

# Übungsaufgabe 7

---

André Hardtke

Markus Lück



---

Physikalische Prozesse in der Ökologie

WS 2009/2010

## 1 Aufgabenstellung

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

Nun können Sie die Penman-Monteith-Gleichung nutzen, um folgende 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 Tagesgänge dar.

Dazu steht Ihnen ein Datensatz zur Verfügung. Er enthält die Variablen:

G: Bodenwärmestrom

RN: Netto-Strahlung

G<sub>so</sub>: Globalstrahlung ( $W/m^2$ )


SHF<sub>tc</sub> und LHF<sub>tc</sub>: mit der Eddy-Korrelationsmethode bestimmte turbulente Energieströme ( $SHF_{tc} = H$ ,  $LHF_{tc} = \lambda E$ ) in  $W/m^2$


P<sub>02</sub>: Luftdruck (hPa)

VPD: Wassersättigungsdefizit in 39 m Höhe (Pa)

WG<sub>39</sub> Windgeschwindigkeit in 39 m Höhe (m/s)

### 2.1 Methode der Auswertung

Der Wasserhaushalt spielt in vielen Ökosystemen wie den Wäldern eine wesentliche Rolle. Eine besondere Stellung nimmt hier die Verdunstung ein, also die Umwandlung von Wasser in Wasserdampf. Sie beeinflusst maßgeblich die Verfügbarkeit und das Speichervermögen von Wasser in den Pflanzen. 

Verdunstung findet statt, wenn eine Differenz des chemischen Potentials (z.B. zwischen einer Pflanze und der Atmosphäre) vorliegt.  wird in Pa angegeben und ist in diesem Fall negativ. Da die Atmosphäre in den meisten Fällen untersättigt ist, führt die vorliegende Differenz der chemischen Potentiale zur Verdunstung. Pflanzen sind dieser Verdunstung aber nicht hilflos ausgeliefert, sondern können über das Schließen der Stomata die Verdunstung eindämmen. Darum ist es wichtig, dass der stomatäre Widerstand bei der Parametrisierung mit berücksichtigt wird, möchte man die tatsächlich verdunstete Wassermenge berechnen.

Den stomatären Widerstand  $r_s$  gibt Wesley et al (1989) wie folgt an:

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

$$Q > 50 \frac{W}{m^2}$$

Wenn die Globalstrahlung unter  $50 \text{ W/m}^2$  fällt steigt der Widerstand nicht unendlich an, sondern nimmt den Wert von  $2000 \text{ s/m}$  an. Dies ist nachts der Fall, wenn nur kutikuläre Verdunstung angenommen wird. Die beiden Faktoren  $[Q]$  und  $[T]$  stehen für die Einheiten der Globalstrahlung und der Blattoberfläche. Eine Multiplikation führt dazu, dass dieser Parameter einheitslos wird.

Mit der so genannten Penman- Gleichung kann die Verdunstung einer „freien“ Wasseroberfläche, z.B. eines mit Regenwasser bedeckten Waldes bestimmt werden. Sie ist gleich der potentiellen Verdunstung.

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

Da die vorliegende Verdunstung nicht immer gleich der potentiellen Verdunstung ist, hat Monteith diese Gleichung mit dem Stomatawiderstand des Bestandes erweitert. Dabei wird der Bestand als ein einziges großes Blatt betrachtet (big leaf Modell).

Mit der nun vorliegenden Penman-Monteith-Gleichung kann die Wassermenge berechnet werden die verdunstet wird.

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

Dabei ist:

$E$  die Verdunstung,

$\lambda_w$  die Verdampfungswärme,

$Rn$  ist die Nettostrahlung,

$G$  bezeichnet den Bodenwärmestrom,

$\rho$  ist die Dichte der Luft in  $\text{kg/m}^3$ ,

$c_p$  stellt die spezifische Wärmekapazität für Luft bei konstantem Druck dar

( $1004 \text{ J/(K kg)}$ ),

$E_s$  der Sättigungsdampfdruck,

$e$  bezeichnet den Wasserdampfpartialdruck in Pa,

$\gamma$  bezeichnet die Psychrometernmethode (sie nimmt bei 20°C einen Wert von 66 Pa/K an),

$r_a$ ,  $r_b$  und  $r_s$  sind die atmosphärischen, laminaren und stomatären Transportwiderstände.

Da das Ergebnis der Penman-Monteith-Gleichung lediglich die Energiemenge darstellt, die zur Phasenumwandlung benötigt wurde, muss das Ergebnis der Gleichung durch die Verdampfungswärme dividiert werden. Dadurch erhält man letztendlich die verdunstete Wassermenge in  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ .

Die Werte des fühlbaren Wärmestroms und die Verdunstungsenergie wurden alle mit der Eddy-Kovarianz-Methode berechnet. Diese Methode beruht auf der Annahme, dass der Transport von Wärme und Feuchtigkeit zwischen bodennaher Grenzschicht und Atmosphäre durch turbulenten Austausch vonstattengeht. Diese Wirbel bilden die Basis für den Austausch zwischen tiefer und höher gelegenen Luftschichten. Mit der Eddy-Kovarianz-Methode wird die Verdunstung auf Grundlage dieses vertikalen Wasserdampfstroms ermittelt.

Zusätzlich zu der Penman-Monteith-Methode wurde so ebenfalls die tatsächlich verdunstete Wassermenge berechnet.

Zum Schluss wurde noch das Bowen-Verhältnis ermittelt, also in welcher Form die dem Boden oder Pflanze zugeführte Energie in turbulente Energieströme fließt.

$$\beta = \frac{H}{\lambda E}$$

Hierbei stellt  $H$  den fühlbaren Wärmestrom und  $\lambda E$  die Verdunstungsenergie dar. Ist das Verhältnis kleiner als 1, wird mehr Energie zur Verdunstung aufgewendet. Ist es größer als 1, dann wird mehr fühlbare Wärme abgegeben. Durch die Festlegung, dass ein nach oben gerichteter Energiefluss ein positives Vorzeichen erhält, wird  $\beta$  negativ, wenn der Boden kälter als die Atmosphäre ist. Negative Werte kommen ebenfalls bei Regen und Taubildung vor.



## 2.2 Der verwendete SAS-CODE

```

libname ueb7 "E:\ppoek\ueb7";
data flevap;
    set ueb7.flevap;
run;

/*aerodynamische Eigenschaften der Fichtenfläche Fl */
data flEvapMar;
%let Z0_1 = 2.6; %let D_1=22;
set flevap;
if "1MAR1997:00:00:00"dt <= saszeit <= "1APR1997:00:00:00"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*/
Ekg = lE_PM/lmbdw*3600;
Ekg_pot = lE_PM_pot/lmbdw*3600;
Ekg_Efl=LHF_TC/lmbdw*3600;
run;

/*Sortieren des Datensatzes flEvapmar*/
proc sort data = flEvapmar; by hour;run;

/* Mitteln */
proc means data = flEvapmar noprint;
by hour;
output out = flEvapmarmt mean=;
run;

/* Bowenverhältnisse berechnen */
data flEvapmarBowen;
set flEvapmarmt;
bowen2 = SHF_tc/lE_PM;
bowen_pot_2 = SHF_tc/lE_PM_pot;
bowen2_eddy= SHF_tc/LHF_TC;
run;

/* GIF-Grafiken erzeugen */

/*Grafik atmosphärischer Transportwiderstand und laminarer
Grenzschichtwiderstand*/
GOPTIONS DEVICE=gif733
noborder
GACCESS='sasgastd>E:\ppoek\ueb7\ueb7_00_01.gif'
GSFMODE=REPLACE
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=1 l=1;
symbol2 i = join c = blue w=1 l=1;
symbol3 i = join c = green w=1 l=1;
symbol4 i = join c = black w=1 l=1;
axis1 order = 0 to 24 by 3 minor=(n=2) label=("Uhrzeit Maerz 1997");
axis2 order = 0 to 10 by 0.5 minor=(n=9) label=(angle = 90
"Transportwiderstand [m/s]");

```

```

legend1 label=none value=("Ra Wald" "Rb Wald" "Rs Wald");
proc gplot data = flEvapmarmt;;
    plot (Ra Rb ) * hour /frame overlay haxis = axis1 vaxis = axis2
        legend=legend1;
run;quit;

/*Grafik stomatärer Transportwiderstand*/
GOPTIONS DEVICE=gif733
    noborder
    GACCESS='sasgastd>E:\ppoek\ueb7\ueb7_00_02.gif'
    GSFMODE=REPLACE
    FTEXT=complex
    HTEXT=1.2;
%let color1=purple;
%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=1 l=1;
symbol2 i = join c = blue w=1 l=1;
symbol3 i = join c = green w=1 l=1;
symbol4 i = join c = black w=1 l=1;
axis1 order = 0 to 24 by 3 minor=(n=2) label=("Uhrzeit Maerz 1997");
axis2 order = 0 to 2200 by 100 minor=(n=9) label=(angle = 90
"Transportwiderstand [m/s]");

legend1 label=none value=("Rs Wald");
proc gplot data = flEvapmarmt;;
    plot (Rs) * hour /frame overlay haxis = axis1 vaxis = axis2
        legend=legend1;
run;quit;

/*Grafik verdunstete Wassermenge*/
GOPTIONS DEVICE=gif733
    noborder
    GACCESS='sasgastd>E:\ppoek\ueb7\ueb7_00_03.gif'
    GSFMODE=REPLACE
    FTEXT=complex
    HTEXT=1.2;
%let color1=purple;
%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=1 l=1;
symbol2 i = join c = blue w=1 l=1;
symbol3 i = join c = green w=1 l=1;

```

```

symbol4 i = join c = black w=1 l=1;
axis1 order = 0 to 24 by 3 minor=(n=2) label=("Uhrzeit Maerz 1997");
axis2 order = 0 to 0.35 by 0.05 minor=(n=4) label=(angle = 90
"verdunstete Wassermenge [kg/m2h]");

legend1 label=none value=("Penman-Monteith" "pot. Verdunstung" "Eddy-
Flux");
proc gplot data = f1EvapmarBowen;
    plot (Ekg Ekg_pot Ekg_Efl) * hour /frame overlay haxis = axis1
vaxis = axis2
        legend=legend1;
run;quit;

/*Grafik Bowenverhältnisse*/

GOPTIONS DEVICE=gif733
    noborder
    GACCESS='sasgastd>E:\ppoek\ueb7\ueb7_00_04.gif'
    GSFMODE=REPLACE
    FTEXT=complex
    HTEXT=1.2;
%let color1=purple;
%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=1 l=1;
symbol2 i = join c = blue w=1 l=1;
symbol3 i = join c = green w=1 l=1;
symbol4 i = join c = black w=1 l=1;
axis1 order = 0 to 24 by 3 minor=(n=2) label=("Uhrzeit Maerz 1997");
axis2 order = -80 to 20 by 10 minor=(n=9) label=(angle = 90
"Bowenverhältnis");

legend1 label=none value=("Bowen_P.M." "Bowen pot." "Bowen_Eddy");
proc gplot data = f1EvapmarBowen;
    plot (bowen2 bowen_pot_2 bowen2_eddy) * hour /frame overlay
haxis = axis1 vaxis = axis2
        legend=legend1;
run;quit;

```



### 3 Ergebnisse

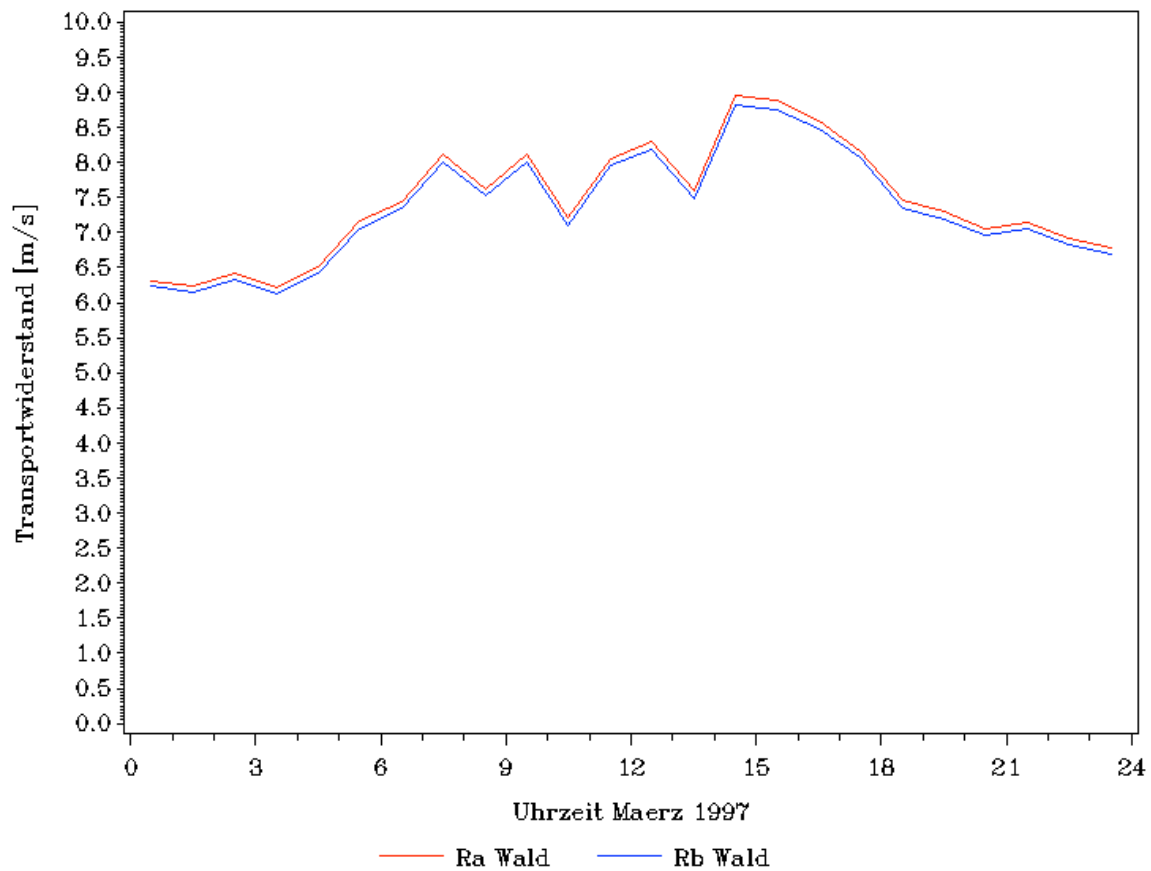
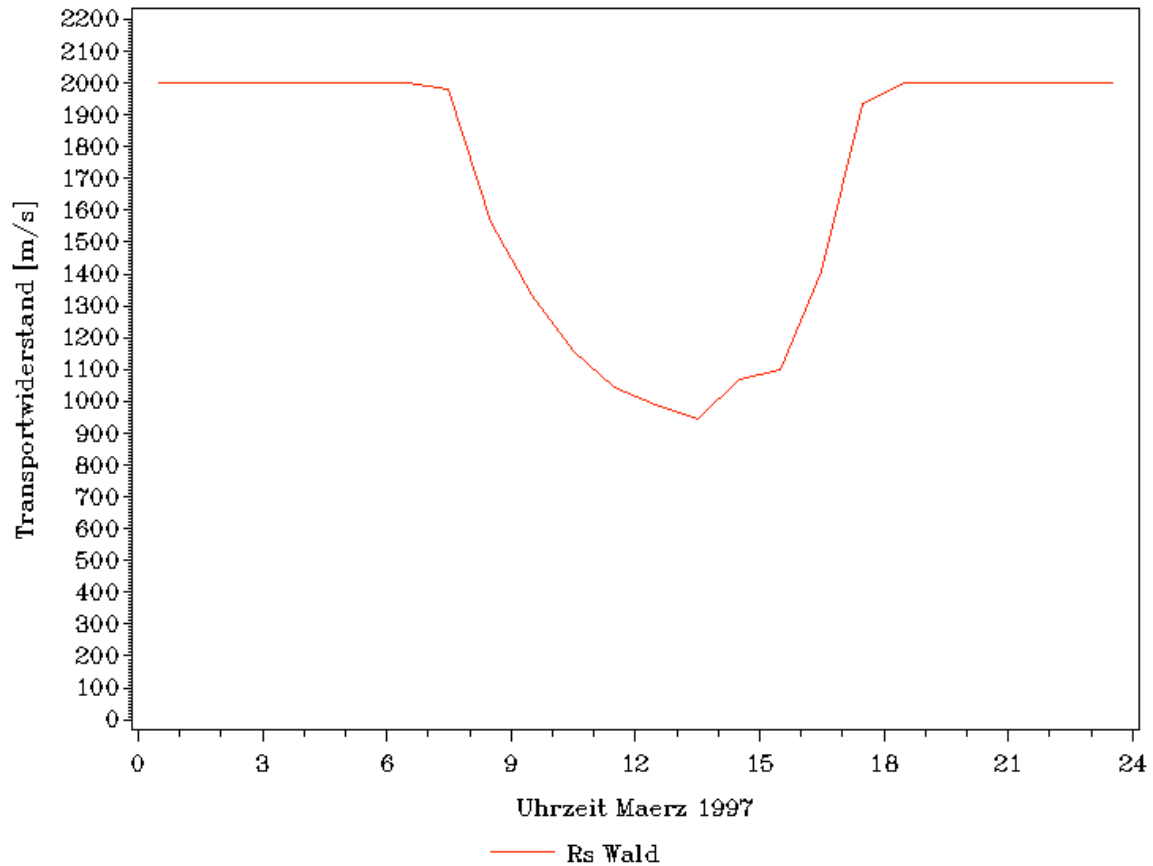


Abbildung 1: Der atmosphärische ( $r_a$ ) und laminare ( $r_b$ ) Transportwiderstand im Tagesgang für den Monat März

In der ersten Abbildung sind der atmosphärische und der laminare Transportwiderstand abgetragen. Beide verlaufen parallel zu einander, wobei der atmosphärische Widerstand immer etwas überhalb des laminaren Transportwiderstandes liegt. Die tiefsten Werte erreichen beide nachts zwischen 0 und 4 Uhr. Im Tagesverlauf steigen beide an und erreichen zwischen 14 und 15 Uhr ihren Höhepunkt. Ab dann fallen sie wieder ab. Auffällig sind bei beiden die recht starken Schwankungen im Tagesverlauf.





*Abbildung 2: Der stomatäre Transportwiderstand im Tagesgang für den Monat März*

In Abbildung 2 ist der stomatäre Transportwiderstand abgetragen. Nachts bewegt er sich durchgehend auf einem Level von 2000m/s. Ab 7 Uhr fällt er erst leicht, aber dann sehr stark ab. Zwischen 13 und 14 Uhr erreicht er seinen tiefsten Punkt, der dann nur noch bei ca. 930m/s liegt. Danach steigt er wieder stark an und pendelt sich zwischen 18 und 19 Uhr bei einem Wert von 2000m/s wieder ein. Auffällig ist auch die Einbeulung zwischen 13.30 und 15.30 Uhr.

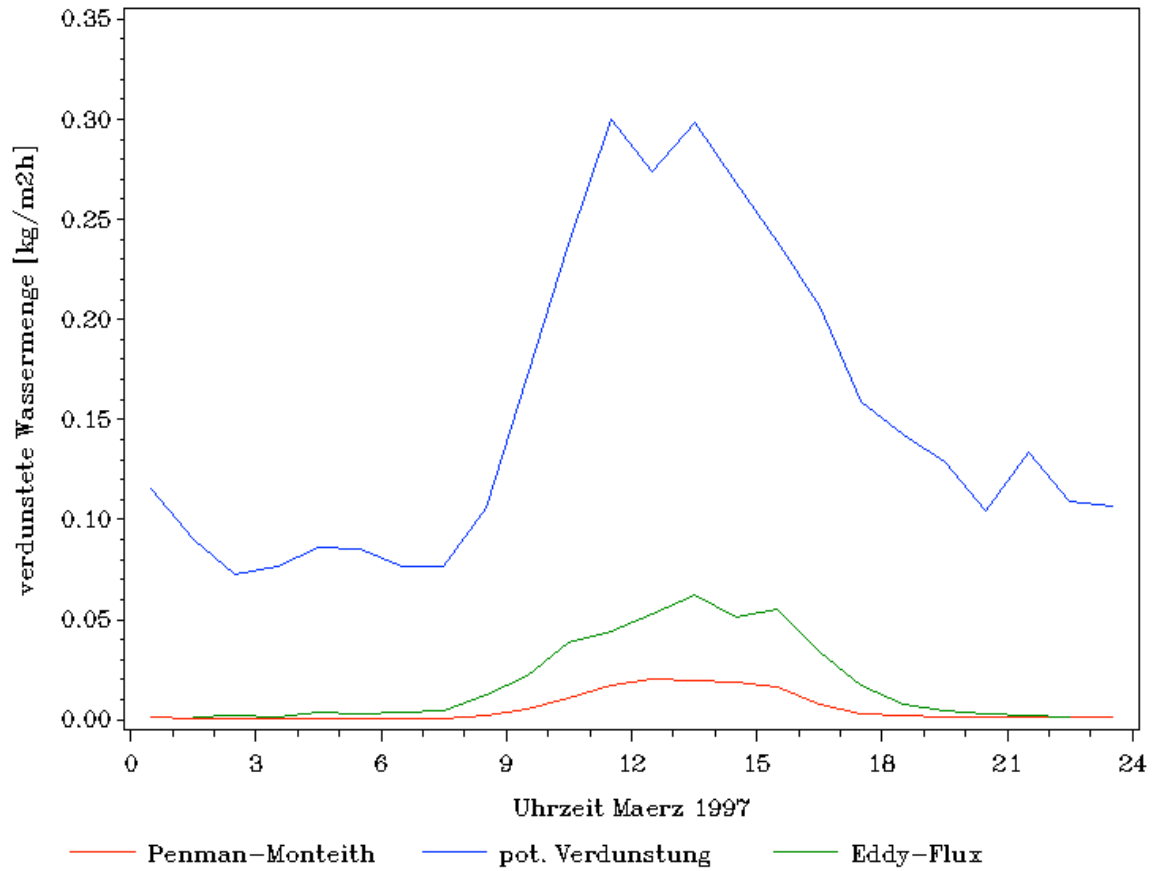


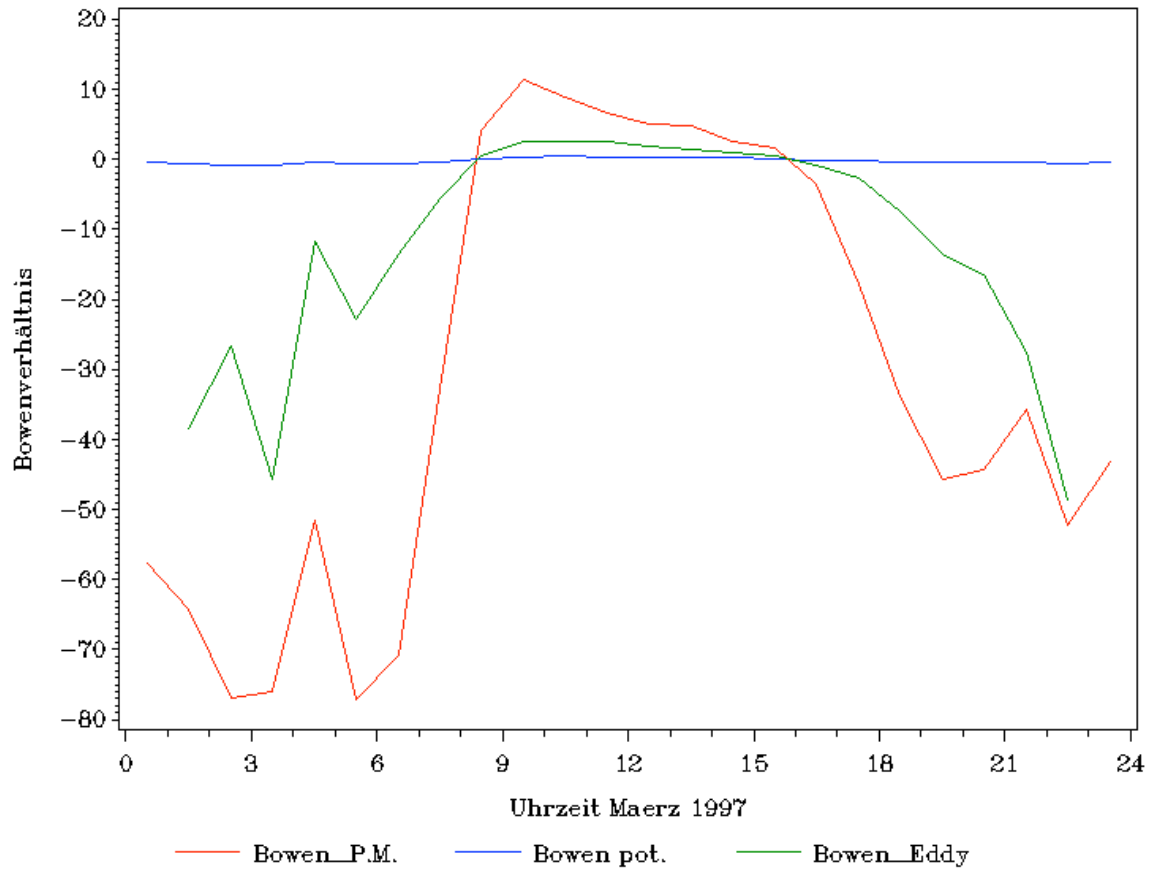
Abbildung 3: Die verdunsteten Wassermengen nach verschiedenen Berechnungen im Tagesverlauf im Monat März

In Abbildung 3 sind die verdunsteten Wassermengen nach unterschiedlichen Berechnungsmethoden abgebildet. Die Umrechnung der latenten Wärmeströme ergab für den Monat März ausgeprägte Tagesgänge. Die verdunstete Wassermenge ist nachts am geringsten. Ab 7:30 Uhr erfolgt ein Anstieg, der gegen 14 Uhr seinen Höhepunkt findet. Danach fallen die Werte wieder ab.

Auffällig ist, dass die Kurve der potentiellen Verdunstung wesentlich höhere Werte aufweist als die anderen Kurven. Auch schwankt sie vielmehr und weist einen uneinheitlicheren Verlauf auf. Auffällig ist auch der Einbruch gegen 13 Uhr. Der Kurvenverlauf, berechnet nach der Penman-Monteith-Methode weist die geringsten Werte auf. Sie besitzt aber den gleichmäßigsten Kurvenverlauf.

Der Kurvenverlauf nach der Eddy-Kovarianz-Methode liegt in einem Zeitraum von 8 bis 18 Uhr deutlich über der Penman-Monteith-Kurve. In dem restlichen Zeitraum verläuft sie mit ihr fast identisch und weicht nur geringfügig ab.

Beide Kurven weisen nachts Werte von annähernd 0 vor.



*Abbildung 4: Bowen Verhältnisse für Penman-Monteith, Potentielle Verdunstung und Eddy-Kovarianz-Methode im Tagesverlauf im Monat März.*

In Abbildung 4 sind die Bowen Verhältnisse grafisch abgetragen. Das Bowen-Verhältnis für die potentielle Verdunstung liegt nahezu konstant bei 0.

Das Bowen Verhältnis für die Penman-Monteith-Methode zeigt starke Schwankungen. Von 8 bis 16 Uhr ist es positiv und erreicht gegen 10 Uhr seinen Höhepunkt. Die restliche Zeit ist das Verhältnis negativ und erreicht in den frühen Morgenstunden seinen größten negativen Wert, der bei -76 liegt. Auffällig sind hier die starken Schwankungen die abends und nachts vorliegen.

Das Bowen Verhältnis für die Eddy-Kovarianz-Methode ist ebenfalls in den Zeitraum von 8 bis 16 Uhr positiv und für den restlichen Zeitraum negativ. Seinen Höhepunkt erreicht es auch gegen 10 Uhr, jedoch sind die Werte bei weitem nicht so negativ wie die der Penman-Monteith Kurve. Auffällig sind auch hier die Schwankungen in den frühen Morgenstunden.

## 4 Diskussion

Der aerodynamischer Transportwiderstand und der Grenzschichtwiderstand sind im Gegensatz zu dem stomatären Transportwiderstand sehr klein. Dies war auch der Grund für die geteilte grafische Abtragung. Es zeigt deutlich, dass für die Berechnung der verdunsteten Wassermenge der stomatäre Widerstand wesentlich wichtiger ist, als der atmosphärische und laminare Transportwiderstand.

Der stomatäre Transportwiderstand ist hier nur berechenbar, wenn die Globalstrahlung mehr als  $50 \text{ W/m}^2$  beträgt. Liegt die Strahlung darunter, wird ein Widerstandswert von  $2000 \text{ s/m}$  angenommen. Dies erklärt, warum die Kurve bei Nacht bei diesem Wert liegt. Nach Sonnenaufgang, mit zunehmender Globalstrahlung öffnen die Blätter ihre Stomata und der Widerstand sinkt stark ab. Gegen Mittag, wenn die größte Strahlung vorhanden ist, ist dementsprechend der Transportwiderstand am geringsten. Nach Mittag steigt der Widerstand mit Sonnenabnahme wieder, so dass eine U-förmige Kurve zustande kommt.

Die Werte der potentiellen Verdunstung liegen verständlicher Weise über den Werten der aktuellen Verdunstung. Dies hat zwei Gründe. Erstens ist die Wassernachlieferung nicht widerstandslos und zweitens ist im März **die Verdunstung bedingende Photosynthese noch sehr gering.**

Die Penman-Monteith Methode spiegelt so gesehen die potentielle Verdunstung wieder, die um den stomatären Transportwiderstand bereinigt ist.

Das die Penman-Monteith Methode und die Eddy-Kovarianz-Methode ähnliche Ergebnisse liefern liegt daran, dass der Rechenweg über den latenten Wärmestrom die verdunstete Wassermenge zu berechnen, im Prinzip richtig ist. Das die Kurve der Eddy-Kovarianz-Methode über der Penman-Monteith-Methode liegt kann daran liegen, dass der wahre stomatäre Widerstand wohl geringer als der gemessene eingeschätzt werden muss.

Der fast lineare Tagesgang des potentiellen Bowenverhältnisses ist dadurch zu erklären, dass der fühlbare Wärmestrom und die Verdunstungsenergie in einem gleichen Verhältnis an der verfügbaren Strahlungsbilanz beteiligt sind.

Die anderen beiden Bowen-Verhältnisse weisen demgegenüber eine starke Tageszeit bedingte Schwankungen auf. Tagsüber ist das Bowen-Verhältnis bei beiden positiv. Nachts ist es negativ. Dies ist dadurch zu erklären, dass nachts der fühlbare Wärmestrom negativ ist, also Energie von der Luft in den Boden fließt. Dadurch wird das Verhältnis negativ. Dies ist praktisch der Fall, wenn der Boden kälter als die Umgebungsluft ist, oder Taubildung stattfindet, da so Energie durch die Kondensation des Wassers freigesetzt wird.

Tagsüber kehrt sich dieses Prinzip um, da nun Energie vom Boden abgegeben wird.

Da am Tag das Bowen-Verhältnis größer als 1 ist, überwiegt hier die Energieabgabe in Form von fühlbarer Wärme. Der restliche Zeitraum wird durch eine Energieabgabe durch Verdunstungsenergie bestimmt.

## 5 Schlussfolgerung

Durch die vorliegenden Daten konnte eindeutig gezeigt werden, dass sich die potentielle Verdunstung wesentlich von der aktuellen Verdunstung unterscheidet. Die stomatären Widerstände spielen hier eine entscheidende Rolle.

Das Penman-Monteith Verfahren und die Eddy-Kovarianz-Methode zeigen deutliche Unterschiede. Dies konnte bei der verdunsteten Wassermenge und bei den Bowen Verhältnissen gezeigt werden.

## 6 Literatur

Theoretische Grundlagen der Eddy-Kovarianz-Methode  
[www.geo.tu-freiberg.de/.../eddy.../theoret\\_grundlagen.htm](http://www.geo.tu-freiberg.de/.../eddy.../theoret_grundlagen.htm)

