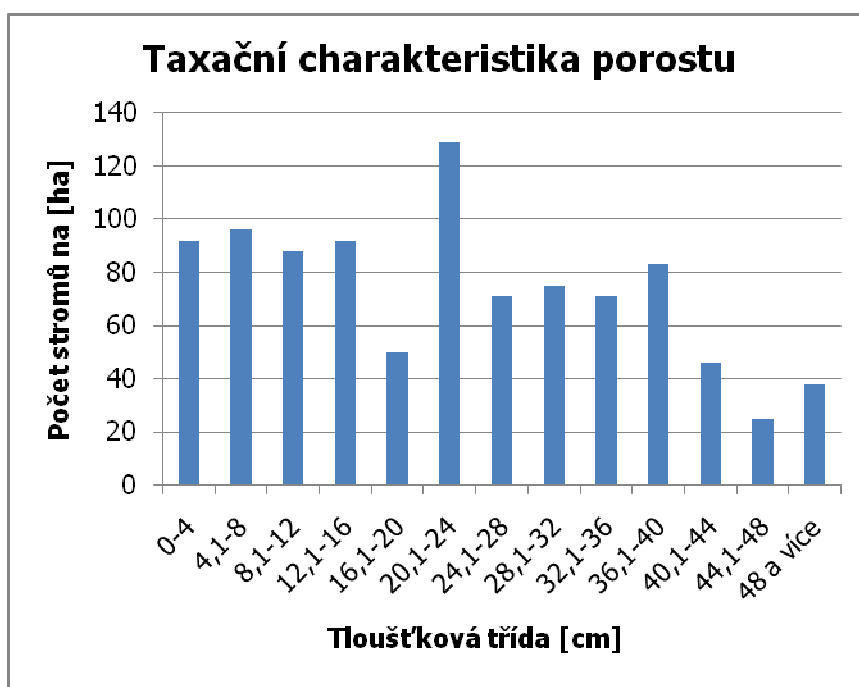


Stanovení transpirace lesních porostů – metody a cíle.

Jiří Kučera – EMS Brno, CZ

Úvod: Účelem měření transpirace lesních porostů je jednak stanovení vodní bilance porostu, jednak analýza reakce porostů a jednotlivých stromů na měnící se meteorologické a půdně-hydrologické podmínky. Metod měření porostní transpirace je celá řada, obvykle v závislosti na úrovni struktury, na níž měření provádíme. Následná analýza naměřených dat slouží k pochopení strategie, s níž stromy reagují na limitní situace nebo na dlouhodobé změny podmínek prostředí.

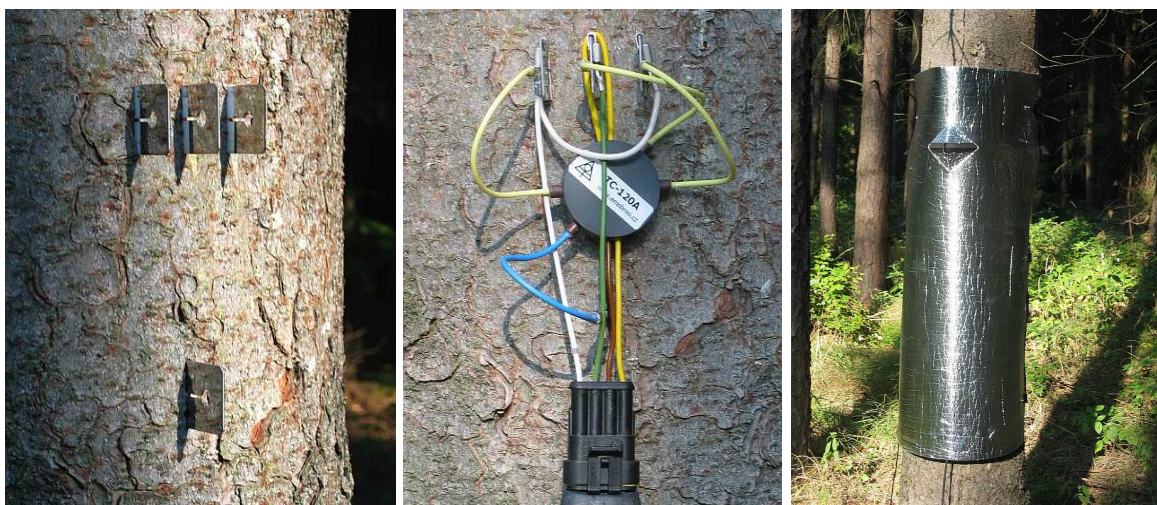
Materiál: Následující text se zabývá analýzou dat typického smrkového porostu. Vychází z výběru reálných naměřených hodnot záměrně modifikovaných způsobem, umožňujícím názorný popis jejich analýzy. Jde o lehce rozvolněný vysokohorský smrkový porost s cca 950 jedinci na hektar a s bohatou podporostní vegetací (Střelcová at all 2009). Histogram rozložení tloušťkových tříd ukazuje obr.1.



Obr.1. Histogram rozložení stromů v tloušťkových třídách ve sledovaném porostu.

Metody: Stanovení transpirace porostu bylo založeno na měření průtoku vody v kmenech vybraných vzorníků. Použitý přístup byl zvolen s ohledem na dostupné technické a finanční možnosti a umožňoval stanovení transpirace stromového patra bez vlivu podporostní vegetace a půdní evaporace. Měření bylo prováděno přístrojem P4.2 vyráběným firmou EMS Brno. Přístroj využívá metody tepelné bilance pletiv (Čermák at all 1973) postupně modifikované s ohledem na hlubší znalost fyzikální podstaty měření (Kučera at all 1977, Čermák at all 2004, Tatarinov at all 2005). Viz

obrázek 2.



Obr.2: Pohled na měříště průtoku vody v kmeni v různých fázích instalace.

Blíže o použité instrumentaci v návodu k obsluze přístroje, dostupným na stránkách výrobce (www.emsbrno.cz).

Průtok vody byl měřen u deseti vzorníků, vybraných s ohledem na rozložení jedinců v tloušťkových třídách tak, aby zahrnovaly celé spektrum průměrů s lehkým důrazem na větší a tudíž z hlediska příspěvku k porostní transpiraci významnějších jedinců. Viz tab.1.

Přepočítání transpirace z měřených vzorníků na 1 ha porostu byl prováděn pomocí „scaling curve“. Při této proceduře se stanoví průměrný denní průtok vody [kg/den] v kmenech měřených vzorníků v jistém časovém období, obvykle zahrnujícím dny s vyššími evaporačními požadavky a období bez významného vláhového deficitu. Z těchto hodnot se stanoví regresní závislost průtoku vzorníků na jejich průměru v tzv. výčetní výšce (1,3 m). Závislost bývá obvykle přímková. Z takto zjištěné závislosti průtoku vody na průměru kmenů se odvodí extrapolovaný průtok vody v kmenech všech tloušťkových tříd. V dalším kroku se vynásobí takto zjištěná hodnota počtem stromů v příslušných tloušťkových třídách, čímž se zjistí transpirace tloušťkových tříd. Posledním krokem vedoucím k přepočtu průtoku vody v kmenech měřených vzorníků na 1 ha porostu za den je součet průtoku ve všech tloušťkových třídách, součet průtoku ve všech vzornících [kg/den] a podíl těchto součtů. Tento podíl je dále používám jako koeficient přepočtu průtoku vzorníků a transpirace v [kg/ha] či po dělení 10^4 v [mm]. Záměna pojmů transpirace a průtoku v kmenech stromů je při tomto přístupu nezbytná, jakkoli je teoreticky nekorektní s ohledem na více či méně odlišnou dynamiku obou procesů, ovlivněnou vodními rezervami v jednotlivých částech stromu a jejími denními změnami v reakci na okamžité hodnoty listového a půdního vodního potenciálu.

Následná analýza naměřených dat spočívá v parametrizaci Penman-Monteithovy (dále P-M) rovnice potenciální evapotranspirace

$$\lambda E_p = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p D g_a}{\Delta + \gamma(1 + \frac{g_a}{g_c})} \quad [1]$$

kde

E_p – transpirace porostu [kg/m_2]

R_n – radiační bilance [W/m_2]

G – tok tepla do půdy [W/m_2]

D – sytostní doplněk [Pa]

γ - psychrometrická konstanta [Pa/K]

Δ – derivace křivky závislosti nasyceného tlaku par na teplotě [Pa/K]

λ – výparné teplo vzduchu [J/kg]

c_p – měrné teplo vzduchu [J/m^3]

g_a – aerodynamická vodivost porostu [s/m]

g_c – vodivost průduchů [s/m]

Pro výpočet aerodynamické drsnosti povrchu porostu platí rovnice, odvozená dle teorie turbulentní difuze:

$$g_a = \frac{k^2 u}{\ln^2 \left[\frac{(z-d)}{z_0} \right]} \quad [2]$$

kde

u – rychlost větru [m/sec]

ρ – hustota suchého vzduchu [kg/m^3]

k – von Karmanova konstanta [-]

d – náhradní nulová hladina rychlosti vzduchu [m]

z_0 – drsnost povrchu porostu [m]

z – výška měření rychlosti větru [m]

Ve shora uvedených rovnicích jsou všechny parametry známé a všechny proměnné se dají více či méně lehce přímo měřit, včetně transpirace porostu. Jedinou neznámou je zde vodivost průduchů.

Smyslem procesu označovaného jako parametrizace P-M rovnice je výpočet hodnot vodivosti průduchů, která je nicméně závislá na evaporačních faktorech. Výsledkem parametrizace může být průměrná denní hodnota, pokud pracujeme s denními hodnotami nebo přímo denní průběh, pokud vyjdeme z okamžitých – subhodinových – dat, který je ovlivněn aktuálními hodnotami meteorologických veličit. Tato závislost byla popsána Lohamarem (Lohamar at all 1980), později prakticky interpretována Haldinem (Haldin 1989) ve tvaru

$$g_s = \frac{R_g}{R_g + R_0} \cdot g_{\max} \cdot \frac{1}{1 + aD} \quad [3]$$

a dále doplněna Kučerou (Kučera at all 2007) do tvaru

$$g_s = \frac{R_g}{R_g + R_0} \cdot g_{\max} \cdot \left(0.5 - \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{D}{a} - b \right) \right) \quad [4]$$

v němž křivka závislosti vodivosti průduchů na sytostním doplňku přibírá další stupeň volnosti. Symboly v rovnicích znamenají

R_g - globální sluneční radiace [W/m²]

D – sytostní doplněk [Pa]

R_o , a , b – parametry.

Nalezení závislosti vodivosti průduchů na hlavních evaporačních proměnných, tedy sluneční radiace a sytostního doplňku, znamená stanovení takových hodnot parametrů R_o , a , b , které po dosazení do rovnice [3] nebo [4] umožní výpočet hodnot vodivosti průduchů, které po dosazení do rovnice [1] budou těsně korelovat s měřenými hodnotami porostní transpirace. Křivky závislosti vodivosti průduchů na sluneční radiaci a sytostním doplňku pak plně popisují chování průduchů za existujícího stavu dostupnosti půdní vody.

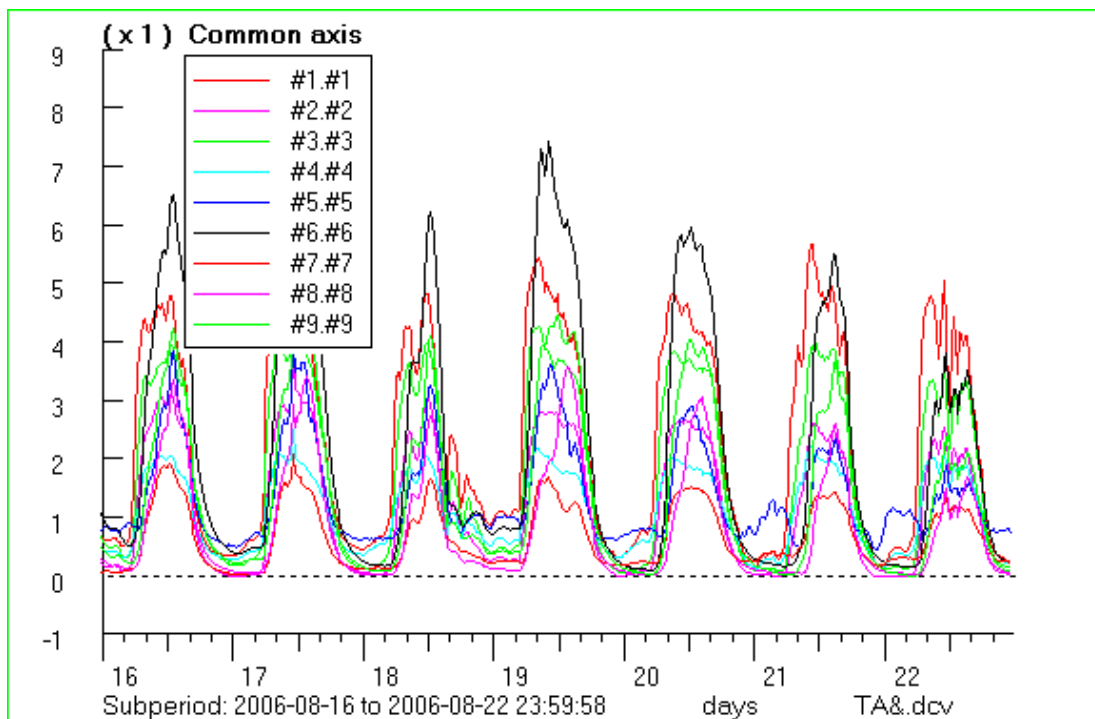
Výpočty potřebné pro popsání procesu parametrizace P-M rovnice se zahrnutím rovnice závislosti vodivosti průduchů [4] byly prováděny v programu pro zpracování časových řad Mini32 (EMS Brno).

Výsledky: Rozměry stromových vzorníků jsou uvedeny v tab.2 společně s naměřenými průměrnými hodnotami průtoky vody za sledované období 16. až 22. srpna.

Průměr kmene ve výšce 1.3 m (DBH) [cm]	Průtok [kg/den]
23	15.2
29.5	33.6
33.5	30.3
34.5	30.7
37.5	40.1
39	42.9
42.5	55.6
40.5	52.4
46	52.2
55	75.5
Suma průtoku vzorníků v daném období:	428.5 kg/den

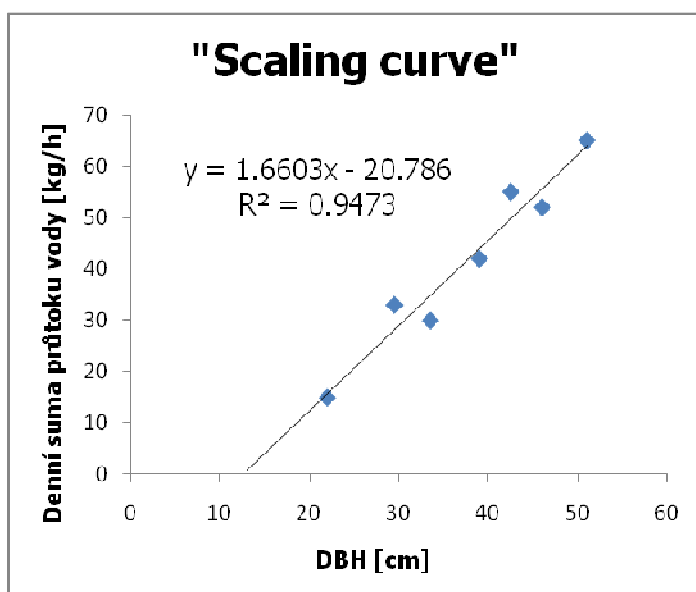
Tab.1: Vybrané stromové vzorníky a jejich hodnoty průměrných denních sum průtoků ve dnech 16. až 22. srpna 2006

Charakter denních křivek průtoků ukazuje obr.1.



Obr.3: Záznam měření průtoku vybraných vzorníků.

Závislost průměrné denní hodnoty průtoku jednotlivých vzorníků na průměru kmene jsou ukázány v obr.4. Regresní závislost je zde velmi těsná s koeficientem determinance 0.94. Za povšimnutí stojí hodnota DBH pro nulový průtok – zde asi 13 cm. Strom této dimenze je někdy označován jako "nejmenší strom porostu" a spolu s jedinci menšího průměru se do porostní transpirace nezahrnuje (Čermák at all 2004).



Obr.4: Regresní závislost mezi průměrem měřených stromů ve výčetní výšce a průměrnými hodnotami průtoku vody na strom v období 16. až 22. srpna 2006.

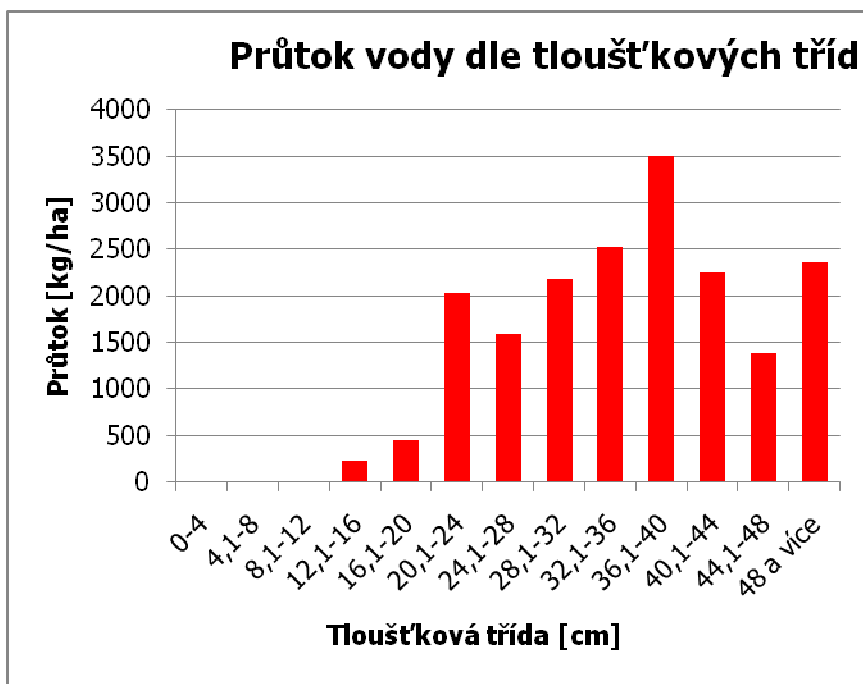
Tab.2 ukazuje rozložení stromů v tloušťkových třídách, průtok stromu v dané třídě vypočítaný dle scalingové křivky a konečně celkovou transpiraci dle tloušťkových tříd, včetně součtu, tedy průměrné porostní transpirace v daném období září 2006, dosahující v daném období 1,9 mm.

Tloušťková třída [cm]	Střední průměr [cm]	Počet jedinců [ha-1]	Průtok jednoho stromu [kg/den]	Transpirace dané třídy [kg/ha]
0-4	2	92	0.0	0.0
4,1-8	6	96	0.0	0.0
8,1-12	10	88	0.0	0.0
12,1-16	14	92	2.5	225.8
16,1-20	18	50	9.1	454.7
20,1-24	22	129	15.7	2,029.7
24,1-28	26	71	22.4	1,588.6
28,1-32	30	75	29.0	2,176.1
32,1-36	34	71	35.7	2,531.4
36,1-40	38	83	42.3	3,510.4
40,1-44	42	46	48.9	2,251.0
44,1-48	46	25	55.6	1,389.4
48 a více	50	38	62.2	2,364.1

Transpirace porostu jako suma všech tloušťkových tříd: 18,521.0 kg/ha
1.9 mm

Tab.2: Rozložení stromů v tloušťkových třídách, transpirace jedince v každé třídě, transpirace všech stromů v tloušťkových třídách a jejich suma jako průměrná denní transpirace ve sledovaném období 16. až 22. srpna 2006.

Rozložení transpirace porostu dle tloušťkových tříd jako sumu průtoků ve třídách ilustruje obr.5.



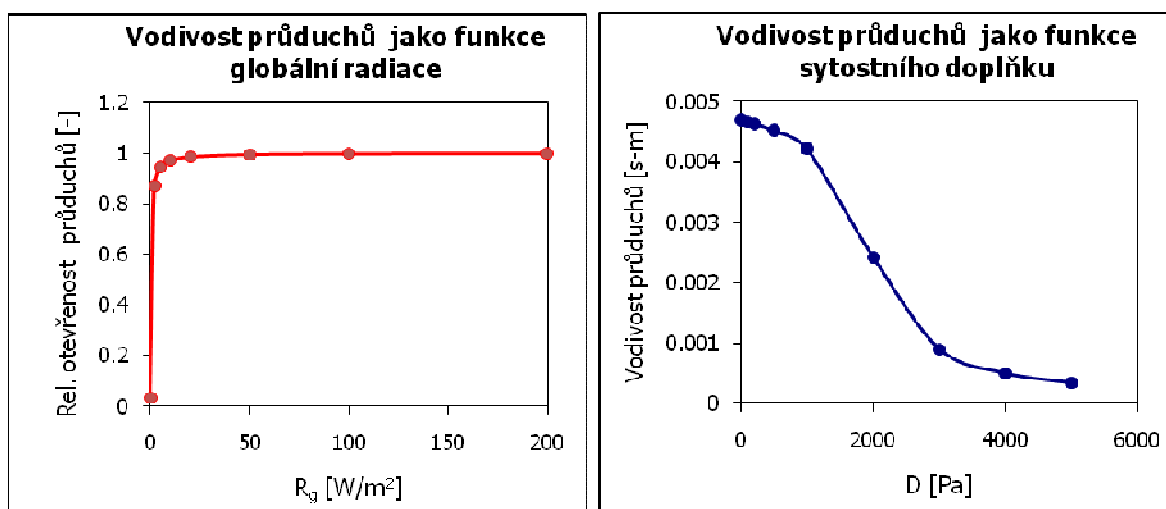
Obr.5: Histogram rozložení porostní transpirace dle tloušťkových tříd.

Koeficient „S“ pro přepočítání hodnot součtu průtoků měřených vzorníků [kg/den] na porostní transpiraci [kg/ha, den] (s výhradou zmíněnou výše) je dán poměrem sum z tab.2 a tab.1 jako

$$S = 18521/428,5 = 43,22.$$

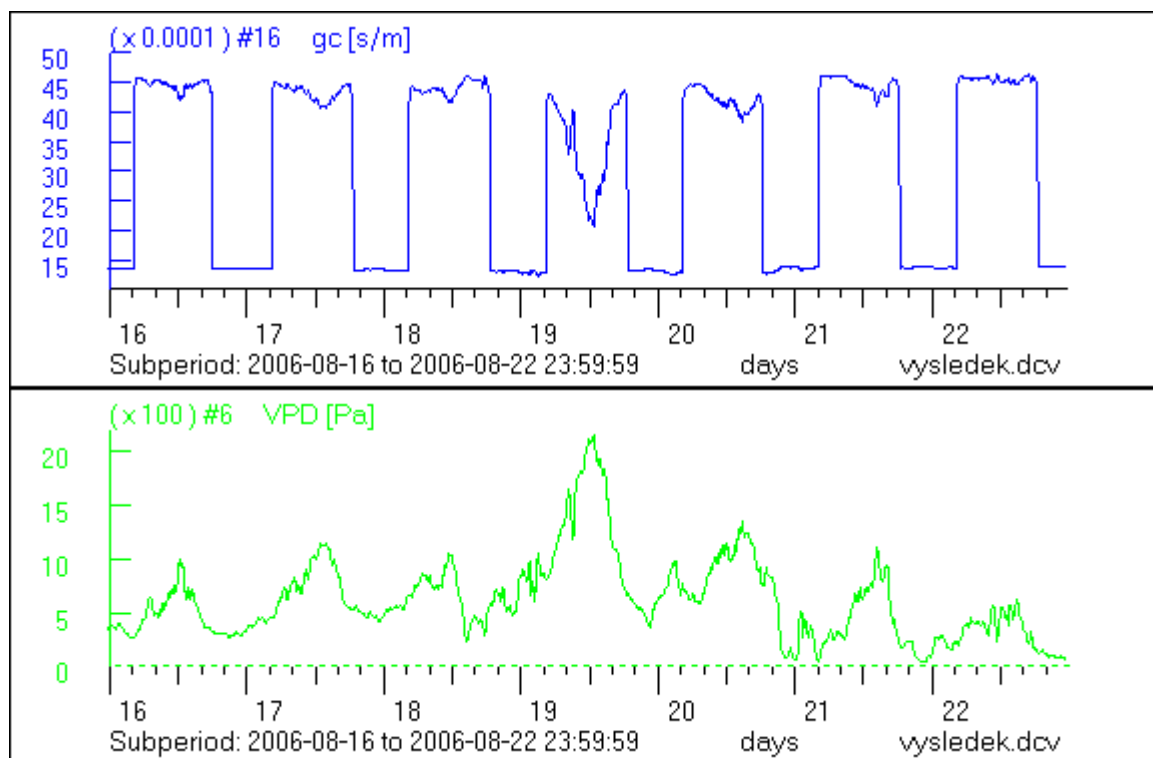
Touto hodnotou je tedy třeba násobit součet průtoků vzorníků, abychom dostali transpiraci v [kg/ha], a to ať již v hodinových či denních intervalech.

Výsledky parametrizace P-M rovnice jsou ukázány obr.6.



Obr.6: Vodivost průduchů jako funkce globální radiace a sytostního doplnku.

Závislosti vodivosti průduchů na sytostním doplňku je dokumentuje výhodu přístupu s více stupni volnosti. Pokles vodivosti s nárůstem evaporačních nároků není tak strmý a až do hodnoty kolem 1000 Pa, v této oblasti obvyklého maxima, je nevýznamný. Jasně to ilustruje i obrázek denního chodu stomatální vodivosti (obr.7).



Obr.7: Denní chod vodivosti průduchů a sytostního doplňku ve vybraných dnech.

Průduchy zůstávají ve sledovaném období otevřeny po celý den s výjimkou jednoho dne (19. srpna) s extrémně vysokým sytostním doplňkem. Závislost otevření průduchů na slunečním záření je zde pozoruhodně strmá – průduchy zjevně reagují už na pár wattů dopadajícího záření plným otevřením a v průběhu fotoperiody vodivost nijak nelimitují.

Závěr: Měření průtoku vody v kmenech stromů je zjevně použitelnou metodou stanovení porostní transpirace. Oproti komorovým měřením na listové úrovni je méně zatížena nepřesností přepočtu na porostní úroveň. Na druhé straně, výhoda oproti metodám založeným na teorii turbulentní difuze je v jasném oddělení transpirace stromové složky od ostatních složek evapotranspirace.

Metoda parametrizace P-M rovnice aplikovaná v této ukázkové studii kvantifikuje vliv evaporačních požadavků na otevřenost průduchů. Aplikace znalosti této závislosti umožňuje jasnou a kvantitativní predikci chování studovaného porostu na změny klimatu. Z hlediska možných dlouhodobých klimatických změn je samozřejmě nutno vzít v úvahu i příslušné adaptační mechanismy.

Literatura:

Čermák, J., Deml, M., and Penka, M. 1973. A new method of sap flow rate determination in trees. *Biol. Plant.* 15: 171-178.

Čermák J., Kučera J., Nadezhdina N. 2004. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees* 18: 529-546.

Haldin, S. 1989. The Lohammar equation for stomatal and surface conductance. Personal communication.

Kučera, J., Střelcová K., Fleischer, P., Giorgi, S. 2007. Canopy transpiration of mountain mixed forest. Pokalamitný výskum v TANAPe 2007, Tatranská Lomnica, 25.- 26.10.2007. Oral presentation.

Kučera, J., Čermák, J., Penka, M. 1977. Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biologia Plantarum (Praha)* 19(6): 413-420.

Lohammar, T., Larsson, S., Linder, S., Falk, O. 1980. Fast – simulation Models of Gaseous Exchange in Scots Pine. Persson, T. (ed) 1980. Structure and Function of Northern Coniferous Forests – An Ecosystem Study. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 32: 505-523.

Střelcová, K., Kučera, J., Fleischer, P., Giorgi, S., Gömöryová, E., Škvarenina, J., Ditmarová, L. 2009. Canopy transpiration of mountain mixed forest as a function of environmental conditions in boundary layer. *Biologia*, Issue Volume 64, Number 3/ June, 2009 (507-511)

Tatarinov, A. F., Kučera, J., Cienciala, E. 2005. The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005) 1157–1169

Sap Flow Meter P4.2 user's manual – firemní materiál výrobce EMS Brno

Mini32 user's manual – firemní materiál výrobce EMS Brno