

Protokoll 7: Verdunstung

Bastian Heß, Rebekka Hüfner

06.01.2010

1 Aufgabenstellung

Führen Sie die Berechnung von Übung 6 fort und berechnen Sie nun auch den *stomatären Transportwiderstand* mit der Parametrisierung von Wesley.

Nun können Sie die Penman-Monteith-Gleichung nutzen, um folgende *latente Wärmeströme* zu bestimmen:

1. bei potenzieller Verdunstung ($r_s=0$)
2. bei aktueller Verdunstung ($r_s > 0$)

Bestimmen Sie das Bowensverhältnis ($H/\lambda E$) *und die verdunstete Wassermenge* für beide Fälle und stellen Sie diese als mittlere monatliche Tagesgänge dar. Dazu steht Ihnen der Datensatz `\\ufobi6\trans\ppoeck\ueb7\fl\evap.sd2` zur Verfügung.

Er enthält die Variablen:

G Bodenbestandswärmestrom,

RN Netto-Strahlung,

G_{so} Globalstrahlung (W/m^2)

SHF_{tc} und **LHF_{tc}** mit der Eddy-Korrelationsmethode bestimmte turbulente Energieströme ($\text{SHF}_{tc}=H$, $\text{LHF}_{tc}=\lambda E$) in W/m^2 .

P₀₂: Luftdruck (hPa)

VPD: Wassersättigungsdefizit in 39 m Höhe (Pa)

WG₃₉: Windgeschwindigkeit in 39 m Höhe (m/s)

2 Methode der Auswertung

2.1 Einleitung_{Heß}

Ein wichtiger physikalischer Prozess, der sowohl den physikalischen Zustand der Atmosphäre als auch die Wasserversorgung von Ökosystemen entscheiden mitbestimmt ist die Verdunstung.

Verdunstung kann stattfinden, wenn Wasser Energie in Form von Strahlung oder Wärme zugeführt wird und die umgebende Luft nicht feuchtegesättigt ist. Das heißt, dass sowohl Verdunstung als auch deren Umkehrung die Kondensation immer mit einem Energiefluß einhergehen, die Verdunstung von Wasser führt dabei zu einer Abkühlung der nassen Oberfläche. Da eine direkte Messung der Verdunstung schwierig ist nutzt man diese Energieflüsse und bestimmt die Verdunstung mit Hilfe des latenten Wärmestroms.

Um nicht nur die potentielle, sondern auch die aktuelle Verdunstung berechnen zu können müssen verschiedene Transportwiderstände einbezogen werden.

In Übung 6 haben wir den laminaren und den aerodynamischen Grenzschichtwiderstand berechnet, diese sind für die Berechnung der aktuellen Verdunstung wichtig, da sie mit der Windgeschwindigkeit zusammenhängen. Eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit sorgt für eine schnellere Bewegung der Luftpakete und somit für eine erhöhte Verfügbarkeit von neuen, trockenen Luftpaketen und letztendlich für eine höhere Verdunstung.

Um die Verdunstung eines Bestandes berechnen zu können reichen diese beiden Widerstände nicht aus. In dieser Übung wird deswegen ein weiterer Widerstand verwendet, der stomatäre Transportwiderstand, der die Fähigkeit der Pflanzen mit Hilfe ihrer Stomata den Wasserverlust durch Verdunstung zu regulieren in die Berechnung der Verdunstung mit einbezieht.



2.2 Theorie_{Hüfner}

Die *potentielle Verdunstung* entspricht der Verdunstung über einer freien Wasseroberfläche oder eines mit Regen bedeckten Bestandes und wird durch die Penman-Gleichung berechnet:

$$(Gl. 1) \lambda_w \cdot E = \frac{\Delta \cdot (Rn - G) + \rho \cdot c_p \cdot [E_s(T) - e] / r_w}{\Delta + \gamma}$$

Erweitert man diesen Ansatz um den stomatären Widerstand, den die Pflanzen nutzen um ihren Wasserverlust zu regulieren ergibt sich die Penman-Monteith-Gleichung:

$$(Gl. 2) \lambda_w \cdot E = \frac{\Delta \cdot (Rn - G) + \rho \cdot c_p \cdot [E_s(T) - e] / (r_a + r_b)}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a + r_b}\right)}$$

$\lambda_w \cdot E$ latenter Wärmestrom $\frac{W}{m^2}$

Rn Nettostrahlung $\frac{W}{m^2}$

G Globalstrahlung $\frac{W}{m^2}$

ρ Wasserdampfdichte in $\frac{kg}{m^3}$

c_p spezifische Wärmekapazität für Luft bei konstantem Druck ist $(1004 \frac{J}{K \cdot kg})$
 E_s Sättigungsdampfdruck in hPa
 e Wasserdampfpartialdruck in hPa
 r_a atmosphärischer Transportwiderstand $\frac{s}{m}$
 r_b laminarer Transportwiderstand $\frac{s}{m}$
 r_s stomatärer Transportwiderstand $\frac{s}{m}$, bei Berechnung der potentielle Verdunstung wird $r_s = 0$ gesetzt.
 γ Psychrometerkonstante in $\frac{Pa}{K}$

Dieser Ansatz behandelt den gesamten Bestand als ein großes theoretisches Blatt, als "big leaf".

Als Werte für r_s wird die von Wesely vorgeschlagene Parametrisierung (Gl. 3) eingesetzt.

Deren Berechnung ist nur gültig bei $Q > 50 \frac{W}{m^2}$, unterhalb dieses Wertes wird ausschließlich kutikuläre Verdunstung angenommen ($r_s = 2000 \frac{s}{m}$).

$$(Gl. 3) \quad r_s = 130 \frac{s}{m} \left\{ 1 + \left(\frac{200|Q|}{Q+0.1} \right)^2 \right\} \frac{400[T]}{T(40-T)}$$

Als Ergebnis aus der Penman-Monteith Gleichung erhalten wir $\lambda \cdot E$, den latenten Wärmestrom.

Für die Verdampfungswärme λ wird als Näherung 2,5 MJ/kg angenommen.

$$(Gl. 4) \quad E = \frac{\lambda \cdot E}{\lambda}$$

Das *Bowenverhältnis* errechnet sich aus dem Verhältnis des fühlbaren zum latenten Wärmestrom und zeigt wie die vorhandene Energie sich auf die Wärmeströme aufteilt.

$$(Gl. 5) \quad \beta = \frac{H}{\lambda E}$$

Ist $\beta > 1$ wird Energie als fühlbare Wärme abgegeben die nicht zur Verdunstung benötigt wurde, ist $\beta < 1$ fließt die Energie in die Verdunstung, der latente Wärmestrom ist dann größer als der fühlbare Wärmestrom und ist $\beta < 0$ dann fließt einer der Wärmeströme aus der Atmosphäre in den Bestand.

2.3 SAS-Quellcode_{Heß}

```

libname ueb7 "U:\ppoek\ueb7\";
data flevap; set ueb7.flevap;
run;
/*aerodynamische Eigenschaften der Fichtenfläche F1 s.Übung 6 */
%let Z0_1 = 2.6;
%let D_1=22;

```

```

/*Auswahl September 1997*/
data flevap_Sept;
set flevap;
if "1SEP1997:00:00:00"dt <= saszeit <= "1OCT1997:00:00:00"dt; hour = hour(saszeit)
+0.5;

/*Wesely-Parametrisierung*/
if G_so > 50 and TT_so > 0
    then rs = 130 *(1+(200/(G_so+0.1))**2) * 400/(TT_so*(40-TT_so));

else rs = 2000;

/* aerodynamischen und laminare Widerstand berechnen */
ustar=WG_39*0.41/log((39-d_1)/Z0_1);
if ustar > 0
    then do;
        ra = WG_39/(ustar**2);
        Rb = 2 /(ustar*0.41)* (22.2E-6/24.9e-6)**(2/3);
    end;

/* Berechnung der Eingangsgrößen Penman-Monteith-Gleichung */
cp = 1004; /* J/(K*kg) spez Wärmekapazität */
rho = P_02 * 100/(287.01 * (TT_so + 273.15)); /* kg/m² Luftdichte */
lambda = (2.5008-0.002372*(TT_so))*1e6; /* latente Verdampfungswärme (J/kg)
*/
Es = 610.78*exp(17.08085*(TT_so)/(234.175+TT_so)); /*Magnusfunktion*/
delta = ES*3999.9080/(234.175+TT_so)/(234.175+TT_So); /* Steigung der
Sättigungsdampfdruckkurve über der Temperatur (Pa/K)*/
gamma = 1004*(P_02*100)/(0.622*lambda); /* Psychrometerkonstante (Pa/K)
*/
V_akt = (delta*(RN-G)+rho * CP*(VPD)/(ra+rb))/(delta+gamma*(1+rs/(ra+rb)));
/* aktuelle Verdunstung nach Penman Monteith (W/m²) */
V_pot = (delta*(RN-G) + rho * CP*(VPD)/(ra + rb))/(delta + gamma*(1+0
/(ra+rb)) ); /* potenzielle Verdunstung nach Penman Monteith (W/m²)*/
run;

/* Mittelwerte bilden */
proc sort data = flevap_Sept;
by hour;
run;

proc means data = flevap_Sept noprint;
by hour; output out = flevap_SeptA mean=;
run;

/*Wassermenge berechnen*/

```

```

Vl_akt=lE_PM/lambda*3600; /* W/m2/J/kg *3600 = kg/m2h */
Vl_pot=lE_PM_pot/lambda*3600;

/*Eddykovarianzwerte*/
Vl_gem=LHF_tc/lambda*3600;
run;

/* GIF-Grafikausgabe erzeugen */
GOPTIONS DEVICE=gif733 noborder
GACCESS='sasgastd>U:\ppoek\ueb\u7\u7_00_05.gif'
GSFMODE=REPLACE
FTEXT=complex
HTEXT=1.2;
symbol1 i = join c = cyan w=2 l=1;
symbol2 i = join c = blue w=2 l=1;
symbol3 i = join c = green w=2 l=1;
symbol4 i = join c = purple w=2 l=1;
symbol5 i = join c = yellow w=2 l=1;
axis1 label = ("Tageszeit September 1997");
axis2 label = ("Transportwiderstand (s/m)");
axis3 label = ("Verdunstungsrate ");
axis4 label = ("Energieröme (W/m2)");
axis5 label = ("Bowen-Verhältnis");
axis6 label = ("Verdunstete Wassermenge (kg/(m2h))");
legend1 label = none value = ("Ra Wald" "Rb Wald" "Rs Wald");
legend2 label = none value = ("lE_PM lat.Wärmestrom bei akt.Verdunstung"
"lE_PM_pot lat.Wärmestrom bei pot.Verdunstung");
legend3 label = none value = ("akt Verdunstung PM" "pot Verdunstung PM"
"Eddykovarianz");/*Transportwiderstände*/

proc gplot data = f1evap_SeptA;;
plot (Ra Rb Rs) * hour /frame overlay haxis = axis1 vaxis = axis2 legend=legend1;
run;quit;

/*Transportwiderstände nur Ra und Rb*/
goptions GACCESS='sasgastd>U:\ppoek\ueb\u7\u7_00_01b.gif';
proc gplot data = f1evap_SeptA;;
plot (Ra Rb Rs) * hour /frame overlay haxis = axis1 vaxis = axis2 legend=legend1;
run;quit;

/*Bowen-Verhältnis*/
data f1evap_SeptA;
set f1evap_SeptA;

/*H berechnen aus Haushaltsgleichung*/

```

```

H_akt=RN-G-V_akt;
H_pot=RN-G-V_pot;

/*Bowen-Verhältnis*/
if H_akt ne 0 then beta_akt=H_akt/V_akt;
if H_pot ne 0 then beta_pot=H_pot/V_pot;
if LHF_tc ne 0
    then beta_gem=SHF_tc/LHF_tc;

/* Grafik der Energieströme */
goptions GACCESS='sasgastd>U:\ppoek\ueb\u7\u7_00_03.gif';
proc gplot data = f1evap_SeptA;
plot (H_akt V_PM V_pot SHF_tc LHF_tc) * hour /frame overlay haxis =
axis1 vaxis = axis4 legend;
run;quit;

/* Grafik der Bowen-Verhältnisse */
goptions GACCESS='sasgastd>U:\ppoek\ueb\u7\u7_00_04.gif'; proc gplot
data = f1evap_SeptA;
plot (beta_akt beta_pot beta_gem) * hour/frame overlay haxis = axis1 vaxis
= axis5 legend;
run;quit;

/* Grafik der verdunsteten Wassermenge */
goptions GACCESS='sasgastd>U:\ppoek\ueb\u7\u7_00_05.gif';
proc gplot data = f1evap_SeptA;
plot (V1_akt V1_pot V1_gem) * hour/frame overlay haxis = axis1 vaxis = axis6
legend;
run;quit;

```

3 Ergebnisse *Hüfner*

3.1 Transportwiderstände

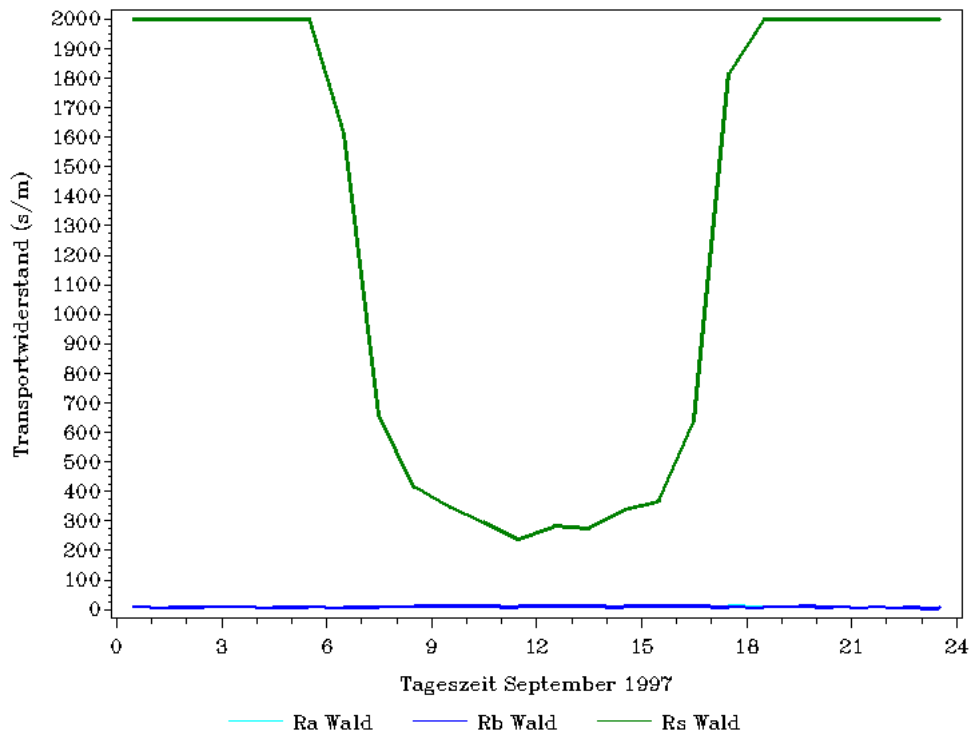


Abb.1 Mittlere monatliche Tagesgang des atmosphärischen (R_a), laminaren (R_b) und stomatären (R_s) Transportwiderstandes über einem Fichtenbestand im Solling im September 1997

In Abbildung 1 zeigt für den mittleren monatlichen Tagesgang des atmosphärischen und des laminaren Transportwiderstandes einen etwa gleichbleibenden Tagesverlauf bei ca 20 s/m.

Der stomatäre Widerstand zeigt eine starke Veränderung im Tagesverlauf, nachts ist er bei 2000 s/m. Ab 6 Uhr fällt er stark auf ca 300 s/m ab und bleibt von ca 9 Uhr bis zum nachmittag auf Werten von 200 bis 400 s/m, um danach bis ca 19 Uhr wieder stark anzusteigen um das alte Niveau von 2000m/s zu erreichen.

3.2 Verdunstete Wassermenge

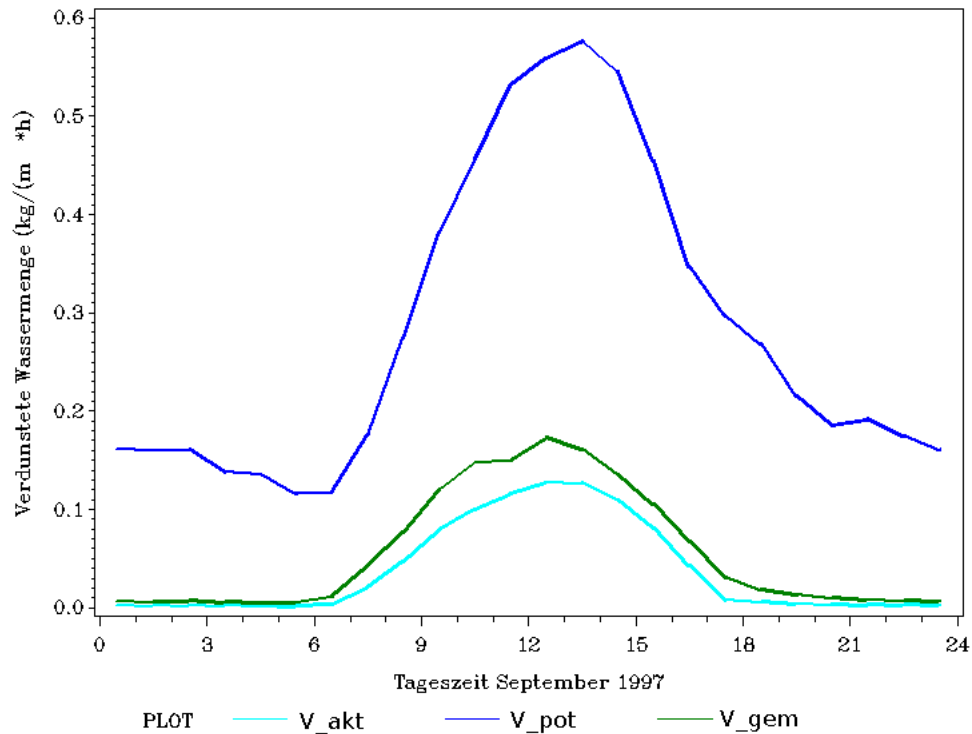



Abb.2 Mittlerer monatlicher Tagesgang der Verdunstungsrate in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$ für potentielle (V_{pot}) und aktuelle (V_{akt}) sowie die über die Eddykovarianz-Methode (V_{gem}) bestimmte Verdunstung über einem Fichtenbestand im Solling im September 1997

Für den mittleren monatlichen Tagesgang der Verdunstungsrate in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$ zeigt sich, dass die mit der Penman-Monteith Gleichung ermittelte aktuelle Verdunstung und die Verdunstung die mit Hilfe der Eddykovarianzmethode bestimmt wurde einen ähnlichen Verlauf zeigen, wobei die aktuelle Verdunstung nach Penman-Monteith durchgehend geringer ist als die gemessene Verdunstung, diese also etwas unterschätzt 

Beide liegen deutlich unterhalb der potentiellen Verdunstung.

Nachts findet kaum Verdunstung statt, obwohl sie potentiell möglich wäre. Am Tage steigt die potentielle Verdunstung zum Mittag hin stark an und auch die aktuelle und gemessene Verdunstung zeigt mittags ein Maximum, dieses bleibt jedoch weit hinter der potentiellen Verdunstung zurück.

3.3 Bowen-Verhältnis

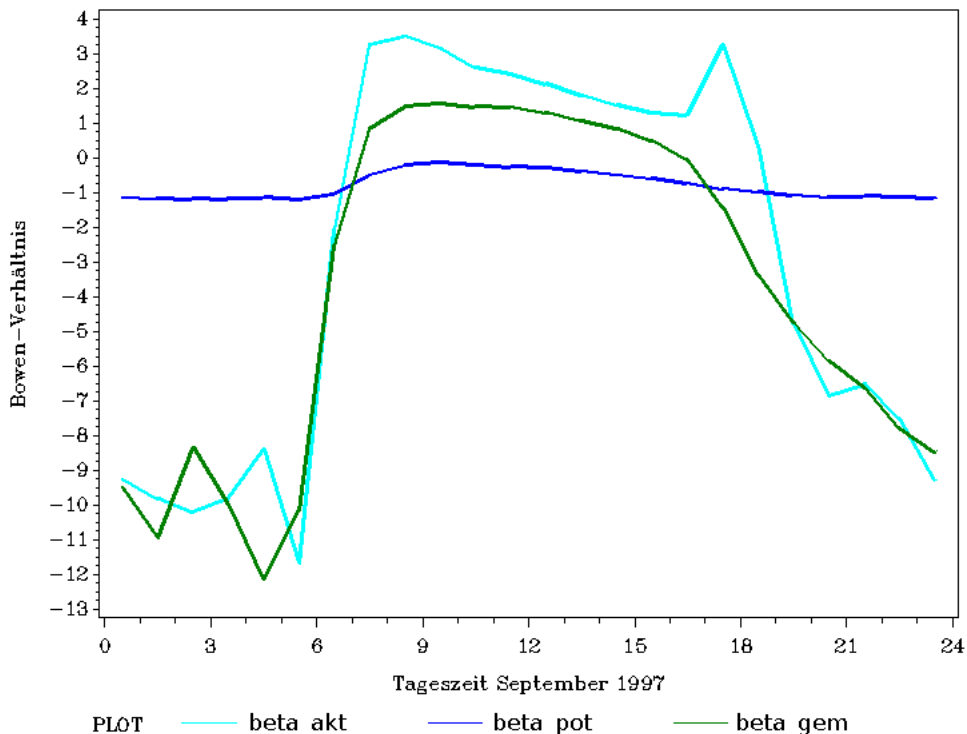


Abb.3: Mittlerer monatlicher Tagesgang des Bowenverhältnisses der potentiellen und aktuellen Verdunstung aus Penman-Monteith-Gleichung (β_{akt} , β_{pot}) und tatsächliche gemessene Werte (β_{gem}) über einem Fichtenbestand im Solling im September 1997


Die Darstellung der mittleren monatlichen Tagesgänge der Bowen-Verhältnisse in Abbildung 3 zeigt einen ähnlichen Verlauf von β_{akt} und β_{gem} . Diese Verläufe nachts im negativen Bereich, zeigen einen starken Anstieg bei Sonnenaufgang, der β rasch größer null werden lässt. Tagsüber bleiben beide im positiven Bereich bei ca 1 bis 4 und sinken dann am späten Nachmittag bis Abend wieder in den negativen Bereich ab um dann von ca 18 Uhr bis kurz vor Sonnenaufgang abzufallen. Der Tagesgang von β_{akt} zeigt jedoch deutlich mehr Peaks und ist tagsüber höher als β_{gem} .

Die Darstellung des Bowen-Verhältnisses das aus der potentiellen Verdunstung errechnet wurde zeigt eine geringe Schwankung im Tagesverlauf mit einem leichten Anstieg nach Sonnenaufgang und bleibt immer zwischen -1.3 und -0.2.

4 Diskussion_{Heß}

4.1 Transportwiderstände

In Abbildung 1 kann man deutlich sehen wie stark der stomatäre Transportwiderstand im Vergleich zum atmosphärischen und laminaren Widerstand ist. Da wir die Parametrisierung nach Wesely benutzt haben wird für Werte der Globalstrahlungsbilanz $Q < 50 \text{ W/m}^2$ der stomatäre Transportwiderstand auf den Wert 2000 s/m gesetzt, da man bei diesem Modell davon ausgeht, dass nachts durch den Mangel an Strahlung keine Photosynthese stattfinden kann und deshalb auch der Gasaustausch durch die Stomata nicht benötigt wird und diese geschlossen sind. Ab diesem Punkt nimmt man in diesem Modell an, dass nur noch kutikuläre Verdunstung stattfindet.

Aber nicht nur zur geringe Strahlung wie in diesem Modell berücksichtigt sondern auch zu starke Strahlung kann zu einem Verschluss der Stomata führen, da sich Pflanzen bei hoher Einstrahlung vor zu starker Verdunstung schützen müssen. Dies kann an einem Sommertag der Fall sein und eventuell auch an einem sonnigen Wintertag mit niedrigen Bodentemperaturen, da dann die Wasserversorgung der Pflanze gestört sein kann. 

Die Betrachtung der Transportwiderstände zeigt, dass ein Modell der Evapotranspiration, das den stomatären Transportwiderstand nicht mit einbezieht eine entscheidende Größe vernachlässigen würde.

4.2 Verdunstete Wassermenge

Sowohl die gemessene als auch die aus der Penman-Monteith-Gleichung berechnete Verdunstung bleiben unterhalb der potentiellen Verdunstung zurück. Eine Überschreitung der potentiellen Verdunstung durch die aktuelle Verdunstung wäre auf Messfehler zurückzuführen, bei einer Überschreitung durch die gemessene Verdunstung könnten Messfehler oder eine Unterschätzung der potentiellen Verdunstung durch das Modell die Ursache sein.

Vergleicht man die aktuelle Verdunstung mit der gemessenen Verdunstung fällt auf, dass bei unserer Berechnung die aktuelle Verdunstung unterschätzt wird. Wird diese Unterschätzung durch die Annahme eines zu hohen stomatären Widerstandes verursacht, kann eine andere Parametrisierung dies ändern. Ist dies jedoch nicht der Fall und ein andere Größe des Modells führt zu der Unterschätzung muss davon ausgegangen werden, dass auch die potentielle Verdunstung unterschätzt wird. So könnte bei Anwendung dieses Modells bei sehr nassen Verhältnissen die gemessene Verdunstung die potentielle Verdunstung überschreiten.

Die gemessene Verdunstung zeigt außerdem einen kleinen Rückgang der Verdunstung kurz vor Mittag, dieser Verlauf zeigt sich nicht in den berechneten Werten der aktuellen Verdunstung. Eventuell verschließt hier die Pflanze Stomata um bei der starken Einstrahlung nicht zuviel zu verdunsten, dieses Verhalten wird von der Penman-Monteith-Gleichung nicht berücksichtigt (vgl. 4.1 Trans-

portwiderstände) und der Abfall taucht deshalb auch in der Kurve der aktuellen Verdunstung nicht auf.



4.3 Bowens-Verhältnis

Das Bowens-Verhältnis der potentielle Verdunstung liegt durchgehend bei ca -1 und schwankt kaum, da es nicht vom stomatären Widerstand beeinflusst ist. Da $\beta < 0$ ist, muss einer der beiden Energieflüsse aus der Atmosphäre in den Bestand fließen. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um den fühlbaren Wärmestrom H .



Die deutliche Veränderung im Tagesverlauf der Bowens-Verhältnisse aus aktueller und gemessener Verdunstung wie sie in Abbildung 3 zu sehen ist ist auf den stomatären Widerstand zurückzuführen, den die Pflanzen der ungehinderten Verdunstung entgegensetzen und der bei der Berechnung des aktuellen Transportwiderstandes berücksichtigt wurde.

Tagsüber, also bei Sonneneinstrahlung ist $\beta < 1$, somit wurde mehr Energie in Form von fühlbarer Wärme freigesetzt als für die Verdunstung benötigt wurde. Nachts hingegen wird β auch für diese beiden Verhältnisse negativ und somit fließt ein Wärmestrom in den Bestand.

5 Schlußfolgerungen Hüfner

Der stomatäre Widerstand hat einen großen Einfluß auf die Verdunstung. Da die Penman-Monteith-Gleichung diesen Widerstand berücksichtigt ist sie ein praktisches Instrument um die tatsächliche Verdunstung aus relativ leicht messbaren Größen zu nähern. Die von Wesely vorgeschlagene Parametrisierung erwies sich hierbei als leicht zu handhaben und hinreichend genau.

Noch bessere Näherungen könnten durch Einbeziehen weiterer Faktoren wie z.B. der Erhöhung des Transportwiderstandes bei sehr starker Sonneneinstrahlung durch schließen der Stomata oder der pflanzenverfügbaren Wassermenge im Boden erreicht werden. Um wieviel genauer dadurch die Näherung wird und welcher Berechnungs- und Messaufwand dafür gerechtfertigt ist, ist von der Verwendung der Daten abhängig. In vielen Fällen dürfte die von uns hier erreichte Genauigkeit ausreichen.

