

## TRANSPIRACE A EVAPOTRANSPIRACE V EKOFYZIOLOGII LESNÍCH DŘEVIN

Radek Pokorný, Zdeňka Klimánková, Otmar Urban, Lenka Krupicová, Zuzana Zvěřinová

### Summary

The aim of this contribution is evaluation as well as comparison of evapotranspiration and transpiration data obtained by nowadays techniques and methodological approaches used in ecophysiological research. Among these techniques and methods fall: i) gas exchange methods, ii) thermodynamic methods, and iii) eddy-covariance technique. Transpiration on a shoot level is measured by ad i) - based on infrared gas analysis, transpiration on a tree level by ad ii) - for sap flux rate monitoring, and evapotranspiration on the stand level by ad iii). Leaf or sapwood areas are usually used for up scaling of data from the shoot or tree level to the stand level.

The above mentioned methods were applied to a young Norway spruce forest stand (*Picea abies* [L.] Karst), which is located at the Experimental ecological research site Bílý Kříž in the Moravian-Silesian Beskydy Mts. Some differences were found between eddy covariance and heat pulse velocity data. Specifically, eddy-covariance technique underestimated the water efflux data whereas heat pulse method overestimated these data in the late afternoon because water refilling of woody tissue. Gas exchange method needs to be improved by detail quantification of sunlit and shaded leaf area proportion and radiation regime within the stand canopy monitoring for accurate up scaling of data from shoot to stand level.

### Úvod

Evapotranspirace představuje jednu z nejdůležitějších ztrátových složek vodní bilance lesního porostu. Měření evapotranspirace nebo jejích složek (transpirace, evaporace, intercepce) se může uskutečňovat v různých měřítkách, od jednotlivých listů přes celé stromy, konkrétní porost až po celé povodí. Vzhledem k tomu, že každý způsob měření reprezentuje jiné časové a prostorové měřítko, vnáší rozdílné chyby a přesnost, je často srovnání jednotlivých technik velice obtížné (Wilson et al. 2001). Různé obory (např. fyziologie, ekologie, hydrologie) často používají rozdílné přístupy a metodologické postupy ke stanovení vodní bilance ekosystému.

V ekofyziologii lesních dřevin jsou k ocenění složek výparu v současnosti používány nejčastěji metody: i) gazometrické (GEM), ii) termodynamické, a iii) vířivé kovariance (EC).

Metoda gazometrická (GEM) měří transpiraci na úrovni letorostu, který se uzavírá do gazometrické komůrky. K měření rychlosti transpiračního proudu celého stromu jsou používány metody založené na různých vari-

antách termodynamického principu. Mezi nejčastěji používané termodynamické metody (Köstner et al. 1997) patří metoda tepelné bilance (HBM) a tepelných pulsů (HPV). HPV metoda je založena na principu, že veškerá stromem vytranspirovaná voda projde jeho kmenem. Rychlost proudu je odvozena z pohybu tepelné vlny v krátkodobě zahřáté části kmene (Manual-Greenspan Technology 1999). Metoda HPV umožňuje zachytit s určitou přesností dynamiku změn rychlosti transpiračního proudu na úrovni větví či jednotlivých stromů (např. Vertessy et al. 1995, Granier et al. 2000). Metoda vířivé kovariance (EC) stanovuje celkovou evapotranspiraci lesního ekosystému (Baldocchi 2003). Měří toky energií a látek mezi ekosystémem a přízemní vrstvou atmosféry. Umožňuje sledovat výměnu pohybové energie, zjevného a latentního tepla, vodní páry a CO<sub>2</sub> mezi porostem a přízemní vrstvou atmosféry. Základem této metody je souběžné měření rychlosti a směru jednotlivých vírů vzduchu a s nimi spojených okamžitých koncentrací CO<sub>2</sub> a vodní páry. Korigovat naměřená data výdeje vodní páry tímto systémem dovoluje současné stanovení

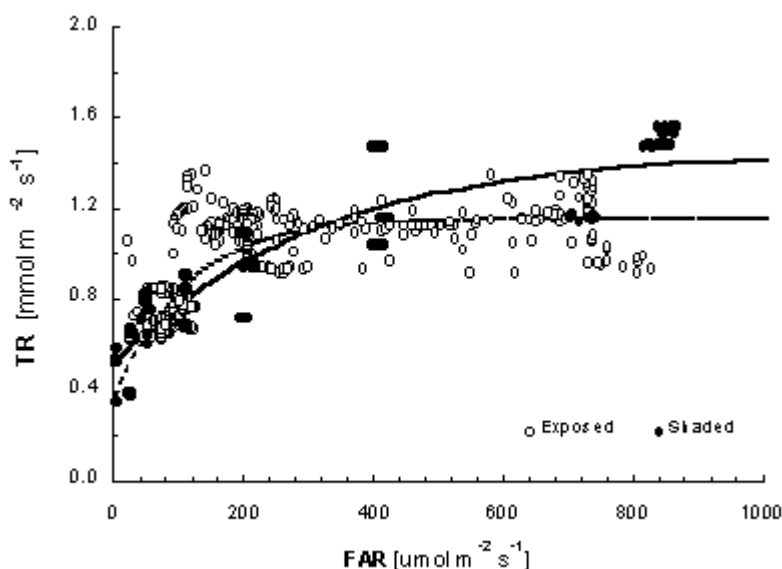
energetické bilance porostu (Baldocchi et al. 1988).

### Materiál a metody

Ke stanovení výdeje vody porostem byly užity tyto metodické přístupy a metody: i) gazometrické, ii) tepelných pulsů a iii) vířivé kovariance. Měření probíhala na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž (49° 30' s.z.š., 18° 32' v.z.d., 908 m n.m.) v porostu 23-leté horské smrčiny (*Picea abies* [L.] Karst) (2040 ks.ha<sup>-1</sup>). Popis lokality a porostní plochy uvádí např. Pokorný a Šalanová (2001).

Transpirace na úrovni jehlice-letorost byla měřena gazometricky pomocí infračerveného analyzátoru plynu CIRAS-1 (PP Systems,

Anglie), a to zvláště pro slunný a zvláště stinný typ asimilačního aparátu za různé ozáření letorostu FAR (fotosynteticky aktivní radiace). Dopadající FAR na porost byla měřena v půlhodinových průměrech čidlem BPV 21 (Siemens, Německo). K měření rychlosti transpiračního proudu HPV metodou byl použit systém SF 300 (Greenspan Technology, Austrálie). Systém byl instalován v kmeni deseti jedinců vybraných tak, aby reprezentovali daný porost. Přepočtovým faktorem z úrovně jedinec na úroveň porost byla vodivá plocha běle (Pokorný 2000). Měření probíhala kampaňovitě 7. - 14. květen, 25. červen - 12. červenec, 23. - 26. srpen. V průběhu r. 2004 byla EC systémem (In Situ Flux System, Švédsko) kontinuálně monitorována evapotranspirace na porostní úrovni.



Obr. 1. Závislost rychlosti transpirace (TR) slunného (exposed, prázdná kola, čárkovaná čára) a stinného (shaded, plná kola, plná čára) typu jehlic na intenzitě dopadající fotosynteticky aktivní radiace (FAR).

### Výsledky a diskuse

I přes vědomí potenciálních zdrojů chyb a nedostatků jednotlivých měřících technik pro stanovení výdeje vodní páry porostem či jeho části bylo provedeno jejich srovnání. Pomocí gazometrické metody (GEM) lze velmi přesně stanovit transpiraci na úrovni jednotlivých letorostů, případně větví. Z obr. 1. vyplývá, že transpirace letorostu exponenciálně závisí na intenzitě dopadajícího FAR. Obrázek dále dokládá rozdílnou dynamiku transpirace slunných a stinných letorostů. Přepočtový mecha-

nismus na porostní úroveň je však velmi složitý, s vysokým potenciálem zdrojů chyb. Musí být zohledněna rozdílná rychlost transpirace (Obr. 1.) i stomatální vodivost slunných a stinných letorostů v závislosti na intenzitě dopadající FAR (např. Šprtová, Marek 1999). Metoda stanovení podílu slunného a stinného typu asimilačního aparátu v korunové vrstvě porostu však zatím nebyla s dostatečnou přesností dosud úspěšně vyřešena. Ačkoli existují modely ohodnocení podílu osluněné a zastíněné části listové plochy

(resp. LAI), jejich výsledky jsou pouze orientační (např. Ondok 1977, De Pury a Farquahar 1997, De Pury a Farquahar 1999). Slunný a stinný typ asimilačního aparátu vycházející z rozdílné morfologické stavby, chemického složení a především fyziologické aktivity (např. Priwitzer a kol. 1998) může být osluněn či zastíněn různou měrou. Heterogenita radiačního režimu v porostu je značná - závisí na hustotě listoví, jeho uspořádání, nahloučení v jednotlivých hierarchických úrovních (tj. porost, koruna, přeslen, větev, letorost), orientaci a inklinacním úhlu nasazení (např. Chen 1996, Stenberg 1996). Podrobný monitoring radiačního režimu v koruně stromu či korunové vrstvě porostu a znalost velikosti listové plochy jednotlivých typů asimilačního aparátu (tj. slunný, stinný) by teprve vytvořil dostatečný přepočtový aparát na přesné stanovení transpirace celého porostu. Třetím problémem v přepočtu transpirace na úroveň porostu je stanovení míry spřažení jednotlivých pater korunové vrstvy s okolní atmosférou. Míru spřažení udává tzv. omega faktor, který nabývá hodnot od 0 (absolutně spřažený list s okolní atmosférou) do 1 (list izolovaný; transpirace je dána pouze intenzitou dopadající radiace). Hodnota omega faktoru je silně závislá na rychlosti proudění vzduchu a dle literárních údajů se pohybuje od 0,97 (list dubu ve větru  $0,2 \text{ ms}^{-1}$ ) až po 0,01 (jehlice smrku sitka ve větru  $5 \text{ ms}^{-1}$ ; Larcher 1988).

Transpirace resp. rychlost transpiračního proudu stromu je závislá na řadě faktorů – klimatických, stanovištních (dostupnost vody a minerálních živin) a porostních (sociální postavení stromu v porostu, zdravotní stav stromu, věk, struktura porostu; např. Vertessy et al. 1995, Granier et al. 1996, Šalanská a Pokorný 2001). Prostorová variabilita rychlosti transpiračního proudu v příčném průřezu kmene je značná (např. Wullschleger, King 2000, Čermák et al. 1992), proto je zapotřebí i k přesnému stanovení výdeje vody jednotlivým stromem řada vhodně prostorově umístěných čidel. Množství čidel pro dostatečné postižení variability na úrovni jedince i porost je tedy jedním z limitních faktorů. Jak uvádí Hatton et al. (1995), u HPV metody je větším zdrojem chyb stanovení transpirace na úrovni jedince než v přepočtovém mechanismu na úroveň porostní. Rychlost transpiračního proudu měřená metodou HPV bývá často nadhodnocena zvláště při nižších rychlostech

pohybu vody v kmeni stromu a především v nočních hodinách díky termodynamickým vlastnostem dřeva. Navíc v hodinách bez slunečního svitu rychlost transpiračního proudu monitoruje spíše dosycování pletiv vodou než transpiraci (např. Granier et al. 2000, Wilson et al. 2001).

Jedním z problémů metody EC je stanovení velikosti a tvaru území (tzv. „footprint“), pro které je informace reprezentativní. Hranice a velikost tohoto území se tak často plošně neshoduje s výměrou porostu či povodí, pro něž se vodní bilance stanovuje konkrétně. Mimo to musí být z naměřených dat vyloučeny hodnoty, při nichž je nedostatečné turbulentní proudění zajišťující komunikaci mezi ekosystémem a přilehlou vrstvou atmosféry. Podíl těchto hodnot je často vysoký (Lee et al. 1996, Baldocchi et al. 2000). K výše zmíněným problémům přesného stanovení evapotranspirace daného porostu EC metodou (tj. dostatečná turbulence vzduchu a velikost footprintu) přibývá ještě fyzikální problém kondenzace vodních par v systému přivádějícím vzorek vzduchu k infračervenému analyzátoru plynu. Ke kondenzaci vodních par dochází díky různé teplotě vzduchu a povrchů v EC systému. Monitorované hodnoty výdeje vodní páry porostem jsou tak podhodnoceny, a to různou měrou v závislosti na teplotní a vlhkostní diferencii atmosféra - analyzovaný vzorek vzduchu - EC systém (Moncrieff et al. 1997). Stejných výsledků bylo dosaženo i při srovnání dat EC metody s metodou HPV. Stanovení evaporace, jako rozdílu mezi evapotranspirací (EC metoda) a transpirací (HPV) je tak bez použití korekce EC dat nemožná. Jednotná korekce EC dat se však stále upravuje a zdokonaluje (Aubinet et al. 2000). Porovnání časového průběhu naměřených dat resp. dynamiky HPV a EC metodou (Obr. 2a,b,c) potvrzují předchozí výsledky spojené s dosycováním rostlinných buněk vodou (Granier et al. 2000, Wilson et al. 2001).

Noční toky byly korigovány (sníženy k nulové hodnotě) u HPV metody. EC toky vodní páry jsou v nočních hodinách velmi nízké a korigovány nebyly. K výdeji vody porostem v nočních hodinách však může docházet díky neuzavřenosti průduchů (Obr. 1) a stálou existencí podmínek pro výpar vody

z rostliny (tj. deficit vodní páry v ovzduší, zvrstvení atmosféry, proudění vzduchu).

### Závěr

K přesnému stanovení transpirace porostu GEM metodou chybí dostatečně přesný přepočtový aparát resp. kvantifikace LAI slunečního a stinného typu listoví a podrobná časová a prostorová mapa FAR ozáření slunečního a stinného typu listoví. HPV metoda kromě transpirace zachycuje pohyb vody v rostlině způsobený dosycováním pletiv vo-

dou. Díky termodynamickým vlastnostem dřeva závislým na jeho vlhkosti jsou HPV systémem monitorovány „toky“ nesouvisející s pohybem vody v kmeni stromu. HPV metoda je porovnatelná s EC metodou. Časová neshoda HPV a EC dat umožňuje monitorovat právě dosycování kmene vodou a ohodnotit v tomto ohledu i jeho kapacitu. Evaporaci z porostu nelze přesně stanovit bez korekce EC dat, neboť hodnoty evapotranspirace porostu EC metodou jsou nižší než hodnoty transpirace stanovené HPV metodou.

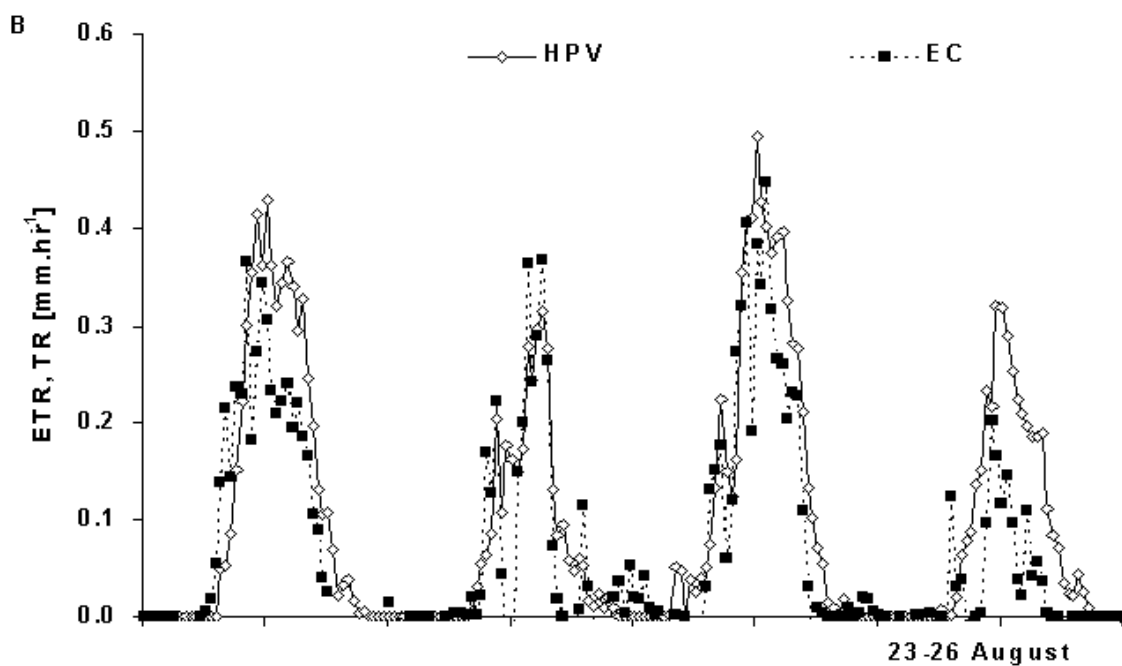
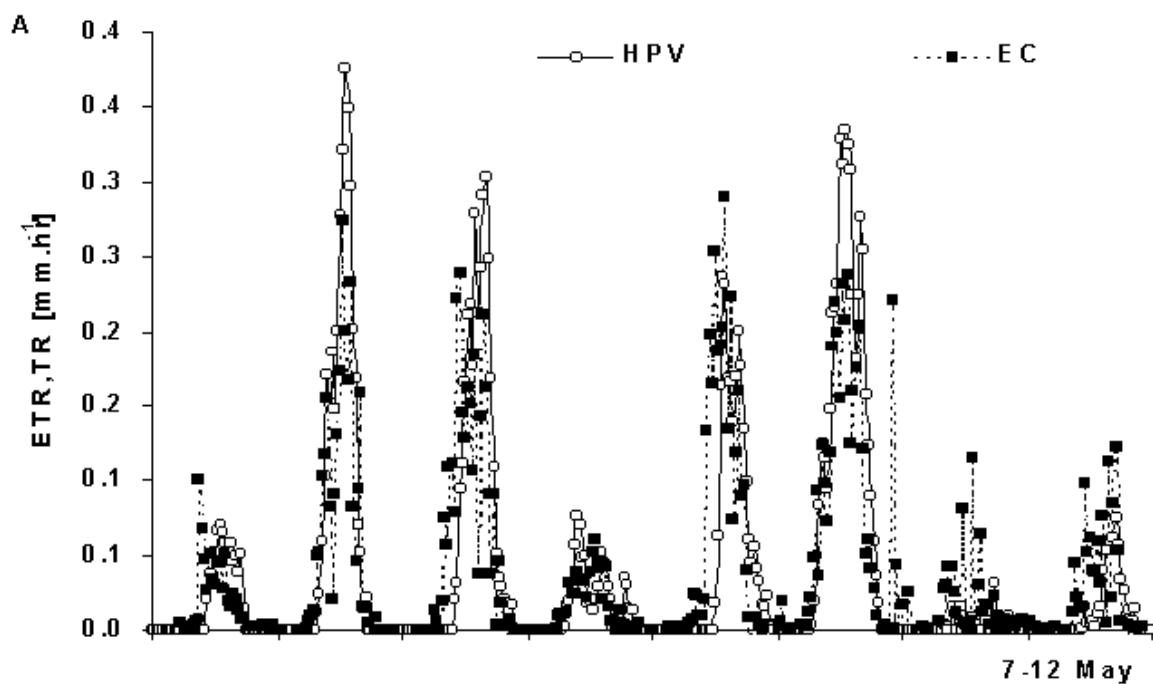
### Literatura:

- Aubinet, M., Grelle A., et al., 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, Vol 30. 30: 113-175.
- Baldocchi, D.D., Hicks, B.B., et al., 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* 69, 1331 – 1340.
- Baldocchi, D.D., Finningan, J., et al., 2000. On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary-Layer Meteorol.* 96, 257 – 291.
- Baldocchi D.D., 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Review. Global Change Biology* 9, 479 – 492.
- Čermák J., Cienciala E., et al., 1992. Radial velocity profiles of water flow in stems of spruce and oak and response of spruce trees to severing. *Tree Physiol.* 10, 367 – 380.
- De Pury, D.G.G., Farquhar, G.D., 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant Cell Environ.* 20 (5): 537-557.
- De Pury, D.G.G., Farquhar G.D., 1999. A commentary on the use of a sun/shade model to scale from the leaf to a canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 95(4): 257-260.
- Granier, A., Biron, P., et al., 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agriculture and Forest Meteorology.* 100: 291-308.
- Chen, J.M., 1996: Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agric. Forest. Meteorol.* 80: 135-163.
- Hatton, T., Wu, H., 1995. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use. *Hydrological processes.* 9: 527-540.
- Köstner, B., Granier A., et al., 1998. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. *Annales Des Sciences Forestieres* 55(1-2): 13-27.
- Larcher, W., 1988: *Fyziologická ekologie rostlin.* Academia, Praha, 361 s.
- Lee D.W., et al., 1996. Carbon dioxide exchange and nocturnal processes over a mixed deciduous forest. *Agric. For. Meteorol.* 81, 13 – 29.
- Long, S. P., Hallgren, J.E., 1993. Measurements of CO<sub>2</sub> assimilation by plants in the field and the laboratory. *Photosynthesis and Production in a Changing Environment. A Field and Laboratory Manual.* D. O. Hall, J. M. O. Scurlock, H. R. Bolhar-Nordenkamp, R. C. Leegood and S. P. Long. London, Chapman and Hall: 129 - 167.
- Manual - Greenspan Technology, 1999. Sapflow measurement: Theory and Technique, User manual.
- Moncrieff, J. B., Massheder, J.M., et al. 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *J.Hydrol.* 188-189: 589-611.
- Ondok, J. P., Gloser, J., 1978. Fotosyntetický model porostu rákosu (*Phragmites communis trin.*). *Acta Ecologica.* 8: 43-72.

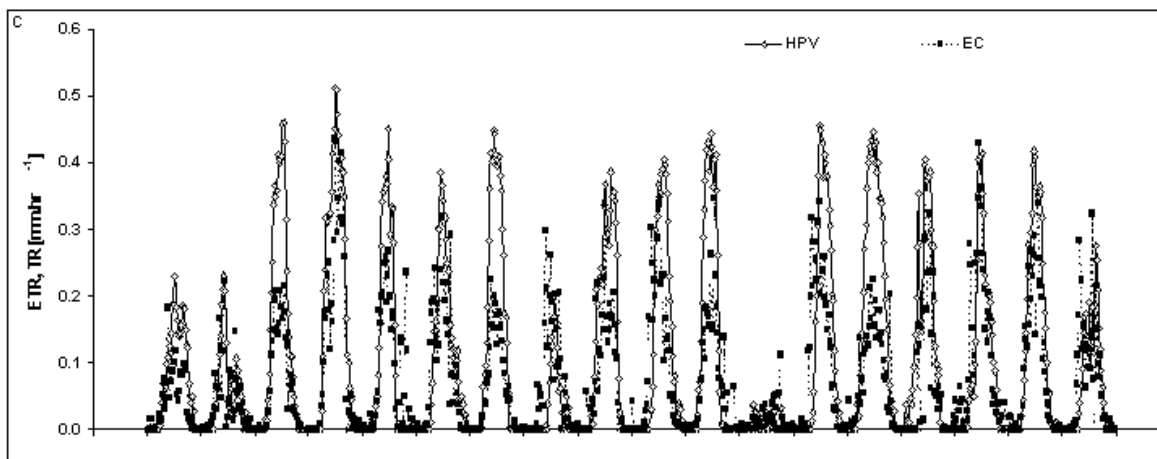
- Pokorný, R., 2000: Sap Flux Simulation and Tree Transpiration Depending on Tree Position within Stand of different Densities. *Phyton* Vol.40, Fasc.4: 157-162.
- Pokorný, R., Šalanská, P., 2001. Sap flux of dominant trees under low soil water availability. *Beskydy* 14: 99-106.
- Pokorný, R., 2002. Index listové plochy v porostech lesních dřevin, Disertační práce. MZLU Brno.
- Priwitzer, T., Urban, O., et al. 1998. Chloroplastic carbon dioxide concentration in Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) needles relates to the position within the crown. *Photosynthetica*. 35: 561-571.
- Stenberg, P., 1996: Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifer. *Agric. Forest. Meteorol.* 79: 1-8.
- Šalanská, P., Pokorný, R., 2000. Rychlost transpiračního proudu v kmeni smrku ztepilého (*Picea abies* [L.] Karst.). „VIII. Posterový den s mezinárodní účastí. Transport vody, chemikálií a energie v systému poda – rostlina – atmosféra.“ (Bratislava 16.11. 2000)
- Šalanská, P., Pokorný, R., 2001. Sap flux of Norway spruce trees in relation to stem diameter class. *Beskydy* 14: 107-112.
- Šprtová, M., Marek, M. V., 1999. Response of photosynthesis to radiation and intercellular CO<sub>2</sub> concentration in sun and shade shoots of Norway spruce. *Photosynthetica* 37(3): 433-445.
- Vertessy, R.A., Benyon, R.G., O'Sullivan, S.K., Gribben, P.R., 1995. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiol.*, 15, 559-567.
- Wilson, K. B., Hanson, P. J., et al. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology* 106(2): 153-168.
- Wullschleger, S. D., King A. W., 2000. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar trees. *Tree Physiology* 20(8): 511-518.

#### **Poděkování:**

Výzkum probíhá za podpory grantů VAV/640/18/03, 526/03/H036 GA ČR a výzkumného záměru AV0Z60870520.







Obr. 2. Rychlost evapotranspirace (ETR) a transpirace (TR) porostu v průběhu měřících kampaní roku 2004: 7. – 12.5. (A), 23. – 26.8. (B), 25.6. – 12.7. (C) za použití měřících technik: HPV – metoda tepelných pulsů, EC – eddy kovarianční metoda.