

# Bestimmung der aerodynamischen- und Bestandesleitfähigkeit eines Pferdebohnenbestandes (*Vicia faba var. Arista*)

Saylan L. und J. Eitzinger

## Estimation of the aerodynamic and surface conductance of a faba bean field (*Vicia faba var. Arista*)

### 1. Einleitung und Problemstellung

Die potentielle und aktuelle Evapotranspiration (ET<sub>p</sub>, ET<sub>a</sub>) im System Boden-Pflanze-Atmosphäre ist ein komplexer Vorgang und wird von vielen Komponenten bestimmt. Atmosphärische Parameter (Temperatur, Strahlung, Luftfeuchte, Wind) legen den Verdunstungsanspruch über das Sättigungsdefizit der Luft fest und der Boden fungiert als Wasserspeicher. Dazwischen versucht die Pflanze mit ihrer Spaltöffnungsregulation den Wasserverbrauch zu optimieren. Die ET wird weiters auch vom Pflanzenbestand selbst beeinflusst. Die Wuchsform, die Blattstruktur und die Höhe der Pflanzen wirken auf die aerodynamische Rauigkeit, den Transport von Masse und Energie oder den turbulenten Fluß bzw. Wasserdampfstrom aus der Vegetation in die Atmosphäre (SCHRÖDTER, 1985).

Verdunstungsformeln sind je nach den berücksichtigten Parametern relativ einfach bis sehr komplex aufgebaut. Komplexe Formeln wie z. B. die Penman-Monteith Kombinationsgleichung sind physikalisch realistischer, sie benötigen aber auch mehr Inputparameter, was sehr schwierige Messungen (z. B. der Bestandesleitfähigkeit) und teure Meßgeräte erfordert (STEWART and GAY, 1988).

Seit Jahren werden etliche Verdunstungsmodelle unterschiedlicher Ansätze (z. B. nach THORNTHWAITE, 1948; HARGREAVES, 1974; BLANEY and CRIDDLE, 1950; PENMAN, 1948; MONTEITH, 1965) entwickelt, um die potentielle Evapotranspiration (ET<sub>p</sub>) oder eine Referenz ET (ET<sub>r</sub>, bezogen auf eine definierte Pflanzendecke bei optimaler Wasserversorgung) für unterschiedliche Zeitmaßstäbe zu berechnen.

Die aktuelle Evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) unterscheidet sich

### Summary

Evapotranspiration is a complex physical-physiological process and of great importance for the water balance in the system soil-plant-atmosphere. The best approach used in science is the so called Penman-Monteith combination equation and its variants, in which a number of the relevant evapotranspiration parameters are considered. Therefore the knowledge of these parameters given under the specific conditions (soil, climate, plant canopy) for the specific application is necessary.

The difficulty in using of the Penman-Monteith equation lies in the estimation of the aerodynamic and surface conductances for the specific conditions. For the estimation of these parameters the sensible and latent heat flux of a faba bean (*Vicia faba var. Arista*) field has been measured and the actual evapotranspiration has been estimated by using the Bowen ratio energy balance method. In this connection the surface conductance has been calculated from the Penman-Monteith equation by using the measured actual evapotranspiration. The measurements were carried out during three different growth stages of fababean in the field. The surface conductance lies under approximately 20 mm s<sup>-1</sup> and 10 mm s<sup>-1</sup> in the first and the last period, respectively. In the second measuring period, which was within the main growth period, the surface conductance varied between 20 mm s<sup>-1</sup> and 75 mm s<sup>-1</sup>. The aerodynamic conductance ranged during the measuring periods from 15 mm s<sup>-1</sup> up to 140 mm s<sup>-1</sup>. A significant correlation was found for the whole vegetation period between surface conductance and vapor pressure deficit, leaf area index and soil water content ( $r^2 = 0.83$ ).

**Key words:** Agrometeorology, fababean, evapotranspiration, surface conductance, bowen ratio.

### Zusammenfassung

Die Verdunstung (Evapotranspiration) von einem Pflanzenbestand ist ein komplexer physikalisch-physiologischer Vorgang und von großer Bedeutung im Wasserhaushalt des Systems Boden-Pflanze-Atmosphäre. Die anerkannteste wissenschaftlich verwendete Annäherung ist die sogenannte Penman-Monteith Kombinationsgleichung mit ihren zahlreichen Varianten, in welche eine Reihe von bestimmenden Faktoren der Verdunstung parametrisch eingehen. Dies erfordert jedoch eine genaue Kenntnis dieser Parameter unter den gegebenen spezifischen Bedingungen (Boden, Klima, Pflanzenbestand) im jeweiligen Anwendungsfall.

Die größte Schwierigkeit bei der Verwendung der Penman-Monteith Gleichung ist die Bestimmung der aerodynamischen- und Bestandesleitfähigkeiten eines definierten Pflanzenbestandes. Zu deren Bestimmung wurde in dieser Untersuchung der sensible und latente Wärmefluß eines Pflanzenbestandes (Pferdebohne; *Vicia faba* var. *Arista*) gemessen und die aktuelle Evapotranspiration mit Hilfe der Bowenverhältnis-Energiebilanz Methode ermittelt. Anschließend wird die Bestandesleitfähigkeit unter Verwendung der gemessenen aktuellen Evapotranspiration aus der Penman-Monteith Formel berechnet. Die Messungen wurden während drei verschiedener Wachstumsphasen der Pferdebohne am Feld durchgeführt. Die Bestandesleitfähigkeit lag in der ersten und letzten Meßperiode jeweils unter ca.  $20 \text{ mm s}^{-1}$  und  $10 \text{ mm s}^{-1}$ . In der zweiten Meßperiode, der Hauptwachstumsphase, änderte sich die Bestandesleitfähigkeit zwischen  $20 \text{ mm s}^{-1}$  und  $75 \text{ mm s}^{-1}$ . Die aerodynamische Leitfähigkeit erreichte in den drei Meßperioden  $15 \text{ mm s}^{-1}$  bis  $140 \text{ mm s}^{-1}$ . Das Sättigungdefizit der Luft, der Blattflächenindex und der Bodenwassergehalt waren die wichtigsten beeinflussenden Parameter für die Bestandesleitfähigkeit über die ganze Vegetationsperiode ( $r^2 = 0.83$ ).

**Schlagerworte:** Agrarmeteorologie, Pferdebohne, Evapotranspiration, Bestandesleitfähigkeit, Bowenverhältnis.

bei limitiertem Wassernachschub (niedriger Bodenwassergehalt) von der potentiellen Evapotranspiration, da der Verdunstung Widerstände entgegengesetzt werden. Bei der im kleinen Zeitmaßstab häufig verwendeten Penman-Monteith Kombinationsgleichung (MONTEITH, 1965) wird der Einfluß des Pflanzenbestandes auf die  $ET_a$  (bzw.  $ET_r$ ) über zwei Parameter, die Bestandes ( $g_s$ )- und aerodynamische ( $g_a$ ) Leitfähigkeit, beschrieben. Dabei steht  $g_s$  für den Feuchte-transport von der Pflanzen- und Bodenoberfläche in die umgebende Luft, wobei der jeweilige Anteil stark vom Blattflächenindex und vom Wassergehalt der Bodenoberfläche abhängt. Die aerodynamische Leitfähigkeit ( $g_a$ ) steht für den Transport durch die vom Bestand gebildete atmosphärische Grenzschicht. Hinsichtlich der Wichtigkeit dieser Parameter für die  $ET_a$  erfolgten eine Reihe von Untersuchungen (z. B. JARVIS, 1976), welche diese Verdunstungswiderstände zwecks einfacherer Bestimmung zu Umweltvariablen und Bestandescharakteristika in Bezug setzen.

Die vorliegende Arbeit stellt neben einer detaillierten Analyse der Meßergebnisse einen weiteren diesbezüglichen Beitrag zur Bestimmung der Bestandes- und aerodynamischen Leitfähigkeit mit Hilfe des Bowen Verhältnisses und der Penman-Monteith Kombinationsgleichung dar.

Die Untersuchungen wurden in Groß-Enzersdorf bei Wien im Jahr 1992 bei Pferdebohne, Sojabohne und Mais

durchgeführt (SAYLAN, 1993), wobei hier Ergebnisse am Beispiel der Pferdebohne detailliert vorgestellt werden. Der Untersuchungsstandort ist repräsentativ für das Klima eines großen Teils des Marchfeldes, einem intensiv ackerbaulich genutzten Gebiet im Nordosten Österreichs.

## 2. Material und Methode

### 2.1 Standort und Meßaufbau

Der Versuch wurde 1992 im Marchfeld auf Flächen der Versuchsstation der Universität für Bodenkultur in Groß-Enzersdorf bei Wien mit Pferdebohne (*Vicia faba* var. *Arista*) durchgeführt. Groß-Enzersdorf liegt 153 m über NN, die geographische Breite beträgt  $48^\circ 12' N$ , die geographische Länge  $16^\circ 34' E$ . Der Boden ist tiefgründig und die Bodenart ist lehmiger Sand bis sandig-schluffiger Lehm.

Das langjährige Klima zeichnet sich durch folgende Charakteristika aus (nach MÜLLER, 1993):

Jahresmitteltemperatur (1953–1987):  $10.1 \text{ }^\circ\text{C}$

Mittlerer langjähriger Jahresniederschlag (1953–1987):  
739 mm

Pot. Evapotranspiration nach Penman (1965–1974):  
615 mm

Akt. Evapotranspiration (Lysimeter), (1969–1974): 495 mm  
Globalstrahlungssumme pro Jahr (1957–1976): 4236 MJ m<sup>-2</sup>

Die Pferdebohnen wurden auf einem quadratisch angelegten Versuchsfeld (50 x 50 m) angebaut und wurden außer während der Meßperioden nach Bedarf künstlich beregnet. Während der drei Meßperioden innerhalb der Vegetationsperiode der Pferdebohne wurden die notwendigen mikroklimatischen Parameter mit Hilfe einer automatischen Meßstation gemessen, wobei die Meßwerte jeder Sekunde in 15-Minutenmitteln in einem Datenlogger gespeichert wurden. Die aktuelle ET wurde mit einem vereinfachten BREB-System nach BERNHOFER et al. (1992) ermittelt. Dabei wurden zwei ventilierte Temperatur-Feuchtefühler (Psychrometer) in zwei Höhen eingesetzt, wobei deren vertikaler Abstand konstant 0,5 m betrug. Die Höhe der Psychrometerfühler über Boden konnte während der Vegetationsperiode je nach Bestandeshöhe manuell verändert werden, sodaß der untere Sensor stets knapp über der Bestandesobergrenze angebracht war. Die weiteren Energiebilanzkomponenten (Strahlungsbilanz, Bodenwärmestrom), andere meteorologische Parameter (Wind, Niederschlag) sowie der Bodenwassergehalt mittels Gipsblöcken in jeweils 15 cm, 30 cm, 60 cm und 100 cm Bodentiefe wurden ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet.

Alle Meßsensoren wurden vor den Messungen im Labor geeicht, die Psychrometer auch während der Messungen mit einem Eichgerät kontrolliert.

Zusätzlich wurden der Blattflächenindex (BFI) mit einem LAI-2000 Plant Canopy Analyser der Fa. LI-COR und der Bodenwassergehalt (BWG) mit der „Time Domain Reflectometry“ (TDR) Methode in Zeitabständen von einigen Tagen gemessen.

## 2.2 Methode

Die Bestandesleitfähigkeit ( $g_s$ ) kann direkt mit einem Porometer gemessen (berücksichtigt nur die physiologische Leitfähigkeit ohne Einfluß der Bodenoberfläche) oder indirekt aus atmosphärischen, Boden- und Pflanzenparametern bestimmt werden.

In dieser Arbeit wurde zunächst die aktuelle Evapotranspiration mit Hilfe der Bowenverhältnis-Energiebilanz Methode (BREB) gemessen. Schließlich wurde mit diesem realen Verdunstungswert ein realer  $g_s$ -Wert aus der Pen-

man-Monteith Kombinationsgleichung errechnet, welcher die physiologische(stomatäre) Leitfähigkeit und den Anteil der Bodenoberfläche gemeinsam erfaßt.

### 2.2.1 Die Bowenverhältnis-Energiebilanzmethode (BREB)

Die BREB Methode basiert auf den Gradienten der Lufttemperatur und der Luftfeuchte über Oberflächen. Die Energiebilanz der Erdoberfläche besteht aus den vier Hauptenergiekomponenten, der Strahlungsbilanz ( $R_n$ ), des Bodenwärmestroms ( $G$ ), des fühlbaren Wärmestroms ( $H$ ) und des latenten Wärmestroms ( $L \cdot E$ ):

$$R_n + G + H + L \cdot E = 0 \quad (1)$$

BOWEN (1926) verwendete den Austausch in der bodennahen Grenzschicht, um das Verhältnis von  $H$  und  $L \cdot E$  auszudrücken:

$$\beta = \frac{H}{L \cdot E} \cong \frac{p \cdot C_p \cdot K_h \cdot \Delta T}{\varepsilon \cdot L \cdot K_e \cdot \Delta e} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (2)$$

wobei  $\beta$  das Bowenverhältnis,  $T$  der vertikale Temperaturgradient,  $e$  der vertikale Dampfdruckgradient,  $p$  der Stationsdruck,  $C_p$  die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck,  $\varepsilon$  das Verhältnis des Molekulargewichts von Wasserdampf und trockener Luft (0.622),  $L$  die Verdunstungsenthalpie,  $K_h$  und  $K_e$  die turbulenten Austauschkoefizienten ( $K_h/K_e=1$ ) und  $\gamma$  ein Beiwert (Näherungswert) ist.

Wenn Gleichung (2) in die Energiebilanzgleichung (1) eingesetzt wird, erhält man Gleichung (3). Mit dieser Gleichung kann der latente Wärmestrom (Verdunstung) mit Hilfe der Strahlungsbilanz ( $R_n$ ), des Bodenwärmestroms ( $G$ ) und des Bowenverhältnisses ( $\beta$ ) berechnet werden.

$$L \cdot E = - \frac{(R_n + G)}{(1 + \beta)} \quad (3)$$

Die BREB Methode sowie deren unterschiedliche Meßsysteme wurde in etlichen Untersuchungen (z. B. LOURENCE and PRUITT, 1968; TANNER, 1960; SINCLAIR et al., 1975; NIE et al., 1992) mit direkten Meßmethoden der ET unter verschiedenen Bedingungen verglichen. Dabei wurde meist eine zufriedenstellende Übereinstimmung zu den direkten Messungen festgestellt. Das in dieser Untersuchung verwendete BREB System (BERNHOFER et al., 1992) wurde vor

den Messungen mit dem von GAY (1988) entwickelten und mittels Lysimetermessungen geeichten BREB Systems kalibriert. Zwischen beiden Meßsystemen wurde unter Verwendung der von einem Datenlogger gespeicherten 10-Minuten Mittelwerte aus Sekundenmessungen (Meßdauer 3 Tage) eine gute Korrelation gefunden ( $r^2 = 0.88$ ,  $\sigma = 11.2$ ). Die ermittelten Abweichungen der Temperatur und der Feuchte wurden dann nach folgender Gleichung berücksichtigt:

$$\beta = \gamma \left( \frac{\Delta T \pm 0.0324}{\Delta e \pm 0.0334} \right) \quad (4)$$

Aus diesem mittleren Meßfehler der im Profil eingesetzten Sensoren für Temperatur und Feuchte (vertikaler Abstand 0.5 m) kann der maximale Meßfehler für  $\beta$  bestimmt werden.

In dieser Arbeit ist die Richtung der Wärmeströme so definiert, daß alle Ströme, die zur Umsatzfläche gerichtet sind, als positiv angenommen wurden.

### 2.2.2 Die Penman-Monteith Kombinationsgleichung

Die Formel nach PENMAN (1948), für die Berechnung der Evapotranspiration von einer freien Wasseroberfläche (ET<sub>p</sub>) entwickelt, wurde von MONTEITH (1965) unter Berücksichtigung der Vegetation weiterentwickelt (Penman-Monteith Kombinationsgleichung). Diese Gleichung bildet die Basis für die Bestimmung des Verdunstungsprozesses im System Boden-Atmosphäre-Pflanze unter Berücksichtigung des gesamten Netzwerkes der Leitfähigkeiten bzw. Widerstände (SCHRÖDTER, 1985).

Die Penman-Monteith Formel lautet:

$$LE = \left[ \frac{-(s(R_n + G) + \rho C_p g_a (e_s - e))}{(s + \gamma) \left( 1 + \left( \frac{g_a}{g_s} \right) \right)} \right] \quad (5)$$

wobei  $s$  die Steigung der Kurve des Sättigungsdampfdrucks bei gegebener Lufttemperatur,  $\gamma$  die Psychrometerkonstante,  $\rho$  die Dichte der Luft,  $C_p$  die spezifische Wärme der Luft,  $(e_s - e)$  das Sättigungsdefizit der Luft,  $g_a$  die aerodynamische Leitfähigkeit und  $g_s$  die Bestandesleitfähigkeit ist.

Die Einflüsse der Struktur des Pflanzenbestandes auf die Rauigkeit der Bestandesoberfläche, die eine Funktion des Entwicklungszustandes der Pflanzen ist, wirken auf den latenten Wärmestrom (LE). Aus diesem Grund bildet die aerodynamische Leitfähigkeit ( $g_a$ ) einen für den latenten Wärmestrom (LE) wichtigen Einflußfaktor (PERRIER et al., 1972).

Die  $g_a$  hängt von der Oberflächenrauigkeit, der Windgeschwindigkeit und der atmosphärischen Stabilität ab, wobei in dieser Untersuchung die semiempirische Formel nach THOM und OLIVER (1977) (Gleichung 6) verwendet wird, die nur für neutrale Schichtung gilt und den Effekt der Stabilität unberücksichtigt läßt.

$$g_a = \frac{(0.212(1 + 0.54u))}{(\ln((z - d)/z_o))^2} \quad (6)$$

wobei  $z$  die Höhe der Windmessung,  $u$  die Windgeschwindigkeit,  $z_o$  die Rauigkeitslänge und  $d$  die Nullpunkt-Verschiebungshöhe des Windprofils ist.

Die Bestandesleitfähigkeit ( $g_s$ ) ist in der Penman-Monteith Formel eine weitere wichtige Variable, um den latenten Wärmefluß zu bestimmen und hängt vom Feuchtigkeitszustand der Bodenoberfläche und dem Stomataöffnungsgrad der Pflanzen ab. Unter Verwendung der Penman-Monteith Gleichung kann diese wichtige Variable aus dem gemessenen latenten Wärmefluß (LE) und der gemessenen oder bestimmten  $g_a$  errechnet werden (GAY, 1988; SAYLAN and BERNHOFER, 1993).

Die mit der BREB-Methode gemessene aktuelle ET wurde wie oben beschrieben, verwendet, um aus Gleichung (5) die  $g_s$  zu bestimmen. Die  $g_a$  wurde mit Gleichung (6), mit  $d = 0.56$  h und  $z_o = 0.08$  h (nach BALDOCCHI et al. 1983), wobei  $h$  die Pflanzenhöhe ist, berechnet. Bei der Berechnung der  $g_a$  sind mittlere Pflanzenhöhen für die erste Meßperiode mit 0.1 m, für die zweite Periode mit 1,25 m und für die letzte Periode mit 1,45 m berücksichtigt.

Die 15-min Daten wurden bei der BREB-Analyse auf Inkonsistenzen getestet (nach OHMURA, 1982) und Perioden unsicherer Daten eliminiert, was wegen der hohen Anforderungen der Bowenverhältnismethode an die Meßgenauigkeit und Repräsentativität der Meßdaten einerseits und der limitierten Meßgenauigkeit der Sensorik andererseits notwendig ist. Dabei wurde überprüft, ob der errechnete sensible bzw. latente Wärmestrom dem Temperatur bzw. Feuchtegradienten auch entgegengesetzt ist, da ein nur kleiner Unterschied zwischen dem Temperatur- und Feuch-

tegradienten zu unsicheren Bowenverhältniswerten führt. Das ist meist der Fall, wenn die verfügbare Energie  $R_n + G < 50 \text{ W m}^{-2}$  beträgt (STEWART und GAY, 1988), insbesondere vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang. Unter ähnlichen Bedingungen kann  $\beta$  auch gegen -1 gehen (Gleichung (3) ergibt keine sinnvollen Werte) wodurch die relevanten Daten unbrauchbar sind. Es wurden zudem auch jene Perioden ausgeschieden, wo durch vollständige Benetzung des Pflanzenbestandes durch Niederschlag der Leitwert unendlich und daher die Steuerung der Verdunstung durch die Stomata weitgehend ausgeschaltet war (reine Interzeptionsverdunstung). Da in den Nacht- und Dämmerungsstunden normalerweise nur ein sehr geringer Anteil an der Gesamtverdunstung stattfindet, andererseits aber die erwähnten Unsicherheiten gehäuft auftreten, wurde die  $g_s$  nur von Tagesstundendaten bei neutraler Schichtung und nur bei trockenem Bestand berechnet.

Während der Meßperioden herrschten unterschiedliche Witterungsbedingungen, welche bei der Interpretation der Ergebnisse eine wichtige Rolle spielen.

Die BREB Messungen bei der Pferdebohne wurden in drei Meßperioden durchgeführt:

1. Meßperiode: Zweiblattstadium bis zum 5-Blattstadium (25. April bis 11. Mai 92)
2. Meßperiode: Hülsenfüllungsbeginn bis zur ersten vollen Hülse (11. Juni bis 24. Juni 92)
3. Meßperiode: Abgeschlossene Hülsenausbildung bis zur Erntereife (15. Juli bis 27. Juli 92)

### 3. Ergebnisse und Diskussion

In dieser Studie werden die Ergebnisse auf Tagesmittel- und Tagessummenbasis dargestellt (vgl. Tabelle 1, Abbildung 1–3).

#### 3.1 Mikroklimatische Parameter und Bestandesleitfähigkeit

In der **ersten Meßperiode** (25. April bis 11. Mai) war die Evapotranspiration relativ konstant und niedrig wobei die Evaporation den größten Anteil an der Gesamtverdunstung aufwies, da die Pflanzen noch sehr klein waren. Die Pflanzenhöhe nahm während der Meßperiode von 3 cm auf 15 cm zu. Der Blattflächenindex (BFI) erreichte beim 5-Blattstadium einen Wert von 0.2. In dieser Periode schwankte die Tagesmitteltemperatur zwischen ca.  $7^\circ \text{C}$  und ca.  $22^\circ \text{C}$  (Tabelle 1) und das Sättigungsdefizit (SD) zwischen 1 hpa und 14 hpa, wobei beide nach einem Temperatursturz am 29. April tendenzmässig wieder anstiegen (Abbildung 1). Die Windgeschwindigkeit erreichte ca.  $5 \text{ m s}^{-1}$  im Tagesmittel.

Die Energiebilanzkomponenten  $R_n$ , LE und H änderten sich jeweils zwischen 35–405, 60–220 und 0–240  $\text{W m}^{-2}$  (Abbildung 2). Während dieser 15-tägigen Meßperiode fiel nur wenig Niederschlag (ca. 14 mm) und die LE erreichte max. 5 mm pro Tag. Die Gesamtevapotranspiration betrug 45.6 mm. Wegen des hohen Bodenwassergehaltes stand für das Pflanzenwachstum genügend Wasser zur Verfügung.

Die Bestandesleitfähigkeit ( $g_s$ ) änderte sich in dieser Periode innerhalb eines Bereiches bis maximal  $20 \text{ mm s}^{-1}$ , zeigte also sehr geringe Werte. Die aerodynamische Leitfähigkeit ( $g_a$ ) schwankte abhängig von der Windgeschwindigkeit (u) zwischen  $14 \text{ mm s}^{-1}$  und  $26 \text{ mm s}^{-1}$ . Abbildung 3 zeigt den Verlauf dieser Parameter.

Die **zweite Meßperiode** (11. Juni bis 24. Juni) war durch starkes Pflanzenwachstum geprägt. Der BFI erreichte einen Maximumwert von 4.5. Am Anfang dieser Periode (in den ersten 3 Tagen) war der Boden auf Grund von Niederschlägen (ca. 42 mm) noch gut mit Wasser versorgt. An diesen drei bewölkten und kühlen Tagen bewegten sich die  $R_n$ , LE,

Tabelle 1: Übersicht der gemessenen und ermittelten Parameter der Tagesmittel und deren Schwankungsbereich (Minima/Maxima) während der Meßperioden im Pferdebohnenbestand (PH=Pflanzenhöhe, BFI=Blattflächenindex, T=Tagesmitteltemperatur, SD = Sättigungsdefizit, u = Windgeschwindigkeit, LE = latenter Wärmestrom,  $R_n$ =Strahlungsbilanz, G = Bodenwärmestrom, H=sensibler Wärmestrom,  $g_a$  = aerodynamische Leitfähigkeit,  $g_s$  = Bestandesleitfähigkeit).

Table 1: Review to the measured and estimated parameters as daily averages and their range (minima/maxima) during the measurement periods in a fababean field (PH = plant height, BFI = leaf area index, T=daily average temperature, SD = vapor pressure deficit, u=wind speed, LE = latent heat flux,  $R_n$  = radiation balance, G = soil heat flux, H = sensible heat flux,  $g_a$  = aerodynamic conductance,  $g_s$  = surface conductance).

Meßperiode	PH (m)	BFI	T ( $^\circ\text{C}$ )	SD (hpa)	u ( $\text{m s}^{-1}$ )	LE (mm)	$R_n$ ( $\text{W m}^{-2}$ )	G ( $\text{W m}^{-2}$ )	H ( $\text{W m}^{-2}$ )	$g_a$ ( $\text{mm s}^{-1}$ )	$g_s$ ( $\text{mm s}^{-1}$ )
1	0.1	0.1/0.2	6.8/21.5	1.1/14.4	1.5/4.9	1.1/4.6	37/492	7/-53	-240/25	13.4/26	0/20.1
2	1.25	3.7/4.5	15.5/23.7	1.6/11.8	0.7/5.1	2.9/10.3	232/499	-10/-26	-58/128	46/128	23/67.6
3	1.45	2.4 /1.1	19.2/27.0	6.6/23.2	0.6/4.5	0.8/5.1	267/483	-3/-58	-345/-36	53.6/14	0.8/11.2

SD Werte naturgemäß auf relativ niedrigem Niveau. Die restlichen Tage während dieser Periode waren niederschlagsfrei. Aufgrund der Photosynthese bei großer Blattmasse und des damit verbundenen hohen Wasserverbrauches mit einer maximalen Evapotranspiration von maximal  $10 \text{ mm d}^{-1}$  nahm der Bodenwassergehalt schnell ab (Abbildung 1). Die sehr hohe Verdunstungsmenge weist auf den sehr hohen Wasserbedarf der Pferdebohne und ihre Trockenstreßempfindlichkeit (geringer Schutz gegen exzessive Transpiration) hin. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für Sojabohne gefunden (SAYLAN und EITZINGER, 1995).

Nach der Niederschlagsperiode nahm die Strahlung zu und die Temperatur, das Sättigungsdefizit und damit die Evapotranspiration stiegen an. Nach kurzer Zeit trat auch der sogenannte „Oasen“ Effekt (der Energieanspruch der aktuellen Verdunstung übersteigt die verfügbare Energie aus der Strahlungsbilanz wodurch der fühlbare Wärmestrom positiv wird, d. h. zum Erdboden gerichtet ist und so der kühleren Oberfläche fühlbare Wärme aus der überlagerten, wärmeren Luft direkt zugeführt wird) in Erscheinung (Abbildung 2), wobei das Bowenverhältnis einen negativen Wert annimmt.

Die Bestandesleitfähigkeit ( $g_s$ ) variierte wegen der großen Blattmasse und deswegen großer Transpirationskapazität stark und zeigte große Werte (Abbildung 3). Sie bewegte sich in Abhängigkeit zu den Witterungsbedingungen zwischen  $20 \text{ mm s}^{-1}$  und  $70 \text{ mm s}^{-1}$ , wobei am Anfang der Meßperiode der Einfluß feuchter Oberflächen (Niederschlag) und später das steigende SD als bestimmende Faktoren wirkten. Wegen der großen Bestandeshöhe wies  $g_a$  in dieser Wachstumsphase größere Werte auf als in der ersten Meßperiode. Sie änderte sich zwischen  $45 \text{ mm s}^{-1}$  und  $130 \text{ mm s}^{-1}$ .

Die dritte Meßperiode (15. Juli bis 27. Juli) fiel in eine ausgesprochen trockene und heiße Witterungsphase, wobei die Pflanzen in Wasserstreß gerieten (Abbildung 1). Auf Grund der großen Hitze und des daraus resultierenden Wassermangels erfolgte eine überaus schnelle Abtrocknung und beschleunigte Abreife der Pflanzen. In dieser Periode sank der BFI wegen des Blattabfalls von 2.3 auf ca. 1. Der Niederschlag betrug nur 27 mm an zwei Tagen. An den anderen Tagen war das Wetter klar, sonnig, warm und sehr trocken. In dieser Periode stieg das SD bis auf 23 hpa. Die Tagesmitteltemperatur schwankte zwischen  $19^\circ \text{ C}$  und  $27^\circ \text{ C}$ .

Durch den Blattabfall nahm der Bodenwärmestrom ( $G$ ) deutlich zu. Die LE sank in dieser Zeit gegenüber der vorhergehenden Periode stark ab. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der LE und der anderen Energiebilanzkomponenten in dieser Periode.  $R_n$  schwankte zwischen  $260 \text{ W m}^{-2}$  und

$500 \text{ W m}^{-2}$  und der fühlbare Wärmestrom zeigte wieder einen negativen Energiefluß. In dieser Meßperiode zeigte sich kein „Oasen“ Effekt mehr, da aufgrund der geringeren Verdunstung (trockene Bodenoberfläche und niedriger Blattflächenindex) im Bestand selbst genügend fühlbare Wärme zur Abdeckung des Energiebedarfs der aktuellen Verdunstung zur Verfügung stand. Anfangs (bis zu stärkerem Blattabfall ab dem 22. Juli) bewegte sich wegen der noch relativ hohen Transpiration die durchschnittliche LE pro Tag zwischen  $40$  und  $240 \text{ W m}^{-2}$  ( $0.8$ – $4.5 \text{ mm}$ ). Die  $g_s$  (Abbildung 3) nahm bis zum Ende der Meßperiode wegen des abnehmenden BFI und trockenen Bodens von ca.  $10 \text{ mm s}^{-1}$  auf ca.  $0.8 \text{ mm s}^{-1}$  ab. Der Niederschlag, der nur kurze Zeit fiel, beeinflusste  $g_s$  kaum, da er durch Interzeption schnell wieder verdunstete. Andererseits änderte sich die  $g_a$  wegen der höheren Windgeschwindigkeit in diesem Zeitraum zwischen  $50 \text{ mm s}^{-1}$  und  $140 \text{ mm s}^{-1}$ .

Bei Betrachtung aller drei Meßperioden erkennt man, daß die Bestandesleitfähigkeit in der zweiten Periode wegen des großen Blattflächenindex um ein vielfaches größer war als während der anderen Perioden. Unter diesen Bedingungen beträgt der Anteil der Transpiration an der Evapotranspiration selbst bei nasser Bodenoberfläche (und damit der Anteil der physiologischen Komponente an der  $g_s$ ) über 95 % (JONES, 1983). In der letzten Meßperiode zeigte sich die kleinste  $g_s$ , weil die Blätter zum großen Teil abgefallen waren, nur mehr geringe Assimilation stattfand und die Bodenoberfläche abgetrocknet war. In der ersten Meßperiode dagegen lag die Bestandesleitfähigkeit trotz des noch niedrigeren BFI etwas höher, was auf den großen Anteil des Bodens an der  $g_s$  und den höheren Bodenwassergehalt zurückgeführt werden kann. An Tagen mit feuchter Bodenoberfläche variierte die  $g_s$  in Abhängigkeit von der Interzeption und der Evaporation zwischen  $30$  und  $60 \text{ mm s}^{-1}$ .

Die aerodynamische Leitfähigkeit wies in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Bestandeshöhe in der letzten Periode die größten und in der ersten Periode die kleinsten Werte auf. Sie schwankte in Abhängigkeit vom Wind während der Messungen zwischen  $15 \text{ mm s}^{-1}$  und  $140 \text{ mm s}^{-1}$ .

Während aller Meßperioden variierte die Strahlungsbilanz an Tagen ohne Niederschlag zwischen ca.  $200$  und  $500 \text{ W m}^{-2}$  und an Tagen mit Niederschlag zwischen ca.  $35$  und  $270 \text{ W m}^{-2}$ . Die LE betrug an Tagen mit Niederschlag zwischen  $60$  und  $230 \text{ W m}^{-2}$  und an Tagen ohne Niederschlag zwischen  $100$  und  $490 \text{ W m}^{-2}$  (Tagesmittel), was maximal ca.  $10 \text{ mm ET}$  entspricht (Tabelle 1).

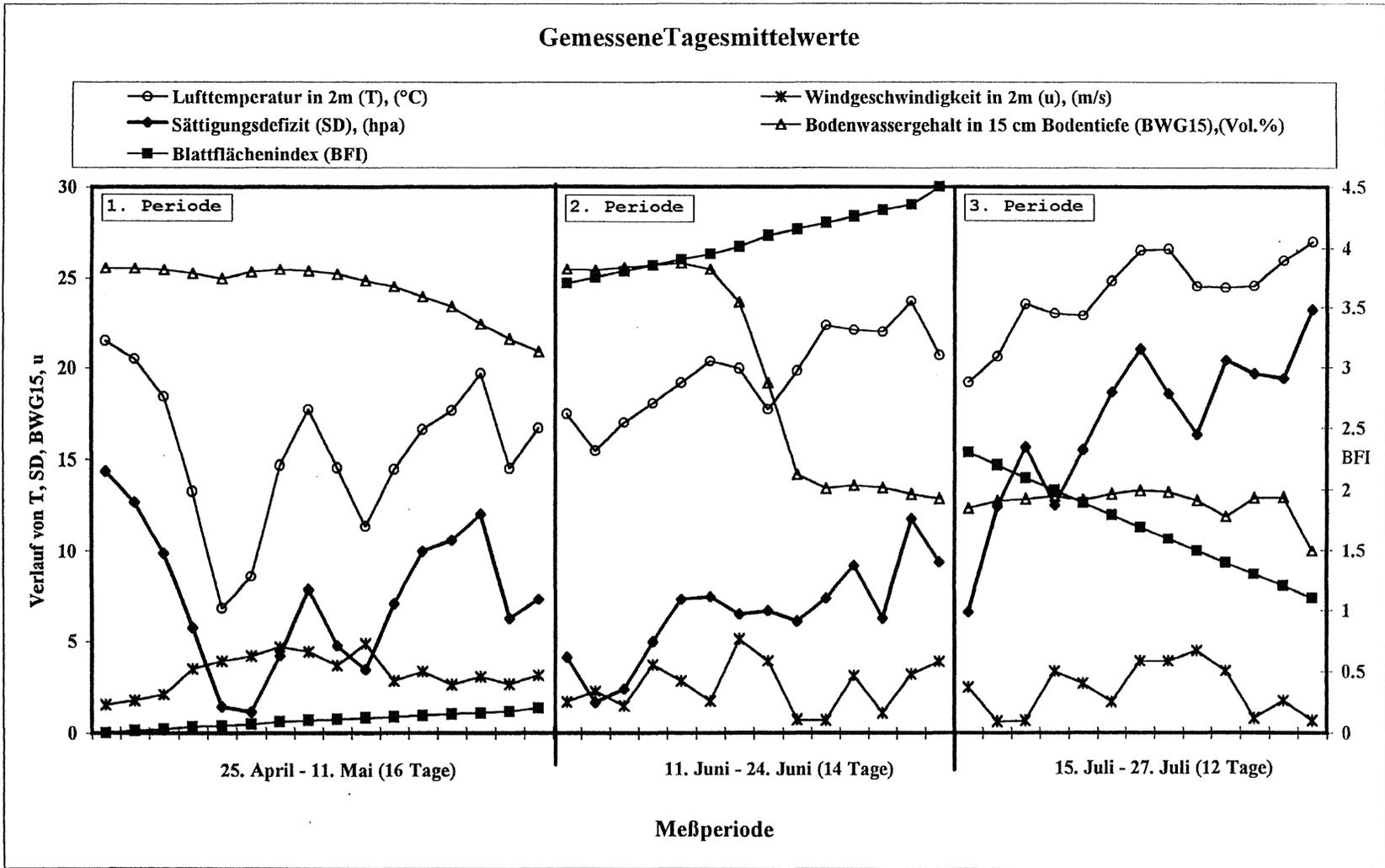
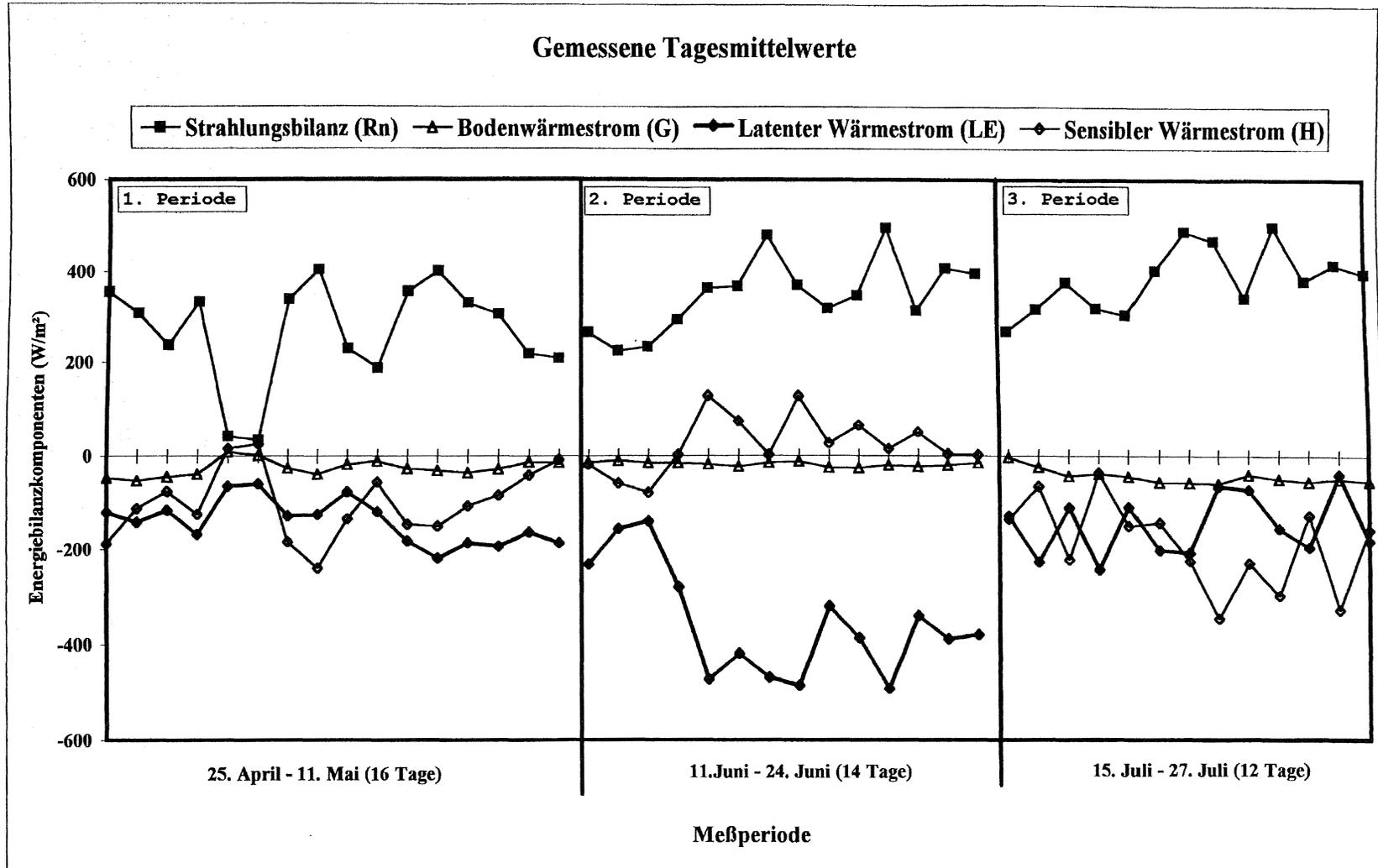


Abbildung 1: Verlauf von atmosphärischen, Boden- und Pflanzenparameter während der drei Meßperioden bei Pferdebohne  
 Figure 1: The variation of atmospheric, soil- and plant parameters during the three measuring periods with faba bean



Saylan L. und J. Eitzinger

Abbildung 2: Verlauf der Energiebilanzkomponenten während der drei Meßperioden von Pferdebohne  
 Figure 2: The variation of the energy balance components during the three measuring periods with fababean

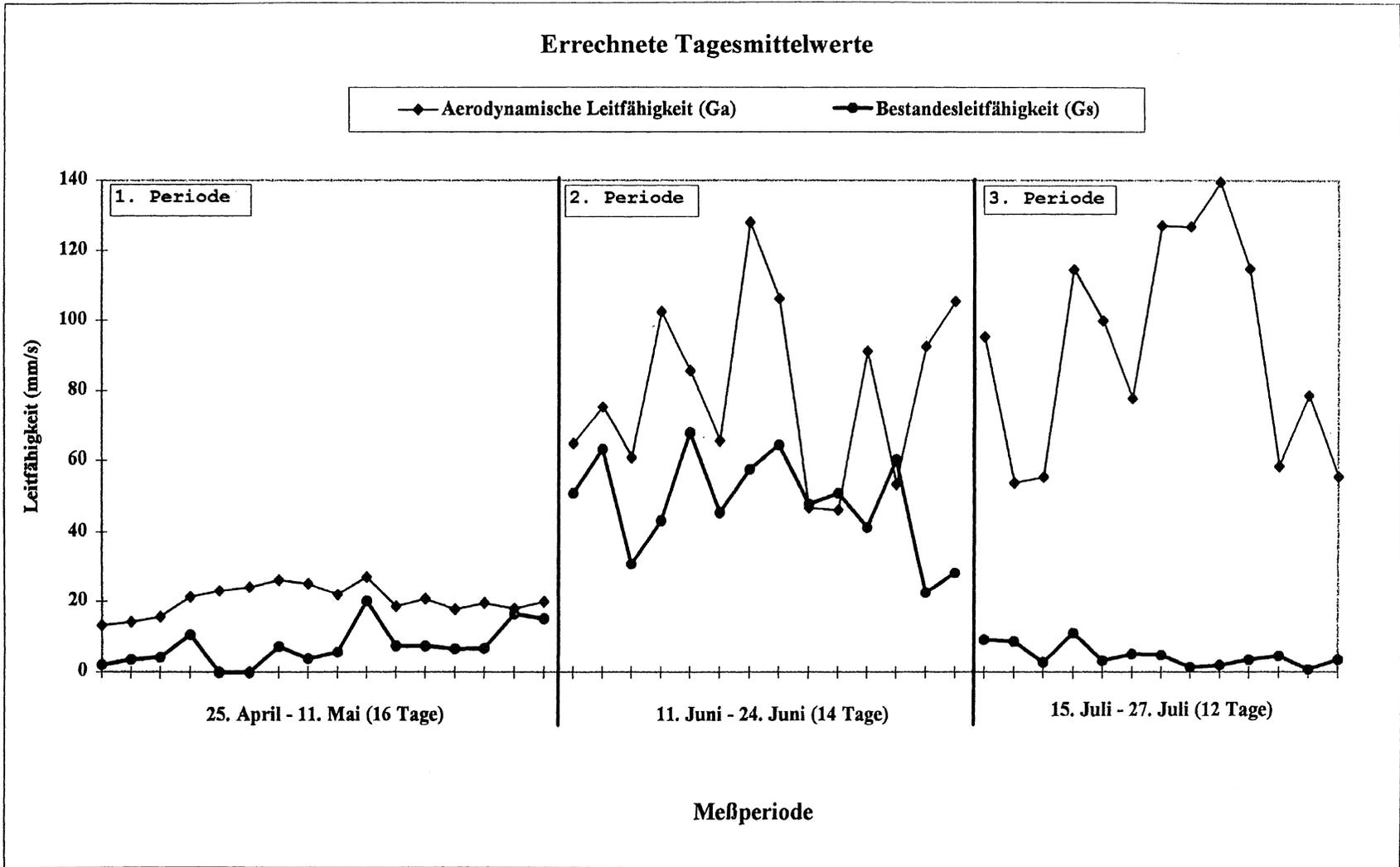


Abbildung 3: Verlauf der aerodynamischen ( $G_a$ )- und Bestandesleitfähigkeit ( $G_s$ ) während der drei Meßperioden von Pferdebohne  
Figure 3: The variation of aerodynamic ( $G_a$ )- and surface conductances ( $G_s$ ) during the three measuring periods with faba bean

Aus der Definition der  $g_s$  ist klar, daß biologische Effekte – wie der Stomatanzustand – sich auf  $g_s$  nur bei trockenem Bestand und in Abhängigkeit vom Blattflächenindex über die Transpiration auswirken können. Bei sehr nasser Bestandes- und Bodenoberfläche dominiert die Evaporation wobei  $g_s$  sehr große Werte annehmen kann.

### 3.2 Beeinflussende Parameter der Bestandesleitfähigkeit

In den letzten Dekaden wurden viele Studien durchgeführt, um eine bessere praktikable Anwendung der Penman-Monteith Kombinationsgleichung durch eine effiziente Ermittlung der aerodynamischen und Bestandeswiderstände aus den beeinflussenden Umweltfaktoren zu erreichen (z. B. JARVIS et al., 1981; JARVIS, 1976; TURNER, 1991; BERNHOFER und GAY, 1990). Derartige Beziehungen wurden unter verschiedenen Klimabedingungen und bei verschiedenen Pflanzenarten aus Funktionen von atmosphärischen, Boden- und Pflanzenparametern bestimmt. Manche Autoren berechneten die  $g_s$  für Sojabohne zum Beispiel aus der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der  $CO_2$ -Konzentration (COLLATZ et al., 1991). Andere wieder verwendeten nur die atmosphärischen Parameter Globalstrahlung und Sättigungsdefizit (DENMEAD und MILLAR, 1976; SHERIFF, 1977; BERKOWITZ und PRAHM, 1982; CHOUDHARY und MONTEITH, 1986; STEWART und GAY 1988). Im Gegensatz dazu verwendeten WAGGONER und REIFSNYDER (1968) nur Bodenparameter (den Bodenwassergehalt und die Bodendichte) zur Bestimmung der  $g_s$  bei Mais. CHOUDHARY und IDSO (1985) betonten die wichtige Rolle atmosphärischer und Pflanzenparameter sowie des Blattwasserpotentials für die Stomataregulierung.

In der vorliegenden Arbeit wurde zwischen der Bestandesleitfähigkeit und den gemessenen mikroklimatischen Parametern über eine Multiregressionsanalyse eine statistische Beziehung hergestellt. Diese Beziehungen sind nur für die gegebenen spezifischen Bedingungen (Pflanzenbestand, Witterung, Wasserversorgung) gültig, da sie wesentlich davon abhängen, welche Faktoren im untersuchten Zeitraum in welchem Ausmaß sensitive Schwellwertbereiche erreichten (BURMAN and POCHOP, 1994). Sie können aber als Richtwerte für ähnliche Bedingungen herangezogen werden.

Für alle drei Meßperioden zusammen ergab sich mit 83 % Beziehungsanteil ( $\sigma = 9.8$ ) die beste Korrelation mit dem BFI, dem BWG15 und des SD zur Bestandesleitfähigkeit.

Zur Bestimmung der Bestandesleitfähigkeit aus diesen Parametern ergibt sich folgender Zusammenhang, gültig für alle drei Meßperioden bei der Pferdebohne an diesem Standort :

$$g_s \text{ (mm s}^{-1}\text{)} = -19.8 - 0.7 \cdot \text{SD(hpa)} + 1.3 \cdot \text{BWG15 (\% - Vol.)} + 11.6 \cdot \text{BFI} \quad (7)$$

In der ersten Meßperiode zeigten die beiden Faktoren Tagesmitteltemperatur und Blattflächenindex wegen ihres großen Einflusses auf die Transpiration und wegen des noch hohen Bodenwassergehaltes mit 86 % die beste Korrelation zu  $g_s$  ( $\sigma = 5.9$ ).

Aufgrund der großen Wachstumsaktivität (Transpiration) und hoher Stomataaktivität sowie voller Bodenbedeckung weist in der zweiten Meßperiode das Sättigungsdefizit der Luft und die Strahlungsbilanz (Einfluß auf die Photosyntheseaktivität) die beste Korrelation zu  $g_s$  ( $r^2 = 0.70$ ,  $\sigma = 5.2$ ) auf.

In der dritten Meßperiode läßt sich die Beziehung zum Sättigungsdefizit der Luft und dem oberflächennahen Bodenwassergehalt (15 cm Bodentiefe) mit 91 % erklären ( $\sigma = 1.2$ ). Da der Bodenwassergehalt in dieser Zeit ein wesentlicher und begrenzender Faktor für die Transpirationsfähigkeit der Pferdebohne war und das SD selbst auch die Stomataöffnung beeinflusst (JONES, 1983), haben die beiden Faktoren den größten Einfluß auf  $g_s$ .

Ähnliche Resultate mit geringfügigen Abweichungen bezüglich der 3 Meßperioden zeigten auch die Messungen bei Sojabohne, da diese ein vergleichbares Transpirationsverhalten zur Pferdebohne aufweist (SAYLAN and BERNHOFER, 1993; SAYLAN und EITZINGER, 1995).

### 4. Schlußfolgerungen

Die Verwendung der Penman-Monteith Gleichung zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration stellt hohe Anforderungen an die Datenbasis und die Parametrisierung. Besonders die Bestimmung der Bestandesleitfähigkeit ( $g_s$ ) und der aerodynamischen Leitfähigkeit ( $g_a$ ), ein wesentlicher Bestandteil der Formel, ist schwierig und aufwendig. Die Alternative ist, brauchbare Werte aus der Literatur oder vereinfachte (meist empirische) Algorithmen oder statistische Verfahren zu verwenden, was jedoch große Unsicherheiten in sich bergen kann.

Aus diesem Grund sollten bei hohen Genauigkeitsanforderungen physikalisch realistische und effektive Methoden

zur Bestimmung der Bestandesleitfähigkeit ( $g_s$ ) (jeweils für verschiedene Pflanzenarten, Bestandescharakteristika und Klimabedingungen) verwendet werden, um daraus einfache Beziehungen zu gängigen Parametern ableiten zu können. Eine derartige Möglichkeit mit Hilfe der BREB Methode wurde in dieser Arbeit am Beispiel der Pferdebohne für einen bestimmten Standort (Groß-Enzersdorf bei Wien, Marchfeld) vorgestellt.

Die wichtigen Eingangsparameter aerodynamische und Bestandesleitfähigkeit der weitverbreiteten Penman-Monteith Kombinationsgleichung zeigten je nach Meßperiode variablen und großen Einfluß von verschiedenen Umweltparametern. Der Energiefluß von latenter Wärme (Evapotranspiration) wird unter Feldbedingungen und während der Vegetationsperiode daher stark von der aerodynamischen und Bestandesleitfähigkeit beeinflusst. Aus diesem Grund muß der zeitliche Verlauf der  $g_s$  und  $g_a$  bzw. der bestimmenden Faktoren bekannt sein, um mit Hilfe der Penman-Monteith Formel die Evapotranspiration berechnen zu können.

## Danksagung

Großer Dank gilt em. Prof. Dr. Inge Dirmhirn und Prof. Dr. Christian Bernhofer für ihre sehr hilfreiche praktische und wissenschaftliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

## Literatur

- BALDOCCHI, D. D., S. B. VERMA und N. J. ROSENBERG (1983): Characteristics of air-flow above and within soybean canopies. *Bound. Layer Meteorol.* 25, 43–54.
- BERKOWITZ, R. and L. P. PRAHM (1982): Sensible heat flux estimated from routine meteorological data by the resistance method. *Amer. Met. Soc.* 21, 1845–1863.
- BERNHOFER, CH. und L. W. GAY (1990): Zur Abschätzung des Spaltöffnungswiderstandes über die Bowenverhältnis-Energiebilanzmethode am Beispiel zweier unterschiedlicher Pflanzenbestände. *BIOMET*, 9.–11. 10. 89, München, Bayr. Lw. Jahrb 67, 77–88.
- BERNHOFER, CH., L. W. GAY, W. LAUBE und W. KLUG (1992): Ein österreichisch-amerikanisches Bowenverhältnis-Energiebilanzmeßsystem. *Wetter und Leben* 44, 83–106.
- BLANEY, H. F. and W. D. CRIDDLE (1950): Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *USDA Soil Conservation Service Tech.* 96, 48–58.
- BOWEN, I. S. (1926): The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 27, 771–787.
- BURMAN, R. and L.O. POCHOP (1994): *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data – Development in Atm. Science* 22, Elsevier, Amsterdam.
- CHOUDHARY, B. J. and S. B. IDSO (1985): An empirical model for stomatal resistance of field-grown wheat. *Agric. For. Meteorol.* 36, 65–82.
- CHOUDHARY, B. J. and J. L. MONTEITH (1986): Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vegetation. *Agric. For. Meteorol.* 36, 215–225.
- COLLATZ, G. J., J. T. BALL, C. GRIVET and A. J. BERRY (1991): Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration, a model that includes a laminar boundary layer. *Agric. For. Meteorol.* 54, 107–136.
- DENMEAD, O. T. and B. D. MILLAR (1976): Field studies of the conductance of wheat leaves and transpiration. *Agron. J.* 68, 307–311.
- GAY, L.W. (1988): A portable Bowen ratio system for ET measurements. *Proc. Natl. Conf. Irrig.* Lincoln, NE. ASCE. 345 East 47<sup>th</sup> St. New York, NY 10017, 625–632.
- HARGREAVES, G.H. (1974): Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Trans. ASAE* 17, 701–704.
- JARVIS, P. G. (1976): The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. B.* 273, 593–610.
- JARVIS, P. G., W.R.N. EDWARDS and H. TALBOT (1981): Models of plant and crop water use. In: D. A. ROSE and C. W. CHARLES-EDWARDS (eds.): *Mathematical and Plant Physiology*. Academic Press, London, 151–194.
- JONES, H. G. (1983): *Plants and microclimate – A quantitative approach to environmental plant physiology*. Camb. Univ. press, Cambridge.
- LOURENCE, F. J. and W. D. PRUITT (1968): A psychrometer system for micrometeorology profile determination. *J. Appl. Meteorol.* 8, 492–498.
- MONTEITH, J. L. (1965): *Evaporation and Environment*. In FOGG, G. F. (Ed.): *The state and movement of water in living organisms*. Academic Press, New York, 205–234.
- MÜLLER, W. (1993): *Agroklimatische Kennzeichnung des zentralen Marchfeldes*. Beihefte zu den Jahrbüchern der ZAMG-Klimatologie, H. 3, Wien.

- NIE, D., I., D. FLITCROFT and E. T. KANEMASU (1992): Performance of Bowen ratio systems on a scope. *Agric. For. Meteorol.* 59, 165–181.
- OHMURA, A. (1982): Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio calculations. *J. Appl. Meteorol.* 21, 595–598.
- PENMAN, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.*, 193, 120–146.
- PERRIER, E. R., J. M. ROBERTSON, R. J. MILLINGTON and D. B. PETERS (1972): Spatial and temporal variations of wind above and within a soybean canopy. *Agric. For. Meteorol.* 10, 421–442.
- SAYLAN, L. (1993): Der Einfluß atmosphärischer, Boden- und Pflanzenparameter auf die Evapotranspiration von Sojabohne, Pferdebohne und Mais. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- SAYLAN, L. and CH. BERNHOFER (1993): Using the Penman-Monteith approach to Extrapolate Soybean Evapotranspiration. *Theor. Appl. Clim.* 46, No. 4, 241–244.
- SAYLAN, L. und J. EITZINGER (1995): Die Anwendung der Bowenverhältnis-Energiebilanzmethode für die Bestimmung der Bestandesleitfähigkeit eines Pflanzenbestandes. *Bull. Tech. Univ. Istanbul*, Vol. 48, 469–480.
- SCHRÖDTER, H. (1985): Verdunstung. Springer, Berlin.
- SHERIFF, D. W. (1977): The effect of humidity on water uptake by, and viscous flow resistance of, excised leaves of a number of species. *Physiological and anatomical observations*, *J. Exp. Bot.* 28, 1399–1407.
- SINCLAIR, T. R., L. H. ALLEN and E. R. LEMON (1975): An analysis of error in the calculation of energy flux densities above vegetation by a Bowen ratio profile method. *Bound.-Layer Meteorol.* 8, 129–139.
- STEWART, J. B. and L. W. GAY (1988): Preliminary modeling of transpiration from the five site in Kansas. *Agric. For. Meteorol.* 48, 19–35.
- TANNER, C. B. (1960): Energy balance approach to pottranspiration from crops. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 1–9.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948): An approach toward rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55–91.
- THOM, A. S. and H. R. OLIVER (1977): On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Q. J. Meteorol.* 103, 345–357.
- TURNER, N. C. (1991): Measurement and Influence of environmental and plant factors on stomatal conductance in the field. *Agric. For. Meteorol.* 54, 137–154.
- WAGGONER, P. E. and W. E. REIFSNYDER (1968): Simulation of the temperature, humidity and evaporation process in a leaf canopy. *J. Appl. Meteorol.* 7, 400–409.

### Anschrift der Verfasser

Univ.-Doz. Dr. Levent Saylan, Fakultät für Luft- und Raumfahrt, Abteilung für Meteorologie, Technische Universität Istanbul, Maslak 80626, Istanbul/Türkei.

Univ.-Ass. Dr. Dipl.-Ing. Josef Eitzinger, Institut für Meteorologie und Physik der Universität für Bodenkultur, Türkenschanzstraße 18, A-1180 Wien.

Eingelangt am 27. November 1997

Angenommen am 20. Jänner 1998