

# Die Referenzverdunstung und ihre Anwendung in der Agrarmeteorologie

Pierluigi Calanca, Pascale Smith, Annelie Holzkämper und Christof Ammann,  
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zürich

Auskünfte: Pierluigi Calanca, E-Mail: pierluigi.calanca@art.admin.ch, Tel.+41 44 377 75 12



Blick von Norden auf das Versuchsfeld in Oensingen (gemähte Wiese mit Traktor), wo mehrjährige Verdunstungsmessungen durchgeführt wurden. (Foto: ART)

## Einleitung

Die potenzielle Verdunstung ist ein wichtiger Term des terrestrischen Wasserkreislaufes. Sie bezeichnet die maximal mögliche Verdunstung, unabhängig von der Wassermenge, die den Pflanzen tatsächlich zur Verfügung steht. Sie gilt als Indikator einer optimalen Pflanzenentwicklung und spielt für die Bewertung der Klimaeignung eine zentrale Rolle (Calanca und Holzkämper 2010). Speziell

wird sie für die Einschätzung des Bewässerungsbedarfs in der Landwirtschaft benötigt (Führer und Jasper 2009).

Eine genaue Definition der potenziellen Verdunstung ist nicht unproblematisch (Brutsaert 1982), denn das Verdunstungspotenzial hängt nicht nur von den Bedingungen in der Atmosphäre und im Boden, sondern auch von den Vegetationseigenschaften ab. Aus diesem Grund führte die Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO) in ihrem Bewässerungs- und

Entwässerungsbericht 56 (Allen *et al.* 1998)<sup>1</sup> das Konzept der Referenzverdunstung ( $ET_0$ ) ein, das heisst der Verdunstung eines idealisierten Grasbestandes (Kasten 1), dem uneingeschränkt Wasser zur Verfügung steht.

Aus der Referenzverdunstung  $ET_0$  werden in der FAO-Methode in zwei weiteren Schritten die tatsächlichen Verdunstungsverluste von Wiesen und Ackerkulturen abgeleitet. Im ersten Schritt werden Kenntnisse der Vegetationsverhältnisse (Höhe des Bestandes und Blattflächenindex) benötigt, um den sogenannten Vegetationskoeffizienten  $K_c$  zu bestimmen, und damit die Verdunstung des jeweiligen Bestandes bei gut bewässerten Bedingungen. Im zweiten Schritt wird auf der Basis einer vereinfachten Wasserbilanz der Wurzelzone eine allfällige Limitierung der Verdunstung durch Trockenheit einbezogen.

Die Berechnung von  $ET_0$  erfolgt mit Hilfe der Penman-Monteith-Gleichung (PM-Gleichung), welche in vielerlei Hinsicht als Standard gilt und von der FAO (Allen *et al.* 1998) als einzige Bestimmungsformel empfohlen wird. Dennoch bleiben empirische Ansätze in der Praxis sehr beliebt, so auch in der Schweiz, wo die Formeln von Primault (1962 u. 1981), beziehungsweise Turc (1961), von MeteoSchweiz, respektive AGROMETEO<sup>2</sup>, der internetbasierten Beratungsplattform von Agroscope, noch heute eingesetzt werden.

Empirische Bestimmungsmethoden sind bezüglich Eingangsvariablen weniger anspruchsvoll als die PM-Gleichung (siehe Kasten 2) und können durchaus gute

**Zusammenfassung**

Der Klimawandel stellt die Landwirtschaft vor neue Herausforderungen. Für die Planung von Anpassungsmassnahmen spielt die Beurteilung des Wasserbedarfs von Wiesen, Weiden und Ackerflächen – auf Grund des Verdunstungspotenzials – eine zentrale Rolle. Die Referenzverdunstung, ein Konzept, das von der Food and Agriculture Organization (FAO) in den 1990er Jahren eingeführt wurde und in dieser Arbeit vorgestellt wird, definiert das Verdunstungspotenzial einer reichlich mit Wasser versorgten Standardvegetation. Sie wird auf der Basis der so genannten Penman-Monteith-Gleichung bestimmt und kann, wie hier gezeigt, den Verlauf der unter nahezu optimalen Bedingungen beobachteten Verdunstung einer Wiese im Schweizer Mittelland sehr genau abbilden.

### Kasten 1 | Eigenschaften der Referenzoberfläche nach Allen *et al.* (1998)

Höhe des Bestandes, $h$ :	12 cm $\equiv$ 0,12 m
Blattflächenindex, LAI:	24 $h$ , mit $h$ in m $\equiv$ 2,88 m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
Albedo, $\alpha$ :	0,23 $\equiv$ 23 %
Stomatärer Widerstand $r_i$ :	100 s m <sup>-1</sup>
Oberflächenwiderstand $r_s$ :	2 $r_i$ / LAI $\equiv$ 70 s m <sup>-1</sup>
Aerodynamischer Widerstand $r_a$ :	208 / $u_2$ s m <sup>-1</sup>

<sup>1</sup> Der Bericht ist auch im Internet unter <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm> oder [www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf](http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf) verfügbar.

<sup>2</sup> <http://www.agrometeo.ch>

**Kasten 2 | Ausgewählte Formeln zur Berechnung der potenziellen Verdunstung**

Penman-Monteith:

$$ET_{PM} = \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{\Delta (R_N - G) + 86400 \frac{\rho_a C_p}{r_a} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \right\}$$

Priestley-Taylor (1972):

$$ET_{PT} = 1,26 \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_N - G) \right\}$$

Turc (1961):

$$ET_{Tu} = \frac{0,4}{30} (23,9 R_s + 50) \left( \frac{T}{T + 15} \right)$$

Primault (1962 und 1981):

$$ET_{Pr} = (1,03 - 0,01RH)(SSD + 2) j C$$

In diesen Gleichungen ist  $\lambda = 2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$  die latente Wärme der Verdunstung,  $C_p = 1,004 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  die spezifische Wärme bei konstantem Druck,  $\Delta$  ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve als Funktion der Temperatur  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) (Gleichung 3),  $\gamma$  ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) die psychrometrische Konstante (Gleichung 2),  $R_N$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) die Nettostrahlung,  $G$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) der Bodenwärmefluss,  $\rho_a$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) die Luftdichte,  $r_a$  ( $\text{s m}^{-1}$ ) der aerodynamische und  $r_c$  ( $\text{s m}^{-1}$ ) der Bestandeswiderstand,  $e_s$  ( $\text{kPa}$ ) der Sättigungs- und  $e_a$  ( $\text{kPa}$ ) der aktuelle Dampfdruck,  $R_s$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) die Globalstrahlung,  $RH$  (%) die relative Feuchte,  $SSD$  ( $\text{h d}^{-1}$ ) die Sonnenscheindauer,  $j$  (-) ein Saisonalitätsfaktor und  $C$  (-) eine Höhenkorrektur. Die numerischen Werte sind in allen Formeln so gewählt, dass für die Verdunstung Einheiten von ( $\text{mm d}^{-1}$ ) resultieren. Die Gleichung von Primault (1962 und 1981) wurde ebenso für Berechnungen auf Tagesbasis umgeschrieben.

Resultate liefern, vorausgesetzt, dass eine Anpassung der Parameterwerte an die lokalen Gegebenheiten stattgefunden hat. Problematisch ist aber ihre Anwendung ausserhalb des parametrisierten Gültigkeitsbereichs.

In dieser Arbeit möchten wir die Berechnung der Referenzverdunstung kurz erläutern und die Anwendungsmöglichkeiten darlegen. Wir zeigen, wie gut  $ET_0$ , die unter nahezu optimalen Bedingungen gemessene Verdunstung abbilden kann. Weiter diskutieren wir, inwiefern dies mit den vereinfachten Ansätzen von Priestley und Taylor (1972), Primault (1962 u. 1981) und Turc (1961) gelingt. Zum Vergleich verwenden wir Messungen der Verdunstung und der bestimmenden Variablen, die in Oensingen (Mähwiese,  $47^\circ 17' \text{N}$ ,  $07^\circ 44' \text{E}$ , 450 m über Meer, mittlere Jahrestemperatur  $9^\circ \text{C}$ , mittlerer Jahresniederschlag 1100 mm) im Rahmen unseres mehrjährigen Feldexperimentes erhoben wurden (Ammann *et al.* 2009).

Es ist nicht unsere Absicht, eine ausführliche Abhandlung der Theorie und eine vollständige Zusammenstellung von empirischen Formeln zu präsentieren. Dafür sei auf die Publikationen von Brutsaert (1982), Schrödter (1985) und Jensen *et al.* (1990) verwiesen.

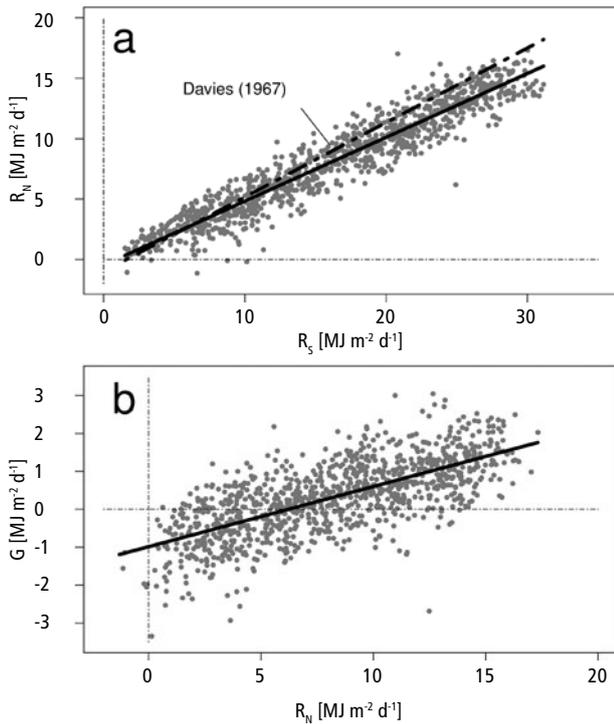
**Historischer Abriss**

Der Begriff der potenziellen Verdunstung wurde vermutlich von Thornthwaite (1948) eingeführt (Brutsaert 1982). Unter Berücksichtigung der damaligen Datenverfügbarkeit, entwickelte er eine rein empirische Formel, die noch heute in den USA bei der Überwachung von Dürreereignissen im Einsatz ist.<sup>3</sup>

Es waren aber Penman (1948) und später Monteith (1965), die die theoretischen Grundlagen für die Entwicklung einer physikalischen Berechnungsmethode lieferten. Die nach ihnen benannte PM-Gleichung (Kasten 2) stellt noch heute die Basis für die modellmässige Behandlung des Verdunstungsprozesses dar, so auch für die von der FAO entwickelte Methode (Allen *et al.* 1998). Sie berücksichtigt sowohl die durch die Energiebilanz vorgegebenen Bedingungen an der Erdoberfläche als auch die Austauschprozesse, die den Wasserdampfstrom zwischen Vegetation und Atmosphäre bestimmen.

Etwa zur gleichen Zeit publizierten Slatyer and McIlroy (1961) eine Monographie, in welcher sie den Begriff

<sup>3</sup> <http://drought.unl.edu/dm/monitor.html>



**Abb. 1** | Beziehung zwischen a) Netto- ( $R_N$ ) und Globalstrahlung ( $R_S$ ), und b) Bodenwärmefluss ( $G$ ) und Nettostrahlung in Oensingen. Beobachtete Tagesmittelwerte der Monate April bis Oktober für die Jahre 2005 bis 2009. Die durchgezogenen Linien stellen die Regressionsgeraden dar: a)  $R_N = 0,529 R_S - 0,466$ ,  $r^2 = 0,89$ ; b)  $G = 0,159 R_N - 0,987$ ,  $r^2 = 0,48$ . Zudem ist in a) die Beziehung von Davies (1976, Gl. 4) als strichpunktierte Linie eingetragen.

der Gleichgewichtsverdunstung einführen. Es handelt sich um die bei konstanter Energiezufuhr mögliche Wasserabgabe an eine Atmosphäre, die im Gleichgewicht mit ihrem Untergrund steht. Dieses Konzept lieferte eine theoretische Basis für weitere Entwicklungen, insbesondere die Untersuchungen zur Verdunstung bei minimaler Advektion von Priestley und Taylor (1972). Die von ihnen vorgeschlagene Formel (Kasten 2) hat sich sowohl in der Praxis als auch in der Forschung bewährt. Die ersten systematischen Studien zur potenziellen Verdunstung in der Schweiz gehen auf Primault (1962) zurück. Überzeugt, dass weder der Ansatz von Thornthwaite (1948) noch derjenige von Penman (1948) unter Schweizer Verhältnissen zu brauchbaren Resultaten führen<sup>4</sup>, entwickelte er eine eigene Berechnungsformel, die noch heute in leicht angepasster Form (Primault 1981), von MeteoSchweiz operationell eingesetzt wird (Kasten 2). In der Schweiz ist desweiteren auch noch die

<sup>4</sup>Primault war sich vielleicht nicht bewusst, dass die schlechten Resultate mit der Gleichung von Penman (1948) vor allem auf eine ungenügende Parametrisierung zurückzuführen waren. In der Tat aktualisierte Penman zu jener Zeit mehrmals die Parameterwerte (siehe z. B. Brutsaert, 1982)

Formel von Turc (1961) im Gebrauch (Kasten 2). Obwohl sie als empirische Gleichung gilt, kann gezeigt werden, dass sie im Prinzip eine Form der Gleichgewichtsverdunstung darstellt und somit äquivalent zur Gleichung von Priestley und Taylor (1972) ist.

### Die FAO56-Gleichung

Die PM-Gleichung (Kasten 2) kann unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Referenzoberfläche (Kasten 1), in folgende Form (FAO56) gebracht werden:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_N - G) + \gamma \frac{900}{T + 273,15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

wobei  $R_N$  die Strahlungsbilanz oder Nettostrahlung ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) bezeichnet,  $G$  den Bodenwärmefluss ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $T$  die Lufttemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $e_s$  und  $e_a$  den Sättigungs- respektive den aktuellen Dampfdruck (kPa) und  $u_2$  die Windgeschwindigkeit ( $\text{m s}^{-1}$ ). Weiter sind

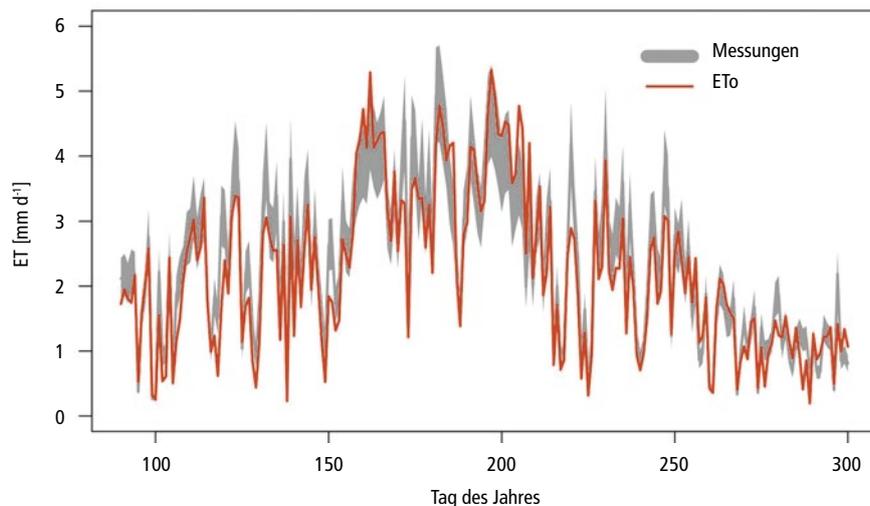
$$\gamma = \frac{C_p p}{\epsilon \lambda} \quad (2)$$

die psychrometrische Konstante ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) als Funktion des atmosphärischen Druckes  $p$  (kPa) mit Parametern  $C_p = 1,004 \times 10^{-3} \text{ MJ } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  (spezifische Wärme bei konstantem Druck),  $\epsilon = 0,622$  (Verhältnis der Molmassen von Wasserdampf und trockener Luft) und  $\lambda = 2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$  (latente Wärme der Verdampfung), sowie die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve als Funktion der Temperatur ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} \quad (3)$$

Für die Auswertung von Gleichung (1) werden Stunden- oder Tageswerte der Eingangsvariablen benötigt. Während Messungen von  $T$  (und folglich  $e_s$ ,  $e_a$ ,  $u_2$  und  $p$  in Rahmen der Messnetze von MeteoSchweiz und AGRO-METEO standardmässig erhoben werden, werden Strahlungsbilanz und Bodenwärmefluss nur selten direkt beobachtet. Dementsprechend müssen sie möglichst genau geschätzt werden, da sie typischerweise etwa zwei Drittel des Verdunstungspotenzials bestimmen.

Eine Formelsammlung für die Berechnung von  $R_N$  und  $G$  aus Wetterstationsdaten findet man ebenfalls in Allen et al. (1998). Aus der Perspektive der Praxis wären aber einfachere Verfahren wünschenswert. Für die Bestimmung von  $R_N$  bietet sich in erster Linie der Ansatz von Davies (1967) an, der – beschränkt auf die Vegetationszeit – einen vom Klima unabhängigen linearen Zusammenhang zwischen Globalstrahlung  $R_S$  und Nettostrahlung  $R_N$  postulierte. Der Grund für die Linearität ist darin zu suchen, dass die langwelligen Strahlungsflüsse (als Funk-



**Abb. 2** | Verlauf der täglichen Verdunstung am Standort Oensingen in der Zeit von April bis Oktober 2006. Grau: Beobachtungsbereich unter Annahme einer relativen Unsicherheit der Messungen von  $\pm 15\%$ ; rot: Referenzverdunstung.

tion der vierten Potenz der absoluten Temperatur) zeitlich viel weniger stark variieren als die kurzweilige Einstrahlung. Auch kann die Albedo einer grasbedeckten Oberfläche unter schneefreien Bedingungen als relativ konstant betrachtet werden.

Basierend auf Daten von 14 Stationen weltweit und umgerechnet in Einheiten von ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) schlug Davies (1967) folgende Gleichung vor:

$$R_N = 0,617 R_S - 1,004 \quad (4)$$

welche in dieser Form die im Schweizer Mittelland beobachtete Beziehung am Standort Oensingen recht gut wiedergibt (Abb. 1a). Eine bessere Übereinstimmung kann durch Anpassung der Regressionsparameter an lokale oder regionale Messdaten erreicht werden ( $R_N = 0,529 R_S - 0,466$ ,  $r^2 = 0,89$ ), was ebenfalls in Abb. 1a zu sehen ist.

Bezüglich des Bodenwärmeflusses empfehlen Allen *et al.* (1998) bei Bestimmung von  $ET_0$  auf Tagesbasis  $G$  gleich Null zu setzen, was sich dadurch begründen lässt, dass der Wärmestrom zwischen Tag und Nacht in entgegengesetzte Richtungen fließt und es so zu einem Ausgleich kommt. Die Daten von Oensingen zeigen jedoch, dass es sinnvoller ist,  $G$  als lineare Funktion von  $R_N$  auszudrücken (Abb. 1b). Die entsprechende Regressionsgerade ( $G = 0,159 R_N - 0,987$ ,  $r^2 = 0,48$ ) ist mit der in der Mikroklimatologie oft benutzten Faustregel  $G \approx 0,1 R_N$  weitgehend konsistent.

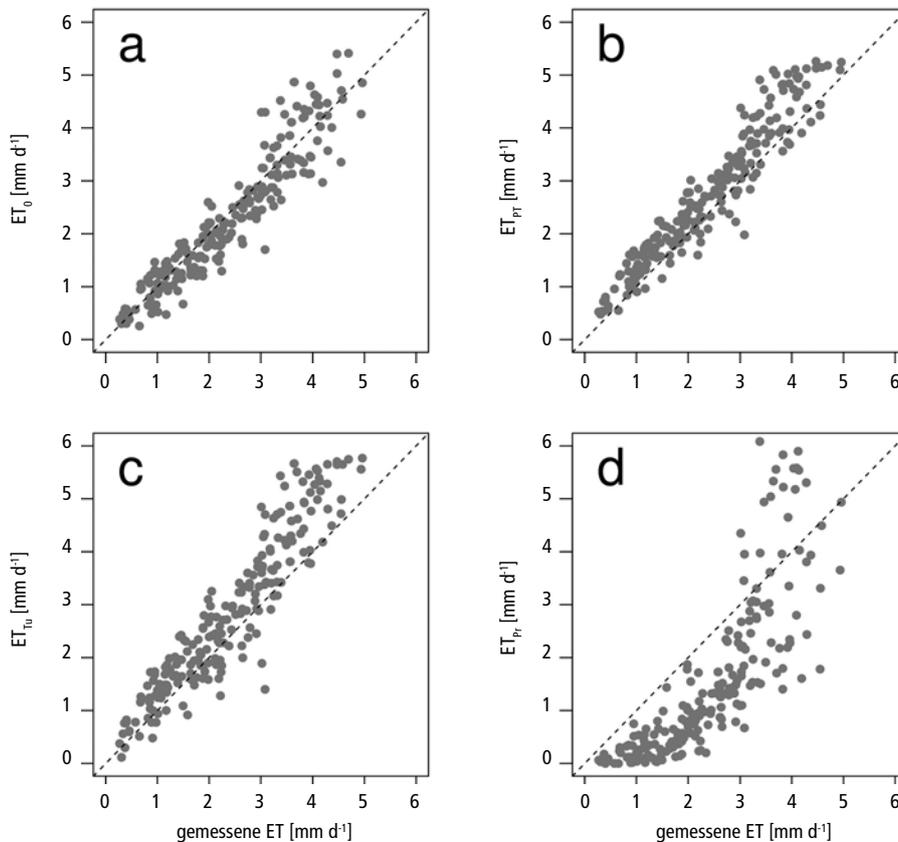
## Methode

### Evaluation

Wir haben Gleichung (1) getestet, indem wir die berechneten  $ET_0$ -Werte mit Messungen der aktuellen Verdunstung am Standort Oensingen verglichen haben (Abb. 2). Es handelt sich um Daten für das Jahr 2006, die mit Hilfe der sogenannten Eddy-Kovarianz-Technik (Neftel *et al.* 2005) erhoben wurden, und mit einem relativen Fehler von zirka 15% behaftet sind.

Die Wahl des Jahres 2006 lässt sich zum einen dadurch begründen, dass in diesem Jahr praktisch über die gesamte Vegetationsperiode hinweg nahezu optimale Bodenfeuchteverhältnisse herrschten und die Umweltbedingungen somit jenen der Definition der Referenzverdunstung entsprachen. Ausserdem war der Blattflächenindex selten höher als  $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , das heisst häufig im Bereich der in der Definition der Referenzoberfläche festgelegten  $2,88 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  (Kasten 1).

Die Resultate in Abbildung 2 zeigen, dass für die Zeit von April bis Oktober die gemessene Verdunstung durch  $ET_0$  gut reproduziert wird. In diesem Sinn kann die Referenzverdunstung vorbehaltlos für die Praxis empfohlen werden. Dennoch stellt sich die Frage, ob einfachere (z.B. Priestley und Taylor 1972) oder empirische (Turc 1961; Primault 1962 und 1981) Berechnungsverfahren ebenso gute Ergebnisse liefern könnten. Abbildung 3 zeigt in Form von Streudiagrammen einen direkten Vergleich der



**Abb. 3 |** Vergleich der Resultate von vier Bestimmungsformeln mit der gemessenen Verdunstung am Standort Oensingen. Tagesmittelwerte für die Zeit zwischen April und Oktober 2006. a) Referenzverdunstung ( $r^2 = 0,88$ ); b) Priestley-Taylor ( $r^2 = 0,91$ ); c) Turc ( $r^2 = 0,87$ ); und, d) Primault ( $r^2 = 0,67$ ). Die Evaluation der Referenzverdunstung und von Priestley-Taylor erfolgte auf der Basis der Parametrisierungen für  $R_N$  und  $G$  aus Abb. 1.

verschiedenen Bestimmungsformeln mit den Messungen in Oensingen. Es lassen sich einige Tendenzen erkennen. Die Formel von Priestley und Taylor (1972) weist ein recht ähnliches Verhalten wie die FAO56-Gleichung auf. Dies ist nicht erstaunlich, da der Strahlungsterm in Gleichung (1) etwa zwei Drittel zum Verdunstungspotential beiträgt, was indirekt mit dem Faktor 1,26 in der Formel von Priestley und Taylor (1972) berücksichtigt wird. Auch die Formel von Turc (1961) liefert recht ähnliche Resultate. Wir haben aber im historischen Abriss bereits darauf aufmerksam gemacht, dass Turc (1961) und Priestley und Taylor (1972) im Prinzip äquivalent sind. Insofern, ist auch dieses Ergebnis nicht überraschend.

Es bleibt der Ansatz von Primault (1962 u. 1981), welcher die beobachtete Verdunstung am wenigsten gut zu reproduzieren vermag. Die Gründe dafür können unterschiedlicher Natur sein. Einerseits spielt die Wahl der bestimmenden Variablen eine Rolle. Die Sonnenscheindauer, früher die einzige operationell gemessene Strahlungsgrösse, hat einen weniger direkten Einfluss auf die Verdunstung als  $R_s$  oder  $R_N$ . Andererseits waren die Ver-

dunstungsmessungen, die Primault ursprünglich für die empirische Anpassung seiner Formel zur Verfügung standen, wahrscheinlich mit relativ grossen Unsicherheiten behaftet. Eine neue Evaluation der Parameterwerte wäre aus diesem Grund opportun.

Für die Beurteilung einer allfälligen Bewässerungsbedürftigkeit (Fuhrer und Jasper 2009) ist ein Vergleich der verschiedenen Ansätze bezüglich der kumulierten Verdunstungsverluste während der Vegetationsperiode von Interesse. Für die Zeit von April bis Oktober 2006 ergaben die Messungen in Oensingen eine Summe von 501 mm. Entsprechende Summen der Referenzverdunstung nach FAO56, einerseits mit lokaler Parametrisierung für  $R_N$  und  $G$ , andererseits mit  $R_N$  nach Davies (1967) und  $G = 0$ , belaufen sich auf 483 und 566 mm. Analoge Berechnungen mit den Formeln von Priestley-Taylor (1972), Turc (1961) und Primault (1962 u. 1981) ergeben jeweils Werte von 574, 596 und 337 mm. Dies zeigt, dass die Referenzverdunstung auch im Bezug auf die Gesamtverluste die kleinste Abweichung von den Messungen aufweist.



**Abb. 4** | Eddy-Kovarianz-System zur Messung der Verdunstung im Feld, bestehend aus einem Ultraschall-Windmesser und einem Infrarot-Sensor für Wasserdampf und CO<sub>2</sub> (weiss). (Foto: ART)

## Resultate und Diskussion

Wir haben das Konzept der Referenzverdunstung erläutert und die Anwendung der FAO56-Gleichung diskutiert. Wir haben gezeigt, dass dieser Ansatz die unter nahezu optimalen Bedingungen gemessene Verdunstung einer Wiese (Abb. 4) im Schweizer Mittelland gut abzubilden vermag.

Für praktische Anwendungen können empirische Formeln durchaus zu brauchbaren Ergebnissen führen, wie am Beispiel von Oensingen gezeigt wurde. Sogar die Formel von Primault, die hier am schlechtesten abschnitt, könnte durch eine neue Evaluation der Parameter und Korrekturfaktoren (jahreszeitliche und Höhenabhängigkeit der Verdunstung, siehe Kasten 2) zu deutlich besseren Resultaten führen. Schwierigkeiten mit solchen Ansätzen sind aber absehbar, wenn es darum geht, das zukünftige Verdunstungspotenzial auf der Basis von Klimaszenarien zu beurteilen, denn die Gültigkeit der heutigen Parametrisierungen ist in diesem Fall nicht gewährleistet.

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel gibt es vier Aspekte, die zu beachten sind: (i) die Erhöhung der Temperatur; (ii) die damit einhergehende mögliche Abnahme der Luftfeuchte tagsüber; (iii) eine mögliche Änderung des Strahlungsregimes; (iv) die Effekte der zunehmenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre, welche eine effizientere Wassernutzung der Pflanzen ermöglichen. Die PM-Gleichung kann alle diese Faktoren ohne weiteres berücksichtigen. Dasselbe gilt für die daraus abgeleitete FAO56-Gleichung, sofern eine Anpassung der numerischen Parameter im Hinblick auf eine CO<sub>2</sub>-bedingte Reduktion des stomatären Widerstandes (Kasten 1) vorgenommen wird<sup>5</sup>.

## Schlussfolgerungen

Empirische Ansätze hatten früher, angesichts der beschränkten Datenverfügbarkeit, durchaus ihre Berechtigung. Eine Umstellung auf physikalischen Bestimmungsmethoden sollte aber heute kein Thema mehr sein, denn die nötigen Inputdaten sind entweder direkt verfügbar oder können mit hinreichender Genauigkeit aus operationellen Messgrössen abgeleitet werden, wie wir hier zeigen konnten.

Im Kontext dieser Arbeit war eine erweiterte Evaluation der Verdunstung nach Allen *et al.* (1998) unter Einbezug eines Vegetationskoeffizienten  $K_c$  nicht nötig, da während der ausgewählten Periode die Vegetationseigenschaften in etwa denjenigen der Referenzoberfläche entsprachen. Dies muss aber von Fall zu Fall beurteilt werden. Auch bleibt zu untersuchen, ob sich die FAO-Methode standardmässig für die Bewertung des Wasserbedarfs im Obst- und Rebbau eignet, in Situationen also, in denen die Anordnung der Pflanzen sowohl die Oberflächen- als auch die aerodynamischen Eigenschaften der verdunstenden Fläche beeinflussen. ■

<sup>5</sup> Für die Abschätzung der tatsächlichen Verdunstung nach FAO (Allen *et al.* 1998) ist auf Grund der verbesserte Wassernutzungseffizienz zudem eine Anpassung des Vegetationskoeffizienten  $K_c$  erforderlich.

Unsere Untersuchungen zum Verdunstungsregime von Grün- und Ackerland finden teilweise im Rahmen der folgenden Projekte statt: ACQWA (7. EU-Rahmenprogramm), AGWAM (Nationales Forschungsprogramm NFP61, Nachhaltige Wassernutzung) und AGRISK (Nationaler Forschungsschwerpunkt Klima, NCCR Climate). Wir danken dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) für die Bereitstellung von operationellen Wetterdaten.

## Riassunto

### L'evapotraspirazione di riferimento e la sua applicazione nella meteorologia agricola

Il cambiamento climatico pone l'agricoltura di fronte a nuove sfide. Considerato il potenziale di evaporazione, nel programmare le misure d'adeguamento è particolarmente importante valutare il fabbisogno idrico di prati, pascoli e superfici campicole. L'evapotraspirazione di riferimento, un concetto introdotto negli anni novanta dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO) e presentato nella presente pubblicazione, definisce il potenziale di evaporazione da una vegetazione standard abbondantemente approvvigionata d'acqua. Essa viene calcolata sulla base della cosiddetta formula di Penman-Monteith e, come mostrato in questo lavoro, riproduce fedelmente l'evapotraspirazione osservata in condizioni pressoché ottimali in un prato dell'Altipiano svizzero.

## Summary

### Reference evaporation and its application in agrometeorology

Climate change places the agriculture in front of new challenges. An assessment of the water requirement of grassland, pasture and arable land on the basis of the evapotranspiration potential plays a central role in the planning of adaptation measures. The reference evaporation, a concept introduced in the 1990's by the Food and Agriculture Organization (FAO) and presented in this paper, defines the evaporation potential of standard vegetation with an abundant water supply. It is determined on the basis of the so-called Penman-Monteith equation and, as demonstrated here, is able to accurately reproduce the evolution of the evaporative flux from grassland as observed on the Swiss Plateau under virtually optimum conditions.

**Key words:** reference evapotranspiration, evapotranspiration potential, Penman-Monteith equation, crop water requirements, climate change.

## 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. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, 300 S.
- Ammann C., Neftel A., Spirig C., Leifeld J., & Fuhrer J., 2009. Stickstoff-Bilanz von Mähwiesen mit und ohne Düngung. *Agrarforschung* **16** (9), 348–353.
- Brutsaert W., 1982. Evaporation into the Atmosphere. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 299 S.
- Calanca P. & Holzkämper A., 2010. Agrarmeteorologische Bedingungen im Schweizer Mittelland von 1864 bis 2050. *Agrarforschung Schweiz* **1** (9), 320–325.
- Davies J.A., 1967. A note on the relationship between net radiation and solar radiation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **93**, 109–115.
- Fuhrer J. & Jasper K., 2009. Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung* **16**, 396–401.
- Jensen M.E., Burman R.D. & Allen R.G. (eds), 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. American Society of Civil Engineers, New York, 332 S.
- Monteith J.L. 1965. Evaporation and environment. pp. 205–234. In G. E. Fogg (ed.) *Symposium of the Society for Experimental Biology, The State and Movement of Water in Living Organisms*, Vol. 19, Academic Press, Inc., NY.
- Neftel A., Ammann C., Calanca P., Flechard C., Fuhrer J., Leifeld J. & Jocher M., 2005. Treibhausgasquellen und -senken: Die «Kyoto-Wiese» *Agrarforschung* **12** (8), 356–361.
- Priestley C.H.B. & Taylor R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* **100**, 81–92
- Primault B., 1962. Du calcul de l'évapotranspiration. *Arch. Met. Geoph. Biocl. Series B* **12**, 124–150.
- Primault B., 1981. Extension de la validité de la formule suisse de calcul de l'évapotranspiration. *Bericht der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (Meteo-Schweiz)* **103**, 1–8.
- Schrödter H., 1985. Verdunstung. Anwendungsorientierte Messverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer-Verlag, Berlin, 186 S.
- Slatyer R.O. & McIlroy I.C., 1961. *Practical Microclimatology*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Melbourne, Australia, 310 S.
- Thornthwaite C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograp. Rev.* **38**, 55–94.
- Turc L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.* **12**, 13–49