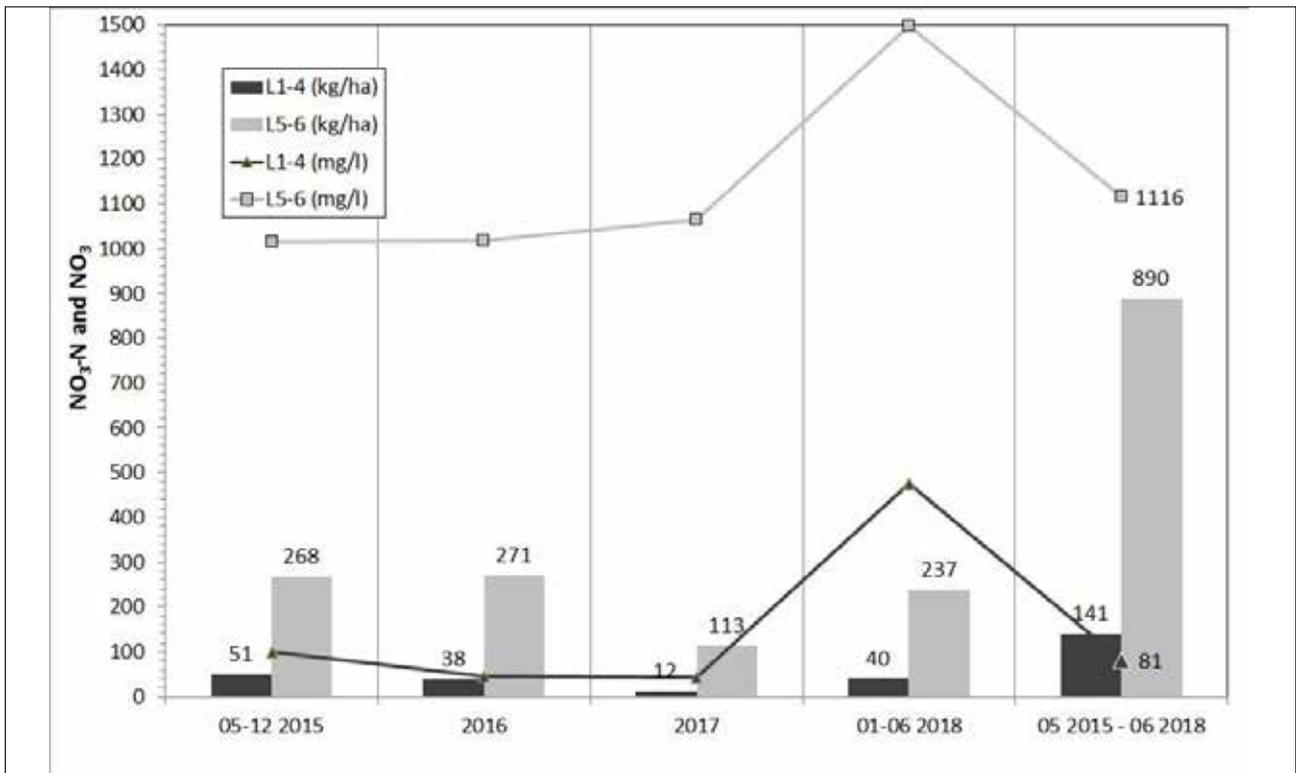


Abbildung 9: Nitrat-Stickstoff Fracht und Nitratkonzentrationen der Lysimeter (L1-4 nicht überbaubares und L5-6 überbaubares Substrat) der Beobachtungsperiode 05 2018 bis 06 2018.

Figure 9: Nitrate nitrogen load and nitrate concentrations of the lysimeter (L1-4 non-buildable and L5-6 buildable substrate) of the observation period 05 2018 to 06 2018.

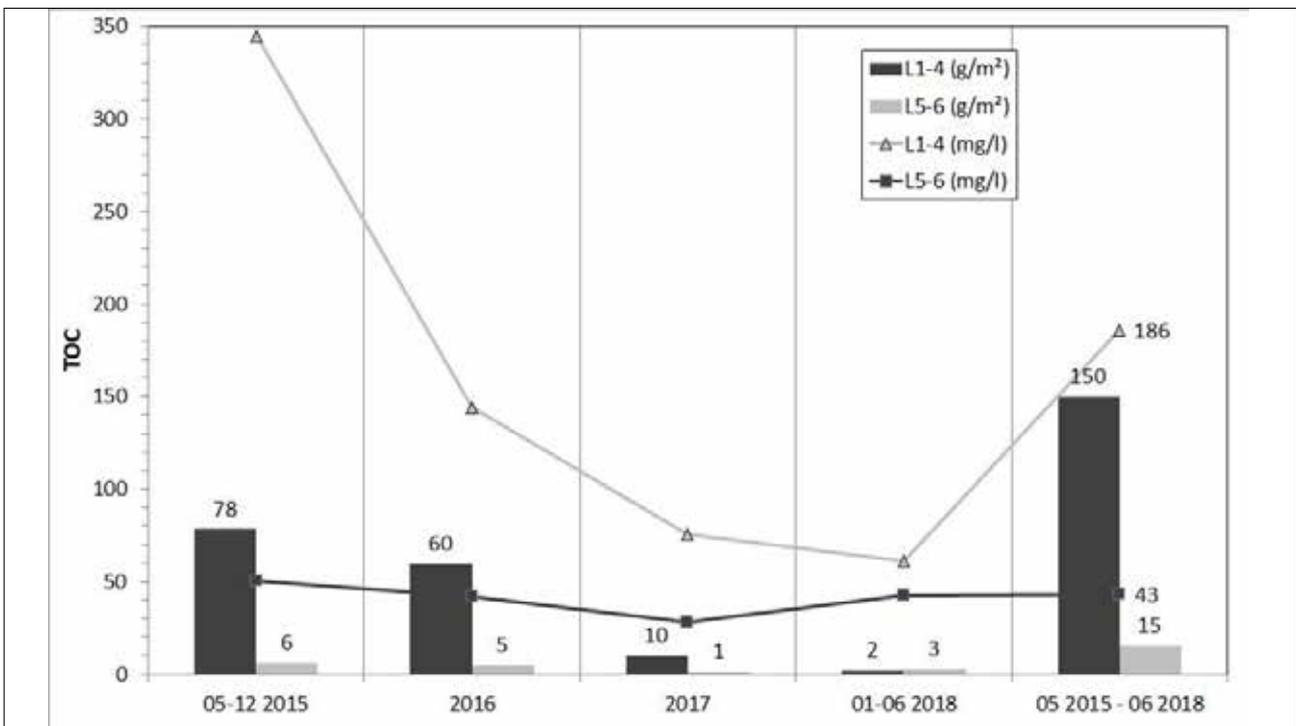


Abbildung 10: Chlorid-Fracht und Konzentrationen der Lysimeter (L1-4 nicht überbaubares und L5-6 überbaubares Substrat) der Beobachtungsperiode von 05 2018 bis 06 2018.

Figure 10: Chloride load and concentrations of the lysimeters (L1-4 non-buildable and L5-6 buildable substrate) of the observation period from 05 2018 to 06 2018.

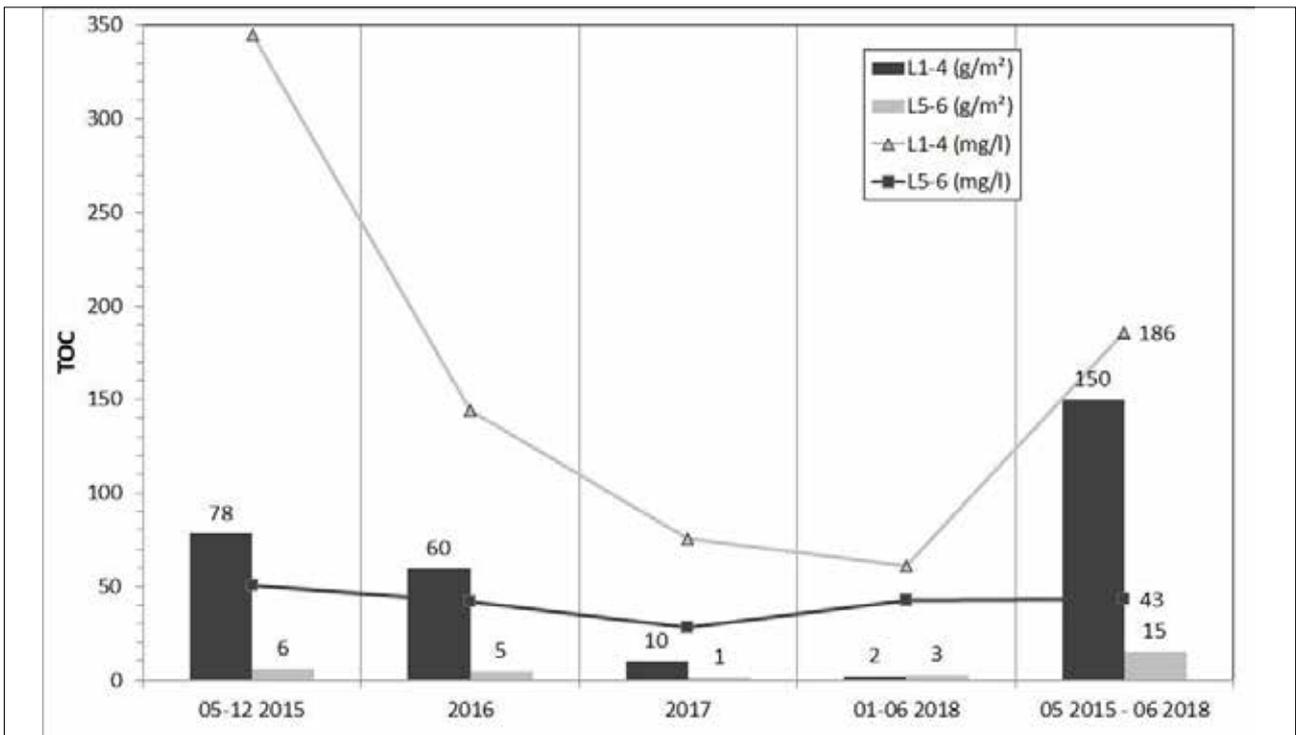


Abbildung 11: TOC-Fracht und Konzentrationen der Lysimeter (L1-4 nicht überbaubares und L5-6 überbaubares Substrat) der Beobachtungsperiode von 05 2018 bis 06 2018.

Figure 11: TOC load and concentrations of the lysimeter (L1-4 non-buildable and L5-6 buildable substrate) during the observation period from 05 2018 to 06 2018.

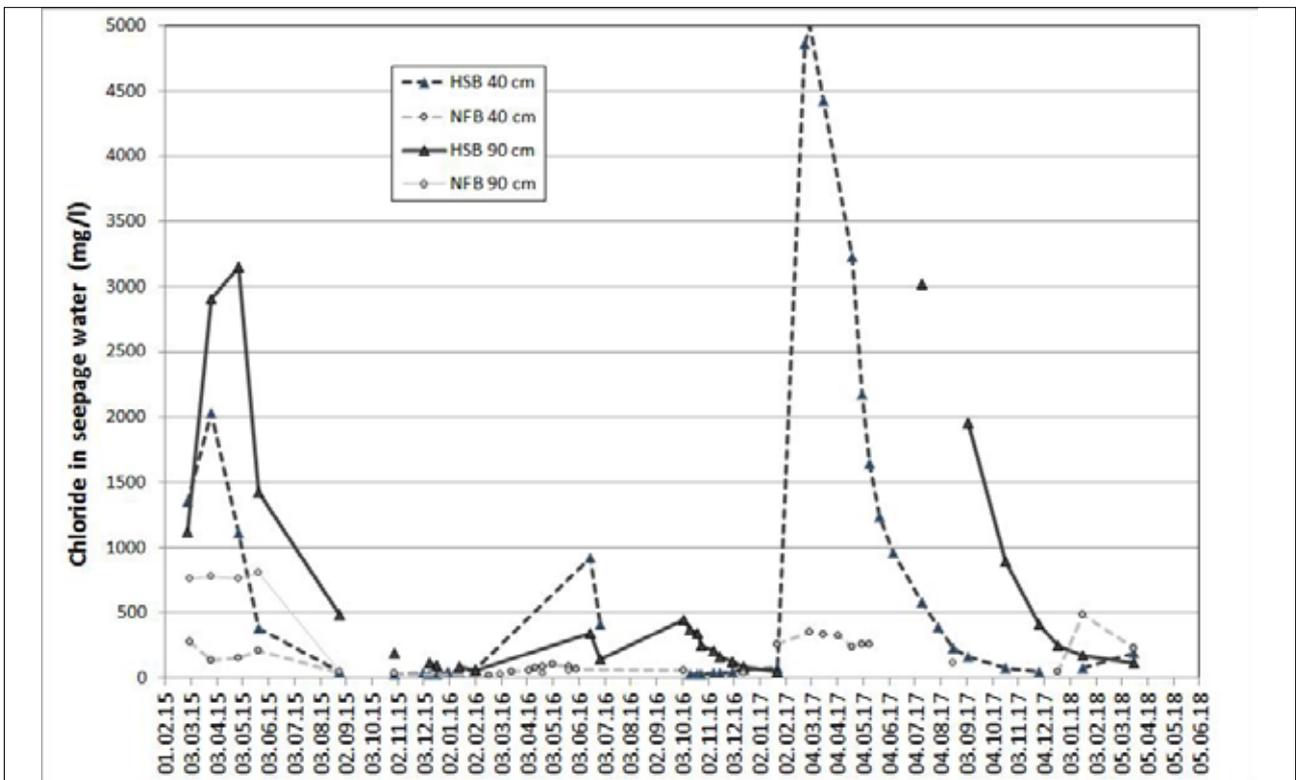


Abbildung 12: Verlauf der Chloridkonzentration im Bodenwasser der Messstellen „Haltestelle“ und „Nebenfahrbahn, mit nicht überbaubarem Substrat.

Figure 12: Chronological sequence of the chloride concentration in soil water in the measuring sites of “tram station” and “by-road” with non-buildable substrate.

ausgewaschen, obwohl im nicht überbaubaren Substrat mehr als die dreifache Kompostmenge hinzugefügt wurde. Die TOC-Fracht ist in den Lysimetern mit nicht überbaubarem Substrat im Mittel etwa 10-mal und die Chlorid-Fracht etwa 3-mal höher gegenüber den Lysimetern mit überbaubarem Substrat (*Abbildung 10-12*).

Freilandstandorte-Börse

In der Baumscheibe Haltestellenbereich wurde in den Wintermonaten häufig und höhere Mengen Auftaumittel gestreut. Die Saugkerzen lieferten Bodenwasser mit deutlichen Anstiegen der Chlorid-Konzentration in den Wintermonaten. Diese sind im Haltestellenbereich um ein Vielfaches höher als in der Nebenfahrbahn (*Abbildung 12*). Der Baum im Haltestellenbereich ist im Herbst 2018 abgestorben.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese Untersuchungen aus den Baum-Lysimetern zeigen sehr deutlich eine notwendige Anpassung der Substrate, um die Austräge mit dem Sickerwasser vor allem in den ersten Standjahren auf ein grundwasserverträgliches Niveau zu reduzieren. Dazu gehört vor allem die Verwendung eines salzärmeren Komposts. Eine entsprechend lange Lagerung der Substrate vor dem Einbau ist von zusätzlichem Vorteil. Die Beigabe von Biokohle zum Kompost kann die Nähr- und Schadstoffdynamik verbessern und damit auch die Austräge reduzieren.

Funktionsfähige Stadtbäume und Stadtböden werden in Zukunft eine wesentliche klimatische Ausgleichsfunktion in den Städten übernehmen. Bäume mit entsprechender Größe sind Voraussetzungen, um diese klimatische Ausgleichsfunktion wie Schatten, Verdunstung, Filter etc. zu gewährleisten. Ein ausreichender Wurzelraum ist dafür die Grundvoraussetzung. Wurzelraum, der in den Nebenflächen der Stadtstraßen bei entsprechender poröser Bauweise vorhanden wäre. Gleichzeitig kann ein poröser Unterbau von dazu geeigneten Verkehrsflächen eine Retentionsfunktion übernehmen. Starkregenereignisse können temporär gespeichert und verzögert dem Kanalnetz und/oder der Verdunstung/Versickerung zugeführt werden. Ausführungsbeispiele aus dem europäischen Ausland zeigen dies. Es ist nun die Zeit reif, auch das Baumumfeld durch die praxistaugliche Überprüfung verschiedener Straßenraumsituationen auf die Durchwurzelbarkeit durch Stadtbäume sowie die Retentionsfunktion mit einzubeziehen.

Literatur

- FLL (2010) Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweise und Substrate. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. – FLL, Bonn.
- Murer E., Schmidt S. (2018) Monitoring der Versuchsstandorte Jägerhausgasse, Ringstraße und Sonnwendviertel von 2015 bis 2017 mit dem „Das Wiener Baums substrat“ unveröffentlichter Projektbericht.

Field drainage lysimeter research in New Zealand: a review

MS Srinivasan^{1*} and Abigail Lovett²

Summary

Field drainage lysimeters are widely used throughout New Zealand (NZ) primarily to measure rainfall and/or irrigation recharge to groundwater. The NZ lysimeter network currently consists of 25 sites distributed across the country, which have been in place from approximately 3 months to 14 years. The continued operation of these sites is dependent on financial contributions from local regional councils and input from research and industry organisations. As the number of lysimeter sites have increased over the last few years, there have been questions raised about their role in influencing large-scale water management, and policy discussions and decisions. The authors undertook a survey of organisations in NZ that are actively involved in lysimeter research and operation, including regional councils, research organisations, universities and consultancies. The primary aims of the survey were to: 1) document the use of lysimeter data for management and policy decisions by scientists and regulators at the regional councils; 2) assess the future uses and continuation of the current lysimeter sites; and 3) identify and record the current and future science and research needs associated with lysimeter data. Based on the survey, it is evident that a lack of national context to lysimeter research may lead to varying levels of lysimeter data use across NZ. Regional councils are well aware of the local context, however, a national context would allow to develop standards for lysimeter data collection and use. While the regional councils see lysimeter data as a useful communication tool with end-users and stakeholders, there are still science questions and gaps around the scaling of lysimeter data to catchment and regional scales and the ability of lysimeter sites to include water quality (leaching) measurements. To sustain lysimeter research in NZ, these two critical science gaps must be addressed immediately, in addition to the development of a national context for lysimeter research.

Introduction and background

In New Zealand (NZ), field-based, passive, soil monolith lysimeters (hereafter referred to as lysimeters) have been in use since 1950's to quantify rainfall and irrigation recharge. Until the end of last century, the majority of recharge data collected at these sites were used as input to groundwater models (e.g., White et al. 2003, Graham et al. 2018). Meanwhile, there has been an increasing pressure mounting on groundwater resources in NZ. This pressure is predominantly due to the continued increase of irrigated area in NZ,

which has been doubling approximately every 12 years since 1970 (Irrigation NZ, 2017), combined with full allocation of easily-accessible surface water resources (Tait 1999).

With the introduction of resource management act (New Zealand Legislation, 1991), the regional governments (referred to as regional councils) are empowered and expected to manage their surface and ground water resources sustainably as one linked resource. Post-2000, regional councils had started engaging with lysimeter research groups in developing a real-time knowledge of rainfall and irrigation recharge to enable sustainable allocation of groundwater. This has led to several regional councils installing lysimeters in real operational farms. Currently, there are 25 active lysimeter sites across NZ (*Figure 1*), where research groups and regional councils are collaborating from installation, data collection, and data analysis.

A recharge monitoring site typically includes two or three lysimeters individually connected to tipping buckets gauges to measure drainage, a ground-level rain gauge to measure rainfall-irrigation, a climate station to measure rainfall, wind speed and direction, humidity, barometric pressure and solar radiation, and a series of soil moisture sensors buried at multiple depth from surface to 70 cm (*Figure 2*). Sites include both irrigated and non-irrigated (dryland) land use, and, barring two, all are under pastoral land cover. Despite that several researchers have analysed data from many of these lysimeter sites (Thorpe & Scott 1999, White et al. 2003, Duncan et al. 2016, Graham et al. 2018), the usability of lysimeter data for making water allocation management decisions and policy setting is yet to be fully examined. We undertook a survey of all organisations that are currently operating lysimeter sites in NZ to assess 1) the current state of their lysimeter data use; 2) their future plans and needs for lysimeter sites and data; and 3) the science gaps and limitations that they have identified while using lysimeter data for water allocation decisions.

Data collection survey

For all known lysimeter sites in NZ, information such as location, length of datasets, and site purpose were compiled. All regional councils and other organisations known to operate these sites were contacted to confirm the accuracy of the compiled information. In addition, the following questions were presented to each organisation:

- What are the primary aims and objectives of the recharge monitoring sites?
- To what extent does recharge data inform science, policy, and management decisions?

¹ National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd., Christchurch, New Zealand

² Earth & Environmental Science Ltd., Lincoln, New Zealand

* Ansprechpartner: Dr. MS Srinivasan

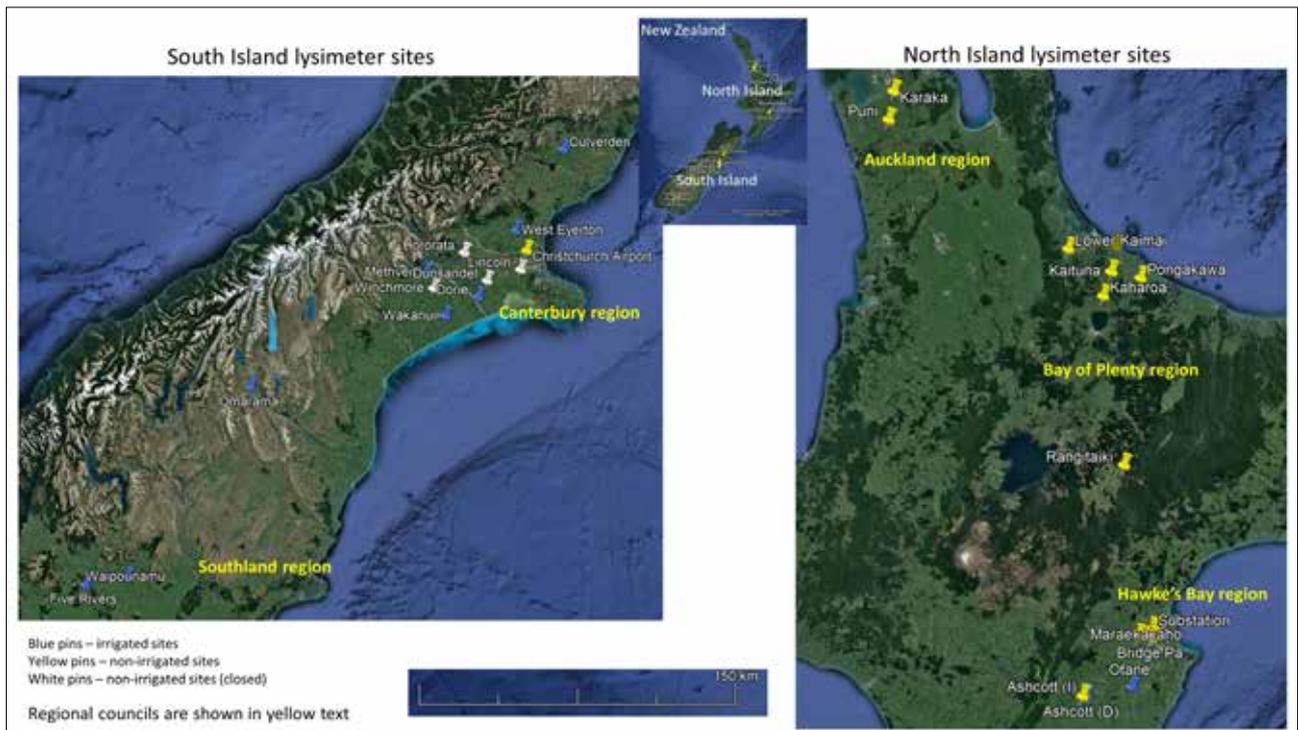


Figure 1. Distribution of recharge monitoring lysimeter sites in New Zealand as of January 2019.

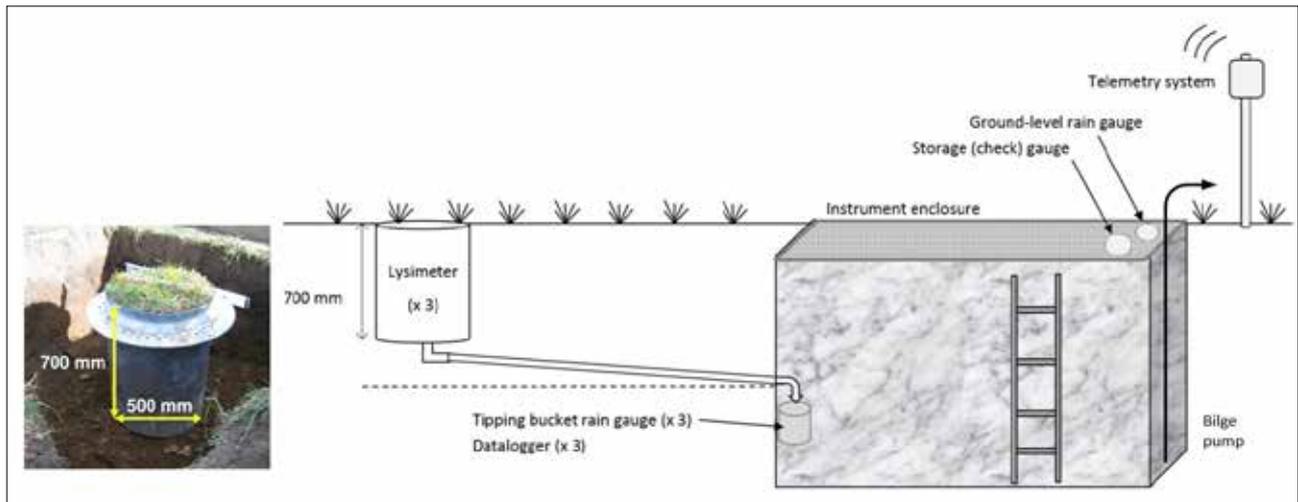


Figure 2. Arrangement of instrumentation in a typical lysimeter site. Bilge pump to pump out ponded excess water.

- How widely are datasets and information from recharge monitoring sites distributed among stakeholders including public?
- What is the current role of research agencies in developing the usefulness and application of the recharge monitoring?
- Are there any emerging issues that you would like addressed using recharge monitoring sites?

In this paper the information compiled from these regional councils which is likely to guide the science and management challenges posed at the researchers is presented. Based on the response, gaps in scientific understanding and use of lysimeters in answering wider water resources management issues across NZ have been identified.

Survey results

1. What are the primary aims and objectives of the recharge monitoring sites?

The regional council objectives fell into three broad categories –

- Quantification of groundwater recharge for water resource management: Councils foresee using the recharge data in water allocation, policy setting and water budgeting. Research providers are actively involved with regional councils in developing procedures to quality control recharge data (e.g., Male 2015, White et al. 2014, 2017).

When regional councils installed sites, they selected locations that were representative of soils and climate in the region. In regions where irrigation has been expanding rapidly (e.g., Canterbury and Southland), the regional councils also focused on irrigation recharge. However, the up-scaling of point scale data to inform and guide regional scale recharge estimation has not fully occurred.

b. Quantification of water use efficiency: While this was not a primary objective, since the majority of recharge sites in Canterbury and Southland regions are located on irrigated farms, they also offer an opportunity to monitor irrigation efficiency. Studies by Srinivasan et al. (2018) demonstrated the use of drainage data from lysimeter sites in informing farmers of their irrigation practices and influencing their water use behaviour. Although regional councils see an opportunity for improved water resources management, they have largely not engaged themselves fully with using the lysimeter data to this effect.

c. A tool to engage with farmers: At those sites where research providers and regional councils are collaborating (Southland, Hawke's Bay and Canterbury), the host farmers are provided with daily updates of their irrigation and drainage output. This has proven to be a useful way of engaging with farmers. The Bay of Plenty and Hawke's Bay Regional Councils publish lysimeter drainage datasets on their websites. However, it is not known as how well these data are used by the farmers in these regions to manage on-farm water use.

In addition to the above, research providers have been using data from recharge sites in parameterising hydrological models (e.g., White et al. 2003, Graham et al. 2018).

2. Current availability of recharge data from lysimeter sites

The availability of data from lysimeter sites vary between regions. The regional councils such as Bay of Plenty and Hawke's Bay provide data access via their websites, while Canterbury and Southland make the data available to the host farmers via daily email. These latter mentioned regional councils work with one of the research providers (NIWA) in making this possible.

Current limitations in the datasets are that publicly available data are not typically quality checked. Also, the site-specific nature of the data has not appeared to have attracted many in using the data. Since all sites are placed within operational farms, there is also a need for collecting on-farm management data (e.g., grazing, plant type), and this is not currently happening at any of the sites. A national standard may provide guidance for those additional data collection.

3. Application of recharge data

The use of recharge data from lysimeter sites varies between councils. Both Canterbury and Hawke's Bay Regional Councils use lysimeter recharge data in verifying groundwater models (e.g., White et al. 2014). It appears as though the data usage and uptake has been more effective at sites that are led by research providers. Furthermore, sites where lysimeters are under controlled conditions, nutrient leaching data from lysimeters are used in calibrating validating nutrient budget and crop growth models (e.g., Di & Cameron 2007).

Emerging challenges and future research needs

Lysimeter research in NZ has grown considerably over the last 15 years following a quiet period from 1970 to 2000. The last two decades have seen the development a science and management business cases for the installation of lysimeters. As many as 23 out of 25 active sites today (January 2019) were installed within the last 10 years, indicating a renewed interest for lysimeter research. This interest mainly emerges from the need to understand, manage and allocate water resources sustainably.

Based on the survey results, it is evident that to sustain an interest in lysimeter research, there is a need to develop a national context around the collection, processing and application of recharge data from lysimeters for groundwater management and monitoring of nutrient leaching. This context may include development of procedures and protocols for the installation of lysimeter sites, quality control of data collected, application of models and methods to scale the lysimeter data spatially and temporally, and finally, methods to combine lysimeter drainage to nutrient leaching.

Lysimeter recharge data offer an approximation of groundwater recharge. Currently, many regional councils use an annual allocation volume when allocating groundwater for irrigation and other uses. Since lysimeters offer time-series recharge information, the annual allocations could be dynamically altered (monthly to seasonal scales as opposed to annual).

The biggest challenge with drainage lysimeters and similar tools have been their representative sizes. These tools provide point scale measurements while water allocation and nutrient management, measurements and target-setting happen at field, farm- or catchment- scales. Owing to other factors such as variability in nutrient transport pathways from land to receiving waters and associated time lags and attenuations further challenge the translation of point scale measurements into usable catchment scale information. Models developed based on laboratory-scale lysimeters may provide a pathway to bridge this spatial gap.

Challenges of using field lysimeters installed in operational farms for water quality monitoring have been discussed in detail in Lilburne et al. (2012). At all but one lysimeter site shown in *Figure 1*, only climate, soil moisture, and recharge data are collected. The site (Methven, Canterbury, South Island) where there is a limited sampling of leachate for water quality is conducted, the lysimeters are fenced off from cattle access. This is to prevent direct deposition of animal excretion on lysimeters.

There has been a sustained interest from the stakeholders (e.g., end-users, farmers and regional councils) to finding ways of integrating water quantity and quality monitoring at the lysimeter sites. The first reported lysimeter study in NZ (Annett 1953) was originally designed to examine the leaching of nutrients through soil profile and the rainfall recharge was not the main focus. Even after more than six decades of lysimeter research in NZ, the leaching question has not yet been fully answered, for a number of reasons (see Lilburne et al. 2012). Apart from the issues such as soil heterogeneity, variable rainfall distribution and amounts, variabilities in plant water uses and differences in land

management activities such as irrigation, the biggest impediment to advancing lysimeters to study nutrient leaching has been the absence of appropriate tools and methods to accurately define and measure the surface nutrient input from animal excretions. In NZ, grazing is widely practised year round and animal excretions have been shown to be an important and significant nutrient input (Lilburne et al. 2012). Several laboratory based studies are attempting to describe nutrient transport through soil profile (e.g., Di & Cameron 2007). These controlled lysimeter experiments provide a comprehensive understanding of soil physical (texture, structure, infiltration), chemical (conversion of nutrients into plant available forms within the root zone) and biological (the process of plant absorbing soil nutrients) controls on nutrient availability, dynamics and leaching within and immediately below the root zone. Since these experiments are controlled, they assist in developing a tight relationship between nutrients inputs to outputs (leaching). However, these studies generally do not represent realistic on-farm controls (e.g., climate, soil drying and wetting, evapotranspiration) and management practices (grazing, irrigation), making the translation of knowledge between laboratory- and field- scales challenging.

Conclusions

In New Zealand, there has been a renewed interest in lysimeter research and the need to have field measured recharge data to better inform water allocation models. This has resulted in the development of 25 recharge lysimeters in operational farms across five regions.

The survey and contacts with various regional councils, research providers and stakeholders such as farmers highlighted two key issues that are directly linked to lysimeter research. The first one is the ability of scaling up lysimeter data from point to larger scale, which questions the place of lysimeter research in a catchment or regional scale context, and the second is around the use of lysimeters sites in monitoring nutrient leaching.

Data from many of these sites have been successfully used in verifying groundwater models and communicating with end-users on issues such as water use efficiency. In order to sustain and advance the current level of interest in lysimeter research, science providers, resource managers and farmers need to work together in enabling the integration of on-farm water quantity and quality management. The current lysimeter design owing to the limitation of size may not offer a pathway for this integration. Indirectly this could be advanced by developing models that can link on-farm in-situ and in-lab, controlled lysimeters.

Finally, the lysimeter research in NZ would greatly be benefitted if placed within a national context. While the local context allows the lysimeters to represent region specific soil, climate and land management variables, a national context would provide for the development of standards for lysimeter data collection and use across the country.

Acknowledgements

We thank the Auckland, Bay of Plenty, Hawke's Bay, Canterbury and Southland Regional Councils for completing

our survey and providing valuable input in developing this paper. We also thank the Institute of Geological and Nuclear Sciences, Manaaki Whenua – Landcare Research, and Lincoln University for their contribution in developing the ideas presented in this paper. We also acknowledge the partial funding of this study from the NZ Ministry of Business, Innovation and Employment Endeavour Programme, Irrigation Insight (COX1718).

References

- Annett H.J. (1953) Water in relation to pasture production. *Journal of the New Zealand Institute of Chemistry*. 17(5):114-127.
- Di H.J., Cameron K.C. (2007) Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor – a lysimeter study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79, 281-290.
- Duncan M.J., Srinivasan M.S., McMillan H.K. (2016) Field measurement of groundwater recharge under irrigation in Canterbury, New Zealand using drainage lysimeters. *Journal of Agricultural Water Management* 166:17-32.
- Graham S.L., Srinivasan M.S., Faulkner N, Carrick S. (2018) Soil hydraulic modelling outcomes with four parameterization methods: comparing soil description and data inversion approaches. *Vadose Zone Journal* 17:170002. doi:10.2136/vzj2017.01.0002.
- Lilburne L., Carrick S., Webb T., Moir J. (2012) Computer-based evaluation of methods to sample nitrate leached from grazed pasture. *Soil Use and Management*, March 2012, 28, 19-26. doi: 10.1111/j.1475-2743.2011.00378.x.
- Male (2015) Analysis of rainfall and lysimeter data. AECOM Report Prepared for Bay of Plenty Regional Council. 26p.
- New Zealand Legislation (1991) Resource Management Act 1991 No 69 (as at 14 September 2018), Public Act – New Zealand Legislation. [online] Available at: <http://www.legislation.govt.nz/act/public/1991/0069/latest/whole.html#DLM231905> [Accessed 25 Jan. 2019].
- Srinivasan M.S., Elley E. (2018) The cycle of trust building, co-learning, capability development and confidence building: Application of a co-innovation approach in a multi-stakeholder project. Case Study in the Environment <https://doi.org/10.1525/cse.2018.001255>.
- Tait P.R. (1999) Valuing agricultural externalities in Canterbury rivers and streams: three essays. Doctoral thesis, Lincoln University, Christchurch, New Zealand; 2010.
- Thorpe H.R., Scott D.M. (1999) An evaluation of four soil moisture models for estimating natural groundwater recharge. *Journal of Hydrology (NZ)* 38 (2), 179-209.
- White P.A., Lovett A.P., Gordon D. (2017) Quality control and quality assurance of Hawke's Bay rainfall recharge measurements: 2011-2014. Lower Hutt, N.Z.: GNS Science. GNS Science report 2016/16. 21 p.
- White P.A., Moreau-Fournier M., Thorpe H.R., Lovett A.P. (2014) Summary of rainfall recharge measurements with lysimeters and ground-level rainfall observations 1952-1978 and 1997-2011, Canterbury. Lower Hutt, NZ: GNS Science. GNS Science report 2013/10. 26 p. + 1 CD.
- White P.A., Hong Y.S., Murray D.L., Scott D.M., Thorpe H.R. (2003) Evaluation of regional models of rainfall recharge to groundwater by comparison with lysimeter measurements, Canterbury, New Zealand. *Journal of Hydrology (NZ)* 42 (1), 39-64.

Massenbilanzierung von atmogenen PAK mit alpinen Lysimeterdaten

Thomas Schiedek^{1*}, Lidia Nersissian¹, Steffen Birk² und Markus Herndl³

Zusammenfassung

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind ubiquitäre, toxische, organische Schadstoffe, die durch Verbrennung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre emittiert werden (v.a. Hausfeuerung). Durch atmogene Deposition können sie wieder in die Geosphäre eingetragen werden und Ökosysteme wie Gebirge schädigen. Über alpine PAK-Stoffeinträge und –Umsätze ist wenig bekannt. Ziel dieser Studie war die Massenbilanzierung atmogener PAK in alpinen Böden. Hierzu wurden Depositions-, Boden- und Sickerwasser-Proben in den Nördlichen Kalkalpen, in der Nähe von Gumpenstein Österreich, in Lysimetern am Stoderzinken (Berg) und in Gumpenstein (Tal) untersucht. PAK konnten in Wasser und Boden nachgewiesen werden. Die PAK-Gehalte in Gumpenstein lagen in einer ähnlichen Größenordnung, am Stoderzinken zeigten sich deutliche Unterschiede. Für zwei ausgewählte Zeiträume (Mai/Juni und Herbst 2016) wurden PAK-Massenbilanzen erstellt. Ein Vergleich der Massenbilanzen beider Lysimeter lässt auf eine höhere Eintragsfracht am Stoderzinken mit lokalem Einfluss schließen. Bei beiden waren v.a. leicht wasserlösliche PAK (v.a. Naphthalin als Anzeiger für Hausfeuerung mit Holz) am Stoffumsatz beteiligt. Für verschiedene PAK mit deutlich unterschiedlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften konnten unterschiedliche Massenbilanzen gefunden werden. Das Gebirgslsylimeter Stoderzinken zeigte einen dynamischeren Stoffumsatz im Vergleich zum Tallysimeter Gumpenstein. Der Austrag von schwerlöslichen PAK deutet auf Partikel- und/oder Kolloidtransport hin.

Schlagwörter: Alpine Böden, organische Schadstoffe, Eintrag, Austrag

Summary

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) are ubiquitous, toxic, organic pollutants. They are generated by combustion processes of fossil fuels and usually emitted into the atmosphere (i.e. heat generation). Atmospheric deposition leads to an input into the geosphere. Because there is a knowledge gap of PAH in/output in mountainous soils this study aims at balancing the mass input/output of atmospheric PAH in alpine soils using lysimeter data. At the Lysimeter stations peak Stoderzinken (ca. 1800 m amsl) and Gumpenstein (ca. 700 m amsl) in the Northern Calcareous Alps, close to the city of Gumpenstein in Austria, samples from deposition, soil and seepage water were investigated. PAH were identified in water and soil samples. The lysimeter Gumpenstein showed a more even PAH concentration pattern compared to the peak lysimeter Stoderzinken with significant different concentrations at different times. For 2 periods with plausible data (May/June and autumn 2016) PAH mass balances were calculated. Comparing the two lysimeter mass balances the lysimeter on peak Stoderzinken showed a higher input mass flow probably with a local source impact. At both lysimeters the mass balances were dominated by highly water soluble PAH, such as naphthalene as indicator for wood heat generation. For PAH with significant different physico-chemical properties significant different mass balances could be revealed. The Stoderzinken lysimeter showed a wider in/output dynamic compared to the valley lysimeter Gumpenstein. The presence of low water soluble PAH in the outflow of the lysimeters is probably because of particle and colloidal supported transport.

Keywords: alpine soils, organic pollutants, input, output

Einleitung

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, kondensierte Benzolringstrukturen) sind eine Gruppe von ubiquitären, toxischen, organischen Schadstoffen, die fast ausschließlich durch die unvollständige Verbrennung von fossilen Brennstoffen (Holz, Öl, Kohle, etc.) entstehen und dabei größtenteils direkt in die Atmosphäre emittiert werden. Über 99% der PAK werden bei energetischen Prozessen („Emissionen aus dem Brennstoffeinsatz“; UBA Deutschland 2018) freigesetzt. Dies sind z.B. Hausfeuerung, Kraft- und Heizwerke, Raffinerien, aber auch Verkehrsemissionen

z.B. aus (inländischem) Flug-, Straßen-, Schienenverkehr und Schiffsverkehr (UBA Deutschland 2018).

In Deutschland wurden 2016 allein vom krebserregenden Benzo(a)Pyren (5-Ring-PAK) ca. 29,5 t emittiert (25-jähriger Mittelwert ca. 35 t, mit Stdaw. +/- 14 t). Die Hauptquelle ist dabei die Hausfeuerung mit einem Anteil von ca. 90 %, andere PAK erreichen vergleichbare Anteile (UBA Deutschland 2018). In Österreich sind mit 75,7 % ebenfalls Haushalte, (Klein-)Gewerbe und öffentlichen Gebäuden sowie die Landwirtschaft mit 14,3 % die stärksten PAK-Emittenten. In beiden Ländern gingen die PAK-Emissionen

¹ Institut für Angewandte Geowissenschaften, Hydrogeologie, TU Darmstadt (IAG), Schnittpahnstraße 9, D-64287 DARMSTADT

² Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geozentrum, Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 GRAZ

³ Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein (HBLFA), Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

* Ansprechpartner: Dr. Thomas Schiedek, schiedek@geo.tu-darmstadt.de

seit den 1990er Jahren stark zurück (jeweils um über 50 %, u.a. wegen der Abschaltung von Quellen in Osteuropa) und verbleiben seit den 2000er Jahren auf etwa demselben Niveau (UBA Deutschland 2018; UBA Österreich 2018).

In der Atmosphäre werden PAK durch unterschiedliche physikalisch-chemische Eigenschaften entweder gasförmig oder partikelgebunden (z.B. Staub, Ruß) transportiert. Neben der quellennahen Ablagerung können PAK einem atmosphärischen Ferntransport unterliegen, der zu einer ubiquitären Verteilung sowie Deposition führt. Somit reichern sich diese Schadstoffe flächenhaft auch in Böden ohne Nutzung an (sogenannte Hintergrundgebiete oder natürliche Gebiete) und können aus Bodendepots auch wieder ausgetragen werden (z.B. Gocht 2007). Während dieser Prozesse können gerade in empfindlichen Ökosystemen, wie Gebirgen, Schäden eintreten, auch zunächst unbemerkt.

Zu Prozessen zum PAK-Eintrag in alpinen Böden gibt es mittlerweile umfangreiche Studien (z.B. Kirchner et al. 2011). Winkler, Lugauer & Reitebuch (2006) konnten zeigen, dass unter bestimmten meteorologischen Bedingungen eine kontinuierliche Luftmassenbewegung vom alpinen Vorland in Richtung Alpenhauptkamm erfolgt („alpines Pumpen“) und somit Schadstoffe in die Alpen aus Industriegebieten gelangen können. Eine Speicherung von anthropogenen Schadstoffen in Gebirgen wurde von Weiss, Lorbeer & Scharf (1998) in den Alpen und Blais et al. (1998) in den Rocky Mountains beschrieben. Schiedek, Gocht & Grathwohl (2006) fanden z.T. eine Zunahme von PAK-Bodenkonzentrationen mit zunehmender Höhe in den Alpen. Laborversuche zeigen, dass PAK in Schnee gespeichert werden und mit Schmelzwasser differenziert (leichtlösliche Komponenten zuerst) freigesetzt werden (Meyer, Lei & Wania 2006). Zu PAK-Bilanzen in alpinen Böden gibt es bisher nach Wissen der Autoren kaum Literatur. Ziel der vorliegenden Studie war daher eine Massenbilanzierung atmosphärischer PAK in alpinen Böden mit Gebirgslsimeter-Daten.

Material und Methoden

Bei dieser Untersuchung wurde mit vorhandenen sowie eigens erhobenen Daten (PAK-Analysen von Wasser, Boden) vom Gebirgslsimeter Stoderzinken (ca. 1800 m üNN) und einem Tal-Lsimeter in Gumpenstein (ca. 700 m üNN.) eine Massenbilanz von atmosphärischen eingetragenen, im Boden akkumulierten sowie mit Sickerwasser ausgetragenen PAK erstellt. Die mehrjährigen Daten der beiden Lysimeter (z.B. Seebacher 2008, Herndl et al. 2009) zeigen, dass die Schneemenge sowie der Verlauf der Schneeschmelze die Grundwasserneubildung stark beeinflusst. Dazu werden hohe anorganische Stoffumsätze bei nasser Deposition und Sickerwasser beobachtet. Hydrologische und hydrochemische Details sind bei Seebacher (2008) und Herndl et al. (2009) zu finden.

Zeitintegrierte Wasserproben (bis zu 3,6 Liter über mehrere Tage) wurden von der HBLFA genommen, mit Festphasentechnik extrahiert und im Labor des IAG (TU Darmstadt) gereinigt und auf PAK vermessen (Nersissian 2017; insgesamt 4 Niederschlags- und 5 Sickerwasserproben). Für die aktuelle PAK-Bodenbelastung wurde jeweils 1 Probe unmittelbar neben dem Lsimeter genommen (160 cm³-Edelstahlstechzylinder, Tiefe 10 cm unter Gelän-

deoberkante) und im Labor des IAG der TU Darmstadt extrahiert (gemahlene Proben der Fraktion <2 mm), präpariert, gereinigt und vermessen, vgl. Nersissian 2017). Bei der Beprobungstiefe wurde angenommen, dass nahezu alle PAK innerhalb der obersten 10 cm im Boden mit der höchsten Konzentration an organischen Material sorbieren (siehe auch Gleichung 3, Chiou 1977). Nach Bodenuntersuchungen von Seebacher erscheint diese Annahme plausibel.

Analysiert wurden die folgenden, von der US-EPA empfohlenen 16 PAK sowie 4 Verbindungen, die detaillierte Informationen zu Prozessen bieten können und gesondert mit einem * gekennzeichnet sind: (Naphthalin (Nap), 2-methyl-Naphthalin* (2-M-Nap), 1-methyl-Naphthalin* (1-M-Nap), Acenaphthylen (Any), Acenaphthene (Ace), Fluoren (Fln), Phenanthren (Phe), Anthracen (Ant), Fluoranthren (Fth), Pyrene (Pyr), Benz(a)anthracen (BaA), Chrysen (Chr), Benz(b)fluoranthren (BbF), Benzo(k)fluoranthren (BkF), Benz(e)pyren* (BeP), Perylen* (Per), Indeno(1,2,3-cd)pyren (Ind), Dibenz(ah)anthracen (DahA) und Benzo(ghi)perylen (BghiP). Die Quantifizierung der PAK wurde mit einem Gaschromatographen (Agilent Modell 7890A) in Kombination mit einem Massendetektor (Agilent Modell 5975C) durchgeführt (interne und externe PAK-Standards im SIM-Modus, Details vgl. Nersissian 2017). Zur Qualitätskontrolle der Messungen wurden Leerproben (Blanks) extrahiert und gemessen. Jede Messung erfolgte mit Tests auf Reproduzierbarkeit (3-fache Standardinjektionen) und Kalibration mit originalen PAK-Standards.

Die Stoffeinträge und -Austräge sowie die Stoffspeicherung wurde mit Geländedaten (Niederschlags- und Sickerwasservolumen, Bodenkonzentrationen) wie folgt berechnet.

Mit Gleichung 1 wurde die PAK-Fracht F_w in oder aus dem Lsimeter bestimmt:

Gleichung 1: $F_w = C_w \cdot Q \cdot A$ [Masse/Bilanzperiode],
mit C_w = PAK-Wasserkonzentration, Q = Wasservolumen, A = Eintragsfläche Lsimeter.

Für die Wasservolumina Q wurden jeweils die in den Lysimetern während der Bilanzperiode gemessenen Niederschläge und Sickerwasservolumina eingesetzt.

Die Bestimmung der PAK- Bodenfracht F_B erfolgte mit Gleichung 2:

Gleichung 2: $F_B = c_B \cdot m_B$ [Masse/Bilanzperiode],
mit c_B = PAK-Bodenkonzentration, m_B = Masse des Bodens innerhalb der oberen 10 cm des Lysimeters als Ort der PAK-Speicherung.

Die Masse m_B wurde mit Gleichung 3 wie folgt berechnet:

Gleichung 3: $m_B = A \cdot \rho \cdot h$,
mit A = 1 m² Lsimeteroberfläche, h = 10 cm und ρ = Bodendichte von 1,1 g/m³ (sandiger Schluff).

Ergebnisse

Nach einem Plausibilitätstest der Rohdaten aus kontinuierlichen Messungen der beiden Lysimeter, konnten 2 Massenbilanzperioden für jeden Standort gefunden werden, die für eine Massenbilanz geeignet war (Stoderzinken 30.5.-28.6.16, 7.9.-27.9.16; Gumpenstein 20.5.-3.6.16, 31.10.-14.12.16). Innerhalb dieser Perioden konnte anhand von Niederschlags-, Sickerwasser- und Massenganglinien eine Sickerwassergeschwindigkeit von mindestens ca. 3

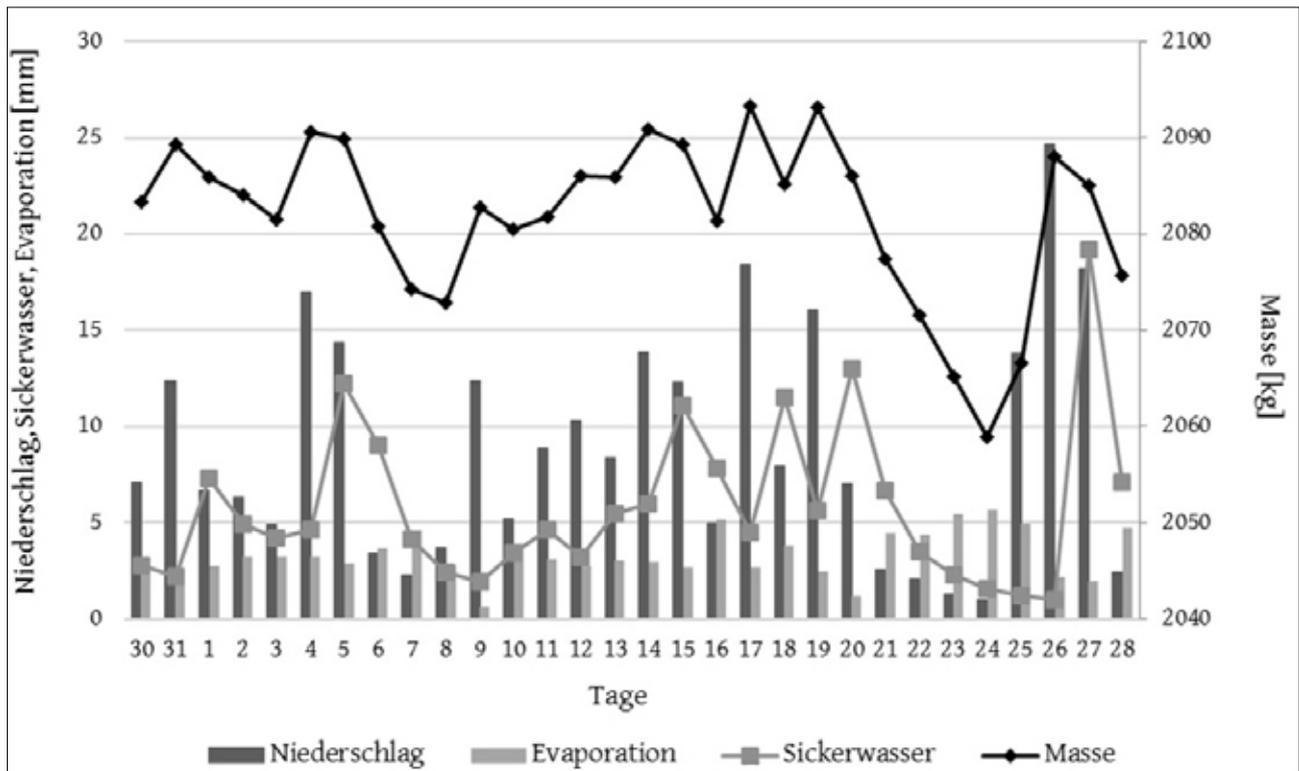


Abbildung 1: Niederschlags-, Evaporations-, Sickerwasser- und Massenganglinien vom Lysimeter Stoderzinken im Bilanzierungszeitraum 30.05 bis 28.06.2016.

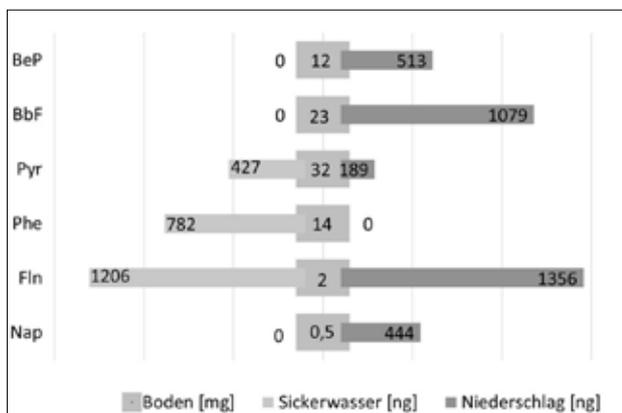


Abbildung 2: PAK-Massenbilanz vom Lysimeter Stoderzinken im Zeitraum 30.05 bis 28.06.2016 (rechts dunkle Balken = Eintrag, mittlere Zahlenreihe graue Balken = Speicher im Boden, hellgraue Balken links = Sickerwasseraustrag).

Tagen durch das jeweilige Lysimeter festgestellt (Abbildung 1) sowie PAK-Analysen synchronisiert werden. Alle präsentierten PAK-Daten sind mit dem Blindwert korrigiert. PAK konnten erwartungsgemäß in Niederschlag, Sickerwasser und Boden nachgewiesen werden (ubiquitäre Verbreitung). Bei beiden Lysimetern waren v.a. leicht wasserlösliche PAK (v.a. Naphthalin, niedermolekular, Masse < 202) am Stoffumsatz beteiligt. Höhermolekulare PAK konnten im Niederschlag, aber nicht in Schneeproben nachgewiesen werden. Das Gebirgslsylimter Stoderzinken zeigte einen dynamischeren Stoffumsatz im Vergleich zum Talysimeter Gumpenstein.

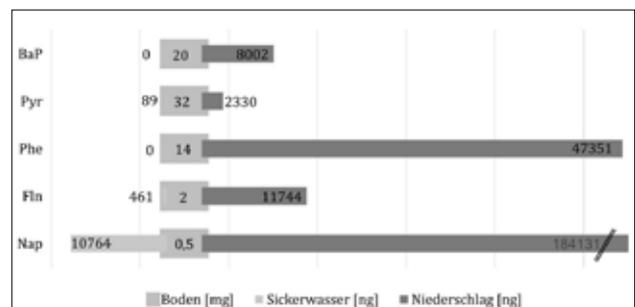


Abbildung 3: PAK-Massenbilanz vom Lysimeter Stoderzinken im Zeitraum 07.09 bis 27.09.2016 (rechts dunkle Balken = Eintrag, mittlere Zahlenreihe graue Balken = Speicher im Boden, hellgraue Balken links = Sickerwasseraustrag), beachte unterschiedliche Einheiten.

In Abbildung 2 ist die PAK-Massenbilanz vom Lysimeter Stoderzinken für den Zeitraum Mai bis Juni 2016 („Sommer“) dargestellt. Die Stoderzinken-Massenbilanz zeigt hier für 4 von 6 PAK (Nap, Flt, Phe, Pyr, BbF, BeP) eine Akkumulation im Boden an (Nap, Flt, BbF und BeP), dabei wurden Phe, Pyr und Flt (mittlere Wasserlöslichkeit) auch aus dem Boden ausgetragen. Der Bodenvorrat war dabei mit ca. 0,5 mg in einer ca. 10 cm tiefen Bodenschicht im Lysimeter weit höher (Faktor 10⁶), als die aktuellen Einträge und Austräge im ng-Bereich.

Im Herbst 2016 (September, siehe Abbildung 3) konnten im Eintrag am Stoderzinken wiederum Nap, Flt, Phe und Pyr gefunden werden, während BeP und BbF nicht mehr nachgewiesen wurden. Hinzu kam im Eintrag B(a)P (kaum

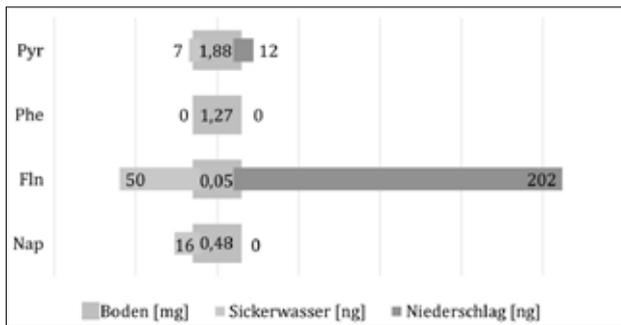


Abbildung 4: PAK-Massenbilanz vom Lysimeter Gumpenstein im Zeitraum 20.05 bis 03.06.2016 (rechts dunkle Balken = Eintrag, mittlere Zahlenreihe graue Balken = Speicher im Boden, hellgraue Balken links = Sickerwasseraustrag), beachte unterschiedliche Einheiten.

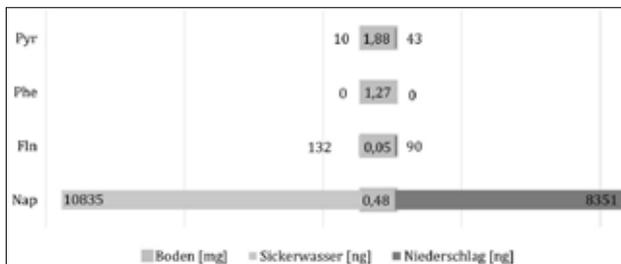


Abbildung 5: PAK-Massenbilanz vom Lysimeter Gumpenstein im Zeitraum 31.10 bis 14.12.2016 (rechts dunkle Balken = Eintrag, mittlere Zahlenreihe graue Balken = Speicher im Boden, hellgraue Balken links = Sickerwasseraustrag), beachte unterschiedliche Einheiten.

wasserlöslich, partikelgebunden), das im Bilanzzeitraum im Boden gespeichert wurde (kein Austrag). Nap war beim Eintrag im Vergleich zum Mai/Juni stark erhöht (ca. 135-fach) und konnte als einzige Verbindung auch im Austrag nachgewiesen werden (Abbildung 3, unterster Balken).

Im Lysimeter Gumpenstein wurden im Frühjahr (Abbildung 4) nach vereinzelt Niederschlägen (8 von 15 Tagen, bis zu 20 mm) und milden Temperaturen (10 – 20 °C) vor allem Pyr, Fln und Nap (gut wasserlöslich) umgesetzt, wobei der Vorrat von Pyr und Fln weiter aufgefüllt wurde. Phe ist vergleichsweise dargestellt und zeigte keinerlei Ein- oder Austrag in beiden Perioden, obwohl diese Substanz im Lysimeter Stoderzinken jeweils detektiert wurde.

Im Tallysimeter Gumpenstein konnte von Oktober bis Anfang Dezember 2016 bilanziert werden (Abbildung 5), zeigte jedoch ein ähnliches Bild wie am Stoderzinken im September mit hohen Nap-Ein- und Austrägen (Abbildung 5). Die höhermolekularen Verbindungen Fln und Pyr wurden signifikant eingetragen, Pyr konnte auch im Austrag festgestellt werden.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Ziel war bei dieser Studie die Darstellung der Massenbilanzen der betrachteten Lysimeter während der ausgewerteten Perioden, um Transport/Speicherprozesse zu erkennen. Der Bodenvorrat war bei allen Bilanzen weit höher (Faktor 10^6), als die aktuellen Einträge. Dies zeigt die langjährige Aufspeicherung von PAK in den Böden an. Ein Vergleich

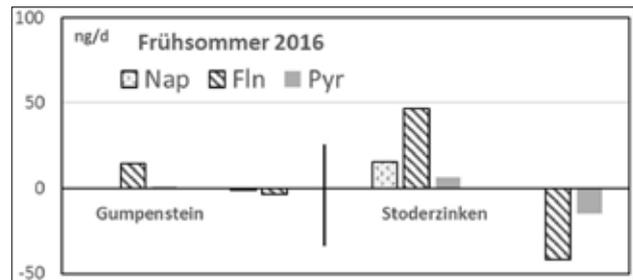


Abbildung 6: Normierter Massenumsatz der 3 mobilsten PAK an den Lysimetern Gumpenstein und Stoderzinken im Frühjahr in ng pro Tag; positive Werte = Eintrag, negative Werte = Austrag.

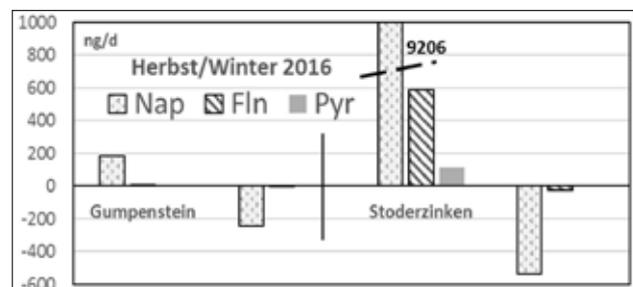


Abbildung 7: Normierter Massenumsatz der 3 mobilsten PAK an den Lysimetern Gumpenstein und Stoderzinken im Herbst/Winter in ng pro Tag; positive Werte = Eintrag, negative Werte = Austrag.

der Massenbilanzen beider Lysimeter (Mai/Juni und Herbst 2016) mit normierten Daten (Abbildung 6 und 7) sowie die gespeicherten PAK-Massen lassen aber auf eine generelle höhere Eintragsfracht über einen längeren Zeitraum am Stoderzinken schließen. Diese Beobachtung wird von Ergebnissen von Bodenuntersuchungen am Stoderzinken von Nersissian (2017) gestützt. Bei Nersissian zeigten Bodenproben am Berg signifikant höhere PAK-Konzentrationen im Vergleich zu Proben im Tal.

Am Stoderzinken führen im Mai/Juni 2016 wahrscheinlich ergiebige Niederschläge bei relativ „warmen“ Temperaturen über den gesamten Mess-Zeitraum zur Auswaschung von bevorzugt leichtlöslichen PAK, wie z.B. Nap, Fln und Pyr (Abbildung 6), aus der Atmosphäre (Lei & Wania 2001). Das Fehlen von Nap im Austrag ist dabei entweder auf Artefakte bei der Probenahme zurückzuführen oder könnte ein Hinweis auf rasche Abbauprozesse sein, da Nap einen niedrigeren Sorptionskoeffizienten hat als Fln oder Pyr, und damit eher ausgetragen werden müsste. Der Sommerwert am Stoderzinken von 444 ng Nap in Abbildung 2 (15,3 ng/d in Abbildung 6) ist dabei wahrscheinlich ein überregional verursachter Hintergrundwert, da in Gumpenstein keine Nap-Einträge im direkt vergleichbaren Zeitraum (Abbildung 4) zu beobachten sind. Die stark erhöhten Nap-Einträge am Stoderzinken und in Gumpenstein im Herbst/Winter (Abbildungen 3, 5 und 7) gehen wahrscheinlich auf die beginnende Hausfeuerung zurück. Dabei sind die winterlichen Einträge am Stoderzinken (ca. 600-facher Nap-Eintrag gegenüber Sommer, vgl. Abbildungen 6 und 7) wahrscheinlich nicht nur überregionalen Quellen zuzuordnen, sondern auch durch lokale Quellen beeinflusst (niedrigste Temperatur im

September 3,2 °C), da hier in der Umgebung des Lysimeters mehrere private, sporadisch bewohnte Häuser sowie 2 Gasthöfe angesiedelt sind.

Die Dynamik und die winterlichen Nap-Einträge in Gumpenstein (deutlicher Anstieg von 0 auf ca. 200 ng/d, *Abbildungen 6 und 7*) repräsentieren am ehesten die PAK-Stoffumsätze in lokalen dauerhaftbesiedeltem Gebiet mit entsprechenden Emissionen (Verkehr, Landwirtschaft, Industrie, Wohngebiete usw.).

Das Fehlen bzw. sporadische Auftreten von schweren PAK beim Eintrag geht wahrscheinlich auf Artefakte bei der Probenahme zurück. Z.B. können Partikelreste in Sammelbehältnissen mit PAK beladen sein, die dann nicht vollständig erfasst werden. Der sporadische Austrag von Verbindungen mit sehr geringen Wasserlöslichkeiten und hohen Sorptionskoeffizienten (Masse >202), ist wahrscheinlich auf partikel- und/oder kolloidgebundene Transportprozesse zurückzuführen.

Literatur

- Blais J.M., Schindler D.W., Muir C.G., Kimpe L.E., Donald D.B., Rosenberg B. (1998) Accumulation of persistent organochlorine compounds in mountains of western Canada.- *Nature*, vol. 395: 8, 585-588.
- Chiou C., Freed V.H., Schmedding D.W., Kohnert R.L. (1977) Partition Coefficient and Bioaccumulation of Selected Organic Chemicals, *ES&T*, Volume 11, Number 5, May 1977 475-478.
- Gocht T. (2007) Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in rural soils based on mass balances at the catchment scale. *Environ. Toxicology & Chemistry*, Vol. 26, No. 4, pp. 591-600.
- Herndl M., Bohner A., Kandolf M. (2009) Gebirgs-Lysimeterstation am Stoderzinken - Erste Ergebnisse. 13. Gumpensteiner Lysimetertagung 2009, 111-116.
- Kirchner M., Jakobi G., Levy W., Kocsis G., Henkelmann B., Pfister G., Bernhöft S., Fischer N., Schramm K.-W., Hangen E., Körner W., Kronawitter H. (2011) Erfassung von persistenten organischen Schadstoffen im bayerischen Alpenraum Projekt: POPALP Endbericht – Teil Boden, Nadeln, Deposition, Luft Helmholtz Zentrum München PSP Element: S-776360-5051-002.
- Laxander M., Schiedek T., Schüth C. (2010) Atmospheric input and fate of persistent organic pollutants (POP) in soil in high and low mountain ranges. SETAC-Meeting, May 23rd – 27th, 2010, Sevilla, Spain.
- Lei Y.D., Wania F. (2004) Is rain or snow a more efficient scavenger of organic chemicals? – *Atmospheric Environment*, Vol. 38, pp. 3557-3571.
- Meyer T., Lei Y.D., Wania F. (2006) Measuring the Release of Organic Contaminants from Melting Snow under Controlled Conditions. *Environ. Sci. Technol.* 40(10) 3320-3326.
- Nersissian L. (2017) Massenbilanzierung von atmodgenen organischen Schadstoffen mit Lysimeterdaten von zwei alpinen Gebieten. Unveröffentlichte MSc-These, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt.
- Schiedek T., Gocht T., Grathwohl P. (2006) Cold-condensation of PAH in soils of the European Alps (Martell valley).- *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, General Assembly, Vienna, Austria, 02-07.04.2006; EGU06-A-05038.
- Seebacher M. (2008) Vergleich der Wasser- und Stoffflüsse eines Gebirgs- und eines Talstandortes anhand von Lysimeterversuchsergebnissen im Grünland. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur Wien, 99 S.
- UBA Deutschland (2018) Emissionsentwicklung 1990- 2016 für Persistente organische Schadstoffe, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (Persistente Organische Schadstoffe, engl: POPs), Endfassung 14.02.2018 (v1.0), <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>, letzter Zugriff 22.1.2019.
- UBA Österreich (2018) Emissionstrends 1990-2016: Ein Überblick über die Verursacher von Luftschadstoffen in Österreich (Datenstand 2018) <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0658.pdf>, letzter Zugriff 22.1.2019.
- Weiss P., Lorbeer G., Scharf S. (1998) Persistent Organic Pollutants in remote Austrian forests - altitude related results. *Environ. Sci. & Pollut. Res.*, Special Issue No. 1, 46-52.
- Winkler P., Lugauer M., Reitebuch O. (2006) Alpines Pumpen, *promet*, Jahrgang 32 Heft ½, 34-42.

Neue Methode zur Messung hydro-physikalischer Eigenschaften von Kultursubstraten und Bewertung ihrer Eignung für gärtnerische Anwendungen

Uwe Schindler^{1*} und Frank Eulenstein^{1,2}

Zusammenfassung

Kultursubstrate werden speziell entwickelt für die Anwendung in Gärtnereien und für Blumentöpfe in Privathaushalten. Gewöhnlich werden sie als Mischung aus Hochmoortorf und anderen organischen und mineralischen Zusätzen hergestellt. Ein nachhaltiges, umweltfreundliches und ressourcenschonendes Wassermanagement im Gartenbau, das für gutes Pflanzenwachstum und hohe Erträge sorgt, erfordert die Kenntnis der Eignung der Kultursubstrate für jede spezifische Anwendung. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, sind verlässliche Methoden zur Messung und Bewertung von hydro-physikalischen Qualitätsindikatoren erforderlich. Hier wurde die Eignung des Erweiterten Verdunstungsverfahrens (EEM) und des zugehörigen HYPROP-Systems (Hydraulic PROProperty Analyzer) für die sehr locker gelagerten Substrate erfolgreich getestet. EEM und HYPROP ermöglichen die gleichzeitige und effektive Messung der Wasserretentionskurve und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion. Der kapillare Wasseraufstieg kann aus der hydraulischen Leitfähigkeit berechnet werden. Zusätzlich werden die begrenzenden Qualitätsindikatoren Schrumpfung und Wiederbenetzungshemmung während der Versuchsdurchführung gemessen. Ein Bewertungsrahmen wurde entwickelt und an 19 kommerziellen Kultursubstraten und vergleichsweise zwei ausgewählten mineralischen Böden getestet. Die Bewertung wurde getrennt für die Anwendung bei freier Dränung im Feld und für das Wachstum in Blumentöpfen vorgenommen. Die Bewertung basiert auf: i- Anteil an leicht pflanzenverfügbarem Wasser, ii- Luftvolumen, iii- Kapillaraufstieg, iv- Wiederbenetzbarkeit und v- Schrumpfungsverhalten und besteht aus einer 5-Klassen-Skala zwischen sehr gut und nicht ausreichend. Die begrenzenden Indikatoren werden in einer 3 Klassen-Skala bewertet. Das beste Kultursubstrat in dieser Studie bestand aus Torf, Kokosfasern und Perlite. Kritisch zu bewerten war das Luftvolumen in Blumentöpfen geringer Höhe. Das Risiko eines Luftmangels wird durch die Zugabe von Ton erhöht. Zukünftige Arbeiten sollten ausgerichtet sein auf die Entwicklung einer Probenvorbereitung, die eine hohe Reproduzierbarkeit und praxisnahe hydro-physikalische Messergebnisse sichert. Ziele für zukünftige Forschungsarbeiten bestehen in einer methodischen Spezifizierung der Probenvorbereitung und der Entwicklung von Torfersatzstoffen.

Summary

Growing media are specially created for use in nurseries and flowerpots in private households. Usually they are produced as a mixture of peat and other organic and mineral ingredients. Sustainable, environmentally friendly, and resource-saving horticultural water management that provides good plant growth and high yields requires knowledge of the suitability of growing media for each specific application. To meet this claim, reliable methods for measuring and evaluating hydro-physical quality indicators of growing media are required. Here, the suitability of the Extended Evaporation Method (EEM) and the associated HYPROP system (Hydraulic PROProperty Analyzer) for the very loosely bedded substrates was successfully tested. EEM and HYPROP allow the simultaneous and effective measurement of the water retention curve and the unsaturated hydraulic conductivity function. The capillary water rise can be calculated from the hydraulic conductivity. In addition, the limiting quality indicators shrinkage and re-wettability inhibition will be measured during the experimental procedure. A hydro-physical assessment framework has been developed and tested on 19 commercial growing media and comparatively selected mineral soils. The hydro-physical evaluation was made separately for field application in free drainage and growth in containers. The rating is based on: i- plant available water, ii- air volume, iii- capillary rise, iv- rewetting time and v- shrinkage behavior and consists of a 5-class rating between very good and not sufficient. The limiting indicators are rated in a 3-class scale. The best growing medium in this study was a composition of peat, coconut fiber and perlite. The risk of lack of air can be increased by the addition of clay. Future work should be focused on the development of a sample preparation that ensures high reproducibility and practical hydro-physical measurement results. Goals for future research include a methodological specification of the sample preparation and the development of peat substitutes.

¹ Mitscherlich Akademie für Bodenfruchtbarkeit (MITAK), GmbH, Prof.-Mitscherlich-Allee 1, D-14641 PAULINENAUE

² Leibniz Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Müncheberg

* Ansprechpartner: Dr. Uwe Schindler, schindler@mitak.de

Einleitung

Die Qualitätsbeurteilung von Kultursubstraten beschränkt sich derzeit im Wesentlichen auf die Inhaltsstoffe und die chemische Zusammensetzung. Informationen für den Nutzer zu hydro-physikalischen Eigenschaften sind weitgehend nicht verfügbar, nach Schmilewski (2017) aber von großer Bedeutung, da sie im Gegensatz zu den chemischen Eigenschaften während der Nutzung kaum gezielt beeinflusst werden können. Der Wasser- und besonders der Lufthaushalt der Substrate sind von entscheidender Bedeutung für das Pflanzenwachstum (Schmilewski 2017). Die Anforderungen an das erforderliche Luftvolumen reichen je nach Autor von 10 bis 40 Vol.-% (Bohne 2006). In Containern und Blumentöpfen sollte eine Durchlüftung besonders im unteren Wurzelbereich sichergestellt werden (Schmilewski 2017).

Es müssen verlässliche Methoden für die Bestimmung hydro-physikalischer Eigenschaften zur Verfügung stehen. Standardmäßig erfolgt ihre Messung derzeit mit der Sandbox nach DIN EN 13041. Die Messung ist aufwendig, die Ergebnisse sind unpräzise und fehlerbehaftet (Raviv und Lieth 2008, Al Naddafa et al. 2011). Das Gesamtporenvolumen als Basis für die Quantifizierung der Luftkapazität wird nicht gemessen, sondern aus angenommenen Reindichtewerten berechnet. Die Schrumpfung der ofentrockenen Probe ist in ihrer Aussage als Qualitätsindikator stark eingeschränkt, solange keine Aussage für den bedeutsamen Saugspannungsbereich bis 100 hPa getroffen werden kann. Wiederbenetzung und Hysterese des pflanzenverfügbaren Wasser- und Luftvolumens werden vollständig vernachlässigt. Eine Unterscheidung für Feld- und Topfbedingungen erfolgt nicht und auch die Topfhöhe als wichtige Variable für die Beurteilung des Wasser- aber insbesondere des Lufthaushaltes (Schindler et al. 2017b) wird vernachlässigt.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Kultursubstrate und mineralischen Böden.

Nr	Zusammensetzung
1	30% Hh, 40% Ko, 30% P
2	50 % Hh (H3-H5), G, R, T
3	60 % Hh (H3-H5), (H6-H7), Ko, T, P
4	60 % Hh (H3-H5), (H6-H7), R, G, Ko, K
5	Hh (H3-H8), G, P, K
6	Hh (H2-H5), G, R, K
7	Hh (H3-H5), (H7-H9)
8	Hh (H3-H8), G, R, P, T, Ko
9	Hh (H2-H5), G, R, P, T, K
10	80 % Hh (H3-H5), (H6-H7), Ko, T
11	75 % Hh (H3-H5), (H6-H7), Ko, T, K
12	Hh (H3-H8), T, P
13	90 % Hh (H4-H8), 10 % T, K
14	R, Ko, T, Guano
15	95 % Hh (H3-H7), P, Ko
16	Hh (H3-H8), R, G, T, K
17	Hh (H2-H5), P, T, K
18	Hh (H2-H4), (H7-H9), G, R
19	Hh (H3-H8), R, G
20	Lehm (Ls3)
21	Ton (Lts)

Hh- Hochmoortorf, H3 Zersetzungsgrad 3, R- Kompost aus Holz- und Forstabfällen, G- Kompost aus Grünabfällen und Landschaftspflegematerial, P- Perlit, K- Kalk, T- Ton, Ko- Kokosfaser

Nachfolgend soll die Anwendbarkeit des Erweiterten Verdunstungsverfahrens (EEM) und des HYPROP (HYdraulic PROProperty analyzer, Schindler et al. 2010) für die hydro-physikalische Messung und Beurteilung von Kultursubstraten geprüft. Dazu werden die hydro-physikalischen Eigenschaften von kommerziellen Kultursubstraten und vergleichsweise von ausgewählten mineralischen Böden gemessen und für unterschiedliche gärtnerische Anwendungen bewertet.

Material und Methoden

Substrate

19 unterschiedliche handelsübliche Kultursubstrate wurden ausgewählt (Tabelle 1). Hauptkomponente der Kultursubstrate war Weiß und Schwarztorf aus Hochmooren. Der Torfanteil variierte zwischen 30 und 100 %. Ein Substrat (Nr. 14 von Neudohum) war torffrei, bestehend aus Rindenumus, Kokosfaser und Zusätzen von Ton. Weitere Beimengungen waren Kompost aus Forst- (F) und Grünabfällen (G), Kokosfasern (Ko) und mineralische Bestandteile (Perlit- P, Kalk- Ka, und Ton-T). Darüberhinaus wurden zwei Substrate (Ls3, Lts) aus mineralischen A-Horizonten in die Untersuchung einbezogen und die Qualität der Nutzung für gärtnerische Anwendungen vergleichsweise bewertet.

Messung hydro-physikalischer Eigenschaften

Das Erweiterte Verdunstungsverfahren und das HYPROP sind hinlänglich bekannt, angewendet und getestet für die Messung der hydro-physikalischen Eigenschaften von Mineral- und Moorböden (Schindler et al. 2010, Schindler et al. 2012, Schelle et al. 2010, Schelle et al. 2013). In dieser Studie wird die Eignung des Verfahrens für die sehr locker gelagerten Kultursubstrate getestet. Zusätzlich zu den Standardeigenschaften, Wasserretentionskurve, ungesättigte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion, Trockenrohdichte, können die Hysterese (Schindler et al. 2015a) der hydraulischen Kennfunktionen und die Schrumpfung (Schindler et al. 2015b) gemessen werden. Die Schrumpfung wurde für diese Untersuchungen in vereinfachter Weise aus der Durchmesseränderung an der Probenoberfläche während der Verdunstungsmessung abgeleitet. Der kapillare Wasseraufstieg wurde aus der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion berechnet. Die Wiederbefeuchtungseigenschaften wurden während der Versuchsdurchführung nach der Water Drop Penetration Time Methode (WDPT, Beardsell et al. 1982, Schmidt 1995, Blanco-Canqui & Lal 2009) quantifiziert. Dazu wurde ein Tropfen auf die Probe gegeben, und die Infiltrationszeit in Sekunden gemessen. Die Messung wurde je Messzeitpunkt in 4-facher Wiederholung durchgeführt. Die dadurch verursachte Störung des Verdunstungsverlaufes war vernachlässigbar.

Probenvorbereitung

Die Substrate wurden locker in Plastikrohre (Durchmesser 15 oder 20 cm, Füllhöhe 60cm) eingefüllt und anschließend etwa 48 Stunden kapillar gesättigt. Die Rohre standen dabei in einer Schale mit etwa 5 cm Wasserfüllung. Während der Sättigung trat eine Setzung ein, so dass nach Abschluss der

kapillaren Sättigung die Substratsäule auf etwa 52 bis 48 cm über der Wasseroberfläche in der Schale zusammengesackt war und die Saugspannung an der Substratoberfläche etwa 50 hPa betrug. Im Folgenden wurden die oberen 4 cm des Substrates entnommen, gemischt und damit die 250 cm³ Stechzylinder locker gefüllt. Die Füllung erfolgte in 2 Etappen. Zunächst wurde der Stechzylinder (Probenzylinder) gefüllt und 5 Mal aufgesteckt. Anschließend wurde ein zweiter Zylinder aufgesetzt, bis zur Hälfte mit Substrat gefüllt und wiederum 5 Mal aufgesteckt. Die Oberfläche wurde geglättet, die Probe im Wasserbad gesättigt, mit dem HYPROP verbunden und die Messung gestartet. Die Probenvorbereitung ist angelehnt an die standardisierte Verfahrensweise in den Niederlanden, sichert eine Reproduzierbarkeit der Einfüllichte und ermöglicht die hydraulische Vergleichbarkeit von Blumenerden und Substraten unterschiedlicher Ausgangsfeuchte des Basismaterials in der Verpackung (Schindler et al. 2017b).

Bewertung der hydro-physikalischen Qualitätsindikatoren

Die Bewertung kann grundsätzlich für alle gärtnerischen Anwendungen erfolgen. In dieser Studie wurde die Gesamtbewertung beispielhaft für die Anwendung in 20 cm hohen Blumentöpfen und für Feldbedingungen durchgeführt. Qualitätsindikatoren sind der pflanzenverfügbare Luft- und Wasseranteil im Saugspannungsbereich bis 100 hPa, im Feld bis 800 hPa und der kapillare Wassertransport. Die Bewertung erfolgt in 5 Klassen (Schindler et al. 2017a, *Tabelle 2*). Ein Luftgehalt kleiner als 10 Vol.-% wurde in Anlehnung an Raviv & Lieth (2008) als wachstumsmindernd angenommen. Der Anteil an pflanzennutzbarem Wasser sollte möglichst hoch sein (Bohne 2006), jedoch nach Handrek & Black (2004) mindestens 35 Vol.-% nicht unterschreiten, um

Tabelle 2: Bewertung der Basiseigenschaften.

Parameter	Klasse				
	1	2	3	4	5
PAW ¹⁾ (% by vol.)	< 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	≥ 35
LV ²⁾ (% by vol.)	< 2	2 – 5	5 – 8	8 – 10	≥ 10
KW ₅ ³⁾ (cm)	< 30	≥ 30			

¹⁾ pflanzenverfügbares Wasser, ²⁾ LV- Luftvolumen, ³⁾ KW₅- kapillare Aufstiegshöhe für eine 5mm^d Rate

Tabelle 3: Bewertung der limitierenden Faktoren.

Parameter	Klasse		
	0	1	2
W (in Sekunden) ¹⁾	≤ 5	5 – 15	> 15
S ²⁾ (Vol.-%)	≤ 2	2 – 5	> 5

¹⁾ W – Benetzungszeit eines Wassertropfens, ²⁾ Schrumpfung

Tabelle 4: Gesamtbewertung der hydro-physikalischen Eignung von Kultursubstraten im Gartenbau.

Bewertung	Punkte
Sehr gut	≥ 10
Gut	< 10 - > 8
befriedigend	< 8 - > 6
Genügend	< 6 - > 4
Ungenügend	≤ 4

Wasserstress zu vermeiden. Qualitätsmindernde Indikatoren sind Schrumpfung und Benetzungshemmung. Sie wurden in 3 Klassen bewertet (*Tabelle 3*), wobei nur der höchste Wert aus beiden Indikatoren berücksichtigt wird. Die Gesamtbewertung erfolgt in 5 Klassen (*Tabelle 4*) zwischen ungenügend (≤ 4 Punkte) und sehr gut (≥ 10 Punkte).

Ergebnis und Diskussion

Die hydro-physikalischen Kennwerte der untersuchten Kultursubstrate und mineralischen Böden zeigten eine große Variabilität bei fast allen Kennwerten (*Tabelle 5*). Die Reproduzierbarkeit der Vergleichsmessungen innerhalb der Substratvarianten war hoch. Der Wassergehalt bei Sättigung variierte zwischen 87,1 und 71,8 Vol.-%. Große Unterschiede zeigten sich auch beim pflanzenverfügbaren Wasser- und Luftvolumen, der Schrumpfung, Wiederbenetzung und der Kapillarität. Die statistischen Auswertungen aus Schindler et al. 2017b werden auch von diesen Untersuchungsergebnissen bestätigt, dass Einmischung von Ton das Luftvolumen negativ beeinflusst. Das ist insbesondere von Bedeutung in Blumentöpfen mit einer geringeren Höhe als 20 cm. Die mineralischen Substrate zeigten zwar keine Einschränkungen durch Schrumpfung oder Wiederbefeuchtung, die Basiskennwerte Wasser- und Luftgehalt und Kapillarität waren jedoch deutlich geringer als die der Kultursubstrate.

Die Bewertung der Kultursubstrate reichte von genügend bis sehr gut (*Tabelle 6*). Besonders groß war die Differenzierung bei der Anwendung in Blumentöpfen. Hauptursache war das nicht ausreichende Luftvolumen und die limitierenden Faktoren Schrumpfung und Benetzungshemmung. Bei freier Dränung unter Feldbedingungen gab es keine Einschränkungen des Luftvolumens. Begrenzend und qualitätsmindernd war hier der begrenzte pflanzenverfügbare Wasseranteil. Das beste Substrat bei diesen Untersuchungen (Nr. 1) war eine Mischung aus Hochmoortorf (30 %), Kokosfaser (40 %) und Perlit (30 %). Hochmoortorf und Kokosfasern haben hohe Wasserspeichereigenschaften, Perlit und Kokosfasern begünstigen die Durchlüftung. In der Topfanwendung erreichte das Produkt die Maximalbewertung von 12 Punkten. In der Feldanwendung war der pflanzenverfügbare Wasseranteil die Ursache für eine mit 9 Punkten „nur“ gute Bewertung. Im Mittel wurden die Kultursubstrate mit befriedigend bewertet. Die mineralischen Substrate erreichten vergleichsweise dazu im Mittel gerade noch ein „genügend“.

Aus den Untersuchungen zeigte sich, dass Substrate die keine Zusätze von Ton, dafür jedoch Anteile von Kokosfasern, Perlit, Kompost und geringere Beimengungen von Hochmoortorf enthielten, überwiegend Luftgehalte größer als 10% aufwiesen. Auch die Schrumpfung und die Wiederbenetzungszeit blieben bei diesen Proben meistens in einem vertretbaren Rahmen. Diese Aussagen werden durch Ergebnisse von Heiskanen (1995) gestützt.

Schlussfolgerungen

Das erweiterte Verdunstungsverfahren und das zugehörige Messgerät HYPROP ermöglichen eine komplexe hydro-physikalische Analyse auch der sehr locker gelagerten Kultursubstrate. Neben der simultanen Messung der Wasserretentionskurve und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit können gleichzeitig die Schrumpfung und

Tabelle 5: Hydro-physikalische Kennwerte der Kultursubstrate und mineralischen Böden.

Nr	Θ _s	FK	pWP	Luft _{p20} Vol.-%	Luft _F	PAW _{p20}	PAW _F	S	KW ₅ cm	W sec
1	83,4	40,8	12,3	17,5	42,7	37,7	24,7	0	40,1	0,1
2	81	47,3	14,3	7,6	33,7	30,6	22,9	7	79,9	2
3	80,8	40,8	20,1	13,8	40	32,1	19,8	6,2	29,3	0,1
4	81,1	39,8	12,6	13,7	41,3	31,5	20,2	3,3	12,7	1
5	83,4	52	12,3	6,9	31,4	29,6	26	7	36,4	2
6	78,8	43,2	12,7	11,6	35,6	29,2	20,8	0,8	15,9	6
7	84,5	55,1	29,8	2,7	29,4	32,5	20,6	0,6	47,7	1
8	75,8	40,8	30	6,8	35	32,8	10,3	1	26,7	6
9	83,1	54,7	31,1	7,2	28,5	26,5	18,5	6,2	13,1	2
10	84,4	44,1	18	13,6	40,4	31,4	24	6,2	29,3	0,1
11	80,7	38,8	4,6	13,9	41,9	33,5	23,2	0,8	29,3	0,1
12	81,2	50,6	12,8	5,7	30,6	29,1	21,1	6,6	45,7	0,1
13	84,2	53,8	23,8	4,5	30,4	31,1	22,4	9,1	24,4	1
14	87,1	31,6	21,4	31,7	55,5	26,7	8,6	0,4	17,9	0,1
15	86,2	45,1	29,1	11,7	41,1	34,4	14	2,1	42,9	2
16	79	46,2	29,9	11,8	32,8	26,7	14,9	3,3	26,7	15
17	79,6	46,4	10	9,4	33,1	27,9	21,9	5,4	54,7	0,1
18	86	48	7,7	6,5	38	36,6	25,2	6,2	45,7	1
19	71,8	38,7	4,6	9,3	33,1	28,2	22,5	2,1	10,1	0,1
MW	81,7	45,1	17,7	10,8	36,5	31	20,1	3,9	33,1	2,1
Mineralische Böden										
20	37,5	30,5	15	2	7	13,4	8,4	0	21	0
21	43	37,8	22,6	1,4	5,2	11,6	7,7	0	17	0
MW	40,3	34,1	18,8	1,7	6,1	12,5	8,1	0	19,0	0

Θ_s-Wassergehalt bei Sättigung, FK-Feldkapazität, Luft_{p20}, Luft_F-Luftgehalt im Blumentopf mit einer Höhe von 20 cm und bei freier Dränung, PAW_{p20}-pflanzenverfügbares Wasser im Topf mit 20 cm Höhe zwischen Luftvolumen und 100 hPa, PAW_F-pflanzenverfügbares Wasser bei freier Dränung zwischen Feldkapazität und 800 hPa Saugspannung, S₁₀₀-Schrumpfung, KW₅-stationäre kapillare Aufstiegshöhe für eine Rate von 5mm^d⁻¹, W- Benetzungszeit.

Tabelle 6: Hydro-physikalische Bewertung der Kultursubstrate und mineralischen Böden.

Nr	Luft _{p20}	Luft _F	WK _{p20}	WK _F	KW ₅	S	W	B _{p20}	B _F	MW _B
1	5	5	5	2	2	0	0	12	9	10,5
2	3	5	4	2	2	2	0	7	7	7,0
3	5	5	4	1	1	2	0	8	5	6,5
4	5	5	4	2	1	1	0	9	7	8,0
5	3	5	3	3	2	2	0	6	8	7,0
6	5	5	3	2	1	0	1	8	7	7,5
7	2	5	4	2	2	0	0	8	9	8,5
8	3	5	4	1	1	0	1	7	6	6,5
9	3	5	3	1	1	2	0	5	5	5,0
10	5	5	4	2	1	2	0	8	6	7,0
11	5	5	4	2	1	0	0	10	8	9,0
12	3	5	3	2	2	2	0	6	7	6,5
13	2	5	4	2	1	2	0	5	6	5,5
14	5	5	3	1	1	0	0	9	7	8,0
15	5	5	4	1	2	1	0	10	7	8,5
16	5	5	3	1	1	1	2	7	5	6,0
17	4	5	3	2	2	2	0	7	7	7,0
18	3	5	5	3	2	2	0	8	8	8,0
19	4	5	3	2	1	1	0	7	7	7,0
MW	4	5	4	2	1	1	0	7,7	6,9	7,3
Mineralische Standorte										
20	2	3	1	1	1	0	0	4	5	4,5
21	1	3	1	1	1	0	0	3	5	4,0
MW	1,5	3,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	3,5	5,0	4,2

B_{p20}, B_F-Bewertung für die Anwendung in Töpfen der Höhe 20 cm und im Feld, MW_B-mittlere Bewertung

die Wiederbenetzung gemessen werden. Damit lassen sich in einem Messdurchlauf alle Kennwerte quantifizieren,

die für eine hydro-physikalische Qualitätsbeurteilung von Kultursubstraten erforderlich sind.

Die Messung und Bewertung von Kultursubstraten nach DIN EN 13041 (2012) sollten in weitergehenden Forschungsarbeiten kritisch hinterfragt und bezüglich der Aussagefähigkeit für praktische Anwendungen im Gartenbau geprüft werden.

Die Messung hydro-physikalische Eigenschaften wird derzeit sowohl an mechanisch vorbelasteten (PPO 1999, Schindler et al. 2017b) als auch locker befüllten (DIN EN 13041) Proben vorgenommen. Die unterschiedliche Probenvorbereitung kann bedeutsam für das Messergebnis sein. In zukünftigen Untersuchungen sollte geprüft werden, welche Vorgehensweise eine hohe Reproduzierbarkeit sichert und die Bedingungen in der Praxis am besten abbildet.

Die untersuchten Kultursubstrate waren gekennzeichnet durch ein sehr hohes pflanzennutzbares Wasservolumen, besaßen aber je nach Zusammensetzung unterschiedlich stark ausgeprägte Nutzungseinschränkungen durch Schrumpfung und Wiederbenetzungshemmung. Besonders kritisch zu bewerten war die Luftversorgung in Blumentöpfen mit einer Höhe geringer als 20 cm. Durch Zugabe von Ton wird das Risiko von Luftmangel erhöht.

Hochmoortorf ist eine endliche und schützenswerte Ressource. Zukünftige Forschung sollte auf die Entwicklung von Torfersatzstoffen ausgerichtet sein. Die hydrothermale Karbonisierung von Landschaftspflegematerial und anderer organischer Reststoffe bietet eine aussichtsreiche Möglichkeit der Torfsubstituierung (Rebeling et al. 2015, Grewe 2016).

Der Bewertungsrahmen hydro-physikalischer Qualitätsindikatoren hat sich als praktikabel erwiesen, sollte allerdings in der Diskussion mit Gartenbauspezialisten und Erdenherstellern diskutiert und ggf. präzisiert werden.

Literatur

- Al Naddafa O., Livieratos I., Stamatakisa A., Tsiogiannis I., Gizas G., Savvas D. (2011) Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite, and mixtures of them, and their impact on cucumber grown on bags. *Scientia Horticulturae* 129, 135-141.
- Beardsell D.V., Nichols D.G. (1982) Wetting properties of dried-out nursery pot media. *Scientia Hort.*, 17, 49-59.
- Blanco-Canqui H., Lal R. (2009) Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma*. 149, 171-180.
- Bohne H. (2006) Physikalische Substrateigenschaften. *Gehölforschung* Band 6. Hrsg. Abt. Baumschule, Institut für Zierpflanzen- und Gehölzwissenschaften, Naturwissenschaftliche Fakultät Universität Hannover.
- DIN EN 13041 (2012) Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate- Bestimmung der physikalischen Eigenschaften- Rohdichte (trocken), Luftkapazität, Pflanzenverfügbares Wasser, Schrumpfungswert, und Gesamtporenvolumen, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Grewe T. (2016) Hydrothermale Carbonisierung von Landschaftspflegematerial Parameteranalyse und Methodenentwicklung in Richtung einer Prozessmodellierung. Diss. Univ. Oldenburg, 236 pp.
- Handrek K., BLACK N. (2004) *Growing Media for Ornamental Plants and Turf*. Univ. of New South Wales Press ISBN 0 86840 333 4.
- Heiskanen J. (1995) Physical properties of two-component growth media based on Sphagnum peat and their implications for plant-available water and aeration. *Plant and Soil* 172: 45-54.
- PPO Analysereeks (1999) Aangepast beperkt fysisch onderzoek potgrond. © PPO Glastuinbouw. 5 pp.
- Raviv M., Lieth J.H. (2008) *Soilless culture: Theory and practice*. Elsevier London, pp. 579. ISBN: 978-0-444-52975-6.
- Rebeling T., von Frieling P., Buchholz J., Grewe T. (2015) Hydrothermal carbonization: combination of heat of reaction measurements and theoretical estimations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119(3), 1941-1953. <http://doi.org/10.1007/s10973-014-4361-7>.
- Schelle H., Iden S.C., Peters A., Durner W. (2010) Analysis of the Agreement of Soil Hydraulic Properties Obtained from Multistep-Outflow and Evaporation Method. *Vadose Zone J.* 9. doi:10.2136/vzj2010.0050.
- Schelle H., Heise L., Jaenicke K., Durner W. (2013) Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: a comparison of laboratory methods. *European Journal of Soil Science*, December 2013, 64, 814-821. doi: 10.1111/ejss.12108, 2013.
- Schindler U., Durner W., Unold G. v., Müller L., Wieland R. (2010) The evaporation method: extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173, 4, 563-572.
- Schindler U., Müller L., da Veiga M., Zhang Y., Schlindwein S.L., Hu C. (2012) Comparison of water-retention functions obtained from the extended evaporation method and the standard methods sand/kaolin boxes and pressure plate extractor. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174, 4, 527-534.
- Schindler U., Unold G. v., Müller L. (2015a) Laboratory measurement of soil hydraulic functions in a cycle of drying and rewetting. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 5, 4, 281-286.
- Schindler U., Doerner J., Müller L. (2015b) Simplified method for quantifying the hydraulic properties of shrinking soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178, 1, 136-145.
- Schindler U., Müller L. (2017a) Hydraulic performance of horticultural substrates - 2. Development of an evaluation framework. *Horticulturae* 3, 1, Article 6.
- Schindler U., Lischeid G., MÜLLER L. (2017b) Hydraulic performance of horticultural substrates - 3. impact of substrate composition and ingredients. *Horticulturae* 3, 1, Article 7.
- Schmidt W. (1995) Einfluß der Wiedervernässung auf physikalischen Eigenschaften des Moorkörpers der Friedländer Großen Wiese. *Zeitschrift f. Kulturtechnik und Landentwicklung*. 36: 107-111.
- Schmilewski G.K. (2017) *Kultursubstrate und Blumenerden – Eigenschaften, Ausgangsstoffe, Verwendung*. Hrsg. Industrieverband Garten e.V., 254 Seiten.

Poster

Vergleich unterschiedlicher Niederschlags-Messsysteme am Gebirgsstandort Stoderzinken

Aleksandar Bijelic^{1*}, Steffen Birk¹, Veronika Slawitsch¹ und Markus Herndl²

Zusammenfassung

Um die Eignung unterschiedlicher Niederschlags-Messsysteme für einen Gebirgsstandort zu beurteilen, vergleicht diese Arbeit Daten, die an der Station Stoderzinken (Steiermark, Österreich) mittels Niederschlags-sammlern, einem laser-optischen Distrometer, einer Niederschlagswaage und einem Lysimeter gemessen wurden. Das Lysimeter wird dabei als Referenzsystem betrachtet. Der Vergleich der Messsysteme für die Sommermonate der Jahre 2014 bis 2016 zeigt, dass das Distrometer gegenüber dem Lysimeter und den anderen Messgeräten eine Tendenz zur Überschätzung des Niederschlags aufweist. Niederschlagswaage und -sammler liefern dagegen im Vergleich mit dem Referenzsystem tendenziell zu geringe Werte. Bei geringen Windgeschwindigkeiten zeigen Niederschlagswaage und Lysimeter eine sehr gute Übereinstimmung der ermittelten Niederschläge. Bei hohen Windgeschwindigkeiten neigt die Niederschlagswaage jedoch zur Unterschätzung, offenbar infolge der Deformation des Windfeldes. Für das laser-optische Distrometer konnte dagegen kein Zusammenhang der beobachteten Überschätzung mit windbedingten Einflüssen erkannt werden.

Schlagwörter: Niederschlagsmessung, Gebirge, Distrometer, Niederschlagswaage, Lysimeter

Summary

To assess the suitability of different precipitation measurement systems for a mountain site, this work compares data measured by storage gauges, a laser-optical disdrometer, a weighing precipitation gauge, and a weighable lysimeter at the station Stoderzinken (Styria, Austria). In doing so, the lysimeter is considered as reference system. The comparison of the measurement systems for the summer months of the years 2014 to 2016 shows a tendency of the disdrometer to overestimate precipitation relative to the lysimeter and the other devices. In contrast, weighing precipitation gauge and storage gauges provide values tending to be too low relative to the reference system. At low wind speed, weighing precipitation gauge and lysimeter show very good agreement of the measured precipitation. At high wind speed, however, the weighing precipitation gauge tends to underestimate, evidently due to the deformation of the wind field. For the laser-optical disdrometer, a correlation of the observed overestimation with wind effects was not apparent though.

Keywords: Precipitation measurement, Mountains, Disdrometer, Weighing precipitation gauge, Lysimeter

Einleitung

Der Wasserhaushalt im Gebirge wird wesentlich durch den Niederschlag bestimmt. Im Gebirge bedingen jedoch unter anderem die hohen Niederschlagsraten und zeitweise hohen Windgeschwindigkeiten eine hohe Anfälligkeit für Messfehler. Auch das Einrichten von Messsystemen kann sich durch die Morphologie des Berglands als schwierig erweisen. Die Niederschlagsmenge, die während eines gewissen Zeitraums fällt, kann mit unterschiedlichen Messgeräten erfasst werden. Um die Eignung unterschiedlicher Messsysteme für einen Gebirgsstandort zu beurteilen, werden in dieser Arbeit Daten verglichen, die an der Station Stoderzinken (Steiermark, Österreich) in 1830 m ü. A. mittels Niederschlagssammlern, einem laser-optischen Distrometer, einer Niederschlagswaage und einem Lysimeter gemessen wurden. Das Lysimeter wird dabei als Referenzsystem betrachtet.

Material und Methoden

Abbildung 1 zeigt die gesamte Instrumentierung der Station Stoderzinken (Bohner et al. 2007, Herndl et al. 2009) mit Kennzeichnung der in dieser Arbeit verwendeten Geräte. Die Messstation beinhaltet ein wägbares monolithisches Lysimeter mit Sickerwassersammlern und zusätzlichen Sonden für Bodenwassergehalt, Bodentemperatur und Saugspannung. Für die Niederschlagsmessung stehen darüber hinaus vier Niederschlagssammler, ein laser-optisches Distrometer (OTT Parsivel) und eine Niederschlagswaage (OTT Pluvio) zur Verfügung. An der Wetterstation werden weitere meteorologische Größen wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen, die in dieser Arbeit zwar nicht von unmittelbarem Interesse sind, aber die Interpretation der beobachteten Unterschiede verschiedener Niederschlags-Messsysteme unterstützen.

Aufgrund der hohen Schneebedeckung ist eine Trennung der Schneedecke über dem Lysimeter nicht möglich,

¹ Universität Graz, Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geozentrum, Heinrichstraße 26, A-8010 GRAZ

² Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

* Ansprechpartner: Dr. Steffen Birk, steffen.birk@uni-graz.at

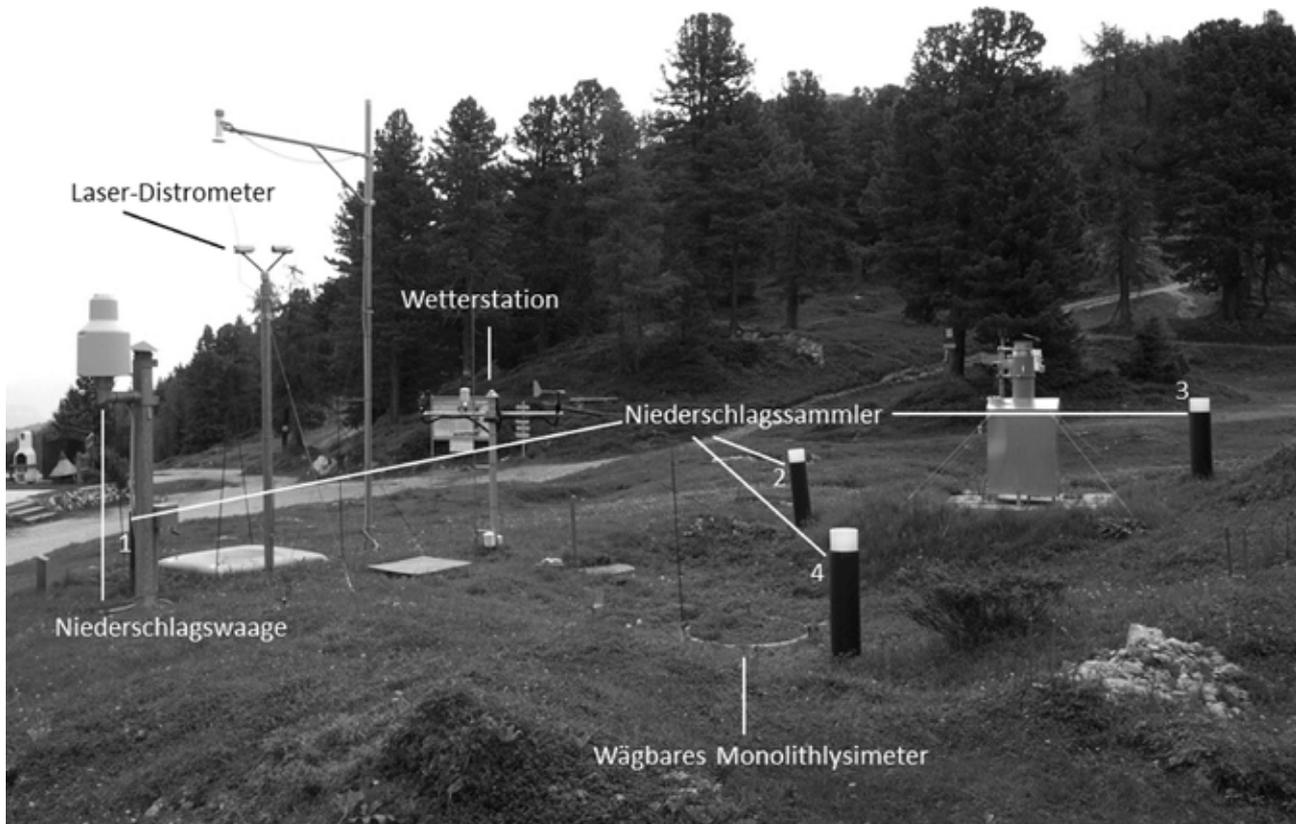


Abbildung 1: Instrumentierung der Station Stoderzinken mit Kennzeichnung der in dieser Arbeit verwendeten Geräte.

sodass keine zuverlässigen Niederschlagsdaten aus den Lysimetergewichten errechnet werden können. Aus diesem Grund wurden die Wintermonate in der Auswertung nicht berücksichtigt. Für den Vergleich der unterschiedlichen Niederschlagsmesswerte wurden daher Zeiträume aus den Sommermonaten der Jahre 2014 bis 2016 ausgewählt, in denen Daten aller Niederschlagsmessgeräte vorliegen (Bijelic 2018). Der Niederschlagsberechnung aus den Lysimeterdaten liegt die Annahme zugrunde, dass die Verdunstung während eines Niederschlagsereignisses vernachlässigbar klein ist, sodass die Niederschlagsmenge als Restglied der Wasserbilanz aus der gemessenen Sickerwassermenge und der Gewichtsänderung errechnet werden kann (Gritsch et al. 2011).

Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der Niederschlagshöhen der vier um das Lysimeter angeordneten Niederschlagssammler. Es zeigt sich, dass die Messungen an den vier Sammlern insgesamt gut übereinstimmen. Allerdings neigt Sammler 4 (siehe Abbildung 1), vermutlich aufgrund des Einflusses von Relief und Vegetation auf das Windfeld, zu etwas höheren Werten. Die Abbildung veranschaulicht, dass die Abweichungen bei einzelnen Messungen von Niederschlagssummen über Zeiträume einiger Wochen erheblich sein können. In der Jahressumme sind die Abweichungen geringer, belaufen sich aber beispielsweise im Jahr 2014 auf immerhin rund 10%.

Abbildung 3 vergleicht für ausgewählte Zeiträume den Mittelwert der aus allen vier Sammlern erhaltenen Niederschlagshöhen mit den aus den anderen Messsystemen

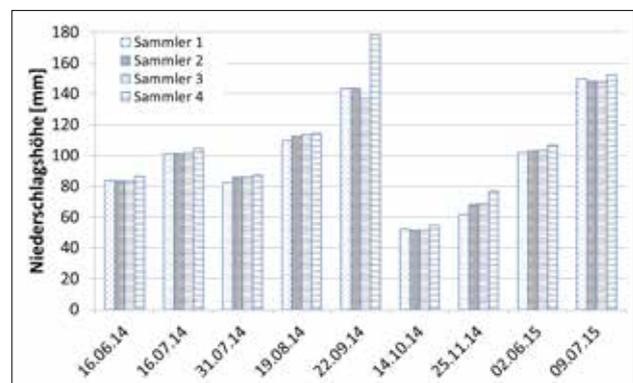


Abbildung 2: Vergleich der in den vier Sammlern (siehe Abbildung 1) ermittelten Niederschlagshöhen.

erhaltenen Werten. In den beiden gezeigten und auch in anderen Zeiträumen zeigt sich eine gute Übereinstimmung der mit den aus den Sammlern erhaltenen Niederschlagshöhen mit den Messwerten der Niederschlagswaage. Die aus den Distrometer-Messungen erhaltenen Niederschlagshöhen liegen dagegen meist wie in den in Abbildung 3 gezeigten Zeiträumen deutlich höher. Im links in Abbildung 3 gezeigten Zeitraum ergibt die Lysimetermessung ebenfalls erheblich höhere Werte als Niederschlagssammler und –waage und übertrifft sogar die Distrometerwerte. Im Allgemeinen liegen – wie rechts in Abbildung 3 veranschaulicht – die aus dem Lysimeter errechneten Niederschlagshöhen jedoch deutlich unter jenen des Distrometers und sind meist nur geringfügig höher als die mit den Sammlern und der Niederschlagswaage erhaltenen Werte.

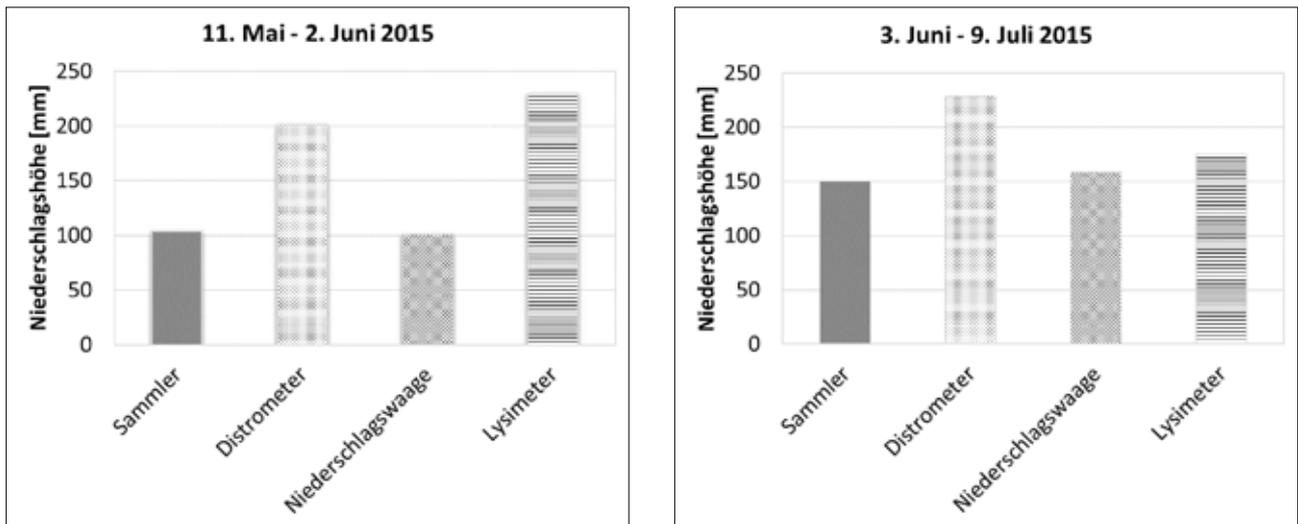


Abbildung 3: Vergleich der mit unterschiedlichen Mess-Systemen erhaltenen Niederschlagshöhen für zwei ausgewählte Zeiträume.

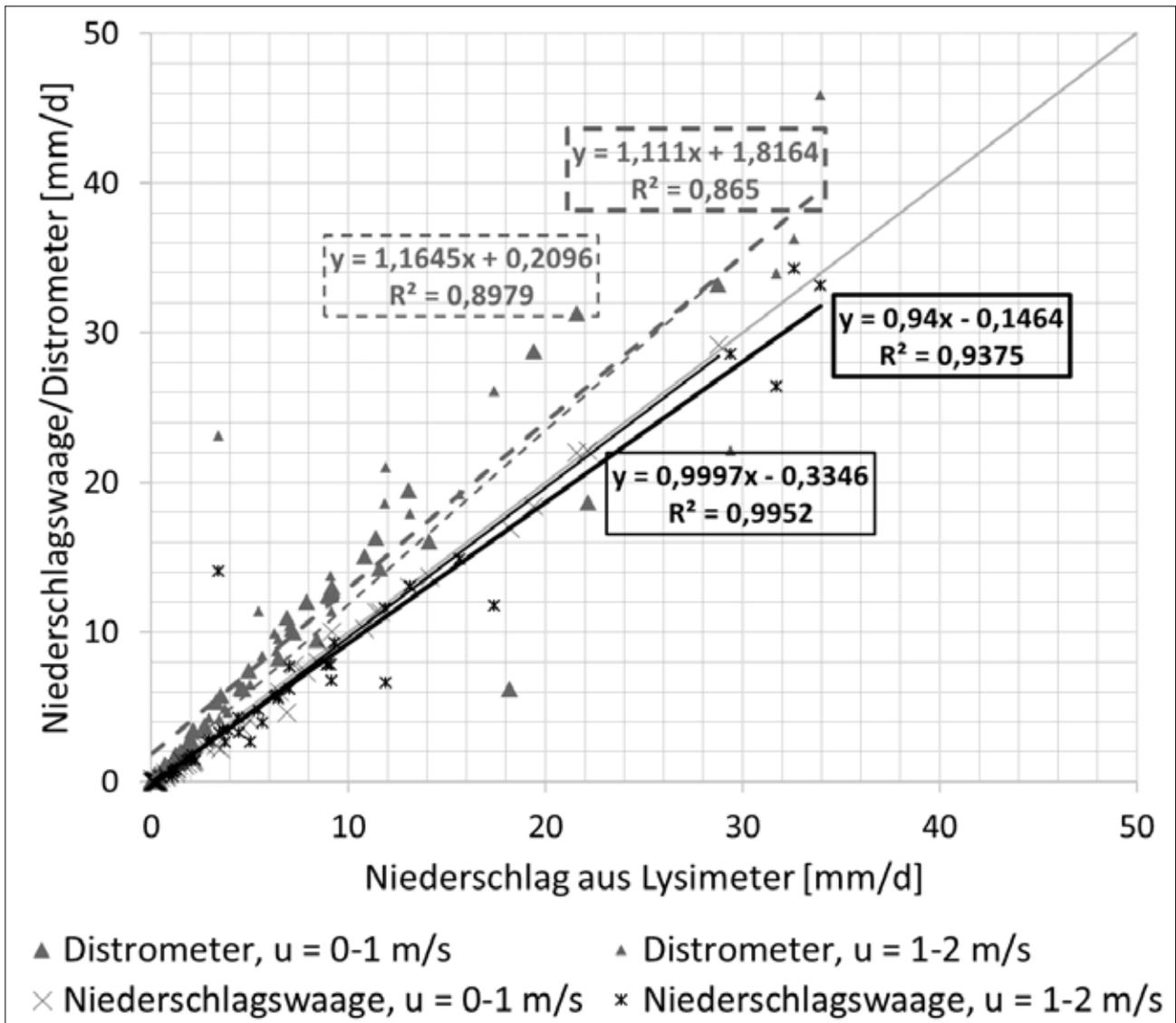


Abbildung 4: Gegenüberstellung der aus Lysimeterdaten und mit Niederschlagswaage bzw. Distrometer erhaltenen Tagesniederschläge des Sommers 2014 für geringe und hohe Windgeschwindigkeiten. Die gestrichelten Trendlinien (dünn: u = 0-1 m/s; dick: 1-2 m/s) basieren auf Distrometer-Daten, die durchgezogenen auf Daten der Niederschlagswaage.

Diskussion

Im Unterschied zu den anderen hier betrachteten Messsystemen, die in verschiedenen Höhen über der Bodenoberfläche den Niederschlag sammeln bzw. detektieren, erfasst das Lysimeter den am Boden ankommenden Niederschlag. Es ist bekannt (World Meteorological Organization 2010), dass die Deformation des Windfeldes durch Sammelgefäße, wie bei den hier betrachteten Sammlern und der Niederschlagswaage, zu einer systematischen Unterschätzung der Niederschlagsmenge führen.

Um zu prüfen, inwieweit die hier beobachteten Abweichungen der unterschiedlichen Messsysteme auf Windeffekte zurückzuführen sein könnten, werden in *Abbildung 4* Tagesniederschlagshöhen, die aus der Wasserbilanz des Lysimeters errechnet wurden, mit den Werten des Distrometers und der Niederschlagswaage bei geringen und bei hohen Windgeschwindigkeiten miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass Lysimeter und Niederschlagswaage bei geringen Windgeschwindigkeiten sehr gut übereinstimmen. Bei hohen Windgeschwindigkeiten unterschätzt dagegen die Niederschlagswaage gegenüber dem Lysimeter die Niederschlagshöhe. Im Unterschied dazu liegen die Distrometerwerte generell über den mit den Lysimeterdaten errechneten Niederschlagshöhen und zeigen auch keine klare Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit.

Schlussfolgerungen

Die gute Übereinstimmung der aus der Wasserbilanz des Lysimeters errechneten Niederschlagshöhen mit den bei niedrigen Windgeschwindigkeiten durch eine Nieder-

schlagswaage ermittelten Werten unterstützt die Annahme, dass das Lysimeter als Referenzmessung geeignet ist. Die bei der Niederschlagswaage beobachtete Neigung zur Unterschätzung der Niederschlagshöhe bei höheren Windgeschwindigkeiten lässt sich auf den bekannten Effekt der Deformation des Windfeldes durch das Sammelgefäß zurückführen. Das Distrometer neigt dagegen offenbar unabhängig von Windeffekten zur Überschätzung der Niederschlagshöhe am untersuchten Gebirgsstandort.

Literatur

- Bijelic A. (2018) Vergleich unterschiedlicher Niederschlags-Messsysteme am Gebirgsstandort Stoderzinken. Bachelor-Projektarbeit, Universität Graz, unveröffentlicht.
- 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, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, 173-175.
- Gritsch M., Winkler G., Herndl M., Birk S. (2011) Niederschlag und Verdunstung am Gebirgslsylimeter Stoderzinken. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung, Lysimeter in der Klimafolgenforschung und Wasserwirtschaft, 39-44.
- Herndl M., Bohner A., Kandolf M. (2009) Gebirgs-Lysimeterstation am Stoderzinken – Erste Ergebnisse. 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, 111-116.
- World Meteorological Organization (2010) Measurement of Precipitation. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8, 151-173.

Are solute concentrations measured in leachate tank and in by-pass collection flask of TERENO SoilCan lysimeters comparable?

Holger Rupp^{1*}, Ralf Gründling² and Hans-Jörg Vogel²

Zusammenfassung

Bei Lysimetern, die als Ackerland bzw. ungedüngtes Grünland genutzt werden und die über eine kontrollierte untere Randbedingung verfügen, wurden die Stoff-Konzentrationen in Bypass-Flaschen und in Sickerwassersammelgefäßen verglichen. Während die Bypass-Flaschen ausschließlich bei Entwässerung der Lysimetergefäße gefüllt werden, wird Wasser im Bewässerungsfall aus den Sickerwassersammelgefäßen entnommen und in die Lysimetergefäße zurück gepumpt. Die in den Bypass-Flaschen und in den Sickerwassersammelgefäßen gemessenen Konzentrationen unterschieden sich deutlich (verschiedene Elementmuster). Aufgrund von Verdünnungseffekten (Nachfüllen von Wasser) waren die in den Sickerwassersammelgefäßen gemessenen Konzentrationen tendenziell niedriger. Aussagen zum sickerwassergebundenen Stoffauftrag sollten bei Lysimetern mit kontrollierter unterer Randbedingung nur anhand der in Bypass-Flaschen gemessenen Stoff-Konzentrationen abgeleitet werden.

Summary

For lysimeters used as arable land or unimproved grassland and having a controlled lower boundary condition, the solute concentrations in by-pass and leachate tanks were compared. While the by-pass bottles are only filled with lysimeter seepage, water is taken during watering periods from the leachate collection tank and pumped back into the lysimeter vessels. The solute concentrations measured in the by-pass bottles and in the leachate collection tanks differed significantly (different element patterns). Due to dilution effects (supply of additional water), the concentrations measured in the leachate collection tanks tended to be lower. Statements on seepage-related solute discharge should only be derived from lysimeters with controlled lower boundary based on solute concentrations measured in by-pass bottles.

Keywords: Lysimeter technique, seepage sampling, solute concentration, seepage tank, by-pass flasks

Introduction

Conventional gravitation lysimeters are regarded to be a suitable tool for studying the water and solute balance of soils (Allen et al. 2011, Weihermüller et al. 2007). By seepage water sampling and the subsequent chemical analysis, solute fluxes with the leachate stream can be exactly quantified. Thereby, conventional gravitation lysimeters allow the quantification of seepage-related solute fluxes, whose knowledge is important for compliance with environmental quality objectives. Lysimeter vessels were frequently filled with soil monoliths. These monoliths were often taken away from their originating sites. At conventional gravitation lysimeters seepage occurs when the soil at lower boundary is saturated (seepage-face boundary condition). Upwards directed fluxes were not adequately considered by these lysimeters. Disconnecting the capillary connection with deeper soil affects the drainage and prevents capillary rise and may lead to a bias in the drainage and in the solute transport processes so that lysimeter observations are not directly transferable to field scale conditions (Groh et al. 2016). A controlled lower boundary was developed which overcomes the disadvantages of conventional lysimeters (Fank and Unold 2007), so that the water balance and moisture profiles in the lysimeter correspond closely to those that would prevail in the undisturbed soil profile. The controlled

lower boundary was operated by drainage or injection of seepage at the bottom of the lysimeter vessel by a system consisting of bi-directional pumps, tubes and a suction rake.

The concentration of typical ions and compounds analyzed in leachate tank and in the by-pass collection flasks was statistically compared to estimate possible impacts from lower boundary control on solute concentrations.

Material and methods

As part of the TERENO SoilCan lysimeter network, lysimeter stations were built in 2010 at the Sauerbach site (SB) and at the Schäfertal site (ST), both in the Bode catchment, Germany. Each lysimeter station consists of six monolithically filled lysimeter vessels. Both lysimeter stations differ in land management, arable land (SB) versus unimproved grassland (ST). All lysimeters have a controlled lower boundary in which the matrix potential is controlled by using bi-directional pumps according to the comparison of matrix potential (actual value) measured in the lysimeter and the matrix potentials (target value) determined outside by 3 field tensiometers. If the soil moisture content inside the lysimeter vessel is increased compared to the field site, the lysimeter have to be drained. In that case, water is pumped out of the lysimeter vessel via the suction rake installed at

¹ UFZ, Dep. Bodensystemforschung, Falkenberg 55, D-39615 ALTMÄRKISCHE WISCHE

² UFZ, Dep. Bodensystemforschung, Theodor-Lieser-Straße 4, D-06120 HALLE

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

Table 1. Differences between solute concentrations in by-pass flasks and leachate tank of the sites Sauerbach (SB) and Schäftertal (ST) (+ significant difference, - no significant differences, probability value < 0.05).

Lys.- site	Analysis criteria												
	NO ₃	NH ₄	NO ₂	K	Na	Ca	Mg	EC	pH	SO ₄	Cl	TP	DOC
SB_1	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-
SB_2	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-
SB_3	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
SB_4	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-
SB_5	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-
SB_6	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-
ST_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
ST_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
ST_3	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+
ST_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
ST_5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
ST_6	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+

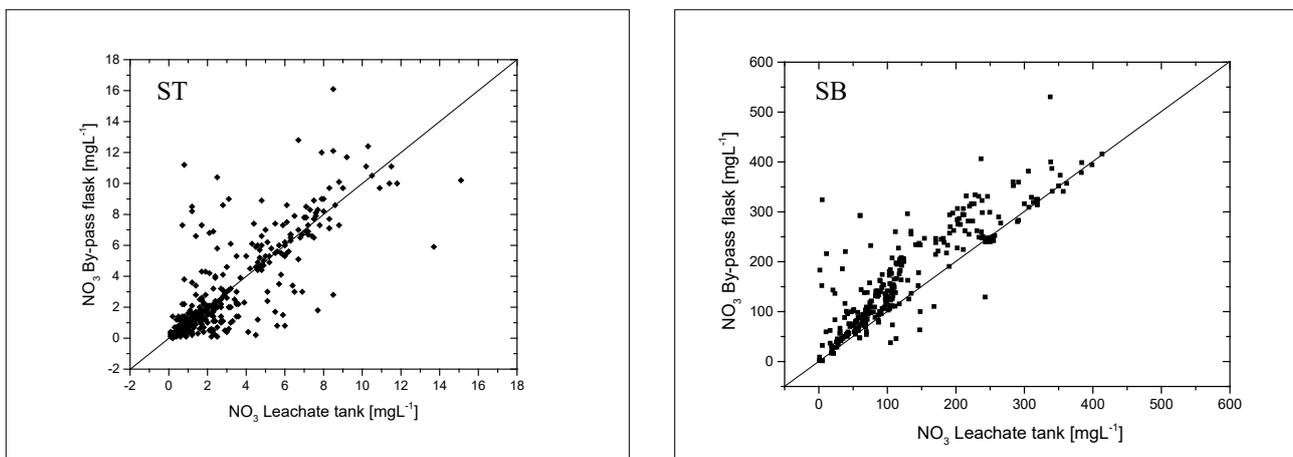


Figure 1. Scatter plot of nitrate concentrations analyzed in leachate tanks and by-pass flasks of site ST and SB.

the bottom of the lysimeter vessel into the leachate tank. Simultaneously, a defined sub-sample is taken from the leachate stream via a by-pass pump and collected in a separate collecting flask. In the watering case (soil moisture content at the field site is increased compared to the conditions inside the lysimeter vessel) already collected seepage water is taken from the leachate tank and pumped back into the lysimeter. In the climatic conditions of North-East Germany with an average annual precipitation of about 650 mm the climatic water balance is stressed. Seepage formation disappeared in late summer and the water demand by plant roots and evapotranspiration is satisfied by capillary rise from deeper soil horizons. In these critical phases the water volume available in the leachate tank was sometimes completely used up for sub-surface irrigation at the lower boundary condition, so that additional water has to be added here (accumulated lysimeter leachates or drinking water). This procedure resulted in a substantial mixture of water used for the watering of the lower boundary condition of the lysimeter vessel.

If present, water samples were collected every 2 weeks. They were transported to the UFZ lysimeter facility in Falkenberg, Saxony-Anhalt, Germany and analyzed in the lab for nitrate (NO₃), ammonium (NH₄), nitrite (NO₂), sulfate (SO₄), potassium (K), calcium (Ca), sodium (Na), chloride (Cl), total phosphorus (TP), dissolved organic carbon (DOC), electrical conductivity (EC) and pH.

Descriptive statistical methods with linear regression function were applied for data assessment and performed using the software package ORIGIN (OriginLab Corporation, Northampton, USA). Since measured values were not normally distributed, the Kruskal–Wallis test (One-way ANOVA on ranks) as a non-parametric method was used for testing whether lysimeter data originate from the same distribution. A cluster analysis was applied to discover similarity structures within the whole data set of site SB.

Results and discussion

The agriculturally managed and fertilized lysimeters at SB showed numerous statistical significant differences in solute concentration between leachate tank and by-pass flasks (Table 1). At the ST site, only DOC showed in contrast to SB site almost exclusively significant differences in solute concentrations in leachate tank and by-pass flasks.

The different pattern of solute concentration in by-pass flasks and leachate tank was caused by the different agricultural management of both sites. The concentration pattern in by-pass flasks of site SB was predominately influenced by ions added with mineral fertilization. These effects were not observed by means of the concentrations patterns at the unimproved grassland site ST.

Solute concentrations in leachate tank tended to be decreased compared to by-pass flasks (Figure 1) at the SB site due

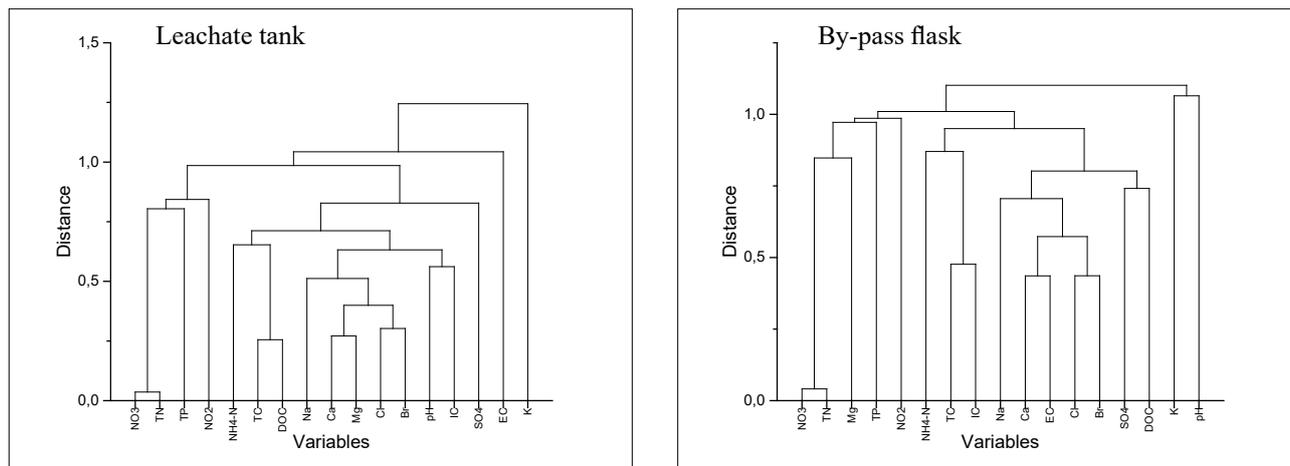


Figure 2. Cluster analyses (dendrogram) of solute concentration in leachate tank and by-pass flasks of site SB.

to a dilution effect (feeding of potable water for watering at the lower boundary). Contrary, this effect couldn't be observed at site ST. The measured nitrate concentrations were very low in leachate tank and by-pass flask at this site. The DOC concentrations in the by-pass flasks were significantly higher than the values measured in the leachate tanks.

The site SB was chosen for an advanced statistical data analysis due to the fact, that significant differences between solute concentrations in leachate tanks and by-pass flasks were predominately proven for this site. As result of the statistical analysis (cluster analysis) different patterns of solute concentration in leachate tanks and by-pass flasks became apparent (Figure 2). Solute concentrations in by-pass flasks were obviously dominated by leaching processes. By adding tap water and or stored seepage, solute concentrations in leachate tanks are more influenced by dilution effects.

Conclusions

The study showed a clear influence of the agricultural land management on measured solute concentrations in the by-pass flask. Bi-directional pumping and adding of supplementary water resulted in dilution effects in leachate

tanks. Due to different solute concentration patterns both sampling locations differ significantly. Statements about solute leaching with seepage fluxes can only be deduced from the leachate collected in by-pass flasks. Hence, water from leachate tank should not be analyzed, given that the effect of adding potable water cannot be quantified reliably.

Literature

- Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. (2011) Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural water management* 98 (6):899-920.
- Fank J., Unold G. (2007) High-precision weighable field Lysimeter - A tool to measure water and solute balance parameters. *Int. Water Irrig.* 27:28-32.
- Groh J., Vanderborght J., Pütz T., Vereecken H. (2016) How to control the lysimeter bottom boundary to investigate the effect of climate change on soil processes? *Vadose Zone Journal*.
- Weihermueller L., Siemens J., Deurer M., Knoblauch S., Rupp H., Goettlein A., Puetz T. (2007) In Situ Soil Water Extraction: A Review. *Journal of Environmental Quality* 36:1735-1748.

Änderung des Bodenwasseranteils in einem Lysimeter: Ein Vergleich von Wiege- und Sensordaten

Reinhard Nolz^{1*} und Peter Cepuder¹

Zusammenfassung

Die beiden wägbaren Lysimeter in Groß-Enzersdorf dienen zur Messung von Wasserbilanzgrößen. Die mittels Wiegesystem erfasste Messgröße repräsentiert die Änderung des Wasseranteils im Bodenprofil, woraus etwa die Verdunstung abgeleitet werden kann. Die Änderung des Wasseranteils im Bodenprofil wird zusätzlich durch eine Rohrsonde mit mehreren kapazitiven Einzelsensoren erfasst. In dieser Studie werden die Änderungen des Bodenwasseranteils aus Wiege- und Sensordaten gegenübergestellt und interpretiert.

Schlagwörter: Profilwasser, kapazitive Rohrsonde, Bodenwasserdynamik

Summary

The weighing lysimeters in Groß-Enzersdorf are operated to measure soil water balance components. To determine evapotranspiration, for instance, changes of soil water content within the lysimeter are registered by means of a weighing system. Furthermore, soil water content is measured using a multi-sensor capacitance probe. In this study, soil water content data of both methods are compared and interpreted.

Keywords: profile water, capacitance probe, soil water dynamic

Einleitung

Die beiden wägbaren Lysimeter in Groß-Enzersdorf, mit einem Durchmesser von 1,9 m und einer Tiefe von 2,5 m, werden vorwiegend zur Ermittlung der Referenzverdunstung sowie der Verdunstung ausgewählter Kulturpflanzen betrieben. Die mittels Wiegesystem erfasste Messgröße repräsentiert die Änderung des Wasseranteils im Bodenprofil. Unter Berücksichtigung der ebenfalls gemessenen Sickerwassermenge werden aus den Wiegedaten sowohl Verdunstung (Gewichtsabnahme) als auch Niederschlag (Gewichtszunahme) ermittelt. Die Änderung des Wasseranteils im Bodenprofil wird zusätzlich durch eine Rohrsonde mit mehreren kapazitiven Einzelsensoren bis in eine Tiefe von 1,6 m erfasst. Solche Rohrsonden sind für den Feldeinsatz konzipiert und können somit relativ leicht an verschiedenen Standorten installiert werden. Allerdings können die Sensoren erhebliche Messungenauigkeiten aufweisen, welche auf unterschiedlichsten Ursachen inklusive einer unzureichenden Kalibrierung beruhen können. In Sensortest-Studien werden üblicherweise Sensorwerte gewissen Referenzwerten gegenübergestellt, um die Messgenauigkeit zu evaluieren. Beim praxisnahen Einsatz solcher Rohrsonden stellt sich aber vielmehr die Frage, inwieweit Änderungen des Profilwasseranteils – etwa infolge der Wasseraufnahme durch Pflanzen – abgebildet werden, und welche Ungenauigkeiten sich dabei ergeben.

Im Folgenden werden Wiege- und Sensordaten gegenübergestellt. Ziele waren (i) den Verlauf des mittels Sensoren gemessenen Wasseranteils zu evaluieren (wobei die Wiegedaten als genauer und damit als Referenzgröße betrachtet wurden) und (ii) zu beurteilen, ob sich die Sensordaten zum Auffüllen allfälliger Datenlücken in den Wiegedaten eignen.

Material und Methoden

Das für die Untersuchung verwendete Lysimeter befindet sich an der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien in Groß-Enzersdorf, Österreich (48°12'N, 16°34'E; 157 m). Es besteht aus einem zylindrischen Glasfaserbehälter mit einem Durchmesser von 1,9 m (Oberfläche = 2,85 m²) und einem gewölbten Boden mit einer maximalen Tiefe von 2,5 m (Nolz et al. 2011, 2014). Das Lysimeter ist permanent mit Gras bewachsen und wird regelmäßig bewässert. Der Bodenaufbau ist sandiger Lehm (0-140 cm) über Schotter (140-250 cm). Die bodenhydraulischen Eigenschaften können durch den Wasseranteil bei 0.3 bar (repräsentativ für Feldkapazität) und 15 bar (repräsentativ für Welkepunkt) beschrieben werden. Bezogen auf das gesamte Bodenprofil ergeben sich dafür Werte von 450 mm und 200 mm, wobei die Speicherung in der Schotterschicht mit etwa 10 mm sehr gering ist. Die EnviroSCAN® Sonde (Sentek Pty., Ltd., Australien) zur Messung des Bodenwasseranteils besteht aus mehreren Einzelsensoren auf einer Trägerschiene. Insgesamt befinden sich 16 Sensoren mit einem Abstand von 10 cm zueinander auf der Schiene. Die Sonde befindet sich in einem vertikal abgeteufte Kunststoffrohr und misst somit den Wasseranteil im umgebenden Boden bis in eine Tiefe von 160 cm. Der darunterliegende Schotterbereich wird von den Sensoren nicht miterfasst.

Die Datenbasis besteht aus Wiegedaten des Referenz-Lysimeters sowie Sensordaten aus dem Zeitraum Juni 2004 bis Dezember 2011. Eine detaillierte Beschreibung der Ermittlung der Wiegedaten findet sich bei Nolz et al. (2011, 2013, 2014). Die Wasseranteilssensoren arbeiten nach dem Prinzip eines Kondensators, wobei die umgebende Bodenmatrix ein dielektrisches Medium bildet und sich

¹ Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Muthgasse 18, A-1190 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Reinhard Nolz, reinhard.nolz@boku.ac.at

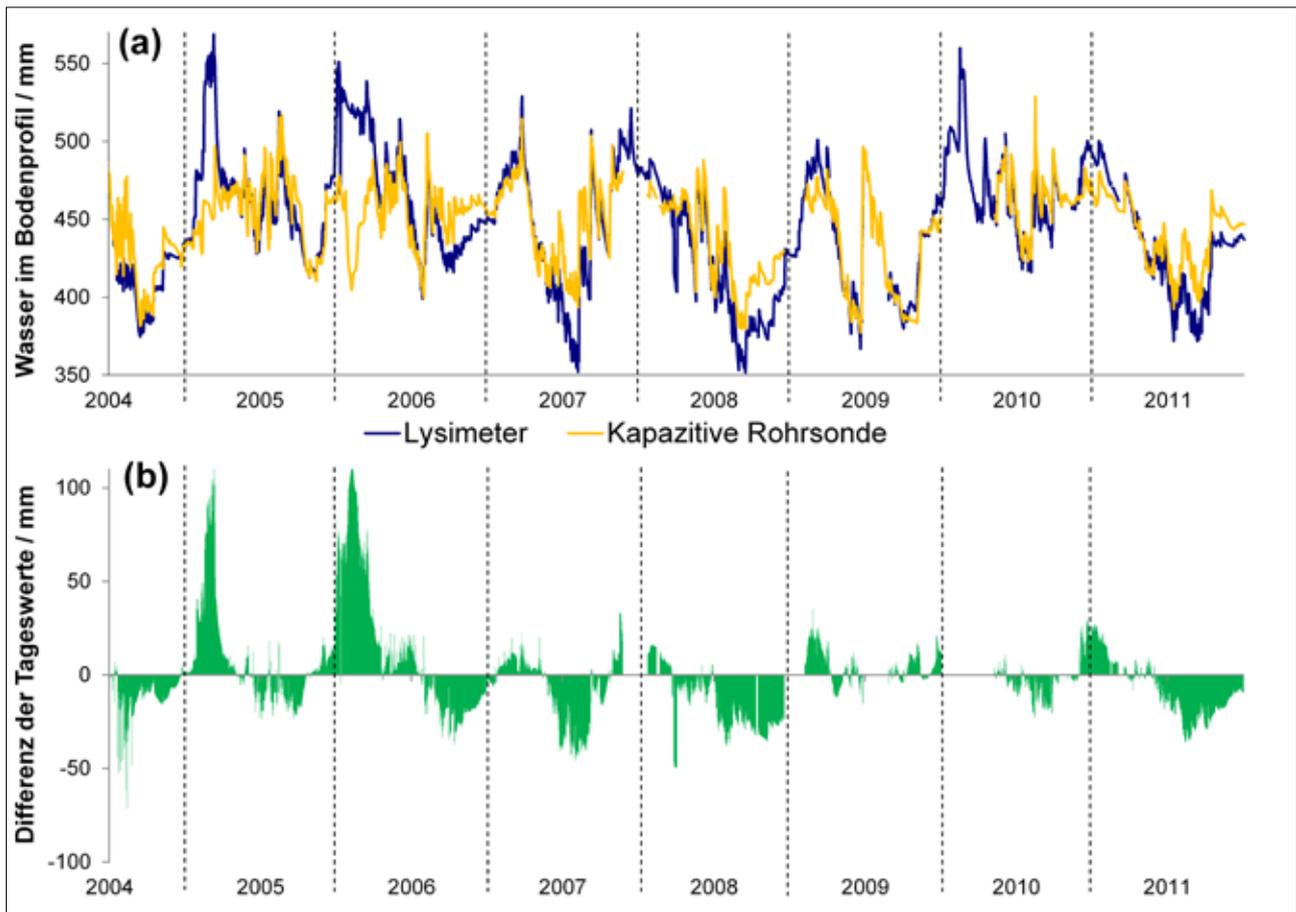


Abbildung 1 (a): Verläufe des Profilwasseranteils aus den Wiegedaten (Lysimeter) und der EnviroSCAN Rohrsonde, (b) Differenzen (Lysimeter minus Rohrsonde) der Tageswerte.

das Messsignal in Abhängigkeit vom Bodenwasseranteil ändert (Paltineanu & Starr 1997). Die gemessene Frequenz wird über eine Kalibrierfunktion mit der physikalischen Größe Bodenwasseranteil in Beziehung gesetzt, wobei den vorliegenden Messungen eine Standardkalibrierfunktion für Lehm zugrunde liegt (Sentek 2001). Die Messwerte der Einzelsensoren (Wasseranteil in Prozent) werden auf den vertikalen Messbereich des Sensors bezogen und dementsprechend in mm pro 10 cm (vertikaler Abstand der Sensoren) angegeben. Die Aufsummierung der Messwerte aller Sensoren ergibt somit den Profilwasseranteil in mm (von 0 bis 160 cm Tiefe).

Beide Datenreihen liegen mit einer zeitlichen Auflösung von 10 bis 15 Minuten vor, es wurden jedoch nur die 7-Uhr-Messwerte berücksichtigt, um so auf Tageswerte zu kommen. Das Wiegesystem erfasst sehr präzise die Masseänderungen des Lysimeters, die Gesamtmasse – und somit der absolute Wasseranteil im Bodenprofil – ist jedoch nicht bekannt (Nolz et al. 2014). Deshalb wurden die Wiegedaten um einen bestimmten Wert verschoben, und so an die Sensordaten angepasst. Von letzteren kann angenommen werden, dass sie den absoluten Wasseranteil besser repräsentieren.

Ergebnisse und Diskussion

Die Verläufe des Profilwasseranteils aus den Wiegedaten (Lysimeter) und der Rohrsonde sind grundsätzlich ähnlich (Abbildung 1a). Absolut betrachtet bewegt sich der Wasser-

anteil stets nahe Feldkapazität (450 mm), was durch die regelmäßige Bewässerung erklärt werden kann. Auffallend sind jedoch die deutlichen Abweichungen in den ersten Monaten der Jahre 2005 und 2006 (Winter). Besonders bei Betrachtung der Differenzen (Abbildung 1b) wird augenscheinlich, dass in diesen Fällen die Wiegedaten deutlich über den Werten der Rohrsonde liegen. Die Gründe sind zum einen Schnee – welcher auf dem Lysimeter liegen bleibt und dadurch das Gewicht erhöht, nicht aber den Wasseranteil im Boden – und zum anderen gefrorenes Bodenwasser – welches von den Sensoren nicht mehr als Wasser detektiert werden kann. Im Gegensatz zu diesen plausibel erklärbar Unterschieden wiesen die Messdaten der Sensoren im Vergleich zu den Wiegedaten in der zweiten Jahreshälfte tendenziell einen höheren Wasseranteil aus (Abbildung 1). Es sei angemerkt, dass die absoluten Differenzen aufgrund der Anpassung der Wiegedaten-Kurve an die Sensor-Kurve nicht überinterpretiert werden dürfen, wohl aber grundsätzliche Tendenzen.

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der Jahre 2006 und 2008. Ausgangspunkt für die höheren Sondenmesswerte waren in den meisten Fällen Bewässerungsereignisse. Offensichtlich führte eine ungleichmäßige Verteilung an der Oberfläche zu höheren Wasseranteilen im Messbereich der Sonde. Eventuell haben auch präferenzielle Flüsse entlang des Sondenrohres dazu geführt. In keinem Fall scheint es zu ausreichendem lateralen Abtransport des Wassers und damit einer gleichmäßigen horizontalen Verteilung im Lysimeterkörper gekommen

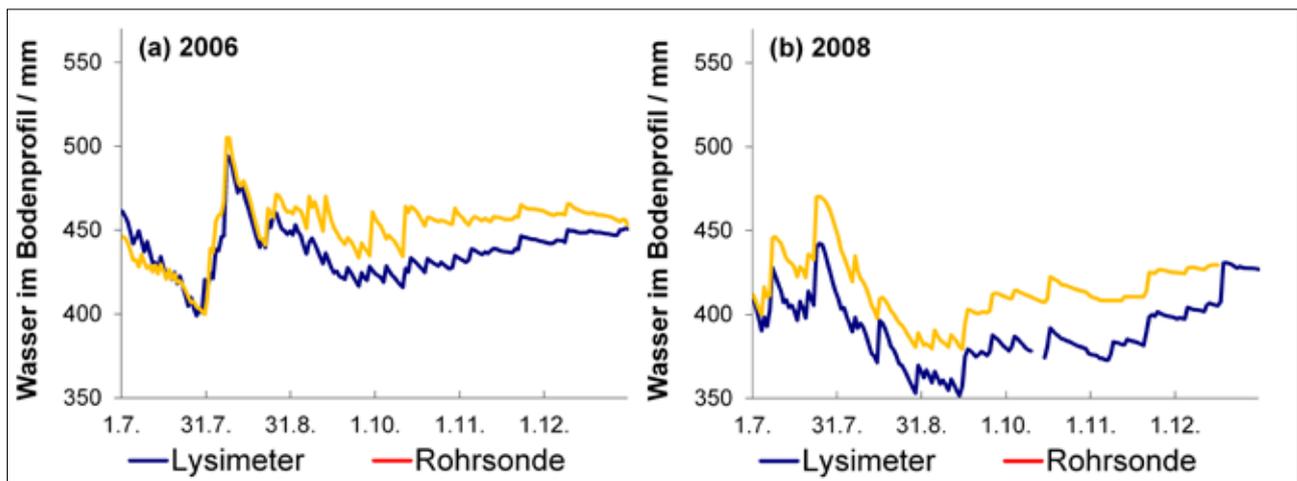


Abbildung 2: Verläufe des Profilwasseranteils aus den Wiegedaten (Lysimeter) und der EnviroSCAN Rohrsonde für die jeweils zweite Jahreshälfte der Jahre (a) 2006 und (b) 2008.

zu sein. Um diese Schlussfolgerung zu verifizieren sind Simulationen der Bodenwasserdynamik geplant.

Schlussfolgerungen

Generell wurde der Verlauf des Wasseranteils im Bodenprofil durch die Sensormessungen zumindest während der Vegetationsperiode gut abgebildet. Die Abweichungen aufgrund der inhomogenen Wasserverteilung nach Bewässerungsereignissen lassen jedoch nicht zu, dass die Sensordaten zum Auffüllen von Datenlücken – etwa bei einem Ausfall des Wiegesystems – verwendet werden.

Danksagung

Für die Betreuung der Lysimeteranlage danken wir unseren Kollegen vom IHLW sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der BOKU Versuchswirtschaft in Groß-Enzersdorf.

Literatur

- Nolz R., Kammerer G., Cepuder P. (2011) Datenmanagement der wägbaren Lysimeter in Groß-Enzersdorf. In: LFZ Raumberg-Gumpenstein (ed.): Proc. 14th Lysimeter Conf., Gumpenstein, Austria, May 3-4, 2011, 33-38.
- Nolz R., Kammerer G., Cepuder P. (2013) Improving interpretation of lysimeter weighing data. *J Land Man Food Env* 64(1-2):27-35.
- Nolz R., Cepuder P., Kammerer G. (2014) Determining soil water-balance components using an irrigated grass lysimeter in NE Austria. *J Plant Nutr Soil Sci* 177(2):237-244. doi: 10.1002/jpln.201300335.
- Paltineanu IC., Starr JL (1997) Real-time soil water dynamics using multisensorcapacitance probes: laboratory calibration. *Soil Sci Soc Am J* 61:1576-1585.
- Sentek (2001) Calibration of Sentek Pty Ltd Soil Moisture Sensors. Manual, 60 pp.

Wird unter Winterweizen oder Wintergerste mehr Nitrat ausgewaschen?

Ernst Spiess^{1*}, Clay Humphrys¹ und Volker Prasuhn¹

Zusammenfassung

In einem zweijährigen Lysimeterversuch in Zürich-Reckenholz wurde untersucht, welche Auswirkungen die frühere Pflanzenentwicklung von Wintergerste gegenüber von Winterweizen auf die Nitratauswaschung hat. Der Biomassertrag und der Stickstoffentzug fielen bei Weizen höher aus als bei Gerste. Die Getreideart hatte im Anbaujahr keinen Einfluss auf die Sickerwassermenge. Unter der nachfolgenden Zwischenfrucht wurde jedoch im Verfahren „Wintergerste“ mehr Sickerwasser gebildet. Die Nitratkonzentration und auch die ausgewaschene Stickstofffracht waren im ersten Versuchsjahr unter Weizen bedeutend höher als unter Gerste; im zweiten Jahr traten nur geringe Unterschiede auf.

Schlagwörter: Getreide, Lysimeter, Nitratauswaschung, Sickerwasser

Summary

In a two-year lysimeter experiment at Zurich-Reckenholz, the impact of the earlier plant development of winter barley than winter wheat on nitrate leaching was assessed. Wheat outyielded barley in biomass yield and nitrogen removal. Crop type had no effect on seepage volume in the cropping year. But under the succeeding cover crop, seepage volume was higher in the treatment „winter barley“ than „winter wheat“. In the first experimental year, nitrate concentration and the amount of nitrogen leached were substantially higher under wheat compared to barley; there was only little difference in the second year.

Keywords: cereals, lysimeter, nitrate leaching, seepage volume

Einleitung

Im Winterhalbjahr ist die Nitratauswaschung in der Regel viel höher als im Sommer, weil das Pflanzenwachstum und damit die Evapotranspiration gering sind und deshalb mehr Sickerwasser gebildet wird. Winterweizen und Wintergerste sind in der Schweiz neben den Klee graswiesen die wichtigsten überwinternden Ackerkulturen. Winterweizen wird meistens im Oktober gesät und geht mit einer geringen Bodenbedeckung in den Winter. Wintergerste wird häufig in der zweiten Septemberhälfte gesät und bestockt noch vor dem Winter. Durch das stärkere Wachstum nehmen die Pflanzen im Herbst etwas mehr Stickstoff (N) aus dem Boden auf. Durch den früheren Saattermin wird aber auch die Bodenbearbeitung bei höheren Temperaturen durchgeführt, so dass mehr organischer Stickstoff mineralisiert werden kann. Unter welcher Getreideart wird nun mehr Nitrat ausgewaschen? Da die Kultur bei der Abschätzung der diffusen N-Einträge in die Gewässer von Einzugsgebieten mittels Stoffflussmodellen wie MODIFFUS von großer Bedeutung ist (Prasuhn & Spiess 2003, Hürdler et al. 2015), haben wir die beiden Kulturen in einem Lysimeterversuch miteinander verglichen.

Material und Methoden

Lysimeter

Der Versuch wurde während zwei Jahren auf zwölf monolithischen Lysimetern der neuen Anlage in Zürich-Reckenholz (47°25'41"N, 8°31'05"E; 444 m ü.M.) durchgeführt (Prasuhn et al., 2009). Die Gefäße weisen eine Oberfläche

von 1 m² und eine nutzbare Tiefe von 1,35 m auf (sowie eine zusätzliche Quarzsandschicht von 0,15 m über dem Auslass, die als Sickerhilfe dient). Sie befinden sich auf dem Anlagenteil mit den nicht wägbaren Lysimetern. Die Sickerwassermenge wird mit 100 ml-Kippwaagen erfasst, wobei der exakte Zeitpunkt jeder Kippung von einem Datenlogger aufgezeichnet wird. Bei jeder Kippung fließen zudem etwa 1-2 ml Wasser in eine Probenflasche, was eine abflussproportionale Entnahme einer kleinen Probe erlaubt. Die Wasserproben werden 14-täglich entnommen und mittels segmentierter Fließinjektionsanalyse (s-FIA) kolorimetrisch auf Nitrat (NO₃) und Ammonium untersucht.

Boden und Kulturmassnahmen

Die Monolithen wurden im Sommer 2008 auf einem Acker in Grafenried bei Bern gefräst. Der Boden ist eine Braunerde mit 16% Ton, 32% Schluff und 52% Sand sowie einem Gehalt an organischem Kohlenstoff von 1,0% und an Gesamtstickstoff von 0,11% (0-20 cm Bodentiefe). Da die Lysimeter zwischen 2009 und 2012 in verschiedenen Versuchen verwendet worden waren, wurde am 19. Oktober 2012 Winterroggen als Ausgleichskultur gesät, welcher am 22. Juli 2013 geerntet wurde. Auf sechs Lysimetern wurde am 26. September 2013 die Stoppelbrache umgebrochen und danach Wintergerste gesät. Auf den sechs anderen Lysimetern erfolgte die Bodenbearbeitung und die Saat von Winterweizen am 22. Oktober 2013. Der Boden wurde beim Umbruch jeweils 20 cm tief bearbeitet. Die Grunddüngung mit Superphosphat und Patentkali wurde direkt vor der Saat durchgeführt. Bei beiden Getreidearten erfolgte die N-Düngung mit Ammoniumnitrat im Frühjahr in drei Gaben (110

¹ Agroscope, Fachgruppe Gewässerschutz und Stoffflüsse, Reckenholzstraße 191, CH-8046 ZÜRICH

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

Tabelle 1: Ertrag und N-Entzug der Verfahren „Wintergerste“ und „Winterweizen“.

	Wintergerste	Winterweizen
Jahr 2014:		
Körnerertrag (dt/ha)	94	80
Strohertrag (dt/ha)	72	101
Biomasseertrag (dt TS/ha)	144	158
N-Entzug (kg N/ha)	162	189
Jahr 2015:		
Biomasseertrag der Zwischenkultur (dt TS/ha)	21	21
Körnerertrag der Sonnenblumen (dt/ha)	32	31
N-Entzug (kg N/ha)	127	119

kg N ha⁻¹ zu Gerste und 140 kg N ha⁻¹ zu Weizen). Die Gerste wurde am 23. Juni 2014 und der Weizen drei Wochen später am 15. Juli 2014 geerntet. Am 14. August 2014 wurden auf allen Lysimetern Chinakohlrüben (*Brassica chinensis* x *Brassica rapa*), eine winterharte Kreuzung von Chinakohl und Winterrüben, gesät. Diese Zwischenfrucht wurde nicht gedüngt und am 8. April 2015 geschnitten, wobei das Erntegut abgeführt wurde (Verwendung als Viehfutter

möglich). Nach dem Umbruch der Zwischenfrucht erfolgte am 22. April 2015 die Saat von Sonnenblumen.

Erhebungsperiode

Für den Versuch wurde die Periode von Juli 2013 bis Juni 2015 ausgewertet. Dieser Zeitabschnitt wurde gewählt, weil das Sickerwasser vorwiegend im Winterhalbjahr gebildet wird, während Mitte Jahr meistens nur wenig oder sogar kein Sickerwasser anfällt. Bei der Auswertung von gesamten Kalenderjahren wären somit Versuchsbeginn und -ende in der Mitte von Sickerwasserperioden gelegen. Bei gleich hoher gesamter Niederschlagsmenge wäre dann je nach zeitlicher Verteilung der Niederschläge im Winter mehr oder weniger Sickerwasser in der betrachteten Periode angefallen.

Klima

Die Klimadaten stammten von der 20 m entfernten Station von MeteoSchweiz. Im ersten Versuchsjahr (2013/14) lagen die Niederschläge mit 948 mm Jahr⁻¹ unter dem langjährigen Mittel (1981-2010) von 1054 mm Jahr⁻¹, im zweiten Jahr (2014/15) lagen sie mit 1131 mm Jahr⁻¹ darüber. Die Tem-

Tabelle 2: Sickerwassermenge und Nitratauswaschung der Verfahren „Wintergerste“ und „Winterweizen“.

Periode	Niederschlag (mm)	Sickerwassermenge (mm)		Nitratkonzentration (mg NO ₃ L ⁻¹)		Ausgewaschene N Menge (kg N ha ⁻¹)	
		Gerste	Weizen	Gerste	Weizen	Gerste	Weizen
2013/14	948	324	326	44	66	32	48
2014/15	1'131	521	446	18	18	21	18
Mittel	1'039	422	386	28	38	26	33

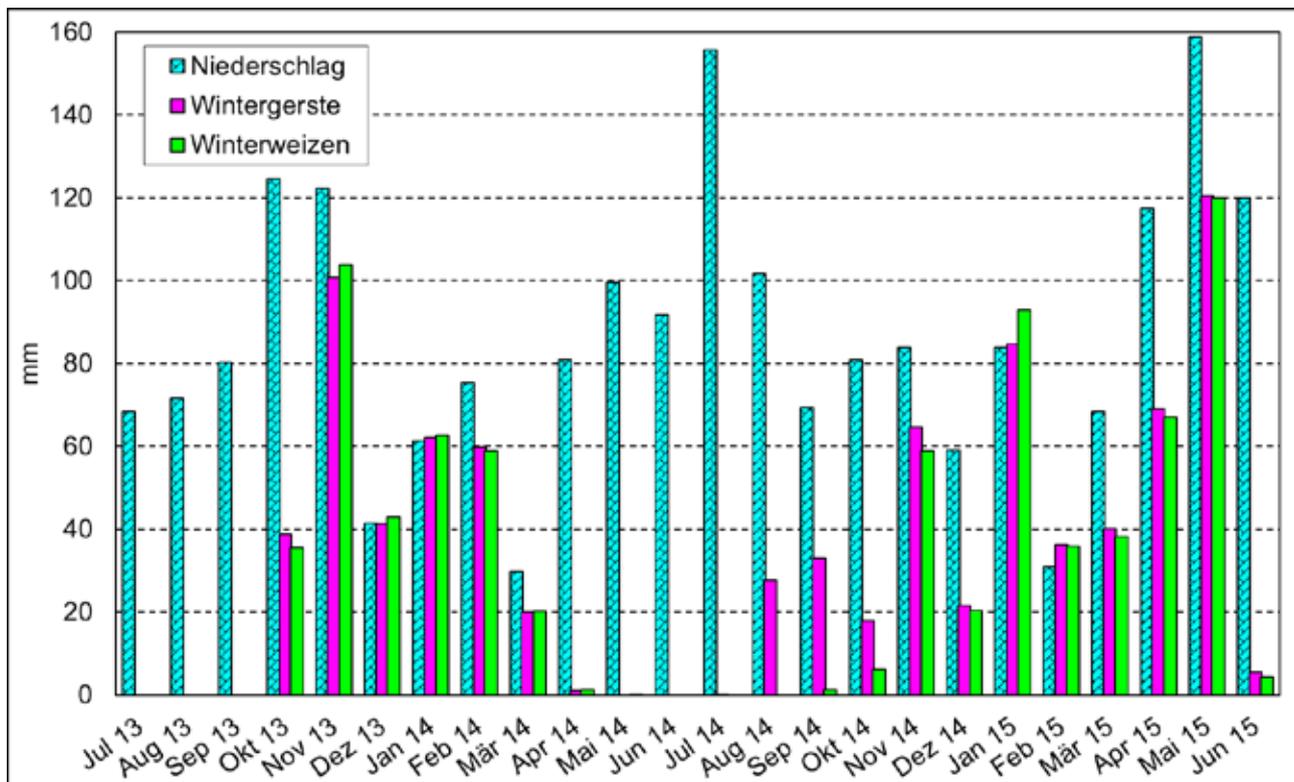


Abbildung 1: Niederschlag sowie Sickerwassermengen in den Verfahren „Wintergerste“ und „Winterweizen“ während der Versuchsperiode.



Abbildung 2: Wintergerste (links) und Winterweizen (rechts) am 18. Dezember 2013.



Abbildung 3: Wintergerste (links) und Winterweizen (rechts) am 15. April 2014.

peratur überstieg mit 10,6 bzw. 10,2°C in beiden Jahren das langjährige Mittel von 9,4°C deutlich.

Ergebnisse

Ertrag und Stickstoffentzug der Kulturen

Mit Wintergerste wurde zwar ein höherer Körnerertrag erzielt als mit Winterweizen, der Strohertrag fiel aber bedeutend geringer aus (Tabelle 1). Als Folge davon waren sowohl der Ertrag als auch der N-Entzug der oberirdischen Biomasse bei Weizen höher als bei Gerste. Bei der folgenden Zwischenkultur Chinakohlrüben und der Nachkultur Sonnenblumen traten keine Verfahrensunterschiede auf.

Sickerwassermenge

Während der zweijährigen Versuchsperiode betrug die Sickerwassermenge im Durchschnitt rund 400 mm Jahr⁻¹, was fast 40% der Niederschlagsmenge ausmacht (Tabelle 2). In der Periode 2013/14 waren die Sickerwassermengen in beiden Verfahren gleich hoch (Abbildung 1), obwohl Winterweizen vier Wochen später als Wintergerste gesät worden war. Über den Winter bedeckte die Gerste zwar den Boden besser als der Weizen (Abbildung 2), dies wirkte sich aber nicht in größerem Masse auf die Evapotranspiration aus. In einzelnen Wintermo-

naten fiel gleich viel Sickerwasser wie Niederschlag an, weil der Boden dauernd wassergesättigt war. In den Sommermonaten hingegen wurde infolge der hohen Evapotranspiration kein oder nur wenig Sickerwasser gebildet.

In der Periode 2014/15 war die Sickerwassermenge im Verfahren „Wintergerste“ 75 mm höher als im Verfahren „Winterweizen“, was ausschliesslich auf Unterschiede zwischen August und Mitte November 2014 zurückgeführt werden kann (Abbildung 1). Winterweizen machte gegenüber Wintergerste eine spätere Entwicklung durch (Abbildung 3) und wurde erst drei Wochen später geerntet. Zudem bildete Weizen mehr Biomasse als Gerste (Tabelle 1). Beide Aspekte waren mit einer höheren und länger dauernden Wasseraufnahme aus dem Boden verbunden. Obwohl die nachfolgende Zwischenfrucht Chinakohlrüben in beiden Verfahren gleichzeitig gesät worden war, wurde nach Gerste schon anfangs August wieder Sickerwasser gebildet, während dies nach Weizen erst Mitte Oktober der Fall war.

Nitratkonzentration des Sickerwassers

Nachdem die Nitratkonzentrationen anfangs Sickerwasserperiode 2013/14 in beiden Verfahren in der gleichen Grössenordnung lagen, wurden zwischen Mitte November 2013 und Mitte Oktober 2014 unter Winterweizen teilweise bedeutend höhere Werte gemessen als unter Wintergerste

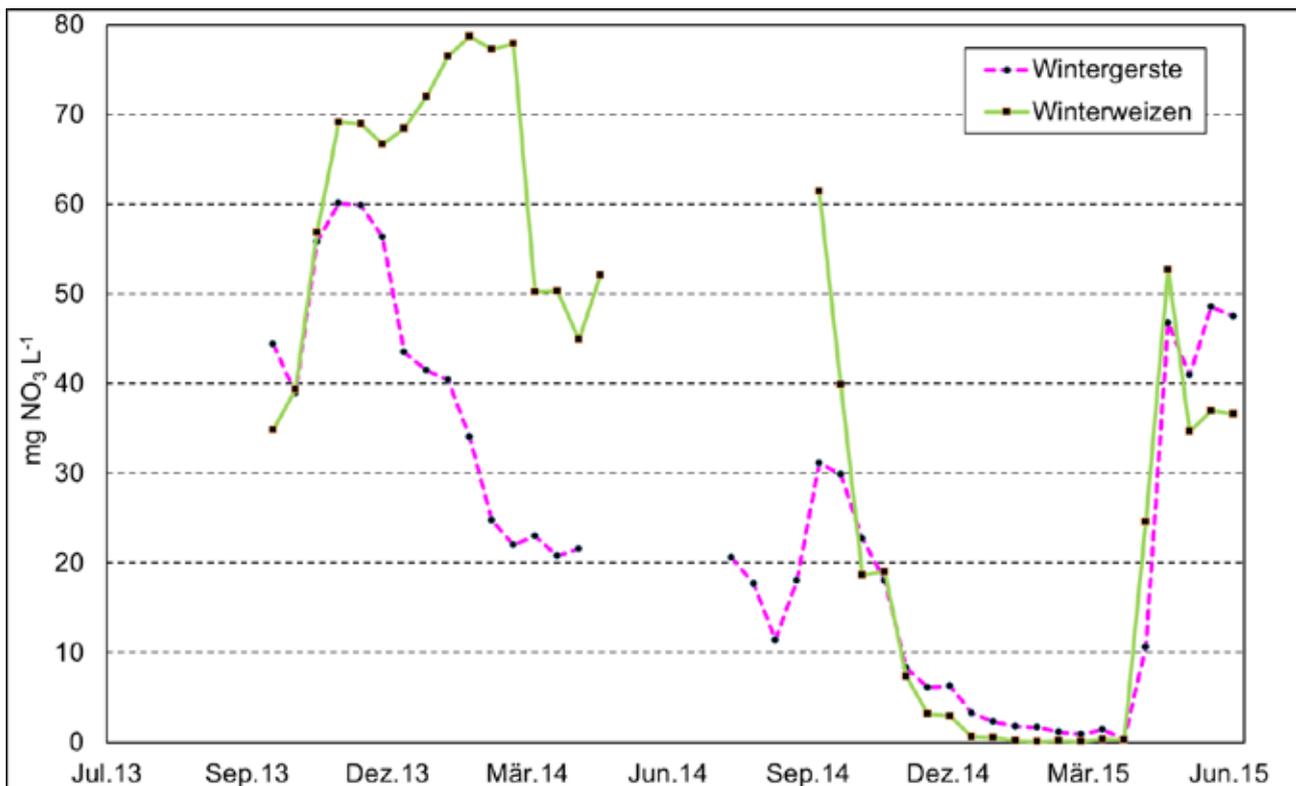


Abbildung 4: Verlauf der Nitratkonzentration des Sickerwassers in den Verfahren „Wintergerste“ und „Winterweizen“ während der Versuchsperiode.

(Abbildung 4). Diese Entwicklung könnte eine Folge der späteren Saat, der schlechteren Bodenbedeckung und der damit verbundenen geringeren N-Aufnahme von Weizen sein. In einigen Wintermonaten überstiegen die Werte unter Weizen und anfangs auch unter Gerste den schweizerischen Anforderungswert an Trinkwasser von 40 mg NO₃ L⁻¹ sowie den Grenzwert der EU von 50 mg NO₃ L⁻¹ deutlich. Anfangs Sickerwasserperiode 2014/15 wurde zwar mehr Sickerwasser im Verfahren „Wintergerste“ gemessen, die Nitratkonzentration war aber im Verfahren „Winterweizen“ höher. In den folgenden Monaten wurden wiederum keine Unterschiede zwischen den Verfahren beobachtet. Die Nitratkonzentrationen waren in den Wintermonaten unter Chinakohlrüben sehr niedrig, was auf eine gute Wirkung der Zwischenfrucht hindeutet. Nach deren Umbruch im April 2015 stiegen die Nitratwerte steil an. Die abflussgewichtete Nitratkonzentration war im zweiten Versuchsjahr in beiden Verfahren identisch (Tabelle 2).

Ausgewaschene N-Menge

Die erhöhten Nitratkonzentrationen im Winter 2013/14 führten dazu, dass bei durchschnittlichen Sickerwassermengen grössere N-Mengen ausgewaschen wurden, wobei die Verluste unter Winterweizen höher waren als unter Wintergerste (Tabelle 2). Die aufsummierten Auswaschungsverluste nahmen zwischen November und anfangs März linear zu (Abbildung 5). In der Periode 2014/15 wurde weniger Nitrat ausgewaschen als in der Vorperiode. Die frühere und stärkere Sickerwasserbildung nach der Ernte von Wintergerste führte nur zu leicht höheren N-Verlusten als unter Winterweizen. Zwischen Dezember 2014 und Mitte April 2015 war die Nitrat Auswaschung infolge der tiefen Nitrat-

konzentrationen sehr niedrig. Ende April und anfangs Mai wurden hohe N-Verluste gemessen, die ihre Ursache in den weit überdurchschnittlichen Niederschlägen von 160 mm innerhalb von zehn Tagen hatten.

Schlussfolgerungen

Die spätere Entwicklung von Winterweizen gegenüber Wintergerste hatte im Winter nach der Saat keine Auswirkungen auf die Sickerwassermenge. Hingegen waren die Nitratkonzentrationen unter Weizen bedeutend höher als unter Gerste. Bei gleich hohen Sickerwassermengen führte dies zu höheren N-Verlusten unter Weizen. Der frühere Erntetermin von Gerste führte dazu, dass die Sickerwasserbildung schon früh einsetzte. Eine kurze Dauer bis zur Ansaat der folgenden Kultur kann mithelfen, die Sickerwassermenge und damit die Nitrat Auswaschung zu reduzieren.

Literatur

- Hürdler J., Prasuhn V., Spiess E. (2015) Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz MODIFFUS 3.0. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Agroscope, Zürich, 117 pp. www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-ressourcen/boden-gewaesser-naehrstoffe/landwirtschaftlicher-gewaesserschutz/modiffus.html (letzter Zugriff: 21.01.2019).
- Prasuhn V., Spiess E. (2003) Regional differenzierte Abschätzung der Nitrat Auswaschung über Betriebszählungsdaten. Bericht über die 10. Lysimeter tagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, 55-57.
- Prasuhn V., Spiess E., Seyfarth M. (2009) Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. Bericht über die 13. Gumpensteiner Lysimeter tagung. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irnding, 11-16.

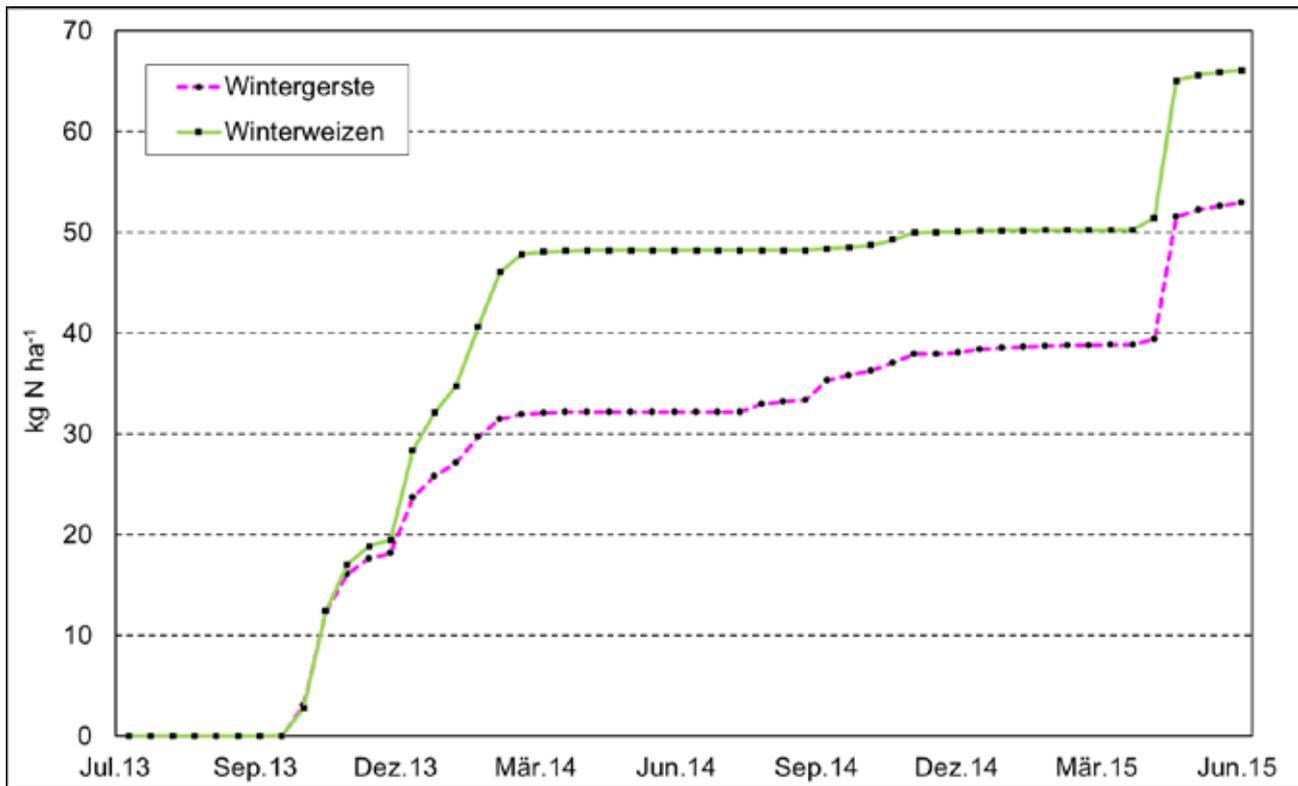


Abbildung 5: Während der Versuchsperiode aufsummierte Nitrat auswaschung in den Verfahren „Wintergerste“ und „Winterweizen“.

Comparison of dendrometer measurements with lysimeter data at Agroscope Reckenholz

Luzia von Känel^{1*}, Josefa Fuchs¹, Volker Prasuhn² and Peter Molnar¹

Zusammenfassung

Der Durchmesser eines Pflanzenstängels ändert sich nicht nur aufgrund des Wachstums, sondern auch in Folge des Wassergehalts im Stängel. Dieser ist abhängig von der Differenz zwischen Wasseraufnahme und Transpiration. Es wurden vier Dendrometerrmessgeräte an unterschiedlichen Rapspflanzen auf einem Lysimeter des Agroscope Reckenholz installiert, um die Durchmesseränderung des Stängels zu messen. Dieser wurde mit der tatsächlichen Verdunstung, Bodenfeuchte und Bodensaugspannung in verschiedenen Tiefen verglichen. Die Dendrometermessungen zeigen einen typischen Tagesgang einer Rapspflanze (siehe *Figur 3*), deren Durchmesser am Morgen – nach der Nacht ohne Transpiration – ein Maximum erreicht, und am Abend minimal ist weil die für die Photosynthese benötigte Transpiration durch den Tag höher ist als die Wasseraufnahme. Dendrometermessungen können helfen den Pflanzenwasserhaushalt besser zu verstehen, insbesondere das zeitliche Verhalten des Wassertransports vom Boden in die Atmosphäre. Somit kann eine Wissenslücke eines Teils im Wasserkreislauf geschlossen werden, und es können für die landwirtschaftliche Praxis hilfreiche Informationen gewonnen werden.

Schlagwörter: Evapotranspiration, Tagesgang, Durchmesser, Pflanzenwasserhaushalt, Wasseraufnahme

Summary

Changes in the diameter of plant stems occur not only due to their growth but also due to changes in the water content within the stem as a function of differences in root water uptake and transpiration. Four dendrometer devices were installed on rapeseed plants on a lysimeter at Agroscope Reckenholz to measure changes in diameter of the plant stem, and were compared to actual evapotranspiration (AET), soil moisture and soil suction at different depths. The dendrometer measurements show typical sub-daily cycles in the diameter of the rapeseed stems with diameter being maximal in the morning, after the night period with no plant transpiration, and minimal in the evening, as transpiration during the day – when photosynthesis takes place – is higher than root water uptake. Dendrometer measurements can give an insight into plant water use and especially the temporal coupling of water transport from soil to the atmosphere, filling a gap in the knowledge of the water cycle and giving helpful information for agricultural practice.

Keywords: evapotranspiration, daily cycles, stem diameter, plant water supply, root water uptake

Introduction

Changes in the diameter of plant stems occur not only due to their growth (added biomass) but also due to changes in the water content within the stem as a function of differences in root water uptake and transpiration. Dendrometers are measurement devices that can be placed on the plant stem or shoot to measure such changes in diameter. They are a non-invasive technique with which plant growth and the water content within a plant stem can be measured, for example to determine the start and end of growing periods, to identify drought conditions, to control irrigation, etc. (MMM Tech Support 2018). As transpiration induces water transport in the stem at rates higher than root water uptake, also sub-daily cycles in the diameter of shoots can be observed and recorded by dendrometers. The sub-daily cycle (its amplitude) can provide an indirect measurement of transpiration which is similar to direct measurements of sap flow and stomatal conductance in trees (Zweifel et al.

2001). Installation of dendrometers on plants in lysimeters provides a complementary assessment of the timing and magnitude of actual evapotranspiration (AET). It is the aim of this poster to present first results of such a combined measurement.

Material and Methods

Four dendrometer devices of the type DD-S (producer: ECOMATIK (2016)) were installed on rapeseed plants for a period of 71 full days (April 12 to June 22, 2018) on a lysimeter at Agroscope Reckenholz (*Figure 1*). The dendrometer measurement devices were installed on four different plants at a height of around 35 cm, and measured the stem diameter change with a temporal resolution of 1 minute. A weighted lysimeter with the same type of soil and the same culture was taken as reference for comparison of dendrometer measurements with soil moisture and soil suction at different depths at a temporal

¹ ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU), CH-8093 ZÜRICH

² Agroscope, CH-8046 ZÜRICH

* Ansprechpartner: Luzia von Känel, vonkaenel@ifu.baug.ethz.ch

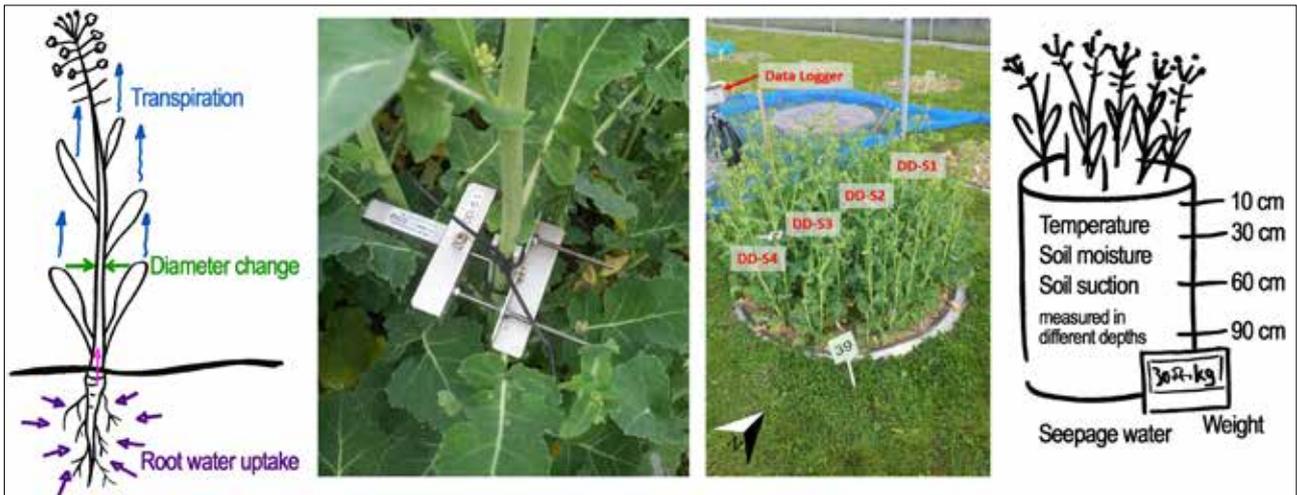


Figure 1: Dendrometer device installation on a rapeseed plant stem and measurement setup of the four dendrometers in 2018, as well as the measurements in the lysimeter.

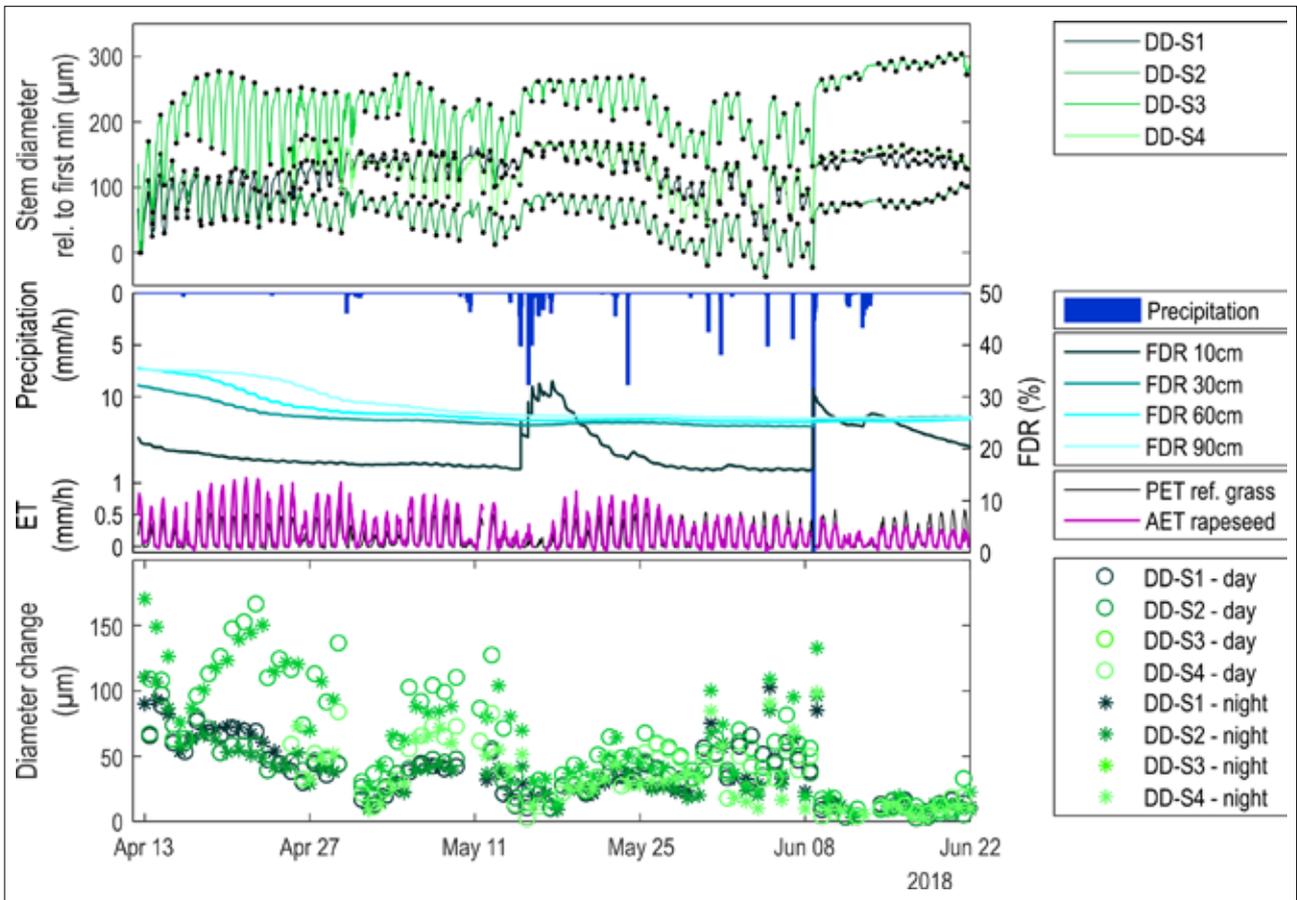


Figure 2: Stem diameter measured by four dendrometers for the whole measurement period, together with soil moisture in four different depths measured by frequency domain reflectometry (FDR), precipitation measured at a meteo swiss station nearby, evapotranspiration measured with a weighable lysimeter and extracted changes in diameter over day and night measured by the four dendrometers. The dots in the uppermost plot indicate the observed maximum and minimum diameter.

resolution of 10 minutes, and estimates of AET with an hourly resolution. The meteorological parameters used to calculate potential evapotranspiration (PET) were measured at the meteo swiss station (Zürich / Affoltern (REH)) nearby.

Results

The dendrometer measurements show typical sub-daily cycles in the diameter of the rapeseed stems with diameter being maximal in the morning, after the night period with

no plant transpiration, and minimal in the evening, as transpiration during the day – when photosynthesis takes place – is higher than root water uptake. *Figure 2* shows an overview of the whole measurement period. Until mid-April, a daily increase in the diameter of the plants can be observed during the early growth stage prior to flowering. As soon as the plants reached maturity, the maximum diameter reached does not change significantly anymore.

The stem diameter changes not only due to growth. It is clearly affected by a superposition of different processes, at short-term timescale mainly by transpiration and root water uptake. Plant transpiration is driven by meteorological parameters such as radiation, vapor pressure deficit, wind speed, etc., at the leaf surface, but also by the regulation of the stomata opening and closure by the plant. By measuring the lysimeter weight, transpiration was measured as the main part of AET. Root water uptake is dependent mainly on the gradients in soil moisture tension between the roots and the soil matrix and the flow of water through the plant stem. Some evidence of this superposition of transpiration and root water uptake can be seen in the long-term behavior of diameter change, together with ET and soil moisture.

In times with high PET and low soil moisture over a period of several days, the overall plants diameter gets smaller, as the root water uptake does not meet the transpiration rate (*Figure 2*, May 4 – 10). In times with low radiation and comparatively low temperatures and thus low PET, the overall diameter increases, indicating that the transpiration is lower than root water uptake (*Figure 2*, May 13 – 18). There is a tendency that with conditions where water is not limited (*Figure 2*, May 15 – 24 / after June 8th), the daily diameter change is smaller than in dry conditions.

A continuous decline of AET compared to PET, beginning at the end of May was observed. On the 8th of June, after a heavy rainfall, the daily fluctuations in plant diameter suddenly dropped, this was also in the period where senescence started and the plants were drying.

A close up of a few days (*Figure 3*) shows that the stem diameter change begins with a slight delay compared to the onset of AET as measured by the lysimeter. The same behavior can be observed at all four measured plants.

As the diameter decrease during the day is induced by the transpiration of the plant, we expect it should be related to the daily AET measured by the lysimeter. These relations are shown for all four dendrometers and two different periods in *Figure 4*. The correlation of AET and diameter change during the day from the whole measurement period (*Figure 4*, left) is rather small. However, when a period with low and constant soil moisture is analysed separately (*Figure 4*, right), this increases the coefficient of determination to almost 80% for most of the dendrometers.

Discussion

If the transpired amount of water in a plant is not recovered by root water uptake from the soil, water is extracted from the stem itself, leading to a temporary decrease in plant stem diameter. Looking at *Figure 3*, one can observe a delayed decrease of stem diameter compared to the onset of AET. This could be related to the position of the dendrometer on the plant stem, which is not reflecting the start of the transpiration process. In future experiments it could be interesting to measure the onset of diameter change at different heights of the plant stem.

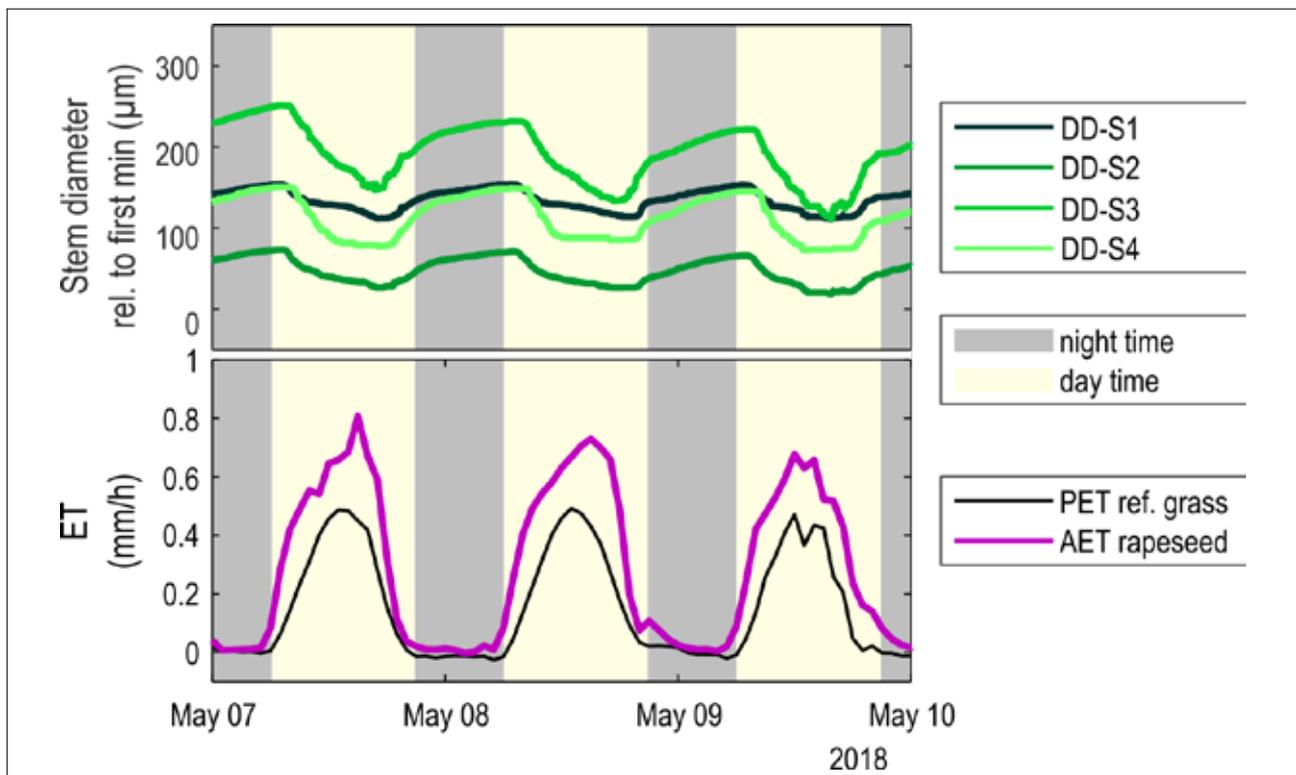


Figure 3: Dendrometer measurements and evapotranspiration, measured with a weighted lysimeter, for three days in the first half of May.

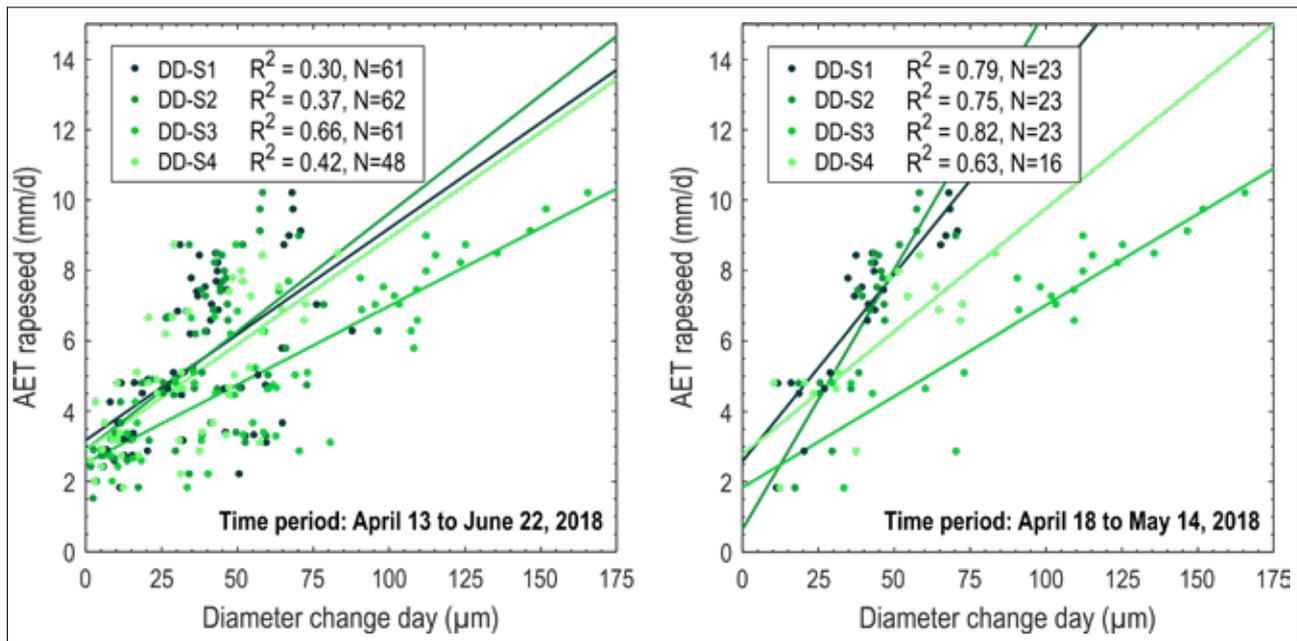


Figure 4: Actual evapotranspiration (AET) of rapeseed versus corresponding changes in diameter of rapeseed plants during the day with a linear regression line plotted for each dendrometer and coefficient of determination. Left: Correlation over the whole measurement period. Right: Correlation for a period of four weeks with constant dry soil conditions in the uppermost layer.

The rate at which the diameter decreases might be indicative of the stomata opening, being fully opened in the morning leading to high rates in diameter decrease and starting to close throughout the day to reduce water loss.

The observed decrease in daily maximum of AET over the second half of the measurement period is indicative for the ripening and slow dry-out of the plants. The precipitation event on the 8th of June falls together with a strong reduction in the daily cycles of the dendrometer measurements. With our data we cannot clearly conclude if this is the result of the plants being dry and not transpiring or another reason.

Overall, this experiment showed that dendrometer measurements of daily temporary diameter change on plants during the growing season provide a reasonable estimate of AET. Since stem diameter changes are different for different shoots, as well as root water uptake differs with soil conditions, a direct link of stem diameter change to AET seems to be difficult. Nevertheless, dendrometer measurements can give an insight into plant water use and especially the temporal coupling of water transport from soil to the atmosphere, filling a gap in the knowledge of the water cycle and giving helpful information for agricultural practice. Further measurements are planned to confirm the results found and to collect data in different environmental and soil moisture conditions.

Literature

- Caird M.A., Richards J.H., Donovan L.A. (2007) Nighttime stomatal conductance and transpiration in C₃ and C₄ plants. *Plant Physiology*, 143(1):4-10.
- ECOMATIK (2016) <https://ecomatik.de/produkte/dendrometer/durchmesser-dd-s/>. Online in August 2018.
- Fan J., Mcconkey B., Wang H., Janzen H. (2016) Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research*, 189:68-74.
- Fuchs J. (2018) Analysis of Lysimeter Data, Dendrometer Measurements and Modelling Results from Tethys-Chloris for Quantification of the Water Balance. Master Thesis Environmental Engineering, ETH.
- Hoshika Y., Osada Y., de Marco A., Penuelas J., Paoletti E. (2018) Global diurnal and nocturnal parameters of stomatal conductance in woody plants and major crops. *Global Ecology and Biogeography*, 27:257-275.
- MMM Tech Support (2018) <https://www.mmm-tech.de/de/dendrometer/dds>. Online in August 2018.
- Or D., Tuller M., Wraith J.M. (Fall Semester 2016) Vadose zone hydrology/ environmental soil physics - slides and script.
- Zweifel R., Item H., Häsler R. (2001) Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiol* 21:869-877.

Auswirkungen unterschiedlicher Grundwasser-Steuerregime auf den Wasserhaushalt eines grundwassernahen Standorts

Ottfried Dietrich^{1*}, Marcus Fahle^{1,2}, Thomas Kaiser¹ und Jörg Steidl¹

Zusammenfassung

Gute Kenntnisse über die Auswirkungen unterschiedlicher Grundwasserstände auf grundwassernahen Standorten sind eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung tragfähiger Wassermanagementstrategien für Niederungsgebiete in denen teilweise sehr konträre Anforderungen unterschiedlicher Interessengruppen aufeinandertreffen. Die Ergebnisse von Lysimeter-Untersuchungen zeigen, dass dauerhaft hohe Wasserstände das Artengefüge der Vegetation hin zu feuchteangepassten Arten verschieben und zu höheren Verdunstungswerten führen. Durch die höheren Wasserstände wird zwar auch der Wasserrückhalt verbessert, jedoch nicht ausreichend, um die höhere Verdunstung in längeren Trockenperioden zu kompensieren.

Schlagwörter: Grundwasser-Lysimeter, Feuchtgebiet, Verdunstung, Wasserbewirtschaftung

Summary

A good level of knowledge about the effects of the different water levels on the water budget components is a precondition for the development of compromises in well-balanced water resource management, especially in regions with controversial demands of different interest groups. Lysimeter results show that the vegetation has adapted to the wet conditions of high water levels within some years. The adapted wetland vegetation increases the evapotranspiration. Higher water levels in spring are linked to increased water storage. This can help to compensate for the higher evapotranspiration for some weeks but not for the entire season, especially in dry years.

Keywords: Grundwasser-Lysimeter, Feuchtgebiet, Verdunstung, Wasserbewirtschaftung

Einleitung

Das norddeutsche Tiefland ist durch viele Niederungsgebiete mit grundwassernahen Standortbedingungen gekennzeichnet. Der Wasserhaushalt dieser Gebiete wird größtenteils durch wasserwirtschaftliche Anlagen (Gräben, Staubaubwerke, Pumpwerke) geregelt. Die Anlagen dienen sowohl der Entwässerung als auch der Bewässerung und ermöglichen die Regulierung der Wasserstände in den Gräben und der Grundwasserstände in den angrenzenden Flächen nach abgestimmten Regeln. Die Entwässerung der Flächen ist die Voraussetzung für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung der Standorte. Die grundwassernahen Standorte sind aber auch Lebensraum vieler seltener, an die Bedingungen angepasster Pflanzen- und Tierarten. Häufig handelt es sich um Moorstandorte, auf denen es durch die Entwässerung zu Stoffumsetzungsprozessen und zur Emission klimaschädlicher Treibhausgase kommt.

In Niederungsgebieten stoßen daher oftmals unterschiedliche Interessensgruppen aufeinander und ein Hauptstreitpunkt ihrer Auseinandersetzungen sind ihre Zielvorstellungen für die einzustellenden Graben- und Grundwasserstände. Die zuständigen Wasserbewirtschaftler stehen vor der schwierigen Aufgabe, tragfähige Kompromisslösungen zu finden, die allen Anforderungen im Rahmen der Möglichkeiten gerecht werden. Gute Kenntnisse der komplexen hydrologischen Zusammenhänge und Auswirkungen unterschiedlicher Wassermanagementstrategien sind hierfür eine wichtige Voraussetzung.

Im Spreewald, südöstlich von Berlin, wurde eine Grundwasser-Lysimeter-Station eingesetzt, um die Wirkung unterschiedlich hoher und zeitlich verlängerter Winterstauziele auf die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen, insbesondere auf die Grundwasserstände in der Vegetationsperiode von April bis September, zu untersuchen. Bei den Stauzielen wurde sich an den in der Region diskutierten Varianten orientiert, mit denen der Wasserrückhalt im Gebiet verbessert und die Wasserentnahme aus den Fließen im Sommer reduziert werden soll.

Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden im Spreewald, ca. 70 km südöstlich von Berlin (51°52'N, 14°02'O) durchgeführt. Die eingesetzte Grundwasser-Lysimeter-Anlage befindet sich auf einer extensiv genutzten Mähweide. Der Boden besteht aus degradiertem Niedermoortorf über einem mehr als 20 m mächtigen, sandigen Grundwasser-Leiter. Die Grundwasserstände schwanken im normalen Jahresverlauf zwischen Geländeoberfläche und ca. 60 cm unter Flur (u. F.), wobei die tief liegenden Flächenteile im Winterhalbjahr wenige Zentimeter überstaut sind.

Bei der Lysimeteranlage handelt es sich um eine Containerstation (Fa. UGT) mit vier wägbaren Monolithen von 1 m² Grundfläche und 2 m Mächtigkeit. Die Monolithe wurden im Herbst 2009 direkt am Standort der Station gestochen. Die ursprüngliche Grünlandvegetation blieb dabei erhalten. Zur Anlage gehören eine Wetterstation und ein Bodenmess-

¹ Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Eberswalder Str. 84, D-15374 MÜNCHENBERG

² Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, D-30655 HANNOVER

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

platz zur Erfassung von Referenzgrößen. Eine ausführliche technische Beschreibung der Station, einschließlich der verwendeten Messtechnik und der Besonderheiten bei der Steuerung der unteren Randbedingungen im Lysimeter ist in Dietrich et al. (2016) beschrieben.

Untersucht wurden vier Varianten mit unterschiedlichen Vorgaben für die Zielwasserstände in den Jahren 2014 bis 2017:

- Variante 1 wurde nach dem gemessenen Grundwasserstand am Referenzmessplatz geregelt (Referenzvariante).
- Variante 2 wurde jedes Jahr Anfang April auf ca. 5 cm u. F. eingestellt. Danach wurde der Zufluss nach den gemessenen Zuflüssen von Variante 1 geregelt und nur entwässert, wenn die Wasserstände höher als 5 cm u. F. anstiegen. Die Entwicklung des Grundwasserstands ergab sich aus der Wasserbilanz.
- Variante 3 wurde wie Variante 2 geregelt, allerdings mit höheren Ausgangs-Wasserständen Anfang April (8 cm über Gelände).
- Variante 4 orientierte sich an optimalen Wasserständen für eine landwirtschaftliche Grünlandnutzung von 30 cm u. F. im Winter und 50 cm u. F. im Sommer.

Eine ausführliche Beschreibung der Untersuchungsvarianten ist in Dietrich et al. (2019) dargestellt. Neben den hydrologischen Messungen wurde die Vegetationsentwicklung und die Biomasserträge erfasst (Dietrich & Kaiser 2017).

Ergebnisse und Diskussion

Die meteorologischen Bedingungen in den Untersuchungsjahren 2014 bis 2017 waren sehr unterschiedlich. In den

Jahren 2014 und 2017 waren die Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode mit ca. 340 bzw. 400 mm überdurchschnittlich hoch, in den anderen beiden Jahren lagen sie mit ca. 290 bzw. 250 mm unter dem Durchschnitt (325 mm an DWD Station Cottbus 1981/2010). Insbesondere Starkniederschläge wie im Mai 2014 oder Ende Juni 2017 ließen die Grundwasserstände wieder auf die Ausgangswerte von April ansteigen (Abbildung 1).

Die gemessenen Ertrags-Werte und Blattflächen-Indizes zeigen, dass sich die 2009 noch einheitliche Vegetation infolge der unterschiedlich hohen Wasserstände in den Folgejahren sehr unterschiedlich entwickelt hatte. Insbesondere auf der nassesten Variante 3 hatten sich feuchteangepasste Vegetationsarten sehr schnell ausgebreitet. Sie erreichte höhere Blattflächen-Indizes und Erträge als die ursprüngliche Vegetation, die noch auf Variante 1 vorherrschte (Dietrich et al. 2019, Dietrich & Kaiser 2017) und war mit einer höheren Verdunstung verbunden. Die Bestandskoeffizienten (k_c) in Abbildung 2 veranschaulichen diese Entwicklung. Die nasse Variante 3 hatte bereits 2014 signifikant höhere k_c -Werte als die anderen Varianten ($p < 0,001$). Die k_c -Werte von Variante 3 waren auch 2017 am höchsten, jedoch wies die mittlere Variante 2 inzwischen auch signifikant höhere k_c -Werte als Variante 1 und 4 auf ($p < 0,001$).

Die mittleren Monatssummen der Wasserbilanzgrößen heben die Unterschiede zwischen den Varianten hervor (Abbildung 3). So hatte Variante 3 in allen Monaten die höchste Verdunstung, gefolgt von Variante 2. Die Verdunstung beider Varianten lag von April bis September auch immer über der FAO-Gras-Referenzverdunstung. Im September erholte sich die Vegetation nach dem zweiten Schnitt nicht mehr so schnell wie nach dem ersten Schnitt

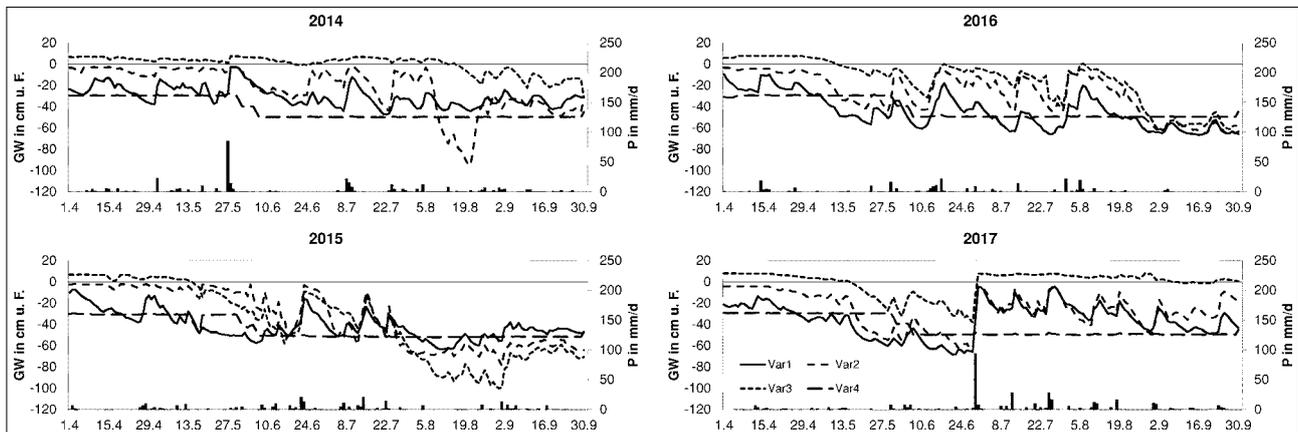


Abbildung 1: Grundwasserstände (GW) der Varianten 1 bis 4 und Tagessumme des Niederschlags (P) in den Vegetationsperioden der Jahre 2014 bis 2017.

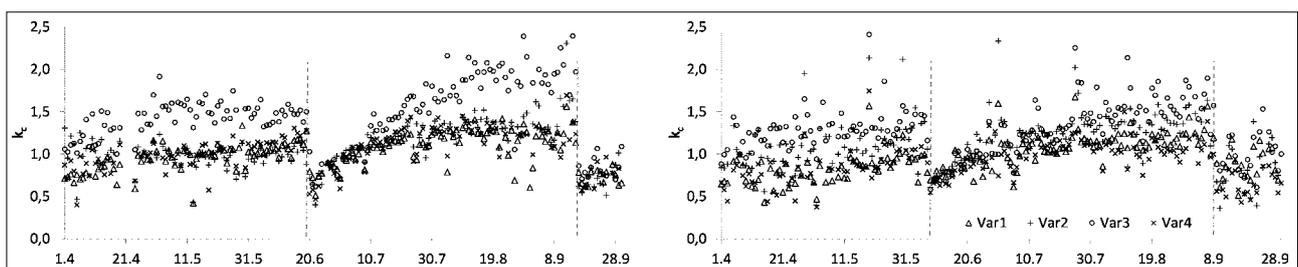


Abbildung 2: Entwicklung der Bestandskoeffizienten ($k_c = ET_a / ET_0$) der vier Untersuchungsvarianten in den Jahren 2014 und 2017 (gestrichelte Linien markieren Schnitttermine).

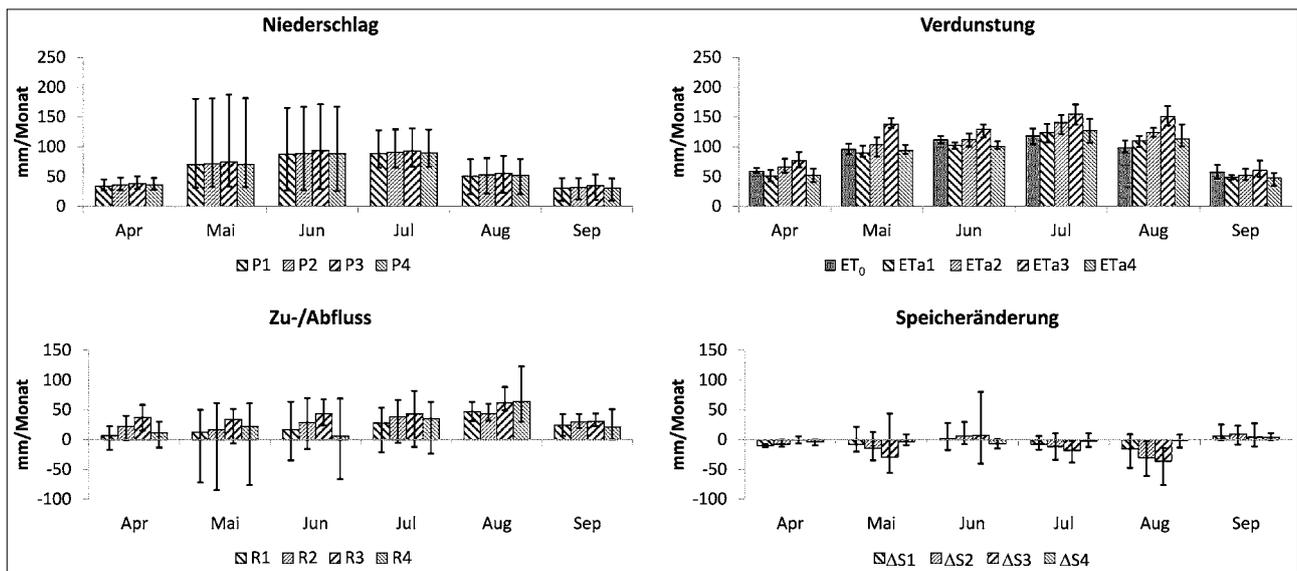


Abbildung 3: Mittlere Monatssummen der Jahre 2014 bis 2017 aus Dietrich et al. (2019) (Schwankungsbereich kennzeichnet die Werte der Monate mit minimaler und maximaler Summe).

im Juni und erreichte daher nicht mehr so hohe Werte. Die gemessenen Monatswerte jeder Variante unterschieden sich zwischen den Jahren für die Verdunstung nur wenig, wie die geringe Schwankungsbreite zeigt. Anders sah es bei den Niederschlägen aus. Besonders der Mai und Juni fiel sehr unterschiedlich aus, was auch zu großen Schwankungen im Zu-/Abfluss und der Speicheränderung führte. Die Werte der Speicheränderung zeigen, dass hier die höheren Wasserstände von Variante 3 zur besseren Nutzung der Speicherkapazität der Fläche beitrugen. Das Gegenteil war bei Variante 4 der Fall. Die weitgehend konstanten Grundwasserstände ließen nahezu keine Nutzung des Flächenspeichers zu, so dass hier das Wasserbilanzdefizit ausschließlich durch Zuflüsse ausgeglichen werden musste.

Schlussfolgerungen

Die dauerhaft hohen Wasserstände verschoben auf den betroffenen Lysimetern das Artengefüge der Vegetation hin zu feuchteangepassten Arten und führten zu höheren Verdunstungswerten und Wasserentnahmen aus Grundwasser und Gewässersystem. Wasserstände von wenigen Zentimetern

über Flur im Winter (ca. 10 cm) verbessern den Wasserrückhalt. Sie können in längeren Trockenperioden die gestiegene Verdunstung aber nicht kompensieren. Hohe und stabile Grundwasserstände, wie sie für den Moorschutz erforderlich sind, können unter den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen nur mit ausreichend hohen Zuflüssen aus dem Einzugsgebiet gesichert werden.

Literatur

- 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.
- Dietrich O., Kaiser T. (2017) Impact of groundwater regimes on water balance components of a site with a shallow water table. *Ecology* 10, e1867.
- Dietrich O., Fahle M., Kaiser T., Steidl J. (2019) Eine Lysimeter-Studie zu Auswirkungen unterschiedlicher Grundwasser-Steuerregime auf den Bodenwasserhaushalt eines grundwassernahen Standorts. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 63, 6-18.

Role of the wastewater irrigation in the chemical composition of next-year-leachate

Ágnes Kun^{1*}, Ildikó Kolozsvári¹, Mária B. Oncsik¹ and Csaba Bozán¹

Summary

According to the report by the Joint Research Centre (JRC) water reuse can help lower the pressure on freshwater resources. The aim of the report was to determine the minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and also in aquifer recharge however in case of many potential environmental risk there are no limit value belonging to wastewater. Nonetheless before wastewater reuse the end-user is responsible to determine further limit values for the prospective irrigation water if its quality is required. In our research the inorganic nitrogen and the sodium content is supposed to harm soil or environment health. Aim of our study was to determine the impact of the irrigation water quality on the chemical composition of the leachate in order to identify the risk of the nitrate leaching and salt accumulation in the soil. The lysimeter experiment was conducted at Szarvas, Hungary started in 2015 with irrigating sorghum. The soil type is Vertisol dominating high clay content where the leaching processes are typically slow. The wastewater is originated from an intensive catfish farm, the current recipient surface water is an oxbow lake where the eutrophication hazard is present but it would be avoidable with irrigation uses.

Keywords: sodium content, nitrate content, field experiment

Introduction

According to Salgot & Folch (2018) is one of the main possibilities to cope with water scarcity is wastewater reclamation and reuse. Wastewater reuse can satisfy different needs: irrigation requests, industrial purposes, potable demands, and civil uses (Roccaro & Verlicchi 2018). Irrigation with raw, partially and treated wastewater is a widespread practice and the importance of wastewater for agriculture has increasingly been recognised not only as a valuable water resource but also for its nutrient value (Elgallal et al. 2016). However, inappropriate management of irrigation with wastewater can pose substantial risks to public health and the surrounding environment (Elgallal et al. 2016). In Hungary alternative water resources utilization should take priority over the conventional irrigation water resources (surface and subsurface waters) in the future, similarly to the global trends because of the global warming and water scarcity.

In our experiment wastewater from an intensive catfish farm with high salt and sodium content was used for sorghum

irrigation. The aim of our research was to evaluate the environmental risk of wastewater irrigation. For the assessment, in a lysimeter experiment the leachate chemical composition and the soil available nitrogen level were examined. Our main goal during the analysis was to determine the effects of different quality irrigation water on the leachate nitrate, salt, sodium concentration.

Material and methods

The experiments were conducted at the National Agricultural Research and Innovation Centre (NAIK), Research Department of Irrigation and Water Management (OVKI) in Szarvas, Hungary. The experiment was set up in the NAIK ÖVKI Lysimeter Station in 2015 in 32 pieces of 1 m³ vessels with sorghum (Variety: Gigant). During the irrigation period 360 mm irrigation water was used between 16.6.2015. and 17.9.2015. The lysimeter vessels were filled with disturbed topsoil of Vertisol without layering. The soil is characterised by high clay content (~70-80%), low humus content (~2%), the lime content less than 0.5%, the total dissolved salt content less than 0.08% and the pH_{KCl} values are between 5.88-6.97 before starting the experiment.

There were two different irrigation water applied in the experiment. First one originated from the Oxbow Lake of Körös River (Körös 30 mm– numbers mean one-time irrigation doses/week) with excellent water quality according to Filep's classification (Filep 1999, Stefanovits 2010) while the other one was a wastewater (Wastewater 30 mm) from an intensive African catfish farm in Szarvas. The water can be characterized by high specific electrical conductivity; high total salt and sodium content (Table 1.)

The leachate and irrigation water and soil samples were analysed at the NAIK ÖVKI Laboratory for Environmental Analytics according to the Hungarian standards. For the statistical evaluation, univariate analysis of variance with Tukey's HSD test was used with SPSS Statistic Ver.22. software.

Table 1. The chemical composition of the irrigation waters.

	River Körös	Wastewater
pH	7.49	7.46
Specific electrical conductivity (µS/cm)	436	1310
HCO ₃ ⁻ (mg/dm ³)	227	949
NH ₄ ⁺ (mg/dm ³)	0,206	22,4
Ca ²⁺ (mg/dm ³)	48,3	20
Mg ²⁺ (mg/dm ³)	12,6	9,42
Na ⁺ (mg/dm ³)	44,6	291
K ⁺ (mg/dm ³)	3,94	6,19

¹ National Agricultural Research and Innovation Centre, Anna-liget utca 35, H-5540 SZARVAS

* Ansprechpartner: Dr. Ágnes Kun, kun.agnes@ovki.naik.hu

Table 2. The chemical composition of the leachate in the different treatments.

	16.2.2016			16.2.2016-7.7.2016		
	Control	Wastewater 30 mm	Körös 30 mm	Control	Wastewater 30 mm	Körös 30 mm
pH	7,77	7,78	7,7	7,99	7,84	7,98
Specific electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1720	1280	1050	966	1104	974
HCO_3^- (mg/dm^3)	....	....	....	441	604	471
NH_4^+ (mg/dm^3)	0,128	0,128	0,165	0,335	0,249	0,284
NO_3^- (mg/dm^3)	223	222	88,9	61,4	52,4	52,4
NO_2^- (mg/dm^3)	0,143	0,153	0,13	0,160	0,123	0,087
Total N (mg/dm^3)	98,4	52,9	25,1	16,8	14,5	14,3
PO_4^{3-} (mg/dm^3)	0,285	0,539	0,257	0,466	0,448	0,580
Total P (mg/dm^3)	0,299	0,539	0,279	0,468	0,459	0,592
Cl^- (mg/dm^3)	....	...	...	21,95	20,75	18,58
SO_4^{2-} (mg/dm^3)	..	...	...	136	126	151
Ca^{2+} (mg/dm^3)	262	159	141	127	133	130
Mg^{2+} (mg/dm^3)	74,0	51,0	44,0	37,7	43,5	40,3
Na^+ (mg/dm^3)	49,0	69,4	50,0	54,1 ^a	83,3 ^b	51,9 ^a
K^+ (mg/dm^3)	9,83	9,16	7,32	7,65	8,94	6,91

Remark: ^{a, b} indexes: The Homogenous Subset of the Tukey's Test (ANOVA).

Results

The highest specific electrical conductivity (EC) values were measured after winter time in the first appearing leachate (Table 2.).

According to Briggs & Courtney (1993) the concentration of the leachate is depend on the length of the period of the water in the soil matrix, which water is in the soil for a long time is able to balance with soil matrix hence the soluble materials can assemble. Because of the above the leachate from February was excluded from the statistical analyses (values in the first leachate were outlier) and it was used only for descriptions. In February the nitrate concentration were higher than in case of leachate from June and July. According to Bohn (1985) the more mobile nitrogen form is the nitrate while the cation exchange capacity restrain the ammonium. The high nitrate concentration of leachate water threatens groundwater resources. According to the 27/2006. (II.7.) decree on the protection of waters against nitrate pollution from agricultural sources; the water is sensitive to nitrate pollution with nitrate content exceeding 50 mg/dm^3 . In case of non-irrigated and wastewater treatment the nitrate value exceed the limit value, although during summertime the values decreased. During irrigation period in the non-irrigated treatment more nutrient stayed in the soil what was non accessible for plants due to the less water compare to the irrigated treatments (Szalóki & Szalókiné 2003). To prove this, the available nitrogen content were measured in the soil also (Figure 1). In case of wastewater irrigation the ammonium content of the effluent water could cause the higher nitrate concentration in leachate.

According to Kiremit & Arslan (2016) the irrigation water quality determined the EC of the leachate: in the irrigated treatment the value were 4110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and in the non-irrigated treatment only 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In our experiment there were no significant impact on the EC of the leachate.

In the leachate in all treatments the orthophosphate concentration was low. Orthophosphate is the most common form of dissolved inorganic phosphorus and it responsible for eutrophication, although in the soil-water system is important nutrient for plants. According to Marton (2009) the phosphorus concentration in the groundwater is low

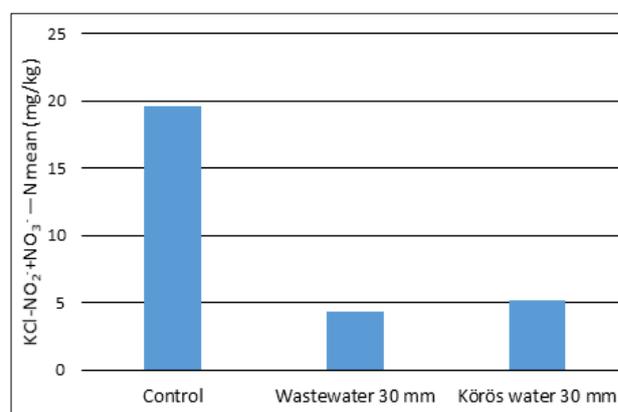


Figure 1. The available nitrogen content of the soil after the irrigation period.

at all circumstances because of the presence of iron and aluminium oxides.

The anion and cation composition of the leachates are very similar and the calcium- and hydrogen-carbonate are dominant. According to Marton (2009) calcium- and hydrogen-carbonate prevalence can be explained by the following. Rainwater filtrate into the three-phase soil zone and absorbs ions and organic constituents which determined its initial chemical composition. An aqueous solution of carbon dioxide results in carbonic acid (the solution is slightly acidic, which dissolves limestone, albite, gypsum) thus the immediate effect of the carbon dioxide dissolution is the rapid increase in the carbonate content of water and the decrease in pH. Magnesium and potassium cations were found to be in the same amount as the general groundwater levels in all tested leachate ($\text{Mg} < 50 \text{ mg}/\text{l}$, $\text{K} < 10 \text{ mg}/\text{l}$) (Bowen 1985). High concentration of sodium cation is present in leachate that filtrate through the wastewater-irrigated soil. Sodium and nitrate was the water quality parameter where the irrigation water quality impact is remarkable.

Conclusions

According to the chemical analysis of leachate water, wastewater does not pose a higher risk of groundwater nitrate

pollution than irrigation with Körös water. However, taking into account the inorganic nitrogen content of the wastewater during the nutrient management is necessary in the future to avoid the environmental risk. The sodium concentration of the leachate in the wastewater treatment may reduce the impact of the irrigation water on the soil and contribute to the moderation of the soil sodicity. Further investigation is needed in connect with the nutrient and sodium balance in the water-soil-plant system.

References

- Bohn H.L., McNeal B.L., O'Connor G.A. (1985) Talajkémia. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.
- Bowen R. (1985) Groundwater. Elsevier Applied Science Publisher. 2nd edition. London és New York. P.192.
- Briggs D.J., Courtney F.M. (1993) Agriculture and environment: The physical geography of temperate agricultural system, Longman Group UK Ltd, Harlow, 442.
- Elgallal M., Fletcher L., Ewans B. (2016) Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. *Agricultural Water Management* 177, 419-431.
- Kiremit M.S., Arslan H. (2016) Effects of irrigation water salinity on drainage water salinity, evapotranspiration and other leek (*Allium porrum* L.) plant parameters. *Scientia Horticulturae* 201, 211-217.
- Marton L. (2009) Alkalmazott hidrogeológia. ELTE Eötvös Kiadó.
- Roccaro P., Verlicchi P. (2018) Wastewater and reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2: 61-63.
- Salgot M., Folch M. (2018) Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2, 64-74.
- Szalókiné Z.I., Szalóki S. (2003) Nitrátlemosódás vizsgálata liziméteres és szabadföldi tartamkísérletben. *Agrokémia és Talajtan*, 52/1-2, 35-52.
- 27/2006. (II.7.) decree on the protection of waters against nitrate pollution from agricultural sources. Available at 21.01.2019: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A0600027.KOR>

New developments at the Lysimeter Station in Szarvas

Mihály Jancsó^{1*}, Ágnes Kun¹, Árpád Székely¹, Timea Szalóki¹,
Marks Ibadzade^{1,2} and Csaba Bozán¹

Summary

The NAIK ÖVKI Lysimeter Research Station (Szarvas, Hungary) was established in 1971. Backfilled gravitational, floating-type and weighing lysimeters were installed that time. To meet the requirements of the up-to-date research, all the 320 non-weighing lysimeters were renewed in 2018. Moreover, 8 brand new weighing lysimeters were built with the surface of 3 m² each. A new innovative micro-irrigation system was also built to start research on precision irrigation management. At present, energy crops, rice, sorghum and fiber hemp are examined at the Station. Our primary goal is to improve the irrigation farming in Hungary and to develop new technologies and information about the water and nutrient requirements of different crop plants. We are working on the environmental effects of alternative water sources (e.g. agricultural originated waste water) and nutrient management options. To provide complex knowledge about the water use of plants, new meteorological stations, different soil moisture sensors, EC probes, plant canopy analyser and infrared camera were set into the system.

Keywords: gravitation lysimeter, irrigation management, water and nutrient use efficiency, drought tolerance

Introduction

Water is a limited resource that is a key element for economic, social and environmental sustainability. Among others, agriculture is one of the main fresh water users. To check the effects of different measures on soil-water management, water balance and transport of nutrients (Eder et al. 2015), lysimeters are effective scientific infrastructures for short term and long term investigations (Szaloki and Szaloki 2003). This function of the equipments makes them appropriate for irrigation research and to describe the quantity and the quality of the irrigation water (Howell et al. 2015). Transport of harmful compounds and elements in the agricultural systems are also easier to follow with these techniques.

Nowadays, alternative water sources are more and more important for agricultural production. Effluent water from intensive agricultural technologies can be reused as irrigation water if the quality meets the requirements (Kun et al. 2017).

The NAIK ÖVKI Lysimeter Research Station of the National Agricultural Research and Innovation Centre (NAIK), Research Institute of Irrigation and Water Management

(ÖVKI) is located in Szarvas (south-east Hungary, latitude 46°86'N, longitude 20°52'E). The Station was built in the year of 1971 when 320 non-weighable backfilled gravitation lysimeters (1m³) were set up on a 1 hectare experimental field. These lysimeters are connected to 5 measuring cellars. The source of irrigation water is usually the oxbow of Körös-river or the specific agricultural originated waste water types. Today, main research priorities at the station are testing of irrigation methods, unravelling nutrient cycles and breeding for drought tolerance of rice. To meet the requirements of the up-to-date research activities and join to international R&D projects, the following new developments were applied in the recent years.

New developments of the research infrastructure

The core research infrastructure of the NAIK ÖVKI Lysimeter Research Station is the 320 non-weighing lysimeters which were renewed in 2018. New plastic lysimeter vessels were installed and the connecting tubes were changed.

Moreover, 8 new weighted lysimeters were built with the Metrisystem Ltd. (Hódmezővásárhely, Hungary). We have the opportunity to measure the water and nutrient balance on 3 m² surface per lysimeters. The soil columns are 120 cm. The resolution of the weighting system (EMX-100 core) is 0.1 kg. The first plants in this system are winter wheat varieties with different water use efficiency and different reactions to drought stress (*Figure 1*).

To measure the changes in soil moisture content, Boreas TSM-06 (72pcs) and TSC-06 (12pcs) were installed to the lysimeters. The weather conditions are now registered by an Agromet-Solar automatic weather station (Boreas Ltd., Hungary).

Measurements of plant physiological and developmental changes are crucial for our research and breeding activities. An SS1 SunScan Canopy Analysis System with radio connection (Delta-T Devices, UK) is used for plant stress research as well as a thermal camera (Flir One Pro) to check the effect of drought on different plant species.

A new innovative micro-irrigation system was also built to start research on precision irrigation management (*Figure 1*). The system is computer controlled and experiments can be irrigated in 8 sections with high resolutions by plots on a 0.5 ha area. The source of irrigation water is either the oxbow lake of river Körös or tap water.

At present, energy crops, winter wheat, rice, soy, sorghum and fiber hemp are examined at the Station.

¹ Research Institute of Irrigation and Water Management, National Agricultural Research and Innovation Centre, Anna-liget 35, H-5540 SZARVAS

² Szent István University, Páter Károly 1, H-5540 GÖDÖLLŐ

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



Figure 1: New weighted lysimeters (left) and the computer controlled precision irrigation system (Szarvas, Hungary).

With the renewed lysimeter station and the new equipments, we have started joint research projects with the Cereal Research Non-profit Co., the Research Institute of Karcag and the Szent István University.

Acknowledgements

The new infrastructural developments were financially supported by GINOP-2.3.3-15-2016-00042 – Development of research infrastructures, international co-operations and scientific networking. Ibadzade Marks is a scholarship holder of the Stipendium Hungaricum Programme.

References

- Eder A., Bloeschl G., Feichtinger F., Herndl M., Klammler G., Hoesch J., Erhart E., Strauss P. (2015) Indirect nitrogen losses of managed soils contributing to greenhouse emissions of agricultural areas in Austria: results from lysimeter studies. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 101: 351-364.
- Howell T.A., Evett S.R., Tolk J.A., Copeland K.A., Marek T.H. (2015): Evapotranspiration, water productivity and crop coefficients for irrigated sunflower in the U.S. Southern High Plains. *Agricultural Water Management.* 162: 33-46. p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.008>
- Kun Á., Bozán Cs., Barta K., Oncsik M.B. (2017): The effects of wastewater irrigation on the yield of energy willow and soil sodicity. *Columella*, 4(1): 11-14.
- Szaloki Z.I., Szaloki S. (2003) Study on nitrate leaching in long-term lysimeter and field experiments (in Hungarian). *Agrokémia és Talajtan*, 52(1-2): 35-52.

Reactions of Alpine grassland species in agricultural ecosystems to predicted climate changes

Georg Leitinger^{1*}, Erich Tasser², Ulrike Tappeiner^{1,2}, Francesca Scandellari³,
Michael Thoma³ and Massimo Tagliavini³

Zusammenfassung

Landnutzungs- und Klimawandel beeinflussen Berggebiete und deren Vegetation stärker als der globale Durchschnitt. Da Gebirge für einen Großteil der Wasserressourcen der Welt verantwortlich sind, ist ihre Vegetation ein Schlüsselfaktor für die Speicherung großer Wassermengen. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die alpinen Graslandökosysteme zu bestimmen, können Lysimetermessungen und stabile Isotopentechniken verwendet werden. Das internationale Forschungsprojekt ‚ClimAgro‘ hat zum Ziel, in einer vergleichenden Studie zu analysieren, wie der Wasserhaushalt (Niederschlag, Verdunstung, Infiltration, Bodenfeuchtigkeit) in alpinen Graslandökosystemen durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst wird, wie beispielsweise landwirtschaftliche Bewirtschaftung, Bodentypen, unterschiedliche klimatische Bedingungen (Nördliches mitteleuropäisches Klima vs. trockenes inneralpines Klima) und extreme klimatische Ereignisse (Dürren). Dazu wurden alpine Graslandgesellschaften in einem Gartenexperiment am sozio-ökologischen Langzeit-Forschungsstandort (LTSER) „Stubaital“, Tirol, Österreich, mit Präzisionslysimeters (Smart Field Lysimeter[®], SFL, METER Group AG, München) untersucht. Veränderungen im Pflanzenmetabolismus wurden durch verschiedene isotopische Reaktionsmuster der Arten analysiert. Aus den Ergebnissen wurde ein besseres Verständnis der Reaktionen von Grünlandarten auf vorhergesagte Klimaveränderungen gewonnen.

Schlagwörter: Grünlandmanagement, Klimawandel, Smart-Field-Lysimeter, Wassernutzungsstrategie

Summary

The impact of land use and climate change in mountain areas is stronger than the global average. Since mountains are responsible for much of the world's water resources, their vegetation is a key factor in buffering large volumes of water. To determine the effects of climate change on Alpine grassland ecosystems, lysimeter measurements and stable isotope techniques can be used. The international research project ‚ClimAgro‘ aims to analyze in a comparative study how the water balance (precipitation, evaporation, infiltration, soil moisture) in Alpine grasslands is influenced by a number of factors, such as agricultural management, soil types, different climatic conditions (Northern central European climate vs. dry Inneralpine Climate) and extreme climatic events (droughts). Alpine grasslands were investigated in a garden experiment at the long term socio-ecological research (LTSER) site ‘Stubai Valley’, Tyrol, Austria, with high precision lysimeters (smart field lysimeters[®], SFL, METER Group AG, Munich). Changes in plant metabolism were reported by various isotopic response patterns of species. From the results, a better understanding of the reactions of grassland species to predicted climatic changes was obtained.

Keywords: grassland management, climate change, smart-field-lysimeter, plant water-use strategy

Introduction

Impacts of climate change on mountain areas and their vegetation are larger than the global average and pose a challenge for the agricultural management of mountain grassland to maintain forage production and other ecosystem services (Leitinger et al. 2015 and references therein). In a joint study between the Department of Ecology (University of Innsbruck), the Institute for Alpine Environment at Eurac Research (Bolzano/Bozen) and the Free University of Bolzano, the effects of changing precipitation patterns and air temperatures on water supply and grassland productivity

were examined. The research project ‘ClimAgro - *Valorization of grassland management for the water supply in context with climate change*’ addressed gradients of agricultural intensity and environmental characteristics by analysing different types of grassland ecosystems in a garden experiment at the long-term socio-ecological research (LTSER) site ‘Stubai Valley’, Tyrol, Austria (Tappeiner et al. 2013).

Materials and Methods

Analyses were performed using 24 high precision lysimeters (Smart Field lysimeters[®], SFL, METER Group AG) with

¹ Department of Ecology, University of Innsbruck, Sternwartestraße 15, A-6020 INNSBRUCK

² Institute for Alpine Environment, Eurac Research, Viale Druso 1, I-39100 BOZEN

³ Faculty of Science and Technology, Free University of Bolzano, Universitätsplatz 5, I-39100 BOZEN

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

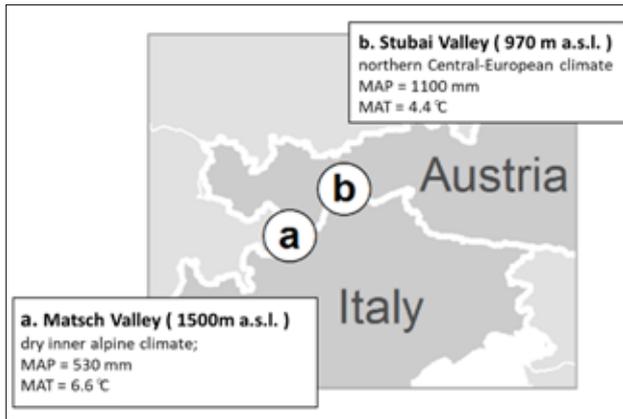


Figure 1. Location of the grassland ecosystems at the two climatically different study sites Matsch Valley and Stubai Valley.

0.3m in diameter and depth, containing soil-vegetation monoliths from two climatically different study sites (Figure 1). Isotope analysis of carbon ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) and oxygen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) of plant biomass to quantify intrinsic water use efficiency (WUE_i), photosynthetic activity and stomatal conductance of species were performed. The conceptual model of Scheidegger et al. (2000) was used to determine changes in photosynthetic activity (A_{max}) and stomatal conductance (g_s).

Results and conclusion

At species level, four patterns of isotopic reactions linked to different drought strategies identified: no reaction, sudden shutdown, water spending strategy and controlled stomatal regulation. In the drought treatment, A_{max} dropped signifi-

cantly. Stubai and Matsch Vegetation behaved very similar, with Matsch showing in general a stronger increase of WUE_i at species level with drought (*Tr1*) (Figure 2) compared to Stubai vegetation. For the control (*Ctrl*), Stubai mixed grass species revealed lower WUE_i and a more pronounced water-spending strategy than other species (i.e. *Achillea sp.* and *Trifolium sp.* as representatives for forbs and legumes, respectively).

At canopy level (lysimetry), the drought-adapted vegetation type (Matsch) showed a high potential to utilize even scarce water resources. The non-drought-adapted type (Stubai), in contrast, showed high water conductance potential. With high rates even at dry conditions, this community appears not to be optimized to save water and might experience drought effects earlier and probably more strongly.

References

Leitinger G., Ruggenthaler R., Hammerle A., Lavorel S., Schirpke U., Clement J.C., Lamarque P., Obojes N., Tappeiner U. (2015) Impact of droughts on water provision in managed alpine grasslands in two climatically different regions of the Alps. *Ecohydrology*, 8(8): 1600-1613. DOI: 10.1002/eco.1607.

Scheidegger Y., Saurer M., Bahn M., Siegwolf R. (2000) Linking stable oxygen and carbon isotopes with stomatal conductance and photosynthetic capacity: a conceptual model. *Oecologia*, 125, 350-357, DOI: 10.1007/s004420000466.

Tappeiner U., Borsdorf A., Bahn M. (2013) Long-Term Socio-ecological Research in Mountain Regions: Perspectives from the Tyrolean Alps. In: Singh SJ, Haberl H, Chertow M, Mirtl M, Schmid M (eds) Long Term Socio-Ecological Research, pp 505-525. Springer Netherlands.

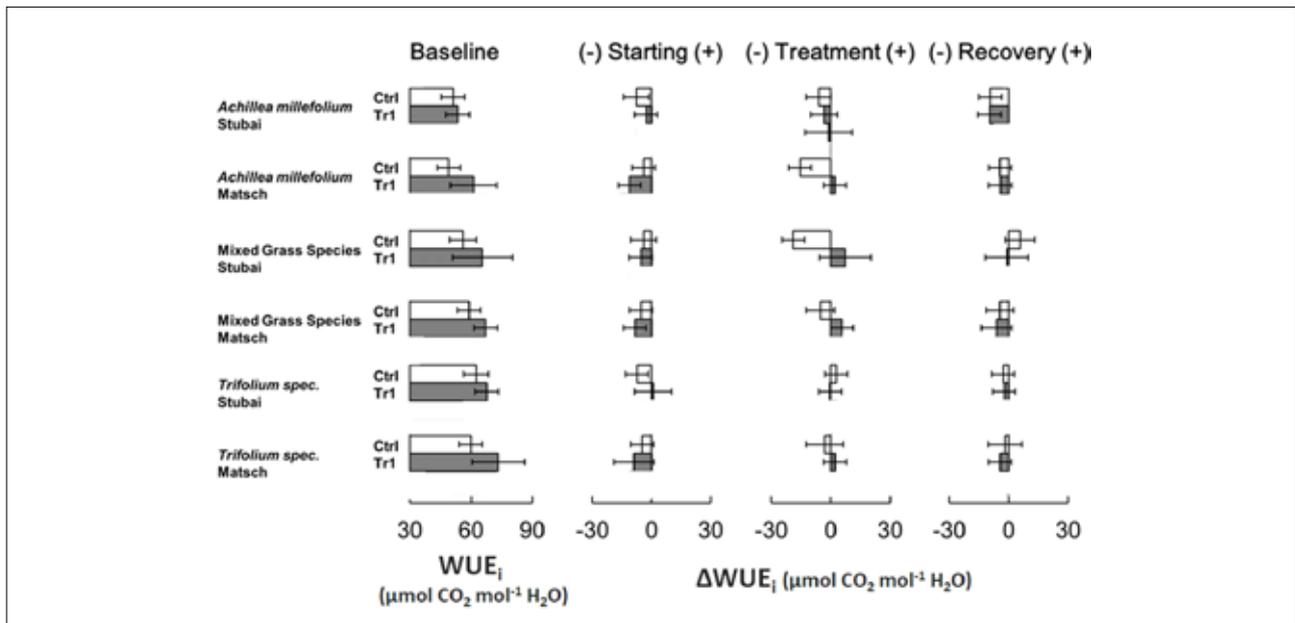


Figure 2. Intrinsic water use efficiency (WUE_i) for different species at the *Starting*-, *Treatment*-, and *Recovery*-phase of the drought experiment. *Baseline* represents WUE_i for the pre-treatment that was used to define the mean WUE_i serving as baseline for ΔWUE_i assessment for the different drought experiment phases (*Starting*, *Treatment*, *Recovery*).

Drought effects on evapotranspiration and productivity of grassland seed mixtures for dry and humid sites

Lisa Huber^{1*}, Elena Tello-García¹, Andre Peters³, Erich Tasser^{1,2} und Georg Leitinger¹

Zusammenfassung

Ein Lysimeterversuch auf dem sozio-ökologischen Langzeitforschungsstandort (LTSER) ‚Stubaital‘ in Tirol, Österreich, untersucht die Einflüsse von Trockenperioden auf alpines Grasland. In 2017 wurden Kleinlysimeter (Smart-Field-Lysimeter) mit zwei unterschiedlichen Einsaatmischungen für Grasland (Dauerwiese für trockene bzw. feuchte Lagen) bepflanzt und abwechselnd feuchten Bedingungen und Dürreperioden ausgesetzt. Bei anhaltender Trockenheit in der Wachstumsphase zeigte sich ein Rückgang sowohl der Evapotranspiration als auch der Biomasseproduktion. Wir hatten erwartet, dass sich die beiden Einsaatmischungen aufgrund der unterschiedlichen Anteile an konservativen und exploitativen Arten in ihrer Wassernutzungsstrategie unterscheiden. Die Ergebnisse zeigten allerdings keine signifikant unterschiedlichen Reaktionen der beiden Einsaatmischungen auf Dürreperioden.

Schlagwörter: Grünlandbewirtschaftung, Lysimeter, Wassernutzungsstrategie

Summary

To assess the reaction of Alpine grasslands to drought, we investigated two different types of grassland seed mixtures (permanent meadow for dry and humid sites) in a lysimeter experiment at the long term socio-ecological research (LTSER) site ‚Stubai Valley‘, Tyrol, Austria. Grassland being exposed to extended drought during growth period showed reduced evapotranspiration and reduced biomass production. Due to different proportions of species with conservative and exploitative strategies, we had expected differences in the water-use strategies of the two grassland seed mixtures. But against expectations, the two vegetation types did not differ significantly in their reaction to drought.

Keywords: grassland management, lysimeter, water-use strategy

Introduction

For the European Alps, drought events are predicted to occur more often and more severe in future (Hohenwallner et al. 2011), with the drought stress affecting the ecosystem services provision of mountain grassland including the ecosystem service ‚forage production‘ (Leitinger et al. 2015). To assess the reaction of Alpine grasslands to drought conditions, we investigated different types of grassland seed mixtures (permanent meadow ‚humid‘ and ‚dry‘) in a garden experiment at the long term socio-ecological research (LTSER) site ‚Stubai Valley‘, Tyrol, Austria (Tappeiner et al. 2013). We hypothesize the two grassland communities to reveal a difference in vegetation development and between water-saving and water-spending strategies regarding evapotranspiration due to different proportions of species with conservative and exploitative strategies in the seed mixture.

Materials and Methods

Four sheltered plots of 3.5 m x 3.5 m were established. In each plot, three high precision lysimeters (Smart Field Lysimeters[®], SFL, METER Group) with 0.3 m diameter and 0.3 m depth were installed (Figure 1).

The lysimeters were filled with the same autoclaved and standardized soils and covered with two different grassland seed mixtures (Schwarzenberger 2018): (1) permanent meadow ‚dry‘ (Type SR012, Nachsaat Dauerwiese TROCKEN) with increased share of *Festuca arundinacea*, and (2) permanent meadow ‚humid‘ (Type SR 037 Dauerwiese FEUCHT) (Table 1).

The experiment was characterized by alternating wet and drought periods (Figure 2). During the wet periods, the lysimeters on all plots were irrigated regularly and a bidirectional pumping system acted as a groundwater supplier, adjusting the water content at the lower boundary of the lysimeters to maintain a matric potential of approximately 10 kPa. During drought periods (18.05.2017 - 08.06.2017 and 07.07.2017 - 10.08.2017), the two ‚control plots‘ were provided with irrigation water mimicking long-term rainfall amounts and intensities at the site, while the two ‚drought plots‘ were not provided with any water (Figure 1). For this, irrigation was stopped and the bidirectional pumping systems were turned off to prevent water supply at the lower boundary (usually mimicking groundwater supply and/or capillary rise).

¹ Department of Ecology, University of Innsbruck, Sternwartestraße 15, A-6020 INNSBRUCK

² Institute for Alpine Environment, Eurac Research, Drususallee 1, I-39100 BOZEN

³ Institute of Geoeology, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

* Ansprechpartner: DI Lisa Huber, lisa.huber@uibk.ac.at

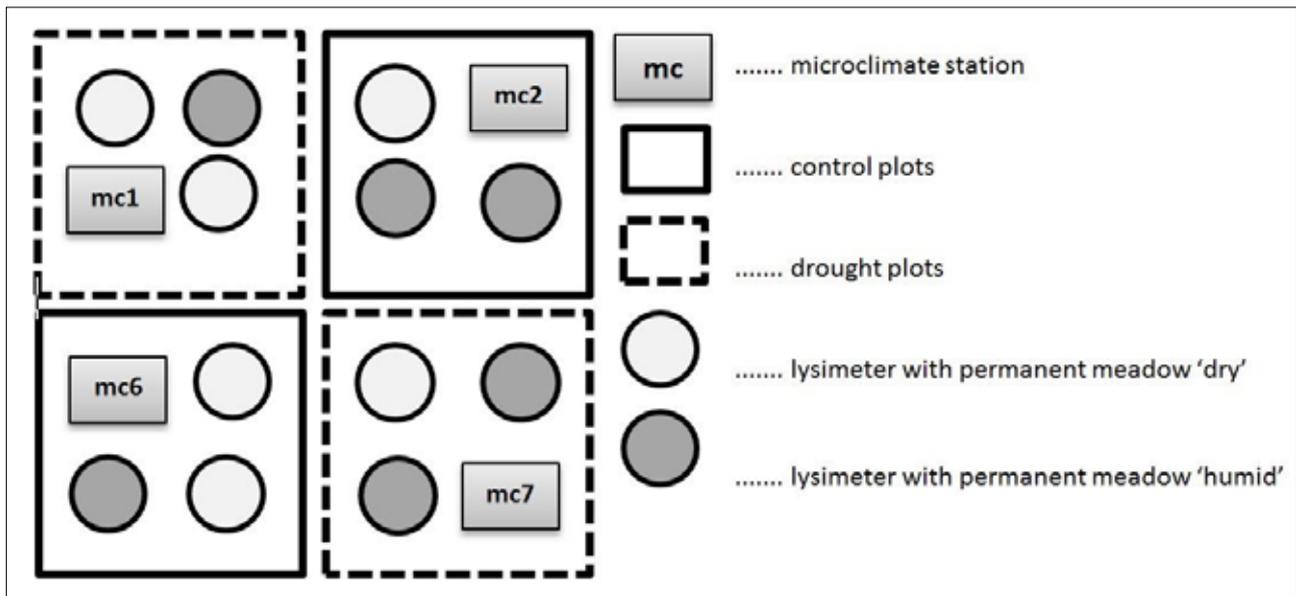


Figure 1. Experimental design of the garden experiment in Stubai Valley, Tyrol, Austria.

Table 1. Seed mixtures (%) of the grassland types 'dry' and 'humid'.

species	permanent meadow 'humid'	permanent meadow 'dry'
<i>Agrostis capillaris</i>	4.1	0.0
<i>Arrhenatherum elatius</i>	0.0	4.4
<i>Dactylis glomerata</i>	7.0	6.7
<i>Festuca arundinacea</i>	0.0	50.6
<i>Festuca pratensis</i>	18.1	2.8
<i>Festuca rubra</i>	12.0	5.0
<i>Lolium perenne</i>	13.5	6.9
<i>Lotus corniculatus</i>	2.5	0.0
<i>Medicago sativa</i>	0.0	3.9
<i>Phleum pratense</i> (variety: <i>Timothe</i>)	8.0	5.8
<i>Phleum pratense</i> (variety: <i>Wiesenfuchsschwanz</i>)	6.1	0.0
<i>Poa pratensis</i>	12.1	5.6
<i>Trifolium hybridum</i>	4.0	0.0
<i>Trifolium pratense</i>	2.5	2.8
<i>Trifolium repens</i>	6.0	5.6
<i>Trisetum flavescens</i>	4.1	0.0

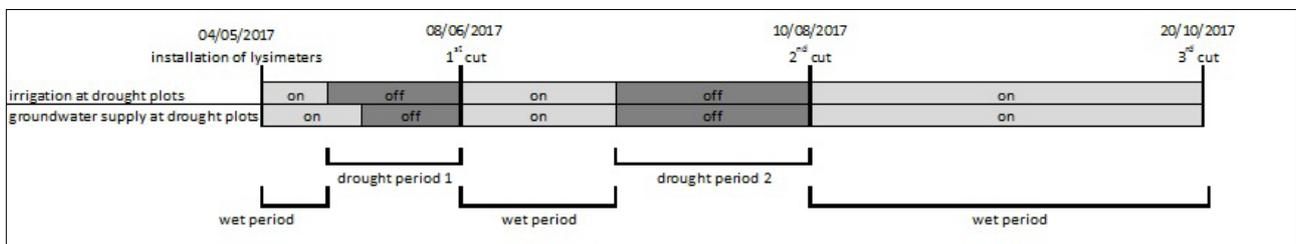


Figure 2. Time schedule of the garden experiment in 2017.

The vegetation in the lysimeters was cut at the end of every drought period to analyse biomass production and at the end of the growing season to allow comparison for the annual biomass production. The lysimeter weights, as well as soil matric potential, soil temperature and soil water content in the lysimeters were measured and logged in 1 and 10 min intervals, respectively. The evapotranspiration and seepage was estimated from the weight measurements, with data being processed and smoothed (Peters et al. 2017).

Results

During drought period 1 (21 days in May/June with the pumps being turned off at day 4, Figure 2), the matric potential at a soil depth of 15 cm remained relatively low also in the drought plots, with a maximum value of approximately pF 1.5 on the last day of treatment (Figure 3). During drought period 2 (30 days in July/August), however, the soil at 15 cm depth dried out. All lysimeters of the drought plots exceeded the mark of pF 4.2, which generally defines

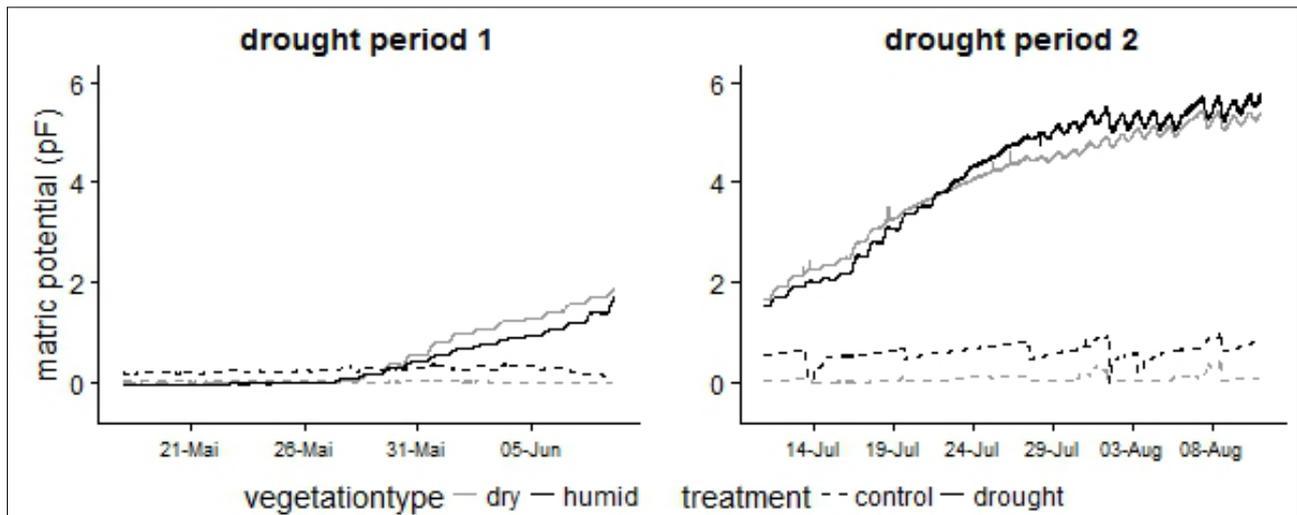


Figure 3. Mean matrix potential during drought period 1 (left) and drought period 2 (right) in 15 cm depth for all combinations of two vegetation types ('dry' and 'humid') and the two treatments (control and drought). Please note that the accuracy of the matrix potential measurements is limited above pF 4.2.

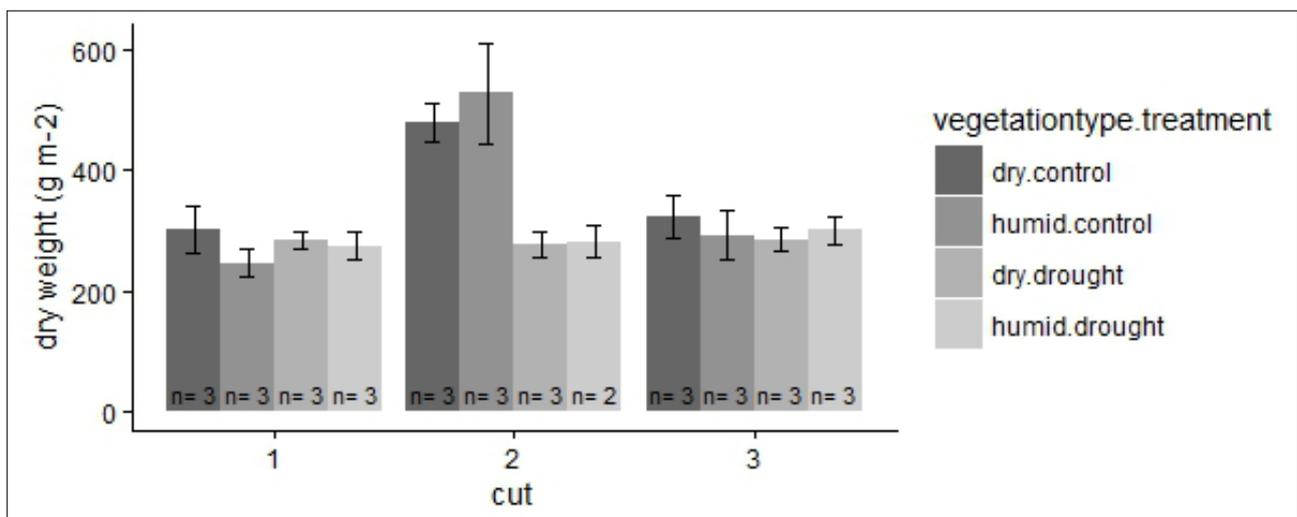


Figure 4. Mean biomass (\pm s.e.) dry weight of the cuts 1 (08.06.2017), 2 (10.08.2017) and 3 (20.10.2017) for all combinations of the two vegetation types ('dry' and 'humid') and the two treatments (control and drought).

the permanent wilting point. No statistically significant difference of the drying behaviour for the lysimeters covered with permanent meadow 'dry' and the lysimeters covered with permanent meadow 'humid' could be found.

The biomass dry weight of cut 2 (after drought period 2) showed a significant difference between control and drought treatment, but not between vegetation types ('dry' and 'humid') (Figure 4). For cut 1 and cut 3, there were no significant differences.

The total evapotranspiration during drought 1 and 2 was similar for both vegetation types 'dry' and 'humid' (46/48 mm in 17 days and 72 mm in 30 days for drought periods 1 and 2, respectively), showing no different water use strategies of the two vegetation types during drought stress (Figure 5).

Discussion

Considering the relatively high matrix potential values during drought period 1, it is not surprising that the dry

weight of above-ground biomass in cut 1 did not show any significant differences between control and drought plots. We conclude 1) that during sufficient water supply, the two vegetation types do not show differences in biomass production and 2) that after a high initial saturation of the soil a short drought period in May/June does not affect biomass production, neither of the permanent meadow 'dry' nor of the permanent meadow 'humid'.

During drought period 2, a clear drying out of the soil in the drought plots could be noticed in the matrix potential data. As a consequence, vegetation in the drought plots produced significantly less biomass than in the control plots. Our hypothesis that the water-use strategies of the two grassland communities during water stress would differ, however, could not be confirmed, as the total evapotranspiration during drought period 2 was the same for both vegetation types. Also, the same amount of above-ground biomass was produced by both vegetation types until cut 2. This finding is not in line with Frenck et al. (2018) who showed for the

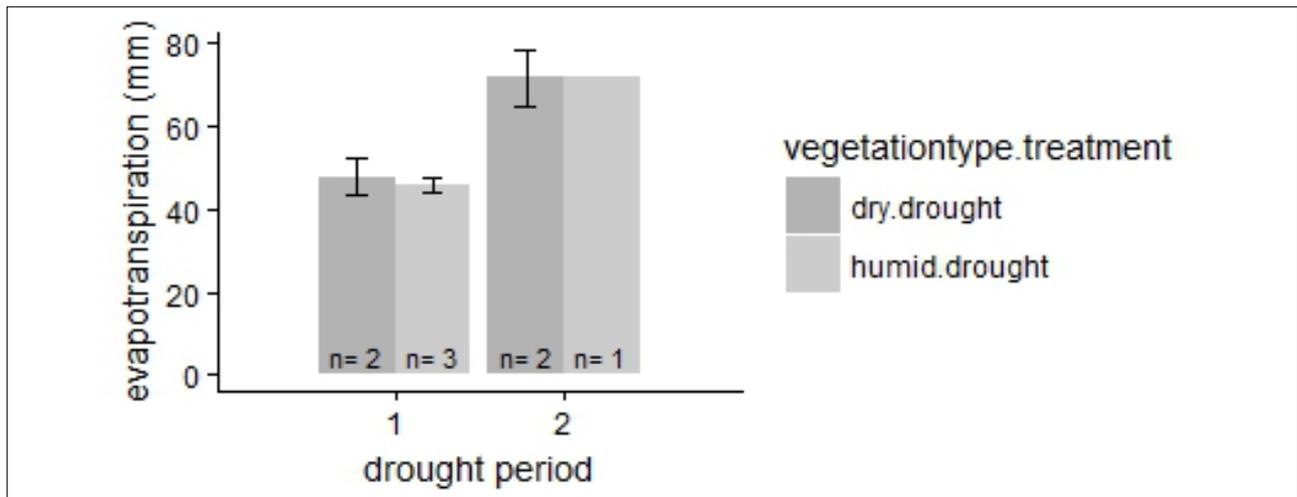


Figure 5. Mean evapotranspiration (\pm s.e.) of drought periods 1 and 2 for the two vegetation types ('dry' and 'humid') for the drought treatment.

differently drought-adapted grassland communities having a water-spending strategy (i.e., no or little reduction of transpiration during drought periods until close to the wilting point) or a water-saving strategy (i.e., continuous decrease in transpiration with decreasing plant-available water). Plant species in the 'dry' and 'humid' grassland of the seed mixtures in our study are almost the same than those determined in Frenck et al. (2018). However, vegetation composition could have changed in the course of the experiment, leading to similar behaviour of all plots. Moreover, in contrast to our experiment with seed mixtures on standardized soil, Frenck et al. (2018) did a transplantation experiment with location-specific soil monoliths and vegetation cover excavated from two field sites differing in environmental setting and climatic conditions. Therefore the differences in the plants' water use found by Frenck et al. (2018) can possibly be explained by differences in physical soil properties, ecotypes of the plant species or the mycorrhization of plant roots.

Between cut 2 and cut 3, all plots were provided with sufficient water. Both vegetation types showed a high resilience as the vegetation in the drought plots was immediately able to come back to its usual productivity in the third growth period without water stress.

Conclusion and outlook

Drought conditions during growth period reduce biomass production of both grassland communities ('dry' and 'humid') to the same extent. This is not in line with our expectations, that the seed mixtures with different proportions of exploitative and conservative species would reveal differences in their water-use strategy, and requires further investigations.

Literature

- 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(4), 1065-1078.
- Hohenwallner D., Saulnier G.M., Castaings W., Astengo A., Brenčić M., Bruno C., Carolli M., Chenut J., De Bona A., Doering M., Dutto E., Freundl G., Harum T., Holzeis F., Jamsek A., Klemenčič-Kosi S., Kopeinig C., Kozel R., Klug H., Lascours S., Maiolini B., Mignone N., Neuwirth J., Paccard P., Pascariello A., Pergher P., Poltnig W., Pušenjak M., Rampazzo R., Reszler C., Robinson C., Rollando A., Rosso M., Salvaro M., Schlamberger J., Scussel R., Siligardi M., Suetter G., Valentar V., Varolo E., Vecellio C., Wagner K., Zadavec D., Zalavari P., Zessar H., Zolezzi G. (2011) Water Management in a Changing Environment. Strategies against Water Scarcity in the Alps. University of Savoie, Chambéry, France.
- Leitinger G., Ruggenthaler R., Hammerle A., Lavorel S., Schirpke U., Clement J.-C., Lamarque P., Obojes N., Tappeiner U. (2015) Impact of droughts on water provision in managed alpine grasslands in two climatically different regions of the Alps. *Ecohydrology* 8(8), 1600-1613.
- 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.
- Schwarzenberger (2018) Schwarzenberger Samen & Gartenbedarf, Retrieved from: https://www.samens-schwarzenberger.at/downloads/datenblaetter_landwirtschaft.html.
- Tappeiner U., Borsdorf A., Bahn M. (2013) Long Term Socio-Ecological Research: Studies in Society-Nature Interactions Across Spatial and Temporal Scales. Singh, S.J., Haberl, H., Chertow, M., Mirtl, M. and Schmid, M. (eds), pp. 505-525, Springer Netherlands, Dordrecht.

50 Jahre Grundwasserlysimeteranlage Paulinenaue - ausgewählte Ergebnisse

Axel Behrendt¹*, Jürgen Pickert¹ und Frank Eulenstein¹

Zusammenfassung

Ausgewählte Ergebnisse aus 50jähriger Forschung an Grundwasserlysimetern werden mitgeteilt. Untersuchungen zur Evapotranspiration und Nährstoffdynamik hydromorpher Böden mit Gras- und Feldfutterpflanzenbewuchs nahmen den größten Umfang ein. Die Torfmineralisation in entwässerten Niedermooren wurde durch sehr aufwendige kontinuierliche Kohlendioxidmessungen analysiert.

Ursachen und Mengen von N-, P-, K-Einträgen in das Grundwasser konnten durch langjährige Lysimeteruntersuchungen ermittelt werden. Versuchsfragen der letzten Jahre waren auch die Wasser- und Nährstoffbilanzierung von nachwachsenden Rohstoffpflanzen (NAWAROs) bis hin zu Heil- und Gewürzpflanzen bei unterschiedlichen Bodenbedingungen.

Die Stickstoffverlagerung bzw. die Sickerwassergeschwindigkeit konnte mit dem Einsatz von Tracern (15 N) ermittelt werden. Weitere Themen waren die punktuelle Nährstoffbelastung bei Weidenutzung, Möglichkeiten der Einschränkung der Moormineralisation unter anderem durch Bodenverdichtung, die Renaturierung von Niedermooren mit kommunalen Abwässern und die Auswirkung auf klimarelevante Gasbildung bzw. P-Auswaschung. Auch Möglichkeiten der gezielten Vertorfung überschüssiger Biomasse und die Wirkung von Mykorrhiza auf unterschiedliche Pflanzenarten wurden untersucht.

Summary

Selected results from 50 years of research on groundwater lysimeters are reported. Investigations on evapotranspiration and nutrient dynamics of hydromorphic soils with grass and field forage vegetation were the most extensive. Peat mineralisation in drained fens was analysed by very complex continuous carbon dioxide measurements.

Causes and quantities of N, P, K inputs into the groundwater could be determined by long-term lysimeter investigations. Experimental questions of the last years were also the water and nutrient balance of renewable raw material plants (NAWAROs) up to medicinal and spice plants under different soil conditions.

The nitrogen displacement and the leachate velocity could be determined using tracers (15 N). Further topics were the punctual nutrient load during pasture use, possibilities of limiting peat mineralisation by soil compaction, the renaturation of fens with municipal waste water and the effect on climate-relevant gas formation and P leaching. Possibilities for the targeted peatification of excess biomass and the effect of mycorrhiza on different plant species were also investigated.

Einleitung

Lysimeteruntersuchungen sind unentbehrliche Bestandteile in der ganzheitlichen Betrachtungsweise von Agrarlandschaften (Schalitz 1996), die Prozesse die hier mit dem Raum-Zeit-Bezug erforscht werden, sind zwischen der Laborebene und dem landschaftsökologischen Experimentalgebiet einzuordnen. Wenn nur Laborergebnisse oder punktuelle Felduntersuchungen auf große Flächen umgerechnet werden, ergeben sich häufig unkorrekte Bilder, weil wesentliche Zusammenhänge unbeachtet bleiben. Ohne Lysimeterdaten wären Validierungen von Modellen, die zum Beispiel die Nährstoffauswaschung, Evapotranspiration oder Grundwasserneubildung von Landschaften errechnen, nicht denkbar.

Unsere Untersuchungen lassen erkennen, dass die Evapotranspiration bei der Betrachtung grundwasserbeeinflusster Standorte eine besondere Rolle spielt. Hohe Verdunstungs-

werte bedingen einen erhöhten Verbrauch an Grundwasser und damit auch einen stärkeren Nährstoffentzug aus den Agrarlandschaften. Da Gebiete mit hohem Grundwasser meist Zuflussgebiete sind (zum Beispiel die großen Urstromtäler) kommt ihnen eine bedeutende Entsorgungsfunktion zu.

Material und Methoden

Die 103 Lysimetergefäße der Lysimeterstation Paulinenaue sind Grundwasserlysimeter. Sie sind durch kreisrunde Oberflächen von 1 m² Größe gekennzeichnet und haben eine Tiefe von 1,5 m. Die verwendeten Böden umfassen Niedermoore verschiedener Mächtigkeit und Herkunft, Sand-Gleye sowie lehmige und tonige Substrate aus Flussauen. In den Lysimetern ist die Einstellung vorgegebener Grundwasserstände möglich. In Verbindung mit der Wetterstation sind der Wasserverbrauch, die chemische und biologische Zusammensetzung des abfließenden Wassers

¹ Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) - Forschungsstation Paulinenaue, Gutshof 7, D-14641 PAULINENAUE

* Ansprechpartner: Dr. Axel Behrendt, abehrendt@zalf.de

sowie anderer Parameter messbar. Weitere methodische Einzelheiten sind früheren Veröffentlichungen zu entnehmen (Behrendt et al. 1996).

Ergebnisse

Ein Schwerpunkt der Paulinenaue Lysimeteruntersuchungen war und ist die Erforschung des Evapotranspirationsverhaltens und der Nährstoffdynamik hydromorpher Böden, insbesondere der Niedermoore. Es wurde u.a. untersucht, welche Grundwasserstände einen maximalen Futterertrag ermöglichen und wie viel Wasser dazu benötigt wird (Mundel 1982). Bei Grundwasserständen um 50 cm wurden die höchsten Graserträge erzielt, dabei wurden etwa 500 mm Wasser pro Jahr verbraucht. In langjährigen Untersuchungen zur Moorrenaturierung wurden mit höheren Grundwasserständen bis Überstau und sehr massenwüchsigen, transpirationsintensiven Arten wie Schilf, Seggen oder Rohrglanzgras sogar Verdunstungswerte von über 1500 mm ermittelt (Behrendt et al. 2009).

Bei Auswertungen zur Nährstoffverlagerung im Boden bzw. zur Nährstoffauswaschung stellte sich die Evapotranspiration als ein wesentlicher Einflussfaktor dar.

Seit Anfang der 80er Jahre wurde dem Eintrag von Nitrat in das Grundwasser besondere Beachtung gewidmet (Mundel 1987).

Die praxisübliche Mineraldüngung von 20 g/m² (200 kg/ha) spielte in der Beziehung zwischen Stickstoffzug und Nitrataustrag eine untergeordnete Rolle, da in Niedermoorböden sehr große Stickstoffmengen aus der organischen Substanz freigesetzt werden.

Hohe Evapotranspirationsraten führten zu einer geringeren Nährstoffverlagerung bzw. zu einem stärkeren kapillaren Aufstieg und damit zu einem verringerten Nitrataustrag. Auch trägt die mit gesteigerter Evapotranspiration verbundene höhere Ertragsbildung durch mehr Stickstoffaufnahme zu geringeren Nitratreträgen in das Grundwasser bei.

Auf Niedermoorböden wurde mit sinkendem Grundwasserstand ein Anstieg des Nitratretrages in das Grundwasser gemessen. Besonders zwischen 70 und 100 cm kam es mit abnehmendem Grundwasserstand zu einem steilen Anstieg des Nitratretrages. Ursache hierfür ist die verstärkte Mineralisation der organischen Substanz und damit der N-Freisetzung aus dem Torf mit zunehmender Entwässerung. Moorböden mit höheren Grundwasserständen (um 30 cm) ließen bei Grünlandnutzung kaum Nitratauswaschung erkennen. Hier lagen die durchschnittlichen NO₃-N Mengen, die jährlich ausgewaschen wurden, meist unter 1 g/m² (Behrendt 1995). Erst bei lang anhaltend tiefer Entwässerung eines Niedermoors unter 100 cm wurden unter einem lückigen Rohrschwengelbestand 11,7 g/m² in das Grundwasser verlagert.

Ende der 80er Jahre traten dann Untersuchungen zum Kaliumhaushalt der Niedermoorböden stärker in den Vordergrund. Kalium unterliegt in Niedermoorböden, soweit es nicht von den Pflanzen aufgenommen wird, einer raschen Auswaschung, weil es von der organischen Bodensubstanz wegen fehlender Tonkomponenten kaum sorbiert wird. Niedermoorgrasland bindet meist in der Erntemasse fast die gesamte Jahresdüngermenge an Kalium. In hydromorphen Böden lehmig-toniger Textur treten geringere K-Verluste

auf. Der Kaliumaustrag aus Niedermoorböden erhöhte sich mit steigender Sickerwasserrate beträchtlich. Dabei nahm mit höherem Kaliumvorrat des Bodens die Kaliumkonzentration im Sickerwasser in der Tendenz zu.

Kaliumdüngungsversuche mit Niedermoorböden ergaben, dass mit höheren K-Gaben bis 300 kg K/ha die aus der Torfmineralisation freigesetzten Stickstoffmengen besser in der Graserntesubstanz gespeichert wurden und somit kaum noch Nitrat ins Grundwasser gelangte (Behrendt et al. 2017).

Die in den siebziger Jahren von Mundel (1976) durchgeführten, aufwendigen kontinuierlichen Gashaubenmessungen zur Kohlendioxidfreisetzung der Moore, gelten auch heute noch als besonders aussagekräftig für die Beschreibung der Torfmineralisation nordostdeutscher Niedermoore. Es wurden in Abhängigkeit vom Grundwasserstand 286-669 g/m² Kohlenstoff pro Jahr freigesetzt.

Mit anderen Untersuchungsmethoden zur Torfmineralisation bzw. zum Zelluloseabbau aus den 90er Jahren konnten Mundels Ergebnisse bestätigt werden. So wurde u.a. auch mit Zellulosetests bei Grundwasserständen von 80-90 cm die höchste torfzehrende biologische Aktivität nachgewiesen (Behrendt 1995).

In den letzten Jahren wurden Experimente zur technischen Vertorfung überschüssiger Biomasse in Lysimetern mit hohen Grundwasserständen durchgeführt, die zeigten, dass mit dieser Methode Kohlenstoffspeicherung bei geringen Nährstoffverlusten möglich ist (Behrendt et al. 2008).

Nachwachsende Rohstoffpflanzen wie Sudangras, Zuckerhirse, Sonnenblumen, Silphie u.a. sogenannte NAWAROs als Alternativen zu Mais wurden langjährig auch in Verbindung mit Mykorrhiza auf Ertrag und Wasserverbrauch getestet (Eulenstein et al. 2017). Es konnten insbesondere unter Wasserstressbedingungen positive Mykorrhizaeffekte nachgewiesen werden (Tauschke et al. 2015). Der Mais war in Wassereffizienz und Ertragsfähigkeit den anderen NAVARO Pflanzen überlegen (Scharschmidt 2016).

Literatur

- Behrendt A., Richter D., Eulenstein F., Pickert J. (2017) Wie beeinflusst K-Düngung von Niedermoor die Effizienz des Stickstoffs aus der Torfmineralisation - Lysimeterversuch. In: Bericht / 17. Lysimetertagung: am 9. und 10.4.2017 am LFZ Raumberg-Gumpenstein.
- Behrendt A., Mundel G., Schalitz G., Hölzel D. (2009) Die Paulinenaue Grundwasserlysimeteranlage: Entstehung, Funktion und Ergebnisse. In: 60 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue: Symposium am 27. Juni 2009 in Paulinenaue. LVL, Fachgebiet Grünland- und Futterwirtschaft, Paulinenaue, pp. 61-87.
- Behrendt A., Müller L., Schalitz G. (2008) Experiment of peat formation from grass cutting material. In: After wise use - the future of peatlands: proceedings of the 13th International Peat Congress; Tullamore, Ireland 8-13 June 2008 International Peat Society, Jyväskylä, pp. Vol. 2, 195.
- Behrendt A. (1995) Moorkundliche Untersuchungen an nordostdeutschen Niedermooren unter Berücksichtigung des Torfschwundes, ein Beitrag zur Moorerhaltung. Diss., Humboldt-Uni. zu Berlin, 170 S.
- Behrendt A., Mundel G., Schalitz G., Hölzel D. (1996) 25 Jahre Lysimeterforschung in Paulinenaue und Neukonzipierung der Untersuchungen 1992. ZALF-Bericht Nr. 26, 1996, S. 6-27.
- Eulenstein F., Tauschke M., Behrendt A., Monk J., Schindler U., Lana M., Monk S. (2017) The application of mycorrhizal fungi and organic

- fertilisers in horticultural potting soils to improve water use efficiency of crops. *Horticulturae* 3, 1, Article 8.
- Mundel G. (1976) Untersuchungen zur Torfmineralisation in Niedermooren. - *Archiv Acker-Pflanzenbau und Bodenkunde*. H. 10, 20: 669-679.
- Mundel G. (1982) Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten. 1. Mitteilung: Beziehungen zwischen meteorologischen Faktoren und Evapotranspiration. - *Archiv Acker-, Pflanzenbau und Bodenkde*. H. 8, 26: 507-513.
- Mundel G. (1987) Beziehungen zwischen dem Stickstoffentzug durch das Erntegut und dem Nitrateintrag ins Grundwasser verschiedener entwässerter Niederungsböden (Lysimeterversuche). - *Archiv Acker-, Pflanzenbau und Bodenkde*. H. 3, 31: 175-174.
- Mundel G. (1990) Kaliumvorrat und Kaliumhaushalt intensiv genutzter Niedermoorböden - Lysimeterergebnisse. - *Archiv Acker-, Pflanzenbau und Bodenkde*. H. 9, 34: 599-607.
- Schalitz G. (1996) Zum Stellenwert der Lysimeteruntersuchungen in der Agrarlandschaftsforschung. ZALF-Bericht Nr. 26, S. 3-5.
- Scharschmidt P. (2016) Einfluss unterschiedlicher Grundwasserstände auf den Nährstoffverbrauch von NAWARO-Pflanzen im Lysimeterversuch Paulinenaue. Masterarbeit, Hochschule Neubrandenburg, 98 S.
- Tauschke M., Behrendt A., Monk J., Lentzsch P., Eulenstein F., Monk S. (2015) Improving the water use efficiency of crop plants by application of mycorrhizal fungi. In: Currie, L. D., Burkitt, L. L. (eds), *Moving farm systems to improved nutrient attenuation*. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, [<http://flrc.massey.ac.nz/publications.html>], pp. 1-8.

Soil water content and EC distributions under drip fertigation of onion

Asen Nikolov^{1*}, Tsveta Moskova¹, Vera Petrova¹, Margarita Himmelbauer², Peter Cepuder²,
Reinhard Nolz², Thomas Weninger², Ivona Dimitrova¹ and Vesselin Koutev¹

Zusammenfassung

Tropfbewässerung und Fertigation sind effektive Methoden zur Steigerung der Wasser- und Nährstoffnutzungs-effizienz im Gemüseanbau in Bulgarien. Ziel der Studie war es, die erhöhte Mobilität von Nährstoffen unter solchen Bedingungen anhand von Elektrischen Leitfähigkeit (EC) -Messungen zu überprüfen. Feldstudien mit Zwiebeln wurden an schwach sauren alluvialen Böden durchgeführt: unter Verwendung von Tropfbewässerung (Kontrolle) und in Kombination mit Fertigation mit zwei Düngern KSC und Duofertil pTOP 34 + KSC. Bodenproben zur Bestimmung von Wasseranteil und die EC-Verteilung im Bodenprofil wurden genommen. Die Ergebnisse zeigten, dass Änderungen des Wasseranteiles während der Wachstumsperiode durch Bewässerungs- und Niederschlagsereignisse sowie durch die Wurzelaufnahme stark beeinflusst wurden. Zu Beginn der Saison waren die EC-Werte weitgehend mit dem niedrigen Wassergehalt und ursprünglichen Nährstoffgehalt im Boden verbunden, später jedoch hauptsächlich mit der Fertigation (Ereignisse und Dünger). Die Verteilung der löslichen Salze konnte leicht durch die EC-Messungen beurteilt werden. Daher kann man diese als geeignete Methode zur Bewertung der Nährstoffverteilung im Feld verwenden.

Schlagwörter: Gemüseanbau, Bulgarien, Tropfbewässerung, Stickstoff- und Phosphordünger

Summary

Drip irrigation and fertigation are effective methods for enhancing water and nutrient use efficiency in vegetable farming in Bulgaria. The aim of the study was to verify the increased mobility of nutrients under fertigation conditions using EC measurements as an indicator. Field study with onion was conducted on slightly acidic alluvial soils with coarse texture: using only drip irrigation (Control) and in combination with fertigation using two fertilizers (KSC and Duofertil TOP 34 + KSC). Soil samples were taken to assess soil water content and EC distributions down the profile. The results showed that soil water content changes during growth season were clearly affected by irrigation applications, precipitation events as well as by the root uptake. In the beginning of the season, the EC results were largely linked to the low water contents and nutrients with soil origins, while later on they mostly related to the fertigation treatments. The soluble salts distributions were readily assessed by the EC measurements. Hence, they can be used as appropriate method for evaluation of nutrients distribution in the field.

Keywords: vegetable farming, Bulgaria, drip irrigation, nitrogen and phosphorous fertilizers

Introduction

Under continuously changeable climate conditions, the irrigation water demand continuously increase for high-value crops such as vegetables, especially in arid areas. Soil water is considered as a one of the limiting factors for the vegetable farming in Bulgaria (Atanasova et al. 2007, Philipova et al. 2012, Tzenova & Mitova 2010). Precise irrigation can help farmers to save water while increasing productivity. The efficiency differs according to the practices and crop demands, soil and climate conditions (e.g. Nolz & Cepuder 2014, Himmelbauer et al. 2015). Drip irrigation is the most precise kind of irrigation as it provides plants with water directly at their roots with less water losses. For more efficient use of nutrients, drip fertigation is often recommended for vegetables (Hatfield et al. 2001), and different fertilizers are applicable for it (Atanasova et al. 2007). It allows more precise timing, in appropriate quan-

ties by controlling nutrient movement and losses below the rooting zone owing to the higher mobility of dissolved fertilizers (Segars 2003, Anitta Fanish & Muthukrishnan 2013). Vegetable crops generally make do with intensive fertilization, but onion does not tolerate high doses (Mitova & Dinev 2012). The main objective of this study was to verify the increased mobility of nutrients under fertigation conditions in onion using EC measurements as an indicator for their distribution in the soil profile.

Materials and methods

Field study with onion was carried out on Alluvial soils at a Research field Vrajdebna near Sofia. The fine sand of 23.3% is the dominant fraction in the soil texture; the gravel content is 37.2%. The soil is classified as non-carbonate and slightly acidic. The long-term average annual temperature is 10.6°C, the annual precipitation is 581.8 mm. The

¹ Forestry University, Sofia 10, Kliment Ohridski Bul., BG-1756 SOFIA

² Institute of Hydraulics and Rural Water Management, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Muthgasse 18, A-1190 WIEN

* Ansprechpartner: Assoc. Prof. DSc, PhD Vesselin Koutev, koutev@yahoo.com

lowest precipitation rate is usually in the period in January - March, the highest ones in May - June (stringmeteo.com, 2010). The onion was planted in Nov 2017 in four rows on a plot with of 12m length and at 10cm between bulbs. Drip irrigation system was installed to the field. AQUATRAXX 6MIL 16MM / 10CM / 1.14L / H tape drip hose was used: doubled in the middle of the plot between the 2nd and the 3rd onion rows, while the 1st and 4th were 30 cm apart of the lines. The irrigation schedule was arranged according to the growth stage and crop needs, and the climate conditions. The following fertilizers were used for the fertigation treatments: Duofertil TOP 34 (N-P-K 5-19-10 + 19SO₂ + 0.1% B + 0.1 Zn) - containing polyphosphates and KSC for vegetables (15% N, 5% P₂O₅, 35% K₂O, 0.1% B, 0.1% Fe, and 0.1% Mo). Both fertilizers were applied five times during vegetation period. In addition, nitrogen was applied at a rate of 200 kg/ha and phosphorus at 150 kg/ha. Potassium was given before onion sowing as background fertilization. The fertilization rates were fitted to the usual practice in Bulgaria (Dinev et al. 2016a, 2016b). The treatment scheme was as follows: 1. Control – no fertilizers applied; 2. with application of KSC fertilizer for vegetables; 3. with application of Duofertil TOP 34 + KSC for vegetables. Soil sampling and measurements started after the first irrigation events. The samples were collected at 0-20cm, 20-40cm and 40-60cm depths in positions: between onions rows beneath the drip irrigation line, between 1st and 2nd onion rows, and between 3rd and 4th ones. Volumetric soil water content and soil electrical conductivity (EC) were measured.

Results and discussion

Soil sampling started just after the first irrigation occasion in April, 2018, no fertigation was applied until so far. The soil water content distribution down the profile is shown in *Figure 1*. Just below the drip irrigation line, the soil water content was relatively low; while the highest values were

measured at 50cm depth and apart of the onion rows. Due to soil conditions being too dry (i.e. only 15 mm precipitations in April); the soil water content distributions were largely affected by the applied irrigation water and root uptake. Comparing to April, the soil water contents at the beginning of August (after the harvest) showed different distributions. Untypically for the season, the soil water contents were higher than in the beginning of the growing season, with the highest values in the top soil (*Figure 2*). There were many heavy rains of more than 150 mm in July. Thus, the soil water content distribution was also strongly affected by the precipitation water.

In April, the treatments 2 and 3 of the onion plot were fertigated with nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers, while the treatment 1 (Control) was just irrigated. Hence, the result of the EC distribution through the soil profile in the control indicated the presence of nutrients lone with soil origins (*Figure 3*). In the treatments 2 and 3, salts of phosphorus fertilizers showed different mobility distributions: they were clearly present (i.e. higher EC contents measured) in the areas just under the drip irrigation line (*Figure 7*), but moved laterally where only potassium was applied (*Figure 5*). The reason for that most probable was linked to the higher mobility of potassium in light soils compared to polyphosphates. In July, large rainwater amount passed through the soil profile provoking leaching of soluble salts downwards. As a result, similar EC profile distributions have been shaped in all three fertilizer treatments (*Figures 4, 6, 8*). Dissolved salts moved down with the water front, so the highest EC was observed deeper in the soil profile and laterally in the fertilized treatments (*Figure 8*).

The presented results here were obtained within one growing season. Hence, for a proper evaluation of the drip irrigation and fertigation performance, further studies and analyses are needed.

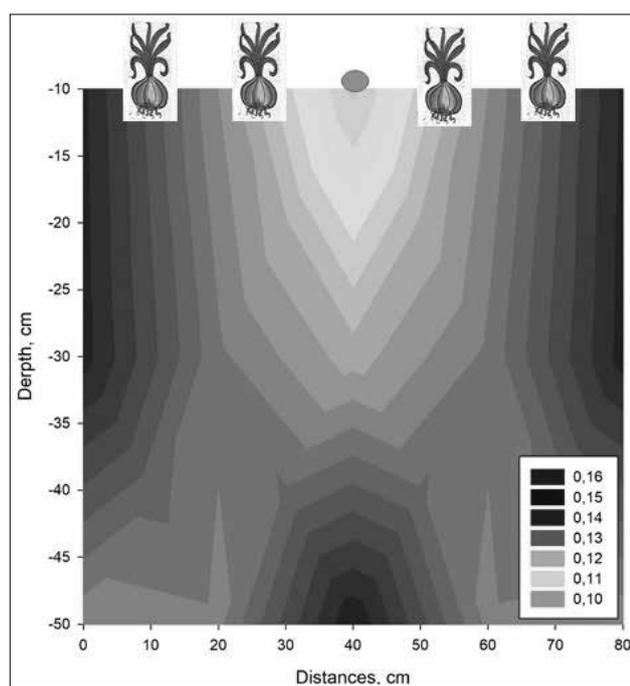


Figure 1. Soil water content after irrigation in April in m³/m³.

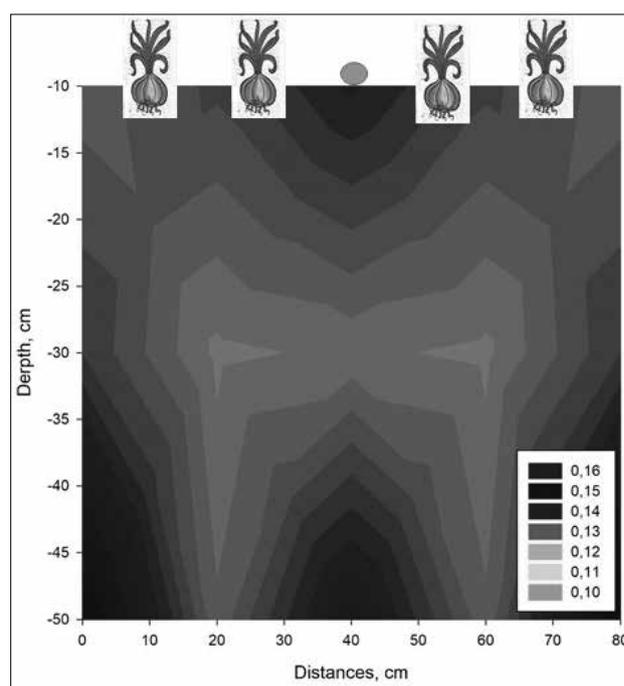


Figure 2. Soil water content after fertigation in August in m³/m³.

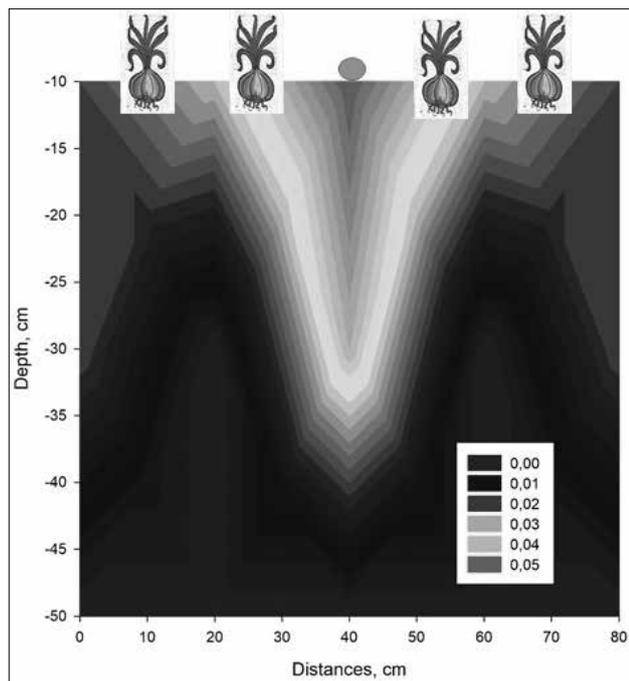


Figure 3. Soil EC in Control (treatment 1) after irrigation in April in dS/m.

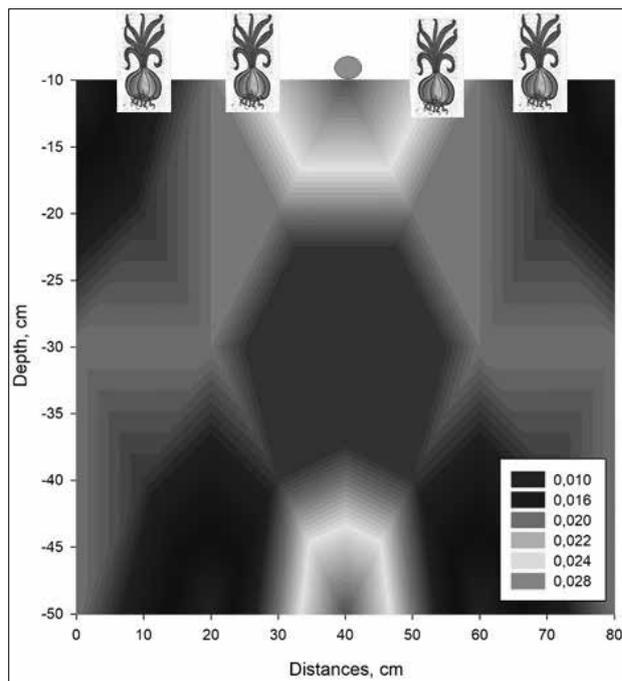


Figure 4. Soil EC in Control (treatment 1) after irrigation in August in dS/m.

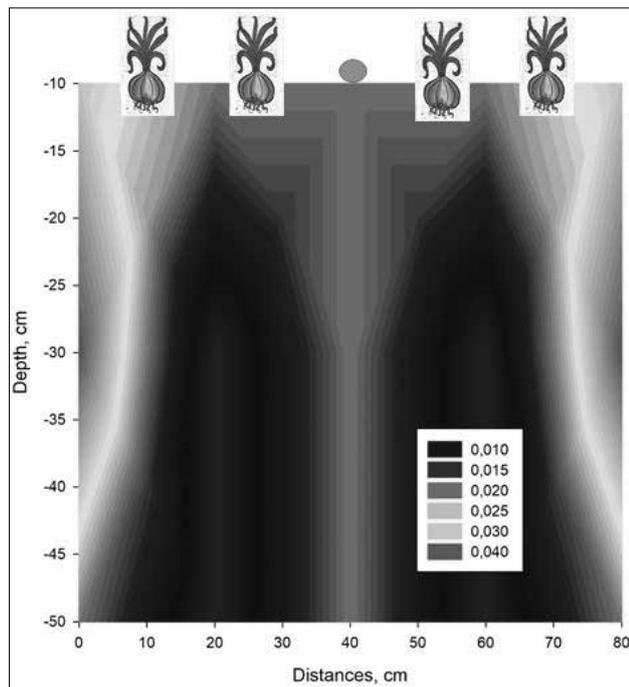


Figure 5. Soil EC in KSC treatment 2 after irrigation in April in dS/m.

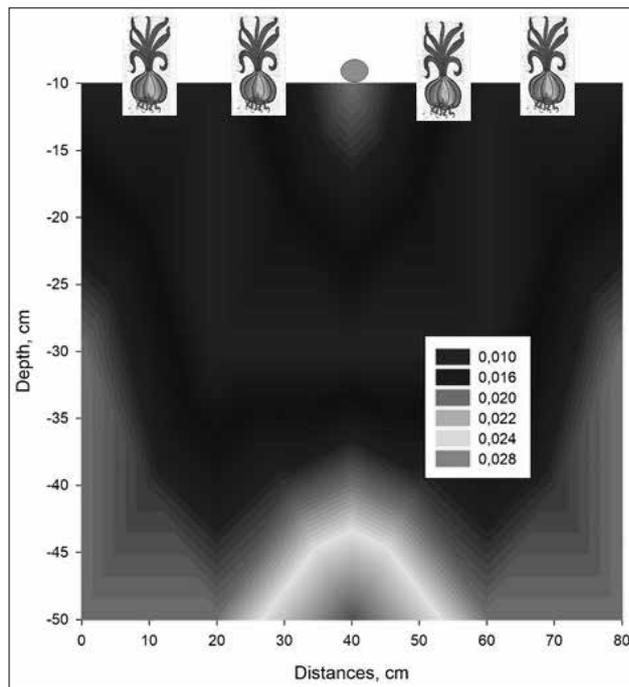


Figure 6. Soil EC in KSC treatment 2 after irrigation in August in dS/m.

Conclusions

Changes in the soil water content distribution in the soil during growth season were clearly affected by irrigation applications, precipitations events and rates as well as by the root uptake. Results for EC distribution in the soil profile in April (beginning of the growth season) largely linked to the low water contents and presence of nutrients in the soil

in the Control, and to the rate of fertilizer applications in fertilized treatments. In August, the EC content distributions were additionally affected by the irrigation events, heavy precipitations, and the type of fertigation applied accompanied by the nutrient uptake of onion roots. Measurements of the EC in soil profile are appropriate indicators of nutrients re-distribution and uptake availability to the root system of studied crops in the field.

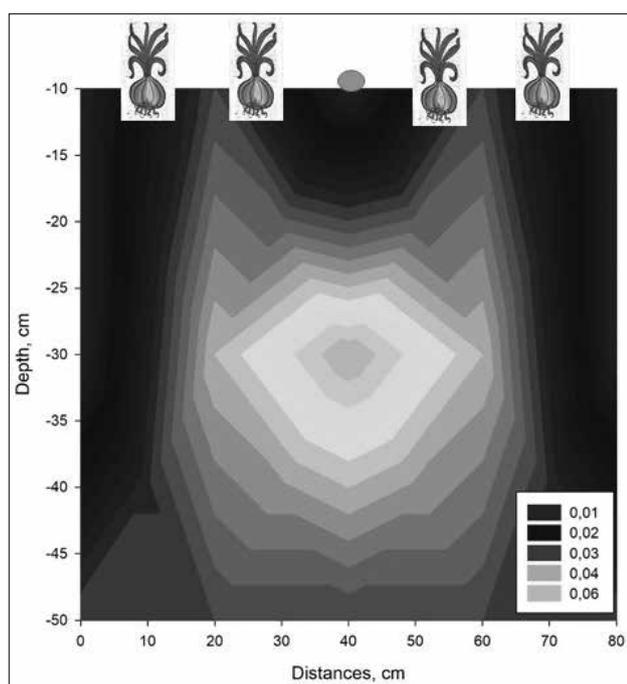


Figure 7. Soil EC in Duofertil+KSC treatment 3 after irrigation in April in dS/m.

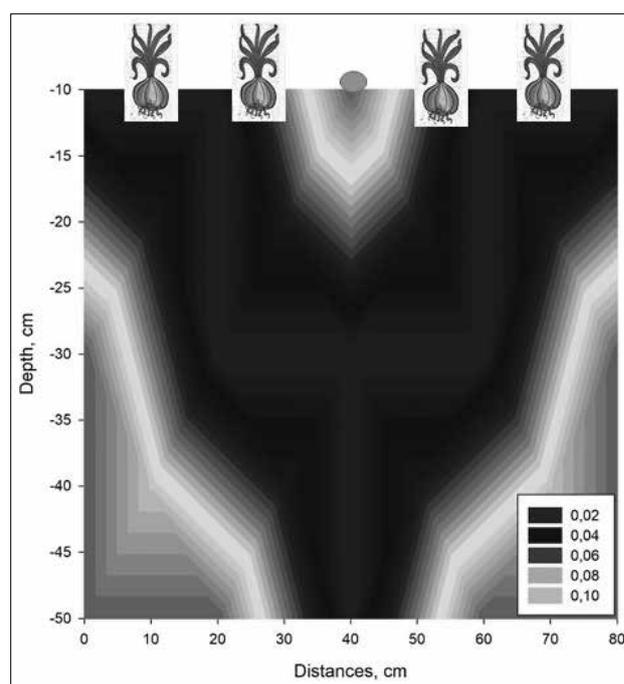


Figure 8. Soil EC in Duofertil+KSC treatment 3 after irrigation in August in dS/m.

Acknowledgment

This study has been co-financed by the National Science Fund, Bulgaria in the frame of the bilateral project OPTIMA (BG 02/2017) supported by the Programme for Scientific & Technological Cooperation between Austrian Federal Ministry of Science, Research and Economy and Bulgarian Ministry of Education and Science, National Science Fund.

References

- Anitta Fanish S., Muthukrishnan P. (2013) Nutrient Distribution under Drip Fertigation Systems. *World Journal of Agricultural Sciences* 9 (3): 277-283, 2013 ISSN 1817-3047, DOI: 10.5829/idosi.wjas.2013.9.3.2941.
- Atanasova E., Mitova I., Dimitrov I., Stancheva I. (2007) Effect of different fertilizer sources on the quality of the head cabbage. *Journal of Applied Horticulture*, 9/1 /: 74-76.
- Dinev N., Mitova I. (2012) Quality of head cabbage, late Polish production, with increasing mineral fertilization standards. *Soil Science, Agrochemistry and Ecology*, Year XLVI, No 2, 28-32.
- Dinev N., Mitova I., Vasileva V. (2016) Export of nutrients to pumpkin fruit in organic and mineral fertilization. *Fourth Nation Conf. with a foreigner participation, C.*, 8- 10.09.2016, 465-470.
- Dinev N., Mitova I., Vasileva V. (2016) Growth indicators, yield and quality of pumpkin in various forms of fertilizers. *Fourth Nation Conf. with a foreigner. Participation, C.*, 8- 10.09.2016, 455-464.
- Himmelbauer M.L., Kamps D., Nolz R. (2015) Demand-driven irrigation for biological urban gardening, Final report, BeMischBEET project. 25pp.7 pp, ISBN: 978-81-89.
- Mitova I., Dinev N. (2012) Morphological evaluation and yield in late Polish production of head cabbage. *Soil Science, Agrochemistry and Ecology*, XLVI, No 4, 86-90.
- Nolz R., Cepuder P. (2014) Testing a Semi-Automatic Irrigation Management System (SAIMS). In: *International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Securing water for food and rural community under climate change. Transactions of the 22nd ICID Congress on Irrigation and Drainage, Vol.1 - Question 58 and 59, 42.*
- Philipova N., Nitcheva O., Kazandjiev V., Chilikova M. (2012) A computer program for drip irrigation system design for small plots", *J of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 42, No. 4, pp. 3-18, ISSN: 0861-6663.
- Segars B. (2003) *Fertigation in IMC Global (ed.) Efficient fertilizer use: Manual, Fourth Edition*. Accessed at http://www.agcentral.com/imcdemo/10_fertigation.html. Brandt, Bresler A.E., Diner N., Ben-Asher I., Heller J., Goldberg D. 1971. Infiltration from a trickle source. I. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 675-682.610-18-0.
- Tzenova V., Mitova I. (2010) Influence of the soil moisture regime on the nitrogen and plastid pigments content in wheat varieties. *Journal of Environmental and Ecology*.

Simulation of the irrigation practice applied in the hobby gardens of Karcag in simple drainage lysimeters

Lúcia Sinka^{1*}, A.R. Garcia¹, Krisztina Czeller², Géza Tuba² and József Zsembeli²

Summary

Most of the vegetables have high water demand hence their production with irrigation is generally justified. Nevertheless improper irrigation may induce unfavourable processes in the soil (e.g. secondary salinization). An irrigation experiment was set in 12 simple drainage lysimeters at the lysimeter station of the Research Institute of Karcag with the basic goal to quantify the effect of the irrigation frequency and water quality on the soil and green bean. Two approaches were applied: all the lysimeters were irrigated with the same weekly amount of water, 6 with saline water, 6 with deionised water. Within both treatments 3 lysimeters were irrigated 5 times, while the other 3 two times a week. We examined the effect of irrigation on the moisture content of the soil layers at 0-10 and 20-30 cm. The soil moisture content data measured in the soil columns irrigated once a week with a higher dose showed more favourable soil moisture profile for the plants. Irrigation with saline water had negative effect on each investigated plant parameter.

Schlagwörter: irrigation frequency, soil moisture, vegetables

Introduction

In Hungary climate change severely affect agricultural production recently as the damages caused by drought are more and more frequent especially in the case of the crops that have the most important role in human nutrition. The Mediterranean character is strengthening in the Great Hungarian Plain, the frequency of weather extremes is increasing, therefore irrigation is essential for the effective production of vegetables with high water demand.

In contrast of primary salinization, secondary salinization is induced by human activities like the development of large-scale irrigation projects (Lambert et al. 2002). The effects are large changes in the natural water and salt balances of entire hydrogeological systems (Daliakopoulos et al. 2016).

The soil salinity cause by human activities is becoming a land degradation issue when soil and environmental conditions allow the concentration in soil layers to rise above a level that impacts on agricultural production, environmental health, and economic welfare, eventually evolving into a sociocultural and human health issue (Rengasamy 2006). In fact the main cause of secondary salinization is the irrigation practice often coupled with poor drainage conditions (Ghassemi et

al. 1991). However this type of salinization is restricted to irrigation in the semiarid zone, generally when the rainfall is below 700 mm, and about 110 million ha is located in this zone (Geeson et al. 2003). The impact of irrigation often extends beyond of the immediate irrigated area. Furthermore the cases of secondary salinization are spread all around the world and each case is different (Smedema 2000).

In plant production in sodic soil plant growth problems can occur including drought, compaction, nutrient deficiency, mineral toxicity, salinity, and submergence (Kemo et al. 2017). As mention previously sodic soils are generated by the accumulation of salts in the soil (Na, K, Mg, and Ca). However these physical conditions and the excess of salts delay seed germination and reduce the rate of plant growth. The plant growth can be affected by osmotic effects, specific ion effects, toxic ion effect and foliar absorption of salt constituents (Qadir & Oster 2004, Shainberg & Letey 1984).

Material and Methods

Our research work was started on the preliminary knowledge that the risk of secondary salinization is high in the hobby gardens around Karcag as the water of the aquifers used for irrigation is saline, nevertheless irrigation in the droughty periods is essential for vegetable production. We examined the possibility of a “soil friendly” optimization of irrigation if we take all these conditions given. For the scientific establishment of our examinations, we set up a complex experiment in 12 simple drainage lysimeters in the lysimeter station of the Research Institute of Karcag, Institutes for Agricultural Research and Educational Farm, University of Debrecen (RIK). The lysimeters are filled with a slightly sodic (0.06% salt content) meadow solonetz soil. The lysimeters are 150 cm deep with a drain tube at 120 cm and have a surface area of 0.8 m². Simple drainage lysimeters are very suitable to quantify the amount of salts leached from the soil column.

As the main goal of our study is the optimization of irrigation under unfavourable soil conditions (heavy textured clay soil susceptible to secondary salinization) and hydrological circumstances (saline irrigation water, high climatic water shortage), we have chosen beans (*Phaseolus vulgaris* L. var. *nanus*) as an indicator crop, which is commonly grown in the hobby gardens and has high water demand.

Regarding frequency, two typical irrigation practices are characteristic in the hobby gardens around Karcag: some hobby farmers has time to irrigate their gardens every day, while others are typical weekend farmers, they use higher

¹ Faculty of Agricultural and Food Sciences and Environmental Management, University of Debrecen

² Research Institute of Karcag, Institutes for Agricultural Research and Educational Farm, University of Debrecen, Kisújszállási út 166, H-5300 KARCAG

* Ansprechpartner: Lucia Sinka, sinkalucia@gmail.com

dosage of irrigation water, generally at the weekends only. In order to simulate these two typical irrigation practices, all the lysimeters were irrigated with the same weekly amount of water (15 litres per week), 6 with saline water (1,600 mg/l salt content), 6 with deionised water. Within both treatments 3 lysimeters were irrigated 5 times (3 litres per day), while the other 3 two times (7.5 litres per day) a week. Taking the surface area of the lysimeters into account, 1 litre of irrigation water equals 1.25 mm.

We wanted to determine the effect of the irrigation frequency and the water quality on the soil moisture profile, and through that, on the water supply of the indicator plant that can be manifested in the morphological parameters and the yields of the plants. SMT 100 sensors by Umwelt-Geräte-Technik GmbH inserted in the soil layers of 0-10 and 20-30 cm measured the soil moisture content (v/v%) and temperature (°C) with the measurement frequency of one hour. The soil moisture data were illustrated by ranking them to four water supply categories (dry, sufficient, good and wet) determined on the base of the water holding capacity of the investigated soil. Among the plant parameters average plant height (cm), average aboveground mass (g/plant), average root mass (g/plant), the number and mass of pods plant (g) were determined.

Results and Discussion

The soil moisture content values published here are the means of 6 replications as we could not figure out any differences in the water qualities: salinity have not influenced

the infiltration and percolation processes. The irrigation period in the year of 2018 started on 20th April, at the same time of the sowing of the green beans. In *Figure 1* it can be seen very well that before the start of the irrigation, the soil moisture content of all lysimeters was quite similar, the fluctuation was due to only the natural precipitation and evaporation. After starting irrigation, though all lysimeters were irrigated with the same weekly amount of water, the soil moisture content of the top soil layer (0-10 cm) was generally higher in the lysimeters irrigated 2 times a week contrary to those which were irrigated on every weekday. Taking the water supply into consideration, sufficient water supply was characteristic before the irrigation period, while by means of irrigation, good water supply category could be achieved in the summer months, especially if 2 times a week irrigation frequency was applied.

In the spring-summer period of 2018, the soil moisture stocks of the lysimeters at the depth of 20-30 cm are shown in *Figure 2*. Significant difference between the two irrigation could be figured out regarding the soil moisture content in the investigated period. Due to the fact that the same irrigation frequencies were applied in the previous year (green beans were grown as a secondary (catch) crop after sweet corn. We found that the differences between the two irrigation frequencies endured to the beginning of the next irrigation season in the deeper soil layer. Therefore the average soil moisture content was higher in the lysimeters previously irrigated 2 times a week even at the beginning of the irrigation season and remained higher at the end as well. This soil layer has more important role in the water

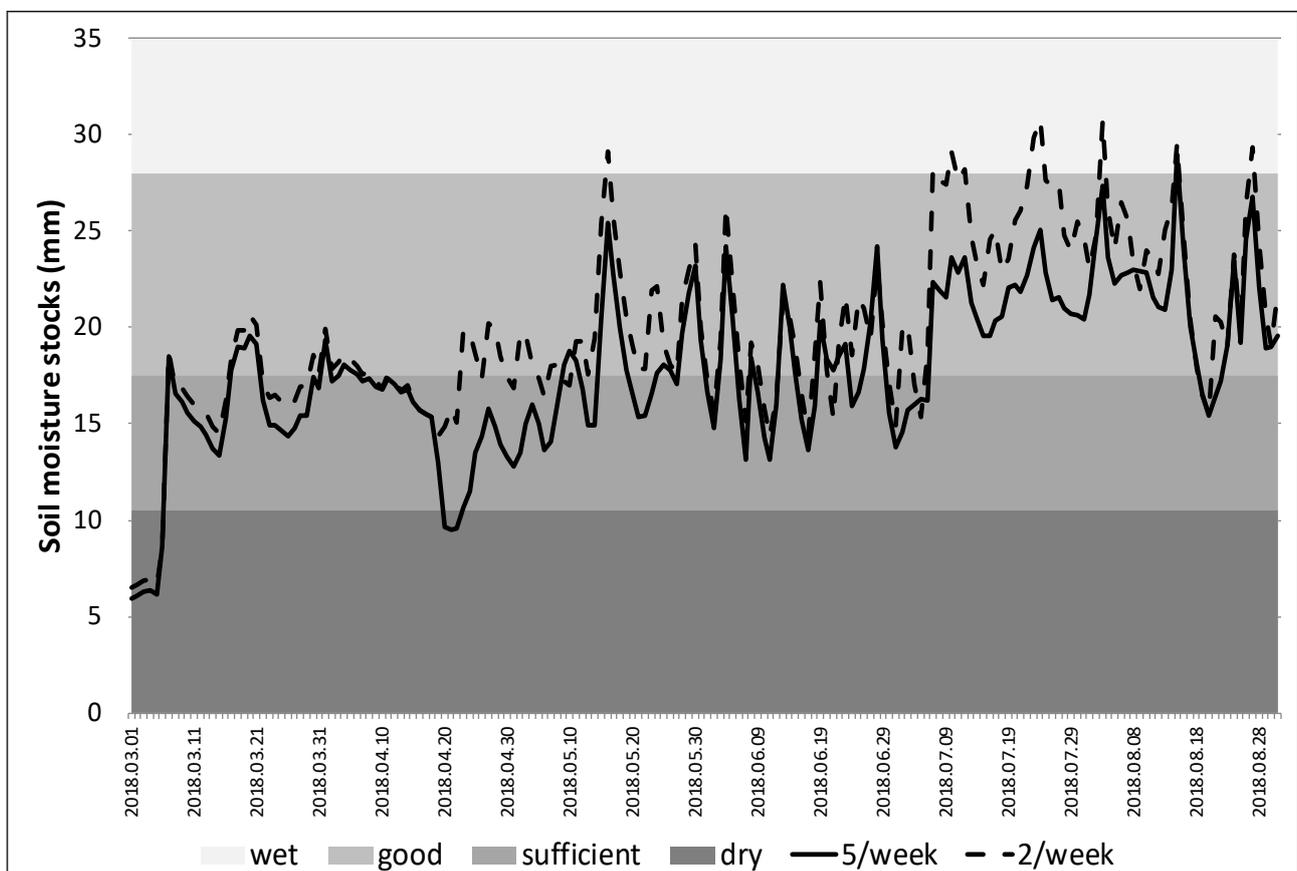


Figure 1. Effect of irrigation frequency on the soil moisture content at the depth of 0-10 cm.

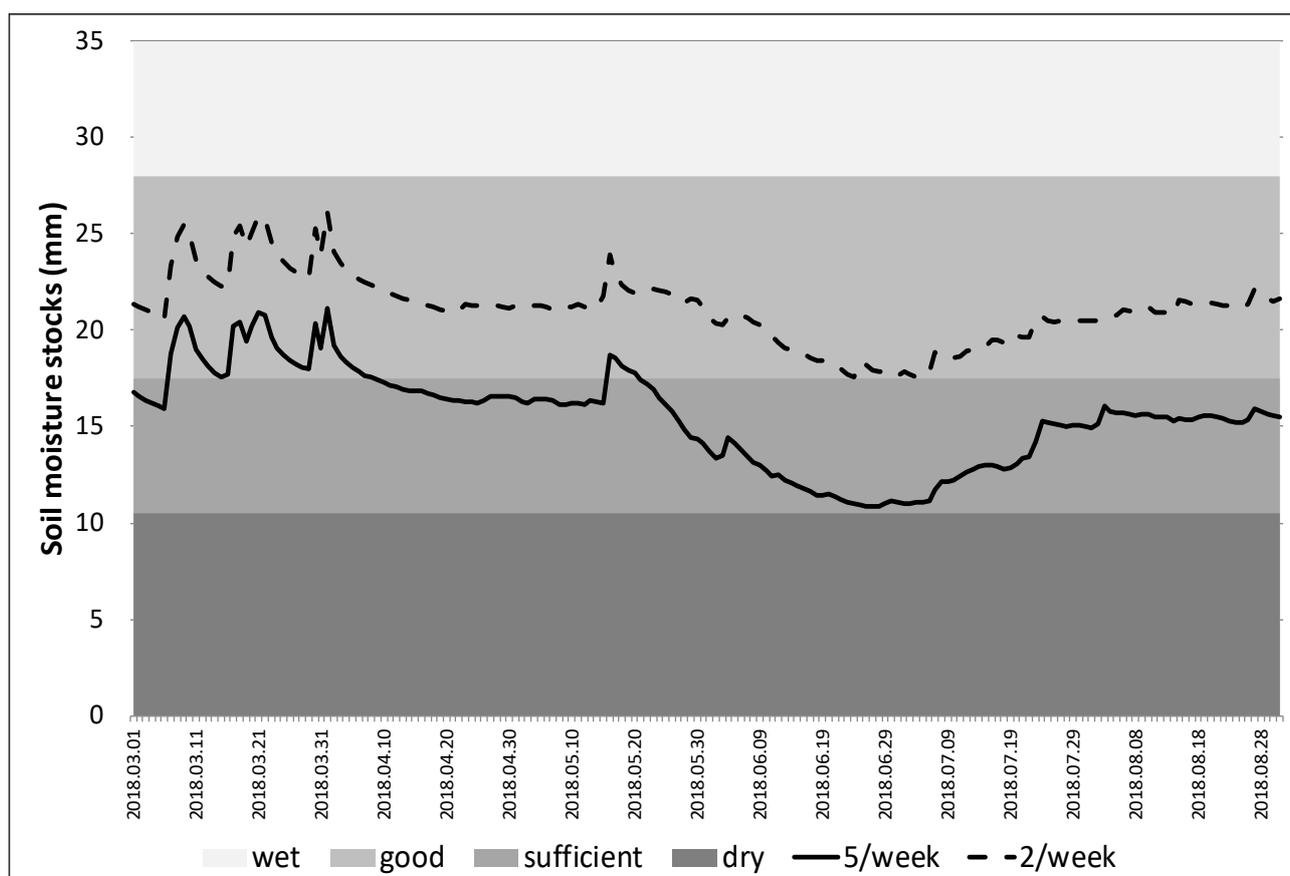


Figure 2. Effect of irrigation frequency on the soil moisture content at the depth of 20-30 cm.

supply of beans then of the surface layer as most of the roots can be found in this soil layer. Good water supply category could be maintained by the application of irrigation 2 times a week, while the daily irrigation with smaller doses kept the soil moisture only in the sufficient category.

Analysing the effect of the irrigation quality on the plant height of green beans, it can be established that the plants irrigated with deionised water were averagely 5.3 cm taller than the plants irrigated with saline water. Similar tendencies were characteristic to the average biomass (deionised: 93.5, saline: 62.5 g), the average root mass (deionised: 9.5 g, saline: 8.2 g), the number of pods (deionised: 17.1, saline: 11.9), and the pod yield (deionised: 137.9 g, saline: 85.9 g) values. The difference in neither parameters was significant regarding the irrigation frequency.

Conclusions

The soil moisture content data measured in the soil columns irrigated once a week with a higher dose showed more favourable soil moisture profile for the plants. Irrigation with saline water had negative effect on each investigated plant parameter. Applying irrigation frequency and doses optimised for the soil properties is recommended in areas with unfavourable agroecological conditions.

Acknowledgement

The research was financed by the Higher Education Institutional Excellence Programme (20428-3/2018/FEKUT-STRAT) of the Ministry of Human Capacities in Hungary,

within the framework of the 4. thematic programme of the University of Debrecen.

Literature

- Daliakopoulos I.N., Tsanis I.K., Koutroulis A., Kourgialas N.N., Varouchakis A.E., Karatzas G.P., Ritsema C.J. (2016) The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of the Total Environment* 573: 727-739.
- Geeson N.A., Brandt C.J., Thornes J.B. (2003) *Mediterranean Desertification: A Mosaic of Processes and Responses*. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 441 pp.
- Ghassemi F.A.J., Akeman J., Nix H.A. (1991) Human induced salinization and the use of quantitative methods. *Environment international*. 17: 581-594.
- Kemo J., Philip J.W., William R.W., Jianbo S., Lei S. (2017) Shaping an Optimal Soil by Root-Soil Interaction. *Trends in Plant Science*. 1581: 1-7.
- Lambert K., Sedema I., Karim S. (2002) Irrigation and salinity: a perspective review of the salinity hazards of irrigation development in the arid zone. *Irrigation and Drainage Systems* 16: 161-174.
- Qadir M., Oster J.D. (2004) Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of the Total Environment* 323: 1-19.
- Rengasamy P. (2006) World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57: 1017-1023.
- Shaingberg I., Letey J. (1984) Response of soils to Sodic and Saline Conditions. *Journal of agricultural science*. 52 (2): 1-60.
- Smedema L. (2000) *Irrigation-induced river salinization: Five major irrigated basins in the arid zone*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute 95pp.

Water use efficiency of *Miscanthus giganteus* under different irrigation doses

Krisztina Czeller^{1*}, Géza Tuba¹, Györgyi Kovács¹, Lúcia Sinka², József Zsembeli¹ and A. Percze³

Summary

The main goal of the research was to determine the water balance and its elements for *Miscanthus giganteus* in the case of different irrigation doses in an experiment set in three weighing lysimeters in the lysimeter station of Karcag Research Institute, Hungary. The lysimeters were irrigated with different doses of water: 10, 15, 20 l/week (5.88, 8.82, 11.76 mm), respectively from May to August in 2018. Beyond the height of the plant and the water balance and its components, water use efficiency index was calculated from the rate of total water input and evapotranspiration in order to characterize the differences among the irrigation treatments. We established that in each month of the investigated period the larger was the water input the highest was the evapotranspiration. The same correlation was characteristic to the height of the plants. The water use efficiency index was more favourable (lower) in the case of the higher irrigation doses.

Keywords: weighing lysimeters, water balance, evapotranspiration

Introduction

Water is essential for crop production as nutrients can be taken up by plants in water soluble forms and it is a basic material of photosynthesis too (Láng 2007). Plants need water during the whole vegetation period. The main source of water is the natural precipitation stored in the upper layers of the soil and gets available by plants. Nevertheless the spatial and temporal distribution and the amount of natural precipitation can be hectic (increasing winter-, decreasing summer precipitation, heavy rainfalls vs. long droughty periods) (Ledér 2016). One of the alternatives of the possibilities to decrease the weather risks in agriculture and ensure more effective food production is irrigation that can make agricultural production safer and more intensive.

Miscanthus giganteus is a perennial grass with high biomass potential, low nutrient demand, good frost tolerance and carbon assimilation capacity (Fogarassy 2001). It can be grown for a long time in the same plot, the duration of a plantation can be 15-25 years. It is not sensitive to the soil properties, its yield is mainly determined by the water supply and the temperature (Percze 2010). It is harvested once a year, in early spring, when its moisture content is low hence it has favourable calorific value.

The 2009/28/EU directive appropriates the increase of the rate of renewable energy up to 20% in communal energy consumption of the EU countries by 2020 in order to support the broader dissemination of renewable energy. In Hungary 14.65% green energy ratio of the total is the goal to be achieved by 2020 (Fodor 2013). In order to reach this goal, not only woody energy crops but herbaceous crops – among them *Miscanthus giganteus* – are of great importance.

Material and Methods

The main goal of the research was to determine the water balance and its elements for *Miscanthus giganteus* in the case of different irrigation doses (water supply). For that, 3 weighing lysimeters in the lysimeter station of Karcag Research Institute, Institutes for Agricultural Research and Educational Farm, University of Debrecen were used (Figure 1). The surface area of the lysimeters is 1.7 m² and their depth is 1 m. The measurement frequency was 10 minutes; the accuracy of the weighing system is 0.1 kg (equivalent water height: 0.06 mm). Seepage water was frequently collected at a bottom outlet and quantified. The amount of precipitation was measured by a rain gauge at the meteorological station. The 3 investigated lysimeters were irrigated with different doses of water: 10, 15, 20 l/week (5.88, 8.82, 11.76 mm), respectively. The investigation period lasted from May 2018 to August 2018.

The basis for quantifying precipitation (P) and evapotranspiration (ET) was a simple water balance equation with the measured quantities on the left-hand side and the (yet unknown) boundary fluxes between soil and atmosphere on the right-hand side (Eq. 1).

$$\Delta W + SW = P + I - ET \quad (1)$$

(ΔW = change of profile water content, SW = seepage water at lysimeter outlet, P = precipitation on the lysimeter, I = irrigation on the lysimeter, ET = evapotranspiration from the lysimeter; all dimensions are mm).

The Water Use Efficiency Index (WUEI) was calculated from the rate of Total Water Input (TWI) and evapotranspiration (ET): $ET/WUEI \cdot 100$ (%). This index shows whether the water balance was negative or positive, in other words if the water supply was sufficient (100% or below) for the crop, or insufficient meaning that the crop decreased the moisture stocks of the soil (Zsembeli et al. 2011).

¹ Karcag Research Institute of Institutes for Agricultural Research and Educational Farm, University of Debrecen

² Faculty of Agricultural and Food Sciences and Environmental Management, University of Debrecen

³ Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, Szent István University

* Ansprechpartner: Krisztina Czeller, czellerk@agr.unideb.hu



Figure 1. *Miscanthus giganteus* in the lysimeters in May, June, July, and August of 2018.

Table 1. Water use of *Miscanthus giganteus* with different irrigation doses in May, 2018.

Irrigation (mm)	Precipitation (mm)	TWI (mm)	Seepage water (mm)	ET (mm)	Water balance (mm)	WUEI (%)
23.53	44.90	68.43	0.00	188.25	-119.82	275.1
35.29	44.90	80.19	0.00	192.37	-112.18	239.9
47.06	44.90	91.96	0.92	201.62	-110.59	219.3

Table 2. Water use of *Miscanthus giganteus* with different irrigation doses in June, 2018.

Irrigation (mm)	Precipitation (mm)	TWI (mm)	Seepage water (mm)	ET (mm)	Water balance (mm)	WUEI (%)
23.53	55.00	78.53	0.00	98.76	-20.24	125.8
35.29	55.00	90.29	0.00	117.00	-26.71	129.6
47.06	55.00	102.06	0.00	127.59	-25.53	125.0

Table 3. Water use of *Miscanthus giganteus* with different irrigation doses in July, 2018.

Irrigation (mm)	Precipitation (mm)	TWI (mm)	Seepage water (mm)	ET (mm)	Water balance (mm)	WUEI (%)
29.41	57.30	86.71	0.00	90.89	-4.18	104.8
44.12	57.30	101.42	0.00	105.06	-3.65	103.6
58.82	57.30	116.12	0.00	119.65	-3.53	103.0

Results and Discussion

In this paper the monthly water use and its efficiency of *Miscanthus giganteus* for the period of May-August of 2018 is reported in the cases of the 3 different irrigation doses. This experiment started in 2017; the first harvest was in April, 2018.

The height of the reeds exceeded 1.5 m by the beginning of May; the plants getting the smaller amount of irrigation water were the shortest. Strongly negative water balance was characteristic to all the three lysimeters (Table 1). The highest ET values of the whole investigation period were calculated for this month, the difference among the treatments was not significant (2 and 7%). WUEIs were above 200%, all the water input was transpired by the reeds, even considerable amount of water was taken up from the original moisture content of the soil of the lysimeters. The larger was the water input the better was the water use efficiency of the reeds. The high water use was manifested in

the growth of the plants too, by the end of May the average height was above 2 m.

In June – similarly to May – the highest ET was characteristic to the lysimeter with the highest water input, though the differences among the treatments were more considerable: 29% more water was transpired from the lysimeter getting the highest dose of irrigation than the one with the lowest dose (Table 2). The WUEIs were above 100%, still negative water balance was characteristic to all treatments, though the differences were not significant.

In July the tendencies of water use were similar to the previous months, 31% more water was transpired from the lysimeter getting the highest dose of irrigation than the one with the lowest dose (Table 3). The WUEIs were just above 100%, almost all the amount of ET was covered by the natural precipitation and irrigation. The height of the reeds did not change a lot in that month, the growth was only a few centimetres, and still the reeds getting the lowest TWI were the shortest.

Table 4. Water use of *Miscanthus giganteus* with different irrigation doses in August, 2018.

Irrigation (mm)	Precipitation (mm)	TWI (mm)	Seepage water (mm)	ET (mm)	Water balance (mm)	WUEI (%)
17.65	72.20	89.85	0.00	82.85	7.00	92.2
26.47	72.20	98.67	0.00	92.73	5.94	94.0
35.29	72.20	107.49	0.00	105.61	1.88	98.2

Though ET from the lysimeters was not less intensive, in August positive water balances were characteristic; in our opinion the highest amount of rainfall of the investigated period contributed to it (Table 4). The drying of the reeds started, though they had no water deficiency.

Conclusions

On the base of the regular measurements of the water balance and its components of *Miscanthus giganteus* with different irrigation doses, we established that in each month of the investigated period the larger was the water input (10, 15, 20 l/week) the highest was the ET (469, 508, 556 mm/4months, respectively). The same correlation was characteristic to the height of the plants. In the WUEIs we found significant differences in the first and the last month of the investigation period, in total the WUEI was more favourable (lower) in the case of the higher irrigation doses (142.42%, 136.86%, 132.77% with the increasing doses). More accurate information on water use efficiency of *Miscanthus giganteus* will be available after the harvest of the reeds as we will be able to determine the total biomass in the function of ET. That index describes how much plant biomass was built up by using 1 mm of water through evapotranspiration during the investigated period.

Acknowledgement

The research was financed by the Higher Education Institutional Excellence Programme (20428-3/2018/FEKUT-STRAT) of the Ministry of Human Capacities in Hungary, within the framework of the 4. thematic programme of the University of Debrecen.

Literature

- Fodor B. (2013) Kihívások és lehetőségek a hazai megújulóenergia-szektorban – Vezetéstudomány 44. évf. 9. szám, pp. 48-61.
- Fogarassy Cs. (2001) Energianövények a szántóföldön – SZIE GTK Európai Tanulmányok Központja, Gödöllő, 144 p.
- Láng F. (2007) Növényélettan – A növényi anyagcsere I-II. – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 1034 p.
- Ledér H. (2016) A klímaváltozás hatása a felszíni vízgazdálkodásra – NAK Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, 32 p.
- Percze A. (2010) A kínai nád (*Miscanthus sinensis*) hazai termesztésének tapasztalatai – Agroforum 21. évf. 7. sz., pp. 75-78.
- 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. p. ISBN: 978-3-902559-61-6 ISSN: 1818-7722.

