

Die Gras - Referenzverdunstung: Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit von Messgeräten und Messintervall

J. FANK

Abstract

The FAO (Food and Agriculture Organization) - grass reference evapotranspiration calculated from daily weather data is commonly a basis to estimate crop evapotranspiration. This Penman-Monteith based evapotranspiration equation has been standardized by the ASCE (American Society of Civil Engineering). Parameters for calculating evapotranspiration in short time intervals have been given. Based on data of the research station in Wagna (Styria, Austria) calculated grass reference evapotranspiration using different weather data time steps are compared with measurements of grass evapotranspiration on precise weighable monolithic lysimeters. The results show, that grass reference evapotranspiration may be calculated with low uncertainty using either the FAO or the ASCE equation. For regional scaled applications the use of daily weather data may lead to reference evapotranspiration values with adequate accuracy. For validation of soil water models and for detailed evaluation of Lysimeter data it is recommended to use the ASCE equation with measuring intervals of not more than 10 minutes on the weather parameters.

Zusammenfassung

Die FAO-Gras Referenzverdunstung als Grundlage zur Ermittlung der Pflanzenverdunstung wird aus Wetterdaten berechnet, wobei üblicherweise Tageswerte meteorologischer Parameter verwendet werden um die tägliche potentielle Verdunstung eines definierten mit Gras bewachsenen Standortes zu ermitteln. Diese auf Penman-Monteith basierende Verdunstungsformel wurde von der ASCE standardisiert und Parameter für Messungen der Witterungsparameter in kurzen Intervallen angegeben. Anhand der Daten der Forschungsstation Wagna werden berechnete Gras - Referenzverdunstungswerte aus unterschiedlichen Messintervallen mit Messungen der Gras - Ver-

dunstung an Lysimetern verglichen. Als Ergebnis der Auswertungen ist festzuhalten, dass die potentielle Gras-Verdunstung anhand der verfügbaren Wetterdaten grundsätzlich mit hoher Genauigkeit berechnet werden kann. Für regionale Anwendungen sind Tagesdaten der Witterung von ausreichender Genauigkeit, um auf Grundlage der Gras Referenzverdunstung die Pflanzenverdunstung abschätzen zu können. Für Detailauswertungen an Lysimeterstandorten bzw. zur Validierung von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen wird empfohlen, auf Messungen in kurzen Intervallen zurückzugreifen. Dabei fällt in den bisherigen Auswertungen auf, dass Stundenwerte der Wetterdaten deutlich höhere Abweichungen von den Lysimeter-Messergebnissen aufweisen, als Daten aus einem Messintervall von 10 Minuten.

Einleitung und Problemstellung

Die Gras - Referenzverdunstung (ET_0) beschreibt die Verdunstung einer definierten Referenzoberfläche, die durch eine Grasbedeckung mit einer Schnittlänge von 12 cm bei optimaler Wasserversorgung angenähert wird. Die ET_0 kann aus meteorologischen Messdaten, die an Wetterstationen erfasst werden, berechnet werden. Auf Grundlage einer Vielzahl an Untersuchungen, wird heute die Verwendung der FAO (Food and Agriculture Organisation) - Penman Monteith Gleichung (ALLEN et al., 1998) zur Berechnung der Referenzverdunstung empfohlen. Dazu sind Tageswerte der Globalstrahlung, der Windgeschwindigkeit, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte erforderlich.

Durch die zunehmende Verwendung von automatisch registrierenden meteorologischen Sensoren stehen heute an vielen Messstationen Wetterdaten auch in sehr kurzen Messintervallen zur Verfügung. Seitens der ASCE (American Society of Civil Engineers) wurde eine Standardi-

sierung der FAO - Gleichung vorgenommen, wobei einerseits zwei Standardoberflächen für die Referenzverdunstung definiert und andererseits Konstante abgeleitet wurden, die es erlauben, das Berechnungsintervall der Referenzverdunstung zeitlich variabel zu gestalten. Außerdem wurden Parameter verfügbar gemacht, die die unterschiedliche Verdunstungsleistung in den Tag- und Nachtstunden berücksichtigen (WALTER et al., 2005).

IRMAK et al. (2005) verglichen die nach der ASCE - Formel berechnete Gras Referenzverdunstung unter Verwendung von stündlichen Wetterdaten mit den Ergebnissen der FAO - Gleichung auf Basis von Tages - Wetterdaten an insgesamt sieben Wetterstationen in unterschiedlichen Klimabereichen. Im humiden Bereich fanden die Autoren eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Berechnungsverfahren.

Nachdem ZENKER (2003) im Rahmen seiner Untersuchungen an Lysimetern in Berlin zum Schluss kam, dass die Abweichung zwischen den aus den Messwerten abgeleiteten und den nach FAO-Methodik ermittelten Faktoren der Pflanzenverdunstung eine entsprechende Anpassung der Berechnungsgrundlagen für unterschiedliche Klimabedingungen erforderlich macht, wird in dieser Arbeit untersucht, inwieweit unterschiedliche Messintervalle der meteorologischen Parameter die Berechnung der ET_0 unter den Klimabedingungen des südlichen Alpenvorlandes beeinflussen. Anhand der Messungen der Lysimeteranlage in Wagna (Steiermark, Österreich) können die berechneten Gras - Referenzverdunstungswerte mit gemessenen Verdunstungswerten eines Gras - Standortes verglichen werden.

Auswertemethoden und Datengrundlage

Die potentielle Verdunstung von einer Referenzoberfläche mit einem Albedowert von 0.23 kann nach Gleichung 1 aus

Autor: Dr. Johann FANK, Joanneum Research, Institut für WasserRessourcenManagement, Hydrogeologie und Geophysik, Elisabethstraße 16/II, A-8010 GRAZ, johann.fank@joanneum.at

gemessenen Wetterdaten - Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung - berechnet werden. Diese Referenzoberfläche entspricht einer gut wasserversorgten Grasoberfläche mit einer Schnitthöhe von 12 cm. Bei der Berechnung von Tageswerten ($z = 1$) kann der Bodenwärmestrom vernachlässigt werden, die Lufttemperatur- und relative Feuchte - Tagesmittel werden aus (Tagesminimum + Tagesmaximum)/2 berechnet (ALLEN et al., 1998). Bei dieser als FAO-PM-Gleichung bekannten Tagesformel liegt der aerodynamische Widerstandsbeiwert bei 70 s m^{-1} .

In der als ASCE-PM-Gleichung verfügbaren Methode zur Berechnung der Referenzverdunstung für kürzere Zeitintervalle werden Mittelwerte der meteorologischen Parameter für den Berechnungszeitschritt (z) verwendet. Der Bodenwärmestrom wird für die Nachtstunden aus $0.5 R_n$, für die Tagstunden aus $0.1 R_n$ berechnet. Der aerodynamische Widerstandsbeiwert wird für die Nachtstunden auf 0.96 , für die Tagstunden auf 0.24 gesetzt (WALTER et al., 2005).

Zur Ermittlung der Strahlungsbilanz wird von der kurzwelligen Einstrahlung, die aus der Globalstrahlung und dem Albedowert berechnet wird, die langwellige Ausstrahlung abgezogen. Diese Ausstrahlung wird aus der Temperatur, dem aktuellen Dampfdruck, der Globalstrahlung und der Solarstrahlung berechnet. Der Sättigungsdampfdruck wird aus der Temperatur, der aktuelle Dampfdruck aus der relativen Luftfeuchte berechnet. Die Berechnungsalgorithmen sind in ALLEN et al. (1998) detailliert aufgeführt.

Am Versuchsfeld Wagna liegt die teilautomatische Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), an der die meteorologischen Parameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung in Standardhöhe und Windgeschwindigkeit in 10 m über Gelände in einem Messintervall von 2 Sekunden erfasst werden. Auf einem Datensammler werden Minuten-, 10 Minuten - und 1 Stunden mittelwerte der Parameter gespeichert. Für die Berechnung der Verdunstung müssen die Windgeschwindigkeitswerte, die mittels Ultraschallsensoren gemessen werden, nach Gleichung 2 (ALLEN et al., 1998) korrigiert werden. Die relative Luftfeuchte

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900 \cdot z}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + C \cdot u_2)}$$

$ET_0 = \text{Referenzverdunstung [mm} \cdot \text{d}^{-1} \text{]}$

$\Delta = \text{Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa} \cdot \text{°C}^{-1} \text{]}$

$R_n = \text{Strahlungsbilanz an der Referenzoberfläche [MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \text{]}$

$G = \text{Bodenwärmestrom [MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{z}^{-1} \text{]}$

$\gamma = \text{Psychrometerkonstante [kPa} \cdot \text{°C}^{-1} \text{]}$

$z = \text{Berechnungszeitschritt [d]}$

$T = \text{Lufttemperatur in 2 m Höhe über Boden [°C]}$

$u_2 = \text{Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe über Boden [m} \cdot \text{s}^{-1} \text{]}$

$e_s = \text{Sättigungsdampfdruck [kPa]}$

$e_a = \text{aktueller Dampfdruck [kPa]}$

$C = \text{Aerodynamischer Widerstandsbeiwert [s} \cdot \text{m}^{-1} \text{]}$

Gleichung 1: Penman-Monteith Gleichung zur Berechnung der Referenzverdunstung

$$u_2 = wg \cdot \left(\frac{4.87}{\log(67.8 \cdot mh - 5.42)} \right)$$

$u_2 = \text{Windgeschwindigkeit in 2 m Messhöhe [m} \cdot \text{s}^{-1} \text{]}$

$wg = \text{gemessene Windgeschwindigkeit [m} \cdot \text{s}^{-1} \text{]}$

$mh = \text{Messhöhe über Boden [m]}$

Gleichung 2: Gleichung zur Korrektur der Windgeschwindigkeit auf eine Messhöhe von 2 m

wird mit einem Sensor mit einer oberen Zuverlässigkeitsgrenze von 95% erfasst.

In das Versuchsfeld Wagna ist ein präzise wägendes Monolithysimeter eingebaut, in denen die aktuelle Verdunstung eines Grasstandortes seit September 2005 in einem Messintervall von 10 Sekunden erfasst und im Datensammler als Minuten-Mittelwert gespeichert wird. Daran angeschlossen ist eine Wetterstation, installiert von der Fa. UMS - Umweltanalytische Messsysteme GmbH, an der die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit mittels Strahlensternanemometer und die Globalstrahlung in einer Messhöhe von 2 m über Boden in einem Intervall von 10 Minuten gemessen werden. Der Sensor der relativen Luftfeuchte wurde bei 30 und 97% kalibriert.

Ergebnisse

Basierend auf den meteorologischen Messdaten der ZAMG im Zeitraum Oktober 2005 bis September 2006 wurde die Gras - Referenzverdunstung für unterschiedliche Messintervalle (1 Minute , 10 Minuten , 1 Stunde) nach der ASCE-PM-Gleichung berechnet und jeweils auf Tagessummenwerte aufsum-

miert. Vergleichend dazu wurden die Tages-Verdunstungswerte aus den erforderlichen Tageswerten nach der FAO-PM-Gleichung ermittelt. Die Wiegedaten des Gras - Lysimeters wurden hinsichtlich der Tagessummen der aktuellen Verdunstung ausgewertet. Die daraus abgeleiteten Monats- und Jahressummen der Gras - Referenzverdunstung für das hydrologische Jahr Oktober 2005 bis September 2006 sind in *Tabelle 1* vergleichend dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die aus Stundenintervall bzw. auf Tageswertbasis berechneten Verdunstungswerte deutlich über den Werten aus 1 bzw. 10 -minütigem Messintervall liegen. In 10 der 12 Monate liegen die Berechnungsergebnisse aus kurzintervalligen Messungen deutlich näher den Lysimeterauswertungen. In der Jahressumme überschätzen die Stunden- bzw. Tageswertberechnungsergebnisse die Verdunstungswerte aus den Lysimetermessungen um 12 bis 15% .

In *Abbildung 1* sind die Summenlinien der Gras-Referenzverdunstung für den Monat November 2006 aus unterschiedlichen Messgeräten und aus unterschiedlichen Messintervallen vergleichend dargestellt. Klar ersichtlich ist, dass die

Tabelle 1: Monats- und Jahressummen der Gras - Referenzverdunstung nach unterschiedlichen Auswertezeitschritten im Vergleich zu den Ergebnissen der Lysimetermessungen für das Hydrologische Jahr 2005 / 2006.

Methode Intervall	1 Minute	ET ₀ - ASCE 10 Minuten	1 Stunde	ET ₀ - FAO Tagesmittel	ET _r - Lysimeter 10 Minuten
OKT 2005	29,5	29,6	37,3	34,5	26,9
NOV 2005	6,5	6,5	13,2	14,2	12,8
DEZ 2005	8,1	8,0	12,7	10,9	7,6
JÄN 2006	6,4	6,3	10,6	8,4	3,1
FEB 2006	17,6	17,5	22,1	18,9	9,5
MÄR 2006	43,4	43,3	50,6	46,4	24,4
APR 2006	59,9	60,4	71,1	70,0	61,6
MAI 2006	87,3	87,9	99,4	98,4	78,7
JUN 2006	112,1	112,2	124,0	122,9	103,7
JUL 2006	132,6	132,0	142,4	141,7	161,3
AUG 2006	75,8	76,2	86,9	88,3	77,1
SEP 2006	67,8	67,7	75,4	71,4	78,7
JAHHR	647,0	647,7	745,9	726,0	645,5

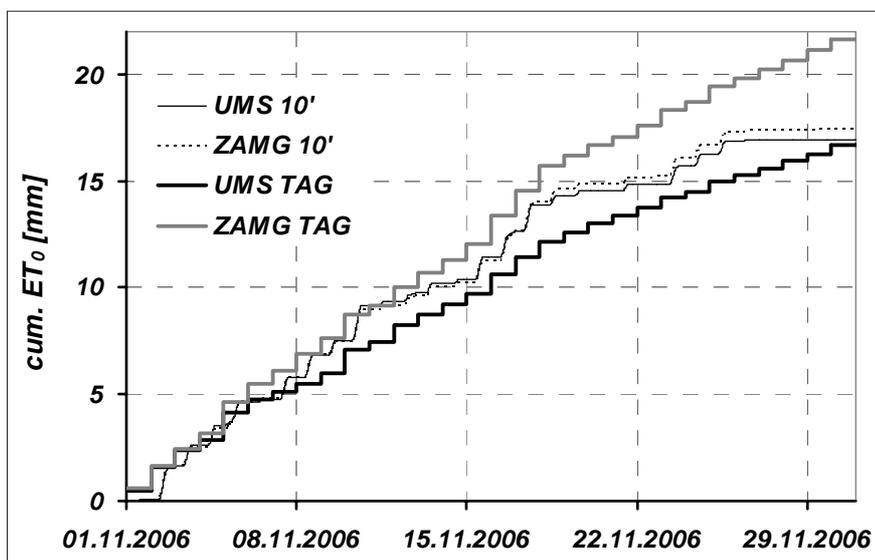


Abbildung 1: Vergleich der Summenlinien der Gras - Referenzverdunstung für November 2006 nach unterschiedlichen Auswertemethoden (FAO - PM für Tageswerte [TAG], ASCE - PM für 10 Minuten Messintervall [10']) und unterschiedlichen Messsensoren.

Summenlinien der Tagesverdunstung aus den unterschiedlichen Messsensoren im Verlauf des Monats deutlich auseinanderklaffen. Dahingegen liegen die berechneten Werte aus den 10-minütigen Messdaten sehr eng beisammen.

Die Ursache für dieses Verhalten liegt wahrscheinlich in den unterschiedlichen Messsensoren begründet: die relativen Luftfeuchte Daten der ZAMG liegen im Tagesmaximum aufgrund der Sensorcharakteristik bei ~95 % - es steht also für die Berechnung der Verdunstung immer ein wasseraufnahmefähiges Luftvolumen zur Verfügung, auch wenn die Luft bereits wassergesättigt ist. Bei den kurzintervalligen Messungen fällt dies kaum ins Gewicht, da die hohen Luft-

feuchtwerte v.a. in den Nachtstunden erreicht werden, hier aber die Verdunstung praktisch gegen Null geht. Während der Tagesstunden liegen die gemessenen Luftfeuchtwerte bei beiden Verfahren im zuverlässigen Messbereich des jeweiligen Sensors.

Zusätzlich ist festzuhalten, dass die Korrektur der Windgeschwindigkeit aus den Messungen in 10 m Höhe auf eine Messhöhe von 2 m etwas höhere Windgeschwindigkeiten ergibt als die Messungen in 2 m Höhe. Ob die Ursache dafür in einer erforderlichen Anpassung der Korrekturfunktion liegt oder beim Ultraschallsensor generell höhere Windgeschwindigkeiten aufgrund des Fehlens des Anlaufwiderstandes gemessen wer-

den, muss in der Folge noch näher untersucht werden.

Abbildung 2 zeigt Tageswerte und Tagesgänge der Gras-Referenzverdunstung und der aktuellen Gras-Verdunstung für ausgewählte Tage des Sommers 2006 in Relation zu den Tagesverläufen der Globalstrahlung aus 10-minütigen Messungen.

Aus den Darstellungen in *Abbildung 2* ist deutlich erkennbar, dass in der Vegetationsperiode die gemessene Gras-Verdunstung am Lysimeter durch die Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit Hilfe der ASCE-PM-Formel aus 10-minütigen Aufzeichnungen der Wetterdaten sowohl in ihrem Verlauf als auch in ihrer Höhe üblicherweise sehr gut abgebildet wird. Eine Ausnahme davon stellen lediglich Tage dar, in denen der Witterungsverlauf aufgrund von Niederschlagstätigkeiten stark gestört ist und die Tagesverdunstung ein niederes Niveau erreicht (07.08.2006). An Tagen mit strahlendem Sommerwetter (17.07.2006) unterschätzt die Berechnung nach der FAO-PM-Gleichung die gemessene Verdunstung geringfügig. Wird die Witterung im Tagesverlauf durch Bewölkung oder Niederschlag gestört, überschätzt die Tageswert-Berechnung die gemessenen Werte (10.07.2006, 07.08.2006). An Tagen mit durchschnittlicher Wetterentwicklung ohne Niederschlag sind die Ergebnisse aus der Lysimetermessung, der Berechnung der Gras-Referenzverdunstung aus 10-Minuten-Daten sowie aus Tageswerten in der Tagessumme nur geringfügig unterschiedlich (23.08.2006).

Schlussfolgerungen

Die bisher durchgeführten Auswertungen am Versuchsfeld Wagna lassen folgende Schlüsse zu:

- Die Berechnung der Gras-Referenzverdunstung aus Wetterdaten hat im Vergleich mit Lysimetermessungen grundsätzlich eine sehr hohe Aussagegenauigkeit.
- Das aktuell herrschende Witterungsgeschehen wird durch die Verwendung von kurz-intervalligen Messdaten zur Berechnung der Gras-Referenzverdunstung wesentlich besser abgebildet als bei Verwendung von Tageswerten
- Die Verwendung von Tageswerten der meteorologischen Daten und der Anwendung der FAO-PM-Gleichung

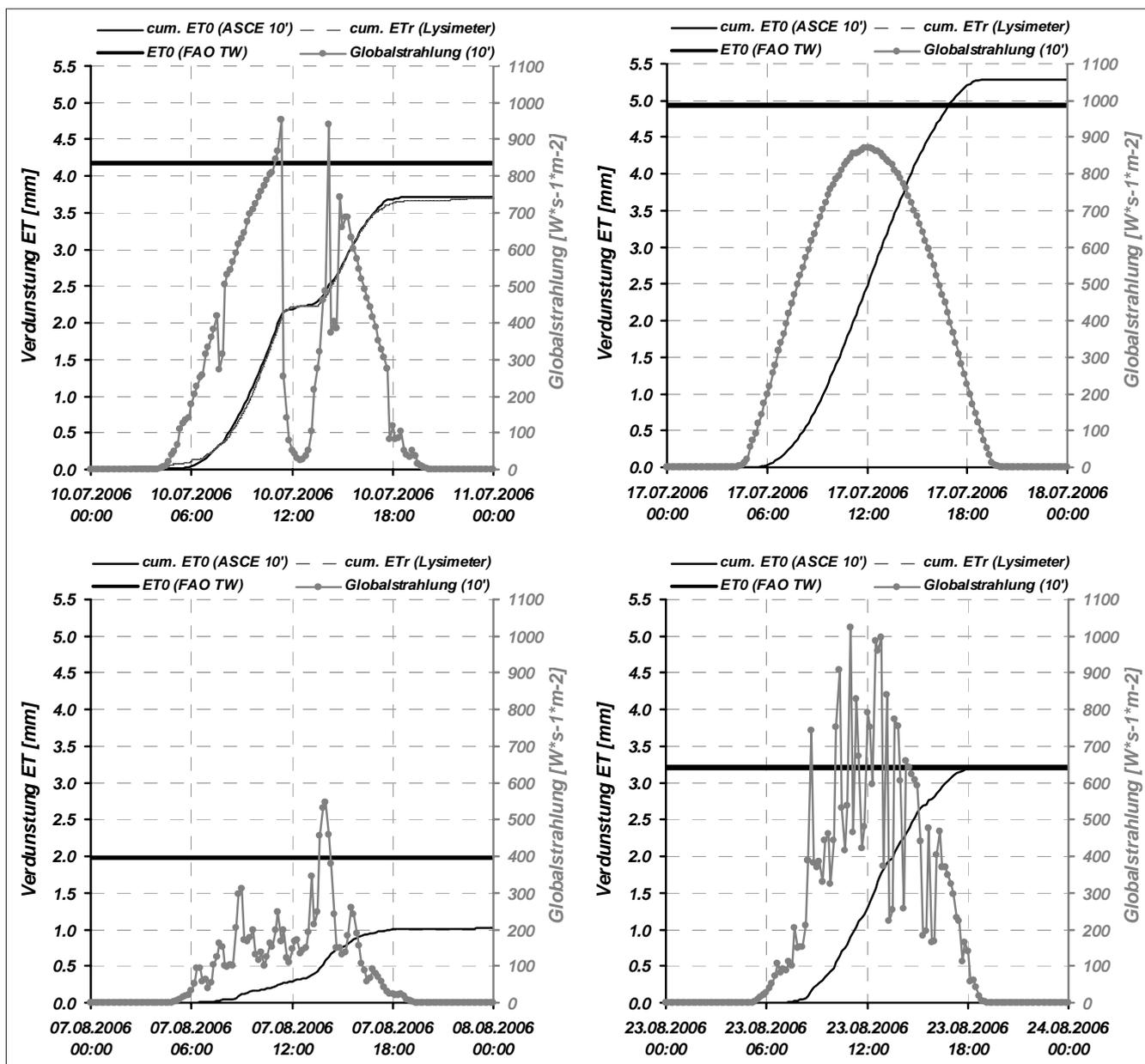


Abbildung 2: Tageswerte und Summenlinien der Gras-Referenzverdunstung aus 10-minütigen Messungen sowie der am Lysimeter gemessenen aktuellen Gras-Verdunstung im Vergleich zur gemessenen Globalstrahlung an ausgewählten Tagen im Sommer 2006.

führt im Vergleich zu Lysimetermessungen zu einer geringfügigen Überschätzung der potentiellen Evapotranspiration eines Gras-Standortes. Aufgrund der regionalen Differenzierung der Witterung, die durch das dünne Stationsnetz, an dem die relevanten Parameter gemessen werden, keinesfalls charakterisiert werden kann, erscheint für regionale Anwendungen die Verwendung von Tageswerten der meteorologischen Parameter durchaus geeignet zu sein.

- Für die Auswertung von Lysimeterdaten und die Validierung von Bodenwasserhaushaltsmodellen wird aller-

dings vorgeschlagen, meteorologische Daten aus kurzen Messintervallen (10 Minuten) für die Berechnung der Referenzverdunstung nach der ASCE-PM-Gleichung zu verwenden. Die bisherigen Auswertungen zeigen, dass die Stundenwerte eine ähnliche Überschätzung wie die Verwendung von Tageswerten nach sich ziehen.

Literatur

- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH, 1998: Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 300 S.
- IRMAK, S., T.A. HOWELL, R.G. ALLEN, J.O. PAYERO and D.L. MARTIN, 2005: Standardized ASCE Penman-Monteith: Impact of sum-of-hourly vs. 24-hour timestep computations at reference weather station sites. Transactions of the ASAE. 48(3):1063-1077.
- WALTER, I.A., R.G. ALLEN, R. ELLIOTT, D. ITENFISU, P. BROWN, M.E. JENSEN, B. MECHAM, T.A. HOWELL, R. SNYDER, S. ECHING, T. SPOFFORD, M. HATTENDORF, D. MARTIN, R.H. CUENCA and J.L. WRIGHT, 2005: The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. ASCE-EWRI Task Committee Report. 59 S.
- ZENKER, Th., 2003: Verdunstungswiderstände und Gras-Referenzverdunstung. Lysimeteruntersuchungen zum Penman-Monteith-Ansatz im Berliner Raum. Dissertation Technische Universität Berlin, 161 S.