

# **Physikalische Prozesse in der Ökologie – Übung 7**

Bearbeitet von: Salecker, Jan; Ziegenhagen, Henrik (Gruppe IV)

## Inhaltsverzeichnis:

1. Aufgabenstellung
2. Methoden
  - 2.1 Theorie
  - 2.2 SAS-Code
3. Ergebnisse
4. Diskussion
5. Schlussfolgerung

## **1. Aufgabenstellung**

Führen Sie die Berechnung von Übung 6 fort und berechnen Sie nun zusätzlich 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.

## 2. Methoden

### 2.1 Theorie

Bereits in Übung 6 wurden für einen Fichtenbestand im Solling für den Monat November der atmosphärische, sowie der laminare Grenzschichtwiderstand berechnet und diskutiert. In dieser Übung soll nun der stomatare Transportwiderstand berechnet werden.

Um Verdunstung und damit auch die Widerstände zu quantifizieren ist die Messung der Oberflächentemperatur notwendig. Um diese aufwendige Prozedur zu umgehen entwickelte Penman einen Ansatz zur Berechnung der Verdunstungsleistung eines Waldbestandes ohne Verwendung der Oberflächentemperatur.

Dies geschieht mittels einer linearen Näherung an die exponentielle Magnus-Funktion. Die Genauigkeit dieser Näherung wird jedoch für große Differenzen von  $T_s$  (Oberflächentemperatur) und  $T$  (Lufttemperatur) geringer.

Penman-Gleichung:

$$\lambda_W * E = \frac{\Delta * (Rn - G) + \rho * c_p * [E_s(T) - e]/r_w}{\Delta + \gamma}$$

$\Delta$  - Ableitung der Magnusfunktion

$Rn - G$  - Strahlungsbilanz

$\rho$  - Dichte

$c_p$  - spezifische Wärmekapazität

$E_s(T) - e$  - Differenz von Sättigungsdampfdruck und aktuellem Dampfdruck

$\gamma$  - Psychrometerkonstante

$r_w$  - Widerstand

Das Ergebnis dieser Gleichung lässt sich auch als potentielle Verdunstung eines Bestandes beschreiben. Der stomatare Widerstand spielt in dieser Berechnung keine Rolle. Da jedoch die aktuelle Verdunstung, gerade aufgrund des Stomatawiderstandes, nicht immer gleich der potentiellen Verdunstung ist, erweiterte Monteith die Penman-Gleichung.

In der Penman-Monteith-Gleichung wird nun auch der Stomatawiderstand des Bestandes berücksichtigt, wobei davon ausgegangen wird dass es sich bei dem Bestand um ein einzelnes großes Blatt handelt („big-leaf-model“).

Penman-Monteith-Gleichung:

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

$r_a, r_b, r_s$  - atmosphärischer, laminarer, stomatare Transportwiderstand

Mithilfe der Penman-Monteith-Gleichung, welche sowohl meteorologische als auch pflanzenphysiologische Komponenten enthält, lässt sich nun die aktuelle Verdunstungsleistung eines Bestandes, ohne Messung der Oberflächentemperatur, ermitteln. Die potentielle Verdunstung lässt sich mit dieser Formel ebenfalls ermitteln, indem der Stomatawiderstand gleich null gesetzt wird ( $r_s = 0$ ). Für die Parametrisierung des Stomatawiderstandes  $r_s$  gibt es verschiedene Ansätze. Für diese Übung soll die Parametrisierung für den Stomatawiderstand für einen Waldbestand nach Wesley herangezogen werden:

$$r_s = 130 \frac{s}{m} * \left\{ 1 + \left( \frac{200[Q]}{Q + 0,1} \right)^2 \right\} * \frac{400[T]}{T (40 - T)}$$

Dieser Ansatz ist jedoch nur gültig für eine Strahlungsleistung von  $Q > 50 \text{ W/m}^2$ . Für alle übrigen Bedingungen (nachts) wird nur kutikuläre Verdunstung angenommen ( $r_s = 2000 \text{ s/m}$ ).

Das Bowenverhältnis beschreibt das Verhältnis zwischen fühlbarer, und latenter Wärme.

$$Bo = H / \lambda_w E$$

## 2.2 SAS-Code

Zunächst werden die aerodynamischen Eigenschaften der Fichtenfläche als Makrovariablen definiert. Danach werden die Datensätze für den Monat November extrahiert. Folgende Berechnungen werden dann durchgeführt:

Für  $G > 50$  wird  $r_s$  berechnet. (Ansonsten  $r_s = 2000$ )

Es wird die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u^*$  berechnet um daraus  $r_a$  und  $r_b$  zu ermitteln.

Dann werden alle Kompartimente der Penman-Monteith-Gleichung berechnet.

Danach folgt die Berechnung der aktuellen und der potentiellen Verdunstung ( $r_s = 0$ ) mithilfe der Penman-Monteith-Gleichung.

Die Werte werden gemittelt und als Grafiken ausgegeben.

Zum Schluss werden für alle drei Fälle (aktuelle Verdunstung, potentielle Verdunstung, Eddykovarianzmethode) die Bowenverhältnisse berechnet.

```
libname ueb7 "N:\Uni zeugs\Master-Studium\ppoek\Eigene Übungen\Übung
7";
data f1evap;
    set ueb7.f1evap;
run;

%let Z0_1 = 2.6; %let D_1=22; /*aerodynamische Eigenschaften der
Fichtenfläche F1 */
data f1EvapNov;
    set f1evap;
    if "1NOV1997:00:00:00"dt <= saszeit <= "1DEC1997:00:00:00"dt;
    hour = hour(saszeit) +0.5;
    /* empirisches Stomatawiderstandsmodell
    Eingangsvariablen:
        Globalstrahlung (G_So ) in W/m²
        Lufttemperatur (TT_So) in °C
    Ausgabe:
        Stomatawiderstand (rs) in s/m
    */
    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; /* nächtlicher Wert des Stomatawiderstands */
    if rs > 2000 then rs = 2000;

    /* Schubspannungsgeschwindigkeit berechnen */
    ustar=WG_39*0.41/log((39-&d_1)/&Z0_1); /* m/s vgl. oben :
aerodynamische Parameter für Fichtenwald */
    if USTAR > 0 then do;
        ra = WG_39/(USTAR**2); /* s/m */
        Rb = 2 / (USTAR*0.41) * (22.2E-6/24.9e-6)**(2/3); /* s/m */
    end;
```

```

        cp = 1004; /* J/(K kg) spezifische Wärmekapazität der Luft bei
konstantem Druck */
        rho= P_02 * 100/(287.01 * (TT_so + 273.15)); /* kg/m²
Luftdichte in */
        lmbdw=(2.5008-0.002372*(TT_so))*1e6;/* latente Verdampfungswaerme
in [J/kg] */
        Es= 610.78*exp(17.08085*(TT_so)/(234.175+TT_so)) ;/*
Saettigungsdampfdruck Pa*/
        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*lmbdw);/* Psychrometerkonstante Pa
/ K */

        lE PM      =(delta*(RN-G)+rho * CP*(VPD)/(ra+rb))/(
delta+gamma*(1+rs/(ra+rb)) );/* Verdunstung nach Penman Monteith
W/m²*/
        lE PM pot=(delta*(RN-G)+rho * CP*(VPD)/(ra+rb))/(
delta+gamma*(1+0/(ra+rb)) );/* potenzielle Verdunstung nach Penman
Monteith W/m²*/

/*verdunstete Wassermenge E in kg/m²h */
Ekg = lE PM/lmbdw*3600;
Ekg pot = lE PM pot/lmbdw*3600;
wasser3 = LHF_tc/lmbdw*3600;

/* Mitteln */
proc sort data = f1EvapNov; by hour;run;
proc means data = f1EvapNov noprint;
by hour;
output out = f1EvapNovmt mean=;
run;

/* Aus den gemittelten Energiestromen wird nun das Bowensverhältnis
(H/lambda*E), mit dem latenten Warmestrom _E und dem mit der Eddy-
Korrelationsmethode bestimmten fühlbaren Warmestrom SHF_tc (H),
berechnet.
Jeweils für aktuelle und potentielle Verdunstung.
/* Bowenverhältnisse berechnen */
data f1EvapNovmt2;
set f1EvapNovmt;
H_PM=Rn-G-lE_PM;
H_PM_pot=Rn-G-lE_PM_pot;
bowen2 = H_PM/lE_PM;
bowen_pot_2 = H_PM_pot/lE_PM_pot;
bowen3 = SHF_tc/LHF_tc;
run;
/* GIF-Grafik erzeugen */
goptions device=gif733 gsfmode=REPLACE;
GOPTIONS FTEXT=complex HTEXT=1.2;
%let color1=red;
%let color2=blue;
%let color3=green;
%let color4=purple;
%let color5=red;
%let color6=blue;
%let color7=green;
%let color8=purple;

```

```

symbol1 i = join c = red 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 = black w=2 l=1;
axis1 order = 0 to 24 by 3 minor=(n=2) label=("Uhrzeit November
1997");
axis2 label=(angle = 90 "Transportwiderstand s/m");
legend1 label=none value=("Ra Wald" "Rb Wald" "Rs Wald");
legend2 label=none value=("Bowen aktuell" "Bowen potentiell" "Bowen
Eddy");
legend3 label=none value=("E" "E_pot" "Eddyfluxmessung");
/* Transportwiderstande */
filename fileref "N:\ueb7\ueb7_00_abb1.gif";
goptions dev=gif733 gsfname=fileref ftext = complex gsfname=replace
htext =
1.3;
proc gplot data = f1EvapNovmt;;
plot (Ra Rb Rs) * hour /frame overlay haxis = axis1 vaxis = axis2
legend=legend1;
run;
quit;
/* Verdunstungsraten */

filename fileref "N:\ueb7\ueb7_00_abb2.gif";
goptions dev=gif733 gsfname=fileref ftext = complex gsfname=replace
htext =
1.3;
axis2 label=(angle = 90 "verdunstete Wassermenge E in kg/m2h");
proc gplot data = f1EvapNovmt;;
plot (Ekg Ekg_pot wasser3) * hour /frame overlay haxis = axis1 vaxis
=
axis2
legend=legend3;
run;
quit;
/*Bowen Verhaeltnis */
filename fileref "N:\ueb7\ueb7_00_abb3.gif";
goptions dev=gif733 gsfname=fileref ftext = complex gsfname=replace
htext =
1.3;
axis2 label=(angle = 90 "Bowenverhaeltnis");
proc gplot data = f1EvapNovmt2;
plot (bowen2 bowen_pot_2 bowen3) * hour /frame overlay haxis = axis1
vaxis = axis2 legend=legend2 vref = 0 LVREF =2;
run;
quit;

```

### 3. Ergebnisse

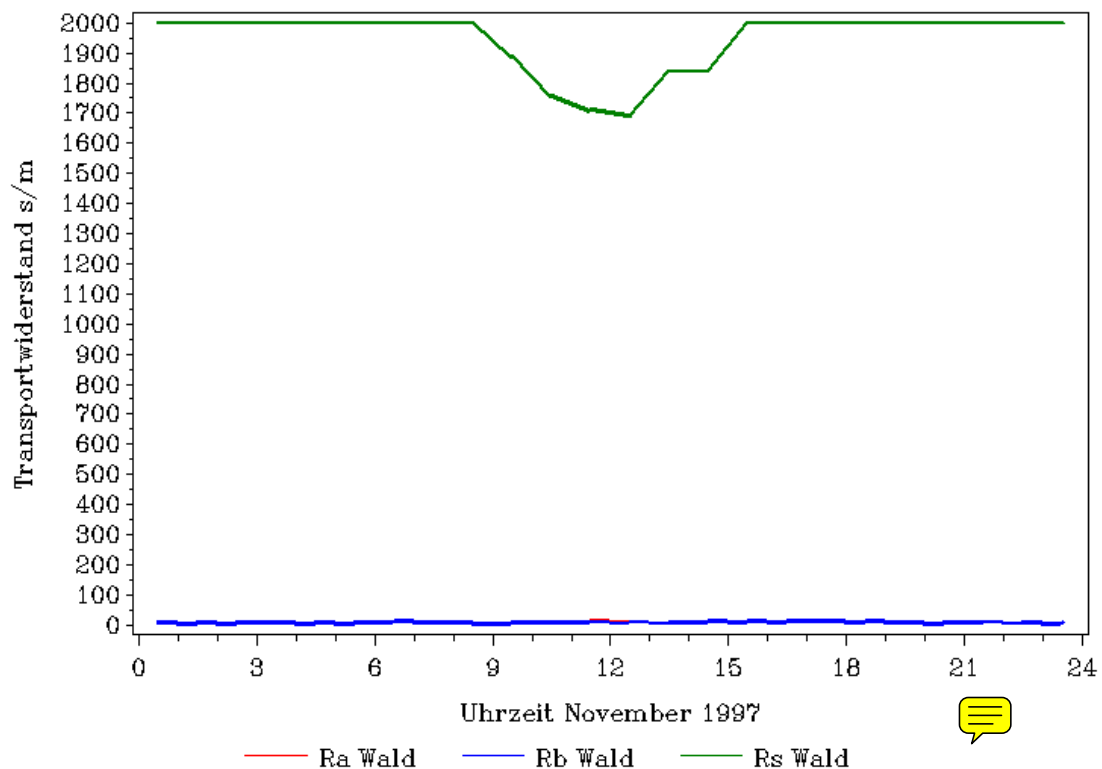
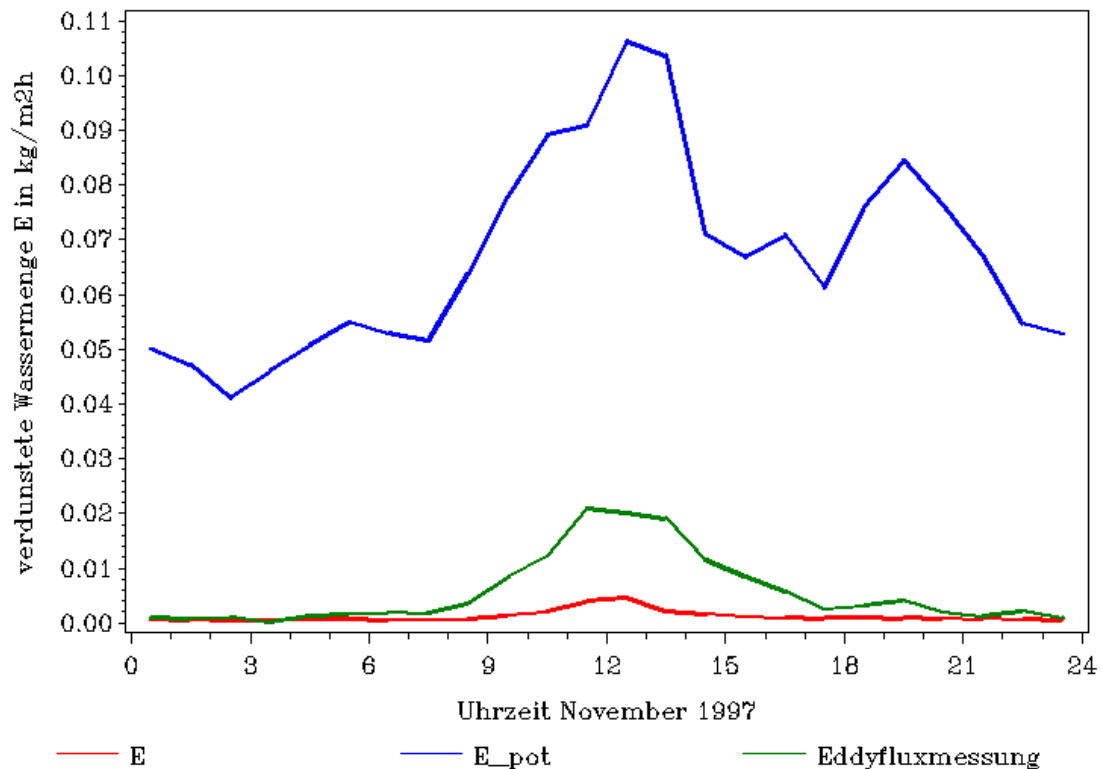


Abbildung 1 – mittlere monatlicher Tagesgang der Transportwiderstände über einem Fichtenaltbestand im Solling im November 1997

Aus Abbildung 1 wird deutlich, dass der Stomatawiderstand ( $r_s$ ) im Gegensatz zum atmosphärischen ( $r_a$ ) und laminaren ( $r_b$ ) Widerstand deutlich höher ist. Er erreicht seinen niedrigsten Punkt ca. um 12 Uhr mittags bei 1650 s/m.  $r_a$  und  $r_b$  liegen dagegen, über den Tag hinweg fast konstant, bei ca. 10 s/m.

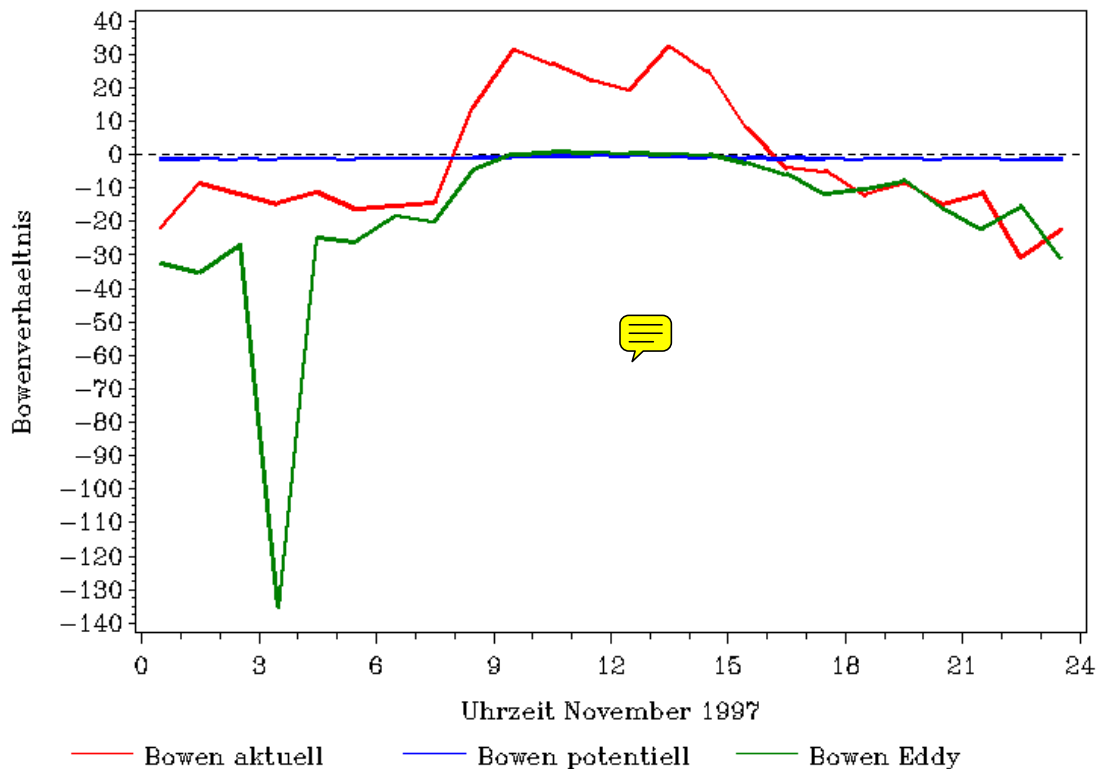
Der Stomatawiderstand nimmt den Großteil des Tages im November den maximalen Widerstandswert von 2000 s/m an. Nur zwischen 9 und 15 Uhr sinkt der Widerstand auf Werte unter 2000 s/m.





**Abbildung 2 – mittlerer monatlicher Tagesgang der verdunsteten Wassermengen über einem Fichtenaltbestand im Solling im November 1997**

Auf Abbildung 2 sind die mittleren monatlichen Tagesgänge der nach Penman-Monteith berechneten Verdunstung ( $E$ ), der potentiellen Verdunstung ( $E_{pot}$ ,  $r_s=0$ ) und der mit Eddyfluxmessung ermittelten Verdunstung abgetragen. Alle drei Kurven haben einen ähnlichen Tagesverlauf, wobei die Kurve der potentiellen Verdunstung deutlich höhere Werte annimmt als die beiden anderen. Das Maximum liegt hier bei  $0,105 \text{ kg/m}^2\text{h}$ . Das Maximum bei der Eddyfluxmessung liegt lediglich bei  $0,02 \text{ kg/m}^2\text{h}$ , bei der aktuellen Verdunstung sogar nur bei  $0,005 \text{ kg/m}^2\text{h}$ . Die Verdunstungsmenge nimmt sowohl bei der berechneten aktuellen Verdunstung als auch bei der mit Eddyfluxmessung bestimmten Verdunstung während der Nacht Werte um  $0$  an. Nach Sonnenaufgang steigen die Werte auf ihr Maximum am Mittag und fallen dann wieder gegen  $0$  ab. Bei der potentiellen Verdunstung liegen die Werte selbst in der Nacht um  $0,05 \text{ kg/m}^2\text{h}$ . Die Kurve hat zudem deutlich größere Schwankungen über den ganzen Tagesverlauf. Dennoch steigen die Werte ebenso nach Sonnenaufgang auf das Maximum zur Mittagszeit an, um anschließend wieder zu sinken. Auffällig ist hier aber eine zweite Spitze am Abend etwa um  $20$  Uhr.



**Abbildung 3 – mittlerer monatlicher Tagesgang der Bowenverhältnisse für einen Fichtenaltbestand im Solling im November 1997. Berechnet auf Grundlage der aktuellen Verdunstung, der potentiellen Verdunstung und der Messung mittels Eddykovarianzmethode,**

In Abbildung 3 sind die mittleren monatlichen Tagesgänge der Bowenverhältnisse für die aktuelle Verdunstung, die potentielle Verdunstung und die mit Eddyfluxmessung bestimmte Verdunstung abgetragen. Das Bowenverhältnis für die potentielle Verdunstung hat kaum Veränderungen und nimmt tags als auch nachts Werte um 0 an. Bei den anderen beiden Kurven sind deutliche Veränderungen sichtbar. Das Bowenverhältnis der aktuellen Verdunstung ist nachts negativ und erreicht den Tiefpunkt etwa um 22:30 Uhr bei -30. Nach Sonnenaufgang steigt es an und erreicht das Maximum um 13:30 Uhr bei einem Wert von 30. Danach sinkt es wieder ab und kehrt sich ab 16 Uhr wieder ins Negative. Auch das Bowenverhältnis bei der Eddyfluxmessung nimmt nachts negative Werte an. Diese liegen zum Großteil unter den Werten bei der aktuellen Verdunstung. Auffällig ist eine negative Spitze um ca. 3 Uhr bei einem Wert von -135. Danach steigt das Verhältnis wieder auf einen Wert von ca -25, um dann von 9 bis etwa 16 Uhr auf einen konstanten Wert um 0 zu steigen. Danach sinkt das Verhältnis wieder langsam ins Negative ab. Das Bowenverhältnis nimmt also auch bei der mit Eddyfluxmessung bestimmten Verdunstung keine positiven Werte an.

## 4.Diskussion

### Zu Abbildung 1:


Aus Abbildung 1 lässt sich gut erkennen, dass sowohl der atmosphärische, als auch der laminare Transportwiderstand im Vergleich zum Stomatawiderstand sehr gering sind.

Über einen Großteil des Tagesverlaufs nimmt der Stomatawiderstand einen Wert von 2000 s/m an. Dies liegt daran, dass die Einstrahlung zu diesen Zeiten unter 50 W/m<sup>2</sup> liegt. Bei einer solch geringen Einstrahlung kann keine Photosynthese stattfinden und die Stomata sind komplett geschlossen. Der Maximalwert von 2000 s/m beschreibt also den Widerstand der Cuticula, da bei geschlossenen Stomata lediglich über diese ein Stoffaustausch stattfinden kann. Im November ist die Sonneneinstrahlung so gering, dass die Pflanze ihre Stomata nur für ein paar Stunden um die Mittagszeit öffnet und der Widerstand somit sinkt. Durch das Öffnen der Stomata findet dann Gasaustausch statt. Es wird CO<sub>2</sub> von der Pflanze aufgenommen. Gleichzeitig steigt auch die Verdunstungsleistung der Pflanze.

Die Eigenschaften und die Bedeutung des atmosphärischen und laminaren Transportwiderstandes wurden bereits in der vorhergehenden Übung ausführlich besprochen.

### Zu Abbildung 2:

Es ist deutlich zu sehen, dass die potentielle Verdunstung um ein Vielfaches höher ist als die aktuelle Verdunstung. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Kurven liegt in der Berücksichtigung des Stomatawiderstands  $r_s$ . Durch den stomatären Widerstand lässt sich die Pflanze deutlich weniger Verdunstung zu als potentiell möglich wäre. Dies zeigt den enormen Einfluss der Stomataregulierung auf die Verdunstung einer Pflanze.

Der Verlauf der berechneten aktuellen Verdunstungsmengen ähnelt dem der mit Eddyfluxmessung bestimmten Verdunstung. Man kann also sagen, dass die Berechnung der Verdunstung mit der Penman-Monteith-Gleichung tendenziell richtige Werte ermittelt. Die gemessenen Verdunstungsmengen liegen jedoch deutlich über den berechneten. Es wäre möglich, dass die Parametrisierung für den Stomatawiderstand  $r_s$  nach Wes  für die niedrigen Strahlungsleistungen im November nicht so gut geeignet ist. Der Stomatawiderstand scheint aufgrund des Verlaufs der mit Eddyfluxmessung bestimmten Kurve nicht ganz so hoch zu sein wie es die Kurve der aktuellen Verdunstungsmenge vermuten lässt.

### Zu Abbildung 3:

Das Bowen-Verhältnis beschreibt die Aufteilung des Energiestroms in fühlbare und latente Wärme. Ist das Verhältnis größer als 1, ist der nach oben gerichtete Strom in Form von fühlbarer Wärme größer als die verbrauchte Verdunstungsenergie. Wenn das Verhältnis negative Werte annimmt, fließt ~~einer der beiden Ströme von oben nach unten in den Bestand~~. Bei der potentiellen Verdunstung verändert sich das Verhältnis kaum und nimmt sehr kleine Werte im negativen Bereich an. Dies liegt an der hohen berechneten Verdunstungsleistung über den gesamten Tagesverlauf (siehe Abbildung 2). Aufgrund der gemeinsamen Darstellung mit den beiden anderen Verhältnissen, welche eine deutlich höhere Schwankungsbreite aufweisen, lassen sich die einzelnen Schwankungen bei der potentiellen Verdunstung nur schlecht erkennen, da sie sehr gering sind.

Die potentielle Verdunstung ist wie erwähnt über den gesamten tagesverlauf positiv (siehe Abbildung 2), daher muss der fühlbare Wärmestrom negativ sein. Es erfolgt also ein Wärmetransport in den Bestand hinein. Da die Werte immer unter 1 liegen wird ersichtlich, dass der Großteil der verfügbaren Energie für den latenten Wärmestrom aufgewendet wird.

Die Bowenverhältnisse der aktuellen Verdunstung und der Eddyfluxmessung folgen einem deutlichem Tagesverlauf. Die negativen Werte in der Nacht zeigen auch hier, dass einer der beiden Ströme negativ sein muss. Da die Verdunstung jedoch immer positiv ist (Abbildung 2) kann nur der fühlbare Wärmestrom negativ sein. Auch hier fließt nachts also Wärme in den Bestand hinein. Die Verhältnisse sind hier im negativen Bereich höher als bei der potentiellen Verdunstung, da die Werte der aktuellen und mit Eddyfluxmessung ermittelten Verdunstung im Gegensatz zur potentiellen nachts sehr gering sind. Der Ausreißer bei der grünen Kurve lässt sich nur über Messungenauigkeiten erklären.

Die Werte des Bowenverhältnis nehmen bei der aktuellen Verdunstung tagsüber sogar Werte von über 1 an. Der nach oben gerichtete Wärmestrom ist hier also höher als die verbrauchte Verdunstungsenergie.

## **5. Schlussfolgerung**

Mithilfe der Penman-Monteith-Gleichung lässt sich die verdampfte Wassermenge eines Bestandes relativ genau berechnen. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Parametrisierung des Stomatawiderstandes  $r_s$ , für die es verschiedene Ansätze gibt. Die Bedeutung des Stomatawiderstandes wurde durch den enormen Unterschied zwischen der aktuellen und potentiellen Verdunstung sehr deutlich. Ebenso wird deutlich das sowohl atmosphärischer also auch laminarer Transportwiderstand im Gegensatz zum stomatären sehr gering sind.

