

Verdunstungspfannen zur Steuerung der Beregnung und Tropfbewässerung

Evaporation pans for scheduling sprinkler and trickle irrigation

Von Peter Wolff *)

1. Einführung

Angesichts der zunehmenden Verknappung der natürlichen Ressourcen wird die Bewässerungspraxis in allen Klimabereichen mehr und mehr gezwungen, die Produktionsfaktoren Wasser und Energie möglichst effizient einzusetzen. Andererseits ist der Bewässerungslandwirt aber auch gezwungen — vor allem bedingt durch die hohe Festkostenbelastung —, ein möglichst hohes und von Jahr zu Jahr ausgeglichenes Produktionsniveau je Flächeneinheit anzustreben. Zu letzterem gehört u. a. die Vermeidung von Bodenfeuchte-defiziten während der Wachstumsperiode. Es kommt somit heute mehr als früher darauf an, Über- und Unterbewässerung zu vermeiden. Beides ist nur durch eine gezielte Steuerung der Bewässerung möglich. Von den zahlreichen bekannten Steuerungsmethoden haben bisher nur wenige Eingang in die Bewässerungspraxis gefunden. Der Grund hierfür ist nicht etwa ein allgemeines Desinteresse der Bewässerungslandwirte, sondern vielmehr die weitaus zu zeitaufwendige und komplizierte Handhabung der meisten Steuerungsmethoden. Nachfolgend soll eine Steuerungsmethode vorgestellt werden, die aufgrund ihrer relativ einfachen Handhabung zunehmend auf Interesse in der Bewässerungspraxis stößt. Grundlage dieser Methode bildet die Verdunstungspfanne, wie sie durch das US-Weather Bureau Eingang in die Praxis der Klimabeobachtung vieler Länder gefunden hat.

2. Verdunstungspfannen

Die in der Klimabeobachtung und bei hydrologischen Untersuchungen benutzte Verdunstungspfanne ist ein standardisierter, mit Wasser gefüllter

*) Prof. Dr. Peter Wolff, Diplomlandwirt, Ing. agr. trop., Hochschullehrer für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik an der Gesamthochschule Kassel, OE Internationale Agrarwirtschaft, Witzenhausen

Anschrift: Steinstraße 19, D—3430 Witzenhausen

flacher Behälter zur Messung der Verdunstung. Sie besitzt meist eine besondere Meßvorrichtung (z. B. Stechpegel mit Mikrometer), um mit einer möglichst großen Genauigkeit die Verdunstung zwischen zwei Beobachtungszeitpunkten in mm ablesen zu können.



Abb. 1. Class-A-pan mit Schutzvorrichtung.

Zu beachten ist hierbei, daß eine solche Schutzvorrichtung die Verdunstung erniedrigt.

Die weitaus verbreitetste Verdunstungspfanne ist der vom US-Weather Bureau eingeführte class-A-pan. In der Praxis sind noch eine Reihe anderer Verdunstungspfannen zu finden, die sich in ihrer Form, Dimension und Aufstellungsart voneinander unterscheiden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Unterschiede einiger gebräuchlicher Verdunstungspfannen.

Bei der nachfolgend näher zu beschreibenden Steuerungsmethode kommt vorzugsweise der class-A-pan zur Anwendung. Er wird aus verzinktem Blech hergestellt und mit Silberbronze gestrichen. Bei Inbetriebnahme wird er bis 5 cm unterhalb des Randes mit Wasser gefüllt. Der Wasserstand soll niemals mehr als 7,5 cm unterhalb des Randes absinken.

3. Wasserbedarf eines Pflanzenbestandes bei Bewässerung

Der Wasserbedarf eines Pflanzenbestandes ist vor allem abhängig von dem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre und der Verfügbarkeit an Boden-

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Verdunstungspfannen

Verdunstungspfanne	Dimension	Aufstellungsart
USWB class-A-pan	rund, Durchmesser: 1 207 mm, Tiefe: 250 mm	150 mm über der Bodenoberfläche, auf Lattengerüst
Australische Doppelring-Verdunstungspfanne	rund, Durchmesser: 900 mm, Tiefe: 900 mm, Außenpfanne: 1 200 mm Durchmesser, 850 mm tief	Verdunstungspfanne in größere, auch mit Wasser gefüllte Pfanne eingeschlossen, in Boden versenkt
Verdunstungspfanne "British Standard"	quadratisch, 1 830 x 1 830 mm, Tiefe: 610 mm	in Boden versenkt, Rand steht 75 mm über Bodenoberfläche
Colorado-pan	quadratisch, 920 x 920 mm, Tiefe: 460 mm oder auch 1 000 x 1 000 x 500 mm	in Boden versenkt, Rand steht 50 mm über Bodenoberfläche

feuchte. Man bezeichnet die Wassermenge, die ein Pflanzenbestand verdunstet, wenn kein Mangel an Bodenfeuchte vorliegt, als potentielle Evapotranspiration (ET_{pot}). Zwischen dieser potentiellen Evapotranspiration und der Verdunstung einer freien Wasseroberfläche (E_o), die den gleichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt ist wie der Pflanzenbestand, besteht folgende Beziehung

$$ET_{pot} = f E_o \quad (1)$$

f = Pflanzenkoeffizient

E_o kann anhand klimatologischer Daten mit Hilfe verschiedener Verdunstungsformeln berechnet werden (5, 7, 8). Die Anwendung dieser Formeln ist für den Bewässerungspraktiker jedoch meist zu aufwendig und kompliziert. Nach Garzoli (3) ist für praktische Zwecke die Anwendung dieser Berechnungsmethoden auch nicht nötig, da eine gute Korrelation zwischen E_o und der Verdunstung aus standardisierten Verdunstungspfannen besteht. Für das Murrumbidgee-Bewässerungsgebiet in New South Wales/Australien hat Fleming (2) in umfangreichen Untersuchungen nachgewiesen, daß zwischen der monatlichen kumulativen Evaporation ($\sum E_o$) und der monatlichen kumulativen Evaporation aus einem class-A-pan ($\sum E_{pan}$) folgende Beziehung besteht:

$$\sum E_o = 0,8 \sum E_{pan} \quad (2)$$

Garzoli (3) geht aufgrund seiner Untersuchungen davon aus, daß obige Beziehung auch unter anderen australischen Standortverhältnissen Anwendung finden kann, ohne daß es dabei für den praktischen Gebrauch zu signifikanten Fehlern in der Berechnung des Wasserbedarfs kommt. Ferner geht er davon aus, daß die gleiche Beziehung mit hinreichender Genauigkeit auch für die tägliche Evaporation oder die „kontinuierliche Evaporation“ zutrifft, somit wäre

$$E_o = 0,8 E_{\text{pan}} \quad (3)$$

Verallgemeinert man diese Beziehung, dann lautet sie

$$E_o = k_p E_{\text{pan}} \quad (4)$$

k_p = Verdunstungsumrechnungskoeffizient (Pan-Koeffizient)

Untersuchungen anderer Autoren deuten darauf hin, daß von einer gewissen Schwankungsbreite des Verdunstungsumrechnungskoeffizienten ausgegangen werden muß. Withers und Vipond (7) geben für den class-A-pan eine Schwankungsbreite von 0,6 bis 0,8 und einen Mittelwert von 0,7 an.

Einen etwas anderen Weg bei der Ermittlung des Wasserverbrauches mit Hilfe von Verdunstungspfannen gehen Doorenbos und Pruitt (1). Sie errechnen mit Hilfe des von ihnen eingeführten Pan-Koeffizienten K_o und der Verdunstung aus einem class-A-pan die Pflanzenverdunstung ET_o . Es handelt sich hierbei um einen Bezugswert, der definiert ist als „die Evapotranspirationsrate einer, die Bodenoberfläche vollständig beschattenden, ausgedehnten, 8 — 15 cm hohen, grünen Grasfläche von einheitlicher Bestandshöhe in einem aktiven Wachstumsstadium und bei reichlicher Wasserversorgung“. Unter Berücksichtigung der Einflüsse, die von der Art der Bodenbedeckung, der relativen Luftfeuchte und den Windverhältnissen auf die Verdunstung aus einer Verdunstungspfanne ausgehen, haben Doorenbos und Pruitt (1) entsprechende Pan-Koeffizienten ermittelt und gewisse Zu- und Abschläge für besondere Klima- und Bestandssituationen vorgeschlagen. Für den praktischen Gebrauch in der Bewässerungspraxis ist diese verfeinerte Methode zu aufwendig. Gut geeignet dürfte sie für die Ermittlung des Wasserbedarfs im Rahmen von Planungsarbeiten sein. Aus der Beziehung 1 ergibt sich, daß der Wasserverbrauch eines Pflanzenbestandes durch pflanzenspezifische Faktoren mitbestimmt wird. Diesem Einfluß der pflanzenspezifischen Faktoren versucht man durch Einführung des Pflanzenkoeffizienten f Rechnung zu tragen. Dieser Koeffizient wird jedoch nicht nur durch die jeweilige Pflanzenart, sondern auch durch die Entwicklung der Pflanzen bestimmt. Und zwar steigt der Wasserverbrauch eines Pflanzenbestandes in der vegetativen und in der generativen Phase meist bis hin zur Blüte oder gar bis zum Beginn der Fruchtreife ständig an, um danach mehr oder weniger stark abzufallen. Diesen Unterschieden muß mit Hilfe des Pflanzenkoeffizienten Rechnung getragen werden.

Tabelle 2: Typische Pflanzenkoeffizienten einiger Kulturarten bei vollentwickeltem Pflanzenbestand nach Garzoli (3, 4)

Kulturart	Pflanzenkoeffizient f
Citrus	0,7
Banane	0,8
Obst (laubabwerfend)	0,9
Reben	0,9
Gemüse	0,9
Tabak	1,0
Tomaten	1,0
Mais	1,1
Zuckerrohr	1,1

In Tabelle 2 sind Pflanzenkoeffizienten für einige Kulturarten aufgeführt, die Garzoli (3, 4) für Australien ermittelt hat. Nach seinen Angaben treffen sie für normale, trockene und sommerliche Klimaverhältnisse zu. Er empfiehlt abweichenden Klimaverhältnissen durch Zu- oder Abschläge von bis zu $\pm 10\%$ Rechnung zu tragen. Entsprechende Zuschläge sind bei besonders heißen und trockenen und Abschläge bei milden und humiden Klimaverhältnissen erforderlich. Ferner sind Abschläge erforderlich, wenn der Wasserverbrauch eines noch nicht vollentwickelten Pflanzenbestandes ermittelt werden soll. Morries (6) empfiehlt für laubabwerfende Obstgehölze einen Pflanzenkoeffizienten von 0,4 zu Beginn der jährlichen Vegetationsperiode und eine kontinuierliche Erhöhung des Koeffizienten auf 0,9 bei voller Laubentwicklung. Für einjährige Pflanzen wird empfohlen, mit einem Pflanzenkoeffizienten von $f/2$ zu beginnen und mit der Bestandsentwicklung auf die in Tabelle 2 aufgeführten Koeffizienten kontinuierlich zu erhöhen. Die Bestandsentwicklung wird dabei an dem Grad der Bodenbedeckung gemessen. Die von Garzoli (3) empirisch ermittelte Abhängigkeit des Pflanzenkoeffizienten von der Bestandsentwicklung geht aus nachfolgender Beziehung hervor:

$$f_o = f [B_b + 1/2 (1 - B_b)] \quad (5)$$

Hierin ist: f_o = Pflanzenkoeffizient eines noch nicht vollentwickelten Pflanzenbestandes

B_b = Anteil der vom Pflanzenbestand bedeckten Bodenoberfläche an der Gesamtfläche (F_g) bei einer senkrecht von oben ausgehenden Betrachtung.

Die sich aus der Beziehung 5 ergebende Korrektur von B_b ist notwendig, weil es ansonsten bei jungen Kulturen — die nur einen geringen Anteil der Ge-

samtfläche bedecken — zu einer Unterbewertung des Wasserverbrauches kommen würde. In Tabelle 3 sind die Korrekturwerte der verschiedenen B_b -Werte aufgeführt.

Tabelle 3. Tabellarische Darstellung der korrigierten B_b -Werte

Bodenbedeckung in % der Gesamtfläche	B_b	B_b korrigiert (B_{bk})
10	0,1	0,55
20	0,2	0,60
30	0,3	0,65
40	0,4	0,70
50	0,5	0,75
60	0,6	0,80
70	0,7	0,85
80	0,8	0,90
90	0,9	0,95
100	1,0	1,00

Die potentielle Evapotranspiration eines Pflanzenbestandes läßt sich nunmehr mit hinreichender Genauigkeit nach folgender Beziehung errechnen:

$$ET_{pot} = f_o k_p E_{pan} \quad (6)$$

Bei Verwendung der in Tabelle 2 angegebenen Pflanzenkoeffizienten sowie der oben angeführten Verdunstungsumrechnungskoeffizienten k_p ist allerdings zu beachten, daß es sich hier um Nährungswerte handelt, die unter ganz bestimmten Standortverhältnissen empirisch ermittelt wurden. Bei erstmaliger Anwendung der in dieser Arbeit beschriebenen Steuerungsmethode ist es sicher sinnvoll, die Gültigkeit der angegebenen Koeffizienten durch Kontrolle der Bodenfeuchte und Beobachtung der Entwicklung des Pflanzenbestandes zu überprüfen. Gegebenenfalls sind Zu- oder Abschläge vorzunehmen.

4. Höhe der Bewässerungsgabe

Soll mit der Bewässerung jeweils nur die in der vorausgegangenen Verbrauchsperiode verbrauchte Bodenfeuchte wieder aufgefüllt werden, dann ergibt sich die hierzu erforderliche Wassermenge aus folgender Beziehung:

$$Q_b = \frac{(ET_{\text{pot}} - N_e)}{W} 100 \quad (7)$$

Hierin ist: Q_b = Bewässerungsgabe mm

N_e = wirksamer (effektiver) Niederschlag mm

W = Wirkungsgrad des Bewässerungsverfahrens %

Wie aus der Beziehung 7 zu ersehen ist, wird die Höhe der jeweiligen Bewässerungsgabe neben dem im Betrachtungszeitraum gefallenem wirksamen Niederschlag auch durch den Wirkungsgrad des angewandten Bewässerungsverfahrens bestimmt. Der Wirkungsgrad drückt aus, wieviel des zugeführten Wassers von den Pflanzen genutzt werden kann, m.a.W., er gibt Auskunft über die verfahrensspezifischen Verluste an Bewässerungswasser. Eine technisch optimale Funktionsfähigkeit und ein gutes Management vorausgesetzt, sind bei Einsatz von Beregnungsanlagen folgende Wirkungsgrade zu erwarten: Nachtberegnung 80—85%; Tagberegnung unter normalen Bedingungen 70—75%; Tagberegnung bei heißen, trockenen Winden 60% und weniger. Mit gut geplanten und überlegt eingesetzten Tropfbewässerungsanlagen sind Wirkungsgrade von 90—95% erzielbar.

Als wirksamer oder effektiver Niederschlag wird in Beziehung 7 ein Niederschlag verstanden, dessen Niederschlagsmenge größer als 5 mm ist. Niederschläge mit Niederschlagsmengen unter 5 mm bleiben unberücksichtigt, weil sie im Regelfall nur unwesentlich zur Wasserversorgung der Pflanzen beitragen. Unter humiden gemäßigten Klimaverhältnissen kann es sinnvoll sein, mit einer Niederschlagsmenge von 3 mm zu arbeiten.

Die Höhe der Bewässerungsgabe ist schließlich ganz wesentlich von der Speicherleistung des Bodens abhängig. Eine über die Speichermöglichkeiten der durchwurzelten Bodenschicht hinausgehende Wasserzufuhr würde zu Wasserverlusten und damit zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades führen.

5. Beispiel für die Steuerung einer Tropfbewässerungsanlage

Nachfolgend soll beispielhaft aufgezeigt werden, wie mit Hilfe der oben näher beschriebenen Methode die Tropfbewässerung in einer Obstanlage gesteuert werden kann.

Als Meßinstrumente sind eine Verdunstungspfanne (class-A-pan) und ein Regenmesser in der Nähe der zu bewässernden Obstanlage aufzustellen. Mit Hilfe dieser Geräte wird von Beginn der Vegetationsperiode an die Verdunstung und der Niederschlag auf wöchentlicher Basis ermittelt. Beide Werte bilden die Grundlage für die Berechnung des Wasserverbrauches in der vorausgegangenen Woche. Mit Hilfe des so ermittelten Wasserverbrauches wird dann die Höhe der erforderlichen Bewässerungsgabe bestimmt. Bei Berechnung der Bewässerungsgabe geht man zweckmäßigerweise wie folgt vor:

Schritt 1: Bestimmung der Gesamtfläche (F_g), die dem einzelnen Baum zur Verfügung steht durch Multiplikation des Reihenabstandes mit dem Abstand in der Reihe.

Beispiel: Reihenabstand = 6 m; Abstand in der Reihe = 5 m.
Fläche pro Baum = 6 m x 5 m = 30 m².

Schritt 2: Bestimmung des Anteils der Gesamtfläche, der von dem Obstbaum beschattet wird, und zwar bei einer senkrecht von oben ausgehenden Betrachtung.

Beispiel: 60% der Gesamtfläche sind beschattet bzw. bedeckt. Nach Tab. 3 ist somit B_b 0,6 und nach Korrektur $B_{bk} = 0,80$.

Schritt 3: Ermittlung der Verdunstung aus der Verdunstungspfanne in den letzten 7 Tagen (bei wöchentlicher Berechnung).

Beispiel: Unter Berücksichtigung des gefallenen Niederschlages sind 60 mm verdunstet, d. h. $E_{pan} = 60$ mm.

Schritt 4: Errechnung der potentiellen Evapotranspiration.

Beispiel: Der Verdunstungsumrechnungskoeffizient sei 0,8 und der Pflanzenkoeffizient 0,9.
 $ET_{pot} = 0,8 \times 0,9 \times 60 = 43,2$ mm.

Schritt 5: Ermittlung des in den letzten 7 Tagen gefallenen wirksamen Niederschlags.

Beispiel: Im Beobachtungszeitraum hat es einmal 8 mm geregnet, damit ist $N_e = 8$ mm.

Schritt 6: Subtraktion des wirksamen Niederschlags von der potentiellen Evapotranspiration zwecks Ermittlung der Netto-Wasserverluste.

Beispiel: $43,2 - 8,0 = 35,2$ mm.

Schritt 7: Ermittle den Wasserbedarf pro Baum mit Hilfe folgender Formel:

$$Q_b = (ET_{pot} - N_e) \times B_{bk} \times F_g$$

Beispiel: $Q_b = (43,2 - 8,0) \times 0,80 \times 30 = 844,8$ l pro Baum und Woche.

Schritt 8: Ermittle die Höhe der erforderlichen Bewässerungsgabe unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des angewandten Bewässerungsverfahrens.

Beispiel: Der Wirkungsgrad der Tropfbewässerungsanlage sei 90%.

$$\text{Bewässerungsgabe je Baum} = 844,8 \times \frac{100}{90} = 938,7 \text{ l pro Baum.}$$

Nach der Bestimmung der Höhe der Bewässerungsgabe ist schließlich noch festzulegen, wie oft bewässert werden soll, z. B. einmal oder mehrmals pro Woche? Diese Frage der Häufigkeit der Bewässerung ist abhängig von der effektiven Durchwurzelungstiefe, der nutzbaren Speicherfeuchte der Durchwurzelungszone, der Evapotranspiration und von dem zulässigen Grad der Ausschöpfung der nutzbaren Speicherfeuchte. Für letztere werden im Regelfall bei Anwendung konventioneller Bewässerungsverfahren 50% der nutzbaren Speicherfeuchte zugrunde gelegt. Da eine so starke Ausschöpfung für die Entwicklung der Pflanzen, zumindest in gewissen Wachstumsstadien, nachteilig sein kann, wird bei Tropfbewässerung oft angestrebt, die Ausschöpfung auf 25% zu beschränken. Übersteigt die wöchentliche Evapotranspiration die maximal zulässige Ausschöpfung der nutzbaren Speicherfeuchte, so sollte die zu verabfolgende Wassergabe auf zwei oder mehr Gaben pro Woche verteilt werden. Unterschreiten die wöchentlichen Netto-Wasserverluste (Evapotranspiration minus effektiver Niederschlag) die zulässige Ausschöpfung der nutzbaren Speicherfeuchte, so ist eine Bewässerungsgabe pro Woche ausreichend. Insbesondere in niederschlagsreichen Perioden können Bewässerungsintervalle, die über eine Woche hinausgehen, durchaus sinnvoll sein.

6. Zusammenfassung

Die Verknappung natürlicher Ressourcen und der Zwang aus ökonomischen Gründen von Jahr zu Jahr ein gleichmäßig hohes Produktionsniveau anzustreben, zwingt Obstbauer, Gärtner und Landwirte weltweit immer mehr zu einer möglichst optimalen Gestaltung des Bodenfeuchtehaushaltes. Letzteres ist ohne einen gezielten Einsatz der Bewässerung kaum noch denkbar. Für einen möglichst effizienten Einsatz der Bewässerung ist die Verwendung von Steuerungsmethoden unumgänglich. Da der überwiegende Teil der heute gebräuchlichen Steuerungsmethoden jedoch zu zeit- und kostenaufwendig ist, haben sie bisher kaum Eingang in die Bewässerungspraxis gefunden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Steuerungsmethode vorgestellt, die in vielen Bewässerungsgebieten auf ein zunehmendes Interesse der Bewässerungslandwirte stößt, weil sie relativ einfach zu handhaben ist. Die Methode basiert auf der Messung der Verdunstung aus sogenannten Verdunstungspfannen und der Erkenntnis, daß zwischen der Verdunstung aus diesen Behältern und der Evapotranspiration eines Pflanzenbestandes gute Korrelationen bestehen. Die Grundlagen dieser Methode werden ausführlich erläutert. Abschließend wird ein Beispiel für die Steuerung einer Tropfbewässerungsanlage gegeben.

Summary

In an age of competition for water and other natural resources, irrigation farmers around the world, are aware of the necessity to schedule their

irrigation operations in order to obtain a high irrigation efficiency. Unfortunately most scheduling methods are too complicated and too time consuming for use under field conditions. In the search of simple scheduling methods, farmers in many irrigation areas are more and more getting interested in using pan evaporation measurements for irrigation control.

This paper describes how water requirements of crops can be estimated with the help of class-A-pan evaporation measurements. An example of scheduling a drip irrigation system is given.

Literaturverzeichnis

1. DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O., 1975: Crop water requirements. — FAO Irrigation and Drainage Papers Nr. 24. FAO, Rome.
2. FLEMING, P. M., 1964: A water budgeting method to predict plant response and irrigation requirements for widely varying evaporation conditions. — Proc. Vth Congress Int. Gen. Rur., Lausanne 1964, 66—67.
3. GARZOLI, K. V., 1974: Trickle irrigation. — Vortrag Agr. Eng. Conf., Sydney 1974 (Vervielf. Manuskript).
4. HOARE, E. R.; GARZOLI, K. V.; BLACKWELL, J., 1974: Plant water requirements as related to trickle irrigation. — Proc. Second Intern. Drip Irrigation Congress, San Diego/Calif., 323—328.
5. LECHER, K., 1971: Bestimmung des Wasserbedarfs. — In: Allinger, G. et. al., 1971: Taschenbuch der Wasserwirtschaft. — Verlag Wasser und Boden, Hamburg.
6. MORRIS, H. L., 1973: Management of trickle irrigation in the Goulburn and Murray Valley irrigation areas. — Vic. Hort. Digest, 60, 4—9.
7. WITHERS, B.; VIPOND, S., 1974: Irrigation design and practice. — B. T. Batsford, London.
8. WOLFF, P., 1973: Zur Weiterentwicklung der Blaney-Criddle Formel. — Z. für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 14, 236—246.