

Vergleich von Lysimeter- und Szintillometerverdunstung mit Referenzverdunstungsmethoden

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

Zusammenfassung

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

Schlagwörter: Energiebilanz, Latenter Wärmestrom, Verdunstung, Grünland

Summary

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

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

Einleitung

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

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

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

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

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

Material und Methoden

Versuchsstandort

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

Lysimeter

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

Szintillometer

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



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

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

Energiebilanz

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

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

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

Referenzverdunstungsmethoden

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

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

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

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

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

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

Ergebnisse und Diskussion

Referenzverdunstung

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

Vergleich Lysimeter und Szintillometer

Energiebilanz

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

Evapotranspiration

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

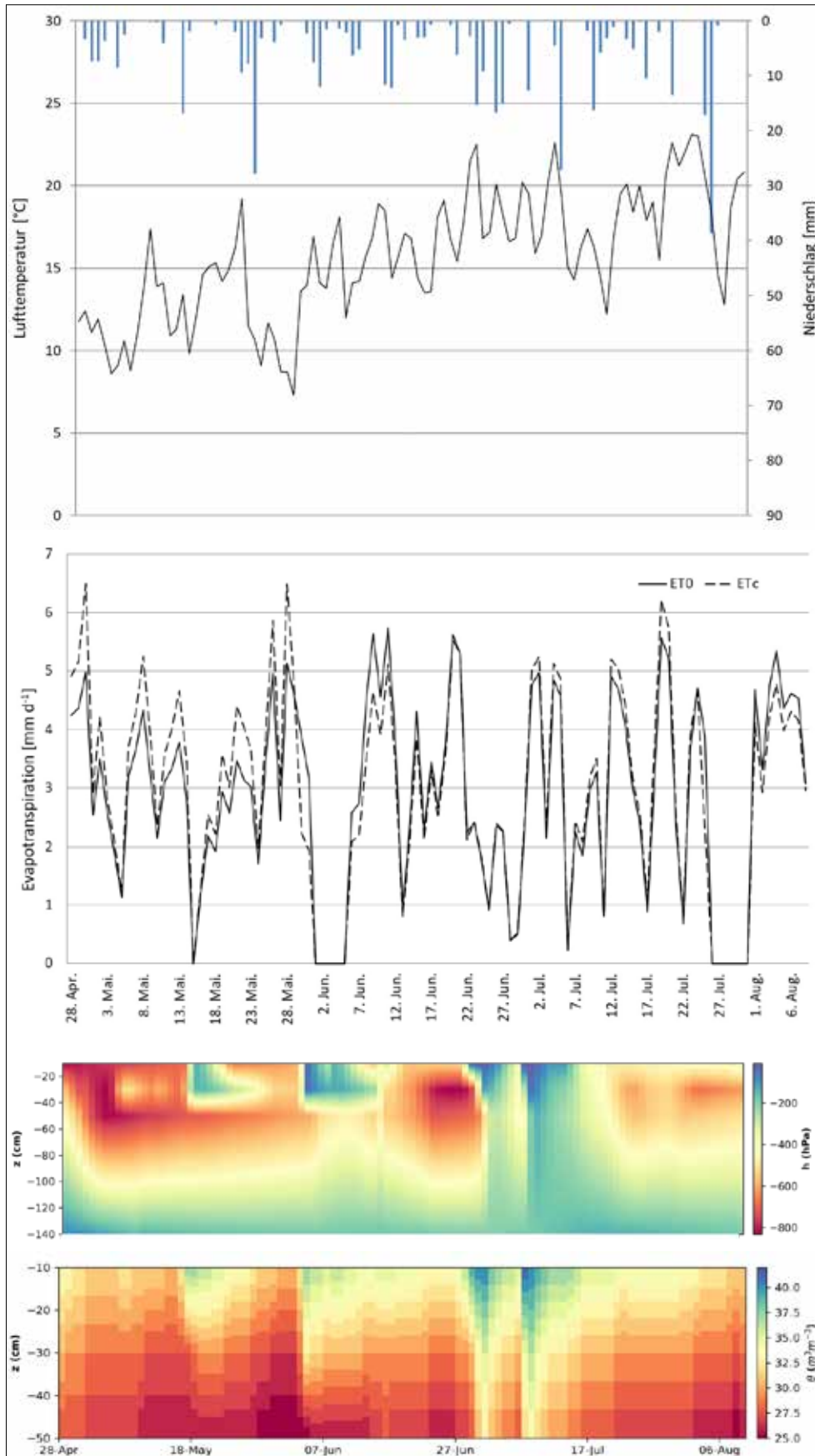
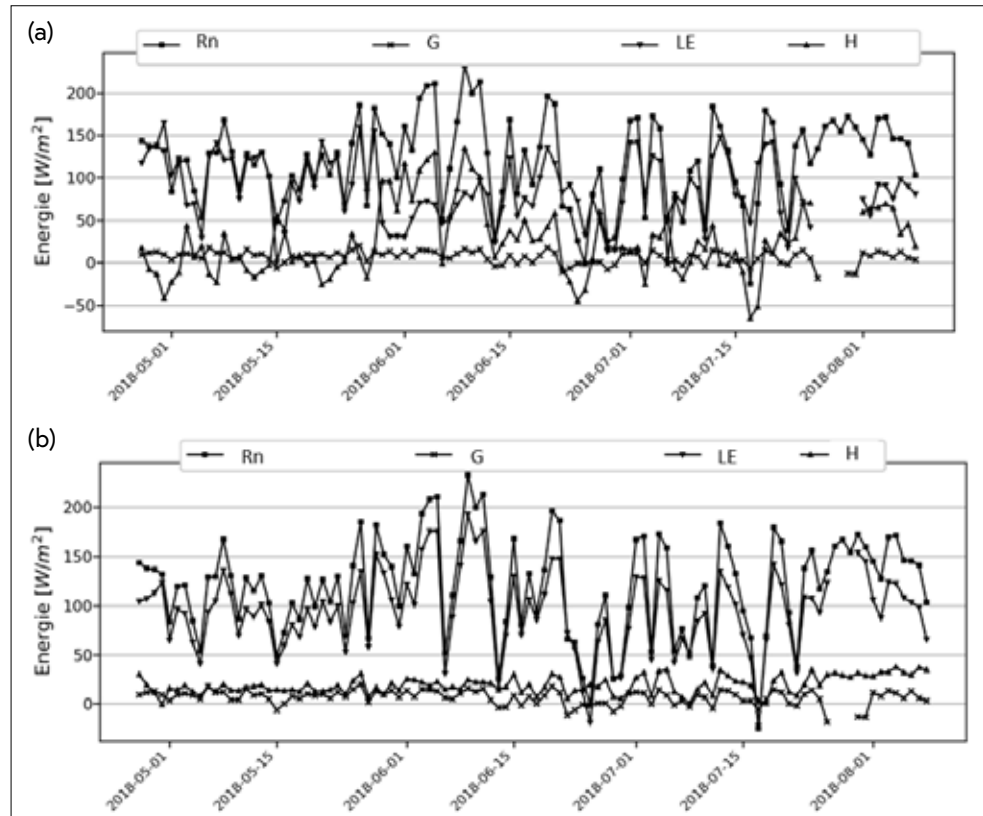


Abbildung 2: Mittlere Tages-temperatur, Niederschlags-summe, ET_0 und ET_c sowie Saug-spannung h und Bodenfeuchte θ in der Tiefe z für die Periode 28.04-08.08.2018 am Standort Raumberg-Gumpenstein.

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



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

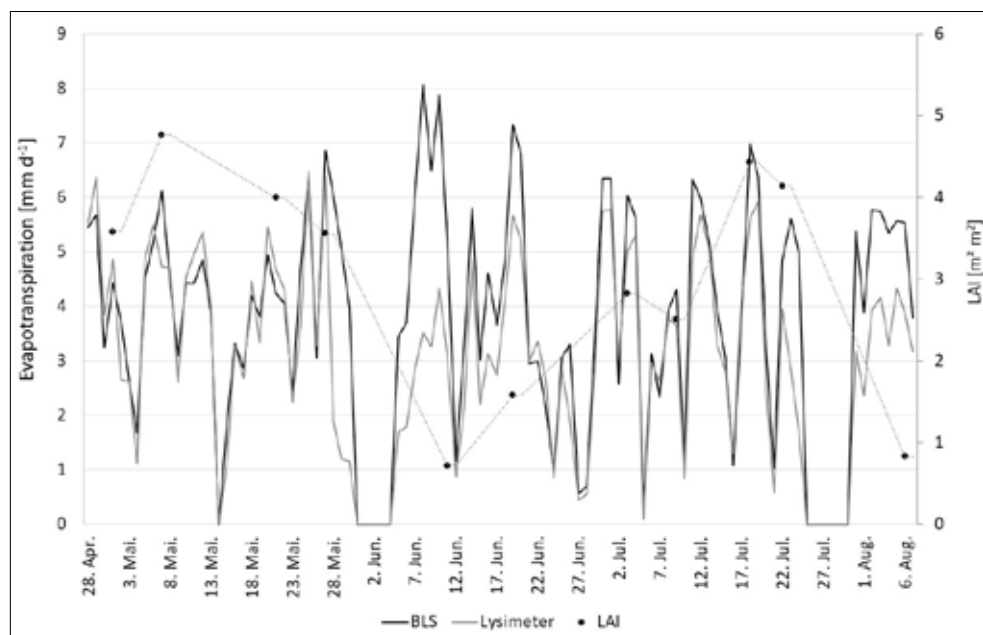


Abbildung 4: Verlauf der täglichen Evapotranspiration gemessen auf dem Lysimeter und dem Szintillometer (BLS) in der Versuchsperiode 2018.

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

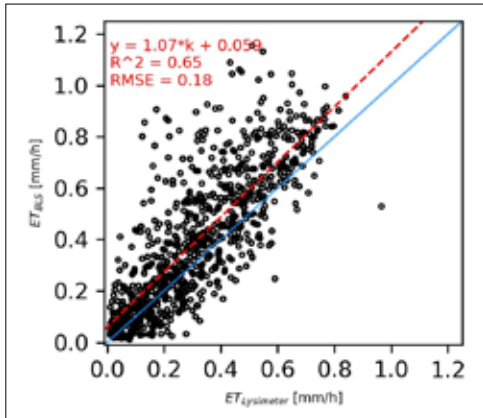


Abbildung 5: Vergleich der stündlichen Evapotranspiration gemessen auf dem Lysimeter und dem Szintillometer (BLS) in der Versuchsperiode 2018.

Vergleich Referenz- mit Lysimeter und Szintillometerverdunstung

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

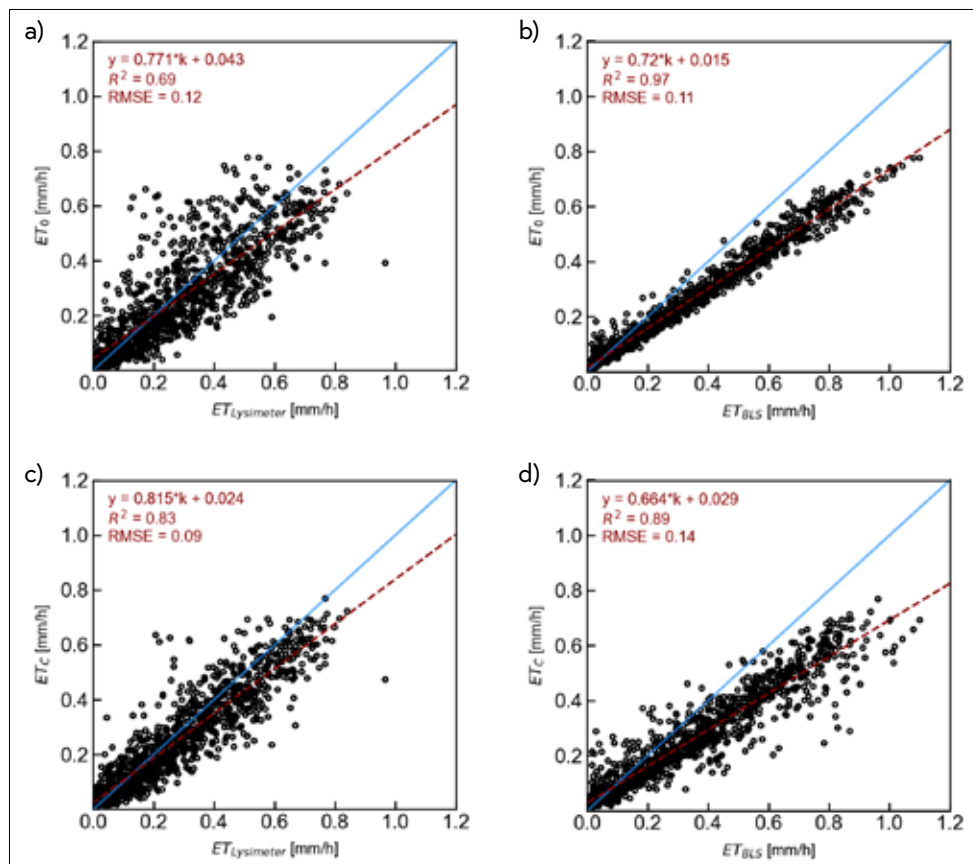


Abbildung 6: Vergleich der stündlichen Evapotranspiration gemessen auf dem Lysimeter und dem Szintillometer mit (a,b) ET_0 und (c,d) ET_c in der Versuchsperiode 2018.

Literatur

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

