PROBLEMATIKA MĚŘENÍ EVAPOTRANSPIRACE V ČHMÚ

Martin Možný

Summary

Questions of evapotranspiration measurements in CHMI

Study of evapotranspiration measurements is wrongly left out. Soil moisture regime data is most available, evapotranspiration regime data is worse available. As soil moisture measurement was and still is relatively simple and cost-effective, measurement of evapotranspiration have been expanding during last years. Electronic system implementations allows to eliminate in a way relatively rare network of evapotranspiration measuring with quality of measured data.

Measurement of evapotranspiration is determinig by lysimeter, where the amount of natural and manual added water is registered as well as amount of water passed through container. Because of small availability of lysimeter measurements, high-quality electronic evaporation measurements from a small water level will be used (evaporimeter EWM). Soil moisture measurement have been determined by gravimetric method (soil moisture determined by measuring the wet weight of soil, compared to the oven dried weight of the same soil sample). It is stepwise going to be replaced by more accuracy electronic measuring system TDT with VIRRIB sensors (a technique by which the one way travel time of an electrical pulse or signal is measured as it travel from point to point along a transmission line buried in soil).

1. Úvod

Měření evaporace a transpirace porostu má význam pro studium toků vody a energie v přirozených rostlinných společenstvech a na zemědělských plochách. K měření se používá celá řada metod, v praxi se nejčastěji využívá tzv. lyzimetrů, nádob naplněných půdou, kde se pěstují zkoumané plodiny, v ekofyziologii jsou to aerodynamické metody, založené na měření profilu koncentrací vodní páry v sérii různých výšek nad porostem [1] .

V rámci EU existuje cca 180 lyzimetrických stanic s 3 000 lyzimetry, nejvíce se jich nachází v SRN. Nejčastěji se používá měření pod travnatým povrchem, a to u 41 % všech lyzimetrů, naopak nejméně pod lesním porostem, pouze u 1 %. Podle velikosti výparoměrné plochy se lyzimetry dělí na malé (< 0,5 m^2), standardní (0,5 – 1 m^2) a velké (> 1 m^2). Převládají lyzimetry malé, nejméně je naopak velkých [2]. K nejrozšířenějším patří tzv. gravitační lyzimetry, kde se stanovuje evapotranspirace, jako rozdíl množství přirozeně i uměle dodané vody a odteklé vody z nádoby [3]. Podle Böhma [4] ideální konstrukce lyzimetru neexistuje, proto je třeba počítat s nevýhodami a limity jednotlivých zařízení. K nejperspektivnějším, ale zároveň k nejdražším patří velké lyzimetry, které jsou založené na změně hmotnosti celého bloku půdy s vegetací během výparu.

V ČR provozuje odbor agrochemie ÚKZÚZ 16 gravitačních lyzimetrických stanic s téměř dvacetiletou řadou pozorování, bohužel se nejedná o monolitické nádoby, takže dochází ke zkreslením vlivem pronikání vody z boku do misek umístěných ve hloubkách 40, 60 a 80 cm. Měření navíc probíhají jen po větších srážkách, v ostatním období se neprovádějí.

2. Přehled měřících metod používaných v ČHMÚ

Pobočka ČHMÚ v Brně provádí ve spolupráci s Mendelovou zemědělskou a lesnickou univerzitou mikroklimatická měření v porostech vybraných zemědělských kultur v Žabčicích. K určení evapotranspirace používají metodu vodní bilance [5] z výsledků měření srážek a vlhkostí půdy, metodu Bowenova poměru [1] z výsledků aerodynamických měření, metodu podle Matejky [6] z výsledků aerodynamických měření, hydrofyzikálních parametrů půdy a biometrických charakteristik a metodu využívající měření výparu z automatického výparoměru EWM.

V observatoři ČHMÚ v Doksanech (OBS) se k určení evapotranspirace využívá lyzimetrická metoda, využívající gravitační monolitický lyzimetr, metoda využívající výparoměrná měření (dva automatické výparoměry EWM a jeden Class-A-Pan), metoda vodní bilance a aerodynamických měření nad standardním travnatým povrchem a ve vybraných zeměděl-

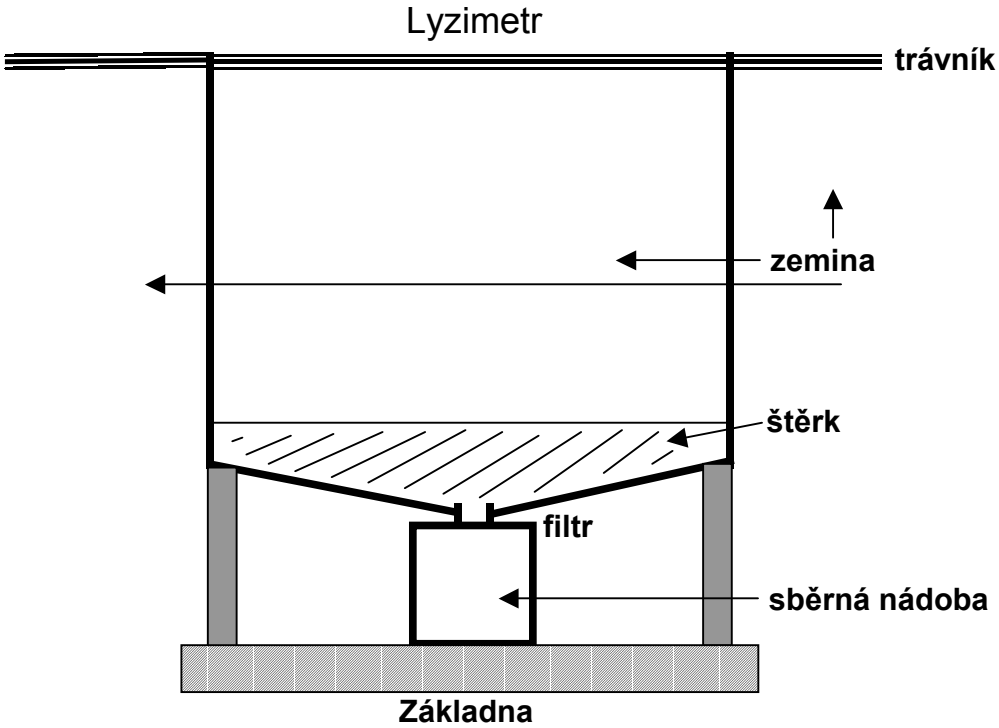
ských plodinách.

Mimo výše uvedené dvě stanice, ČHMÚ může využít metodu využívající měření výparu (12 stanic s automatickým výparoměrem EWM) a metodu vodní bilance (32 stanic se souběžným měřením vlhkosti půdy a srážek).

3. Měření potenciální evapotranspirace v ČHMÚ

Nejpřesnější měření potenciální evapotranspirace se provádí v rámci ČHMÚ ve velkém gravitačním lyzimetru v OBS. Měření bylo zahájeno již v r. 1991 a postupně se stále zdokonaluje. Schéma lyzimetru je znázorněno na obr. 1. Jedná se o monolitický typ lyzimetru o výparoměrné ploše 2 m^2. Měření se provádí na střední půdě pod standardním trávníkem (pravidelně sečeném). Regulace vlhkosti půdy v nádobě se dosahuje prostřednictvím periodických závlah. Měření probíhá ve vegetačním období (duben až říjen), každý den v 7 h SEČ se změří množství přirozeně i uměle dodané vody a množství odteklé vody z půdy. Vlhkost půdy v nádobě se monitoruje kontinuálně, s registrací po 10 minutách.

Na obr. 2 je zobrazena kalibrace lyzimetru v OBS. Lyzimetr je ze tří stran zapuštěn do terénu, vpředu je umístěna šachta pro jeho údržbu a kalibrace.



Obr. 1 Schéma lyzimetru v observatoři Doksany

Kromě OBS ČHMÚ dalšími lyzimetry nedisponuje, proto se jeví jako perspektivní metoda, stanovující potenciální evapotranspiraci z výsledků měření výparu z volné vodní hladiny. Toto měření se navíc podařilo v rámci ČHMÚ zautomatizovat a provádí se zatím na 12 stanicích ve výparoměru EWM o ploše 0,3 m^2, který se skládá z nerezové výparoměrné nádoby, stejných rozměrů a umístění jako u výparoměru GGI 3000, přístrojů na měření povrchové teploty vody a hladiny vody, která je měřena precisním digitálním optickým snímačem [7].. V OBS se automatizované měření výparu provádí i ve výparoměru Class-A-Pan o ploše 1,15 m^2. Automatizované měření je přesnější, podstatně méně zatížené náhodnými a systematickými chybami a je kontinuální, proto lze získat představu i o denním chodu výparu, nezbytnou podmínkou je ale dodržení technologického postupu údržby zařízení a při využití člunkového srážkoměru nezapomenout na korekci srážek při jejich silné intenzitě. Na základě zkuše-

ností z OBS je pro stanovení evapotranspirace výhodnější měření z výparoměru EWM (korelační koeficient r = 0,892), než z Class-A-Pan, kde je nutné provést složité korekce na rychlost větru. Pro představu za vegetační období (duben až září) 2004 byl celkový úhrn výparu z výparoměru EWM v OBS 520,8 mm, z výparoměru Class-A-Pan 795,7 mm a z lyzimetru 624,3 mm.

Obr. 2 Fotografie lyzimetru v observatoři Doksany

4. Měření aktuální evapotranspirace v ČHMÚ

V roce 2002 byl v OBS zpracován projekt lyzimetru, měřícího velmi přesně aktuální evapotranspiraci na základě změn váhy lyzimetrické nádoby s půdou a pěstovanou plodinou, bohužel se jeho výrobu zatím nepodařilo v rámci ČHMÚ prosadit. ČHMÚ proto disponuje pouze mikrolimatickými měřeními (aerodynamická měření, měření vlhkosti půdy a srážek) v porostech zemědělských plodin v Žabčicích a Doksanech.

ČHMÚ disponuje rozsáhlou sítí 32 stanic (http://www.chmi.cz/meteo/ok/dpp.html) s měřením půdní vlhkosti pod standardním travnatým povrchem (pravidelně sečeném) a se současným měřením srážek. Měření vlhkosti půdy se zde provádí snímači VIRRIB měřícími objemovou vlhkost v 5 cm a ve vrstvách 10 - 40 cm a 50 - 90 cm. Měření se provádí celoročně v kontinuálním režimu, data jsou ukládány po 15 minutách. Metodou vodní bilance lze pro tyto stanice počítat aktuální evapotranspiraci.

5. Závěr

ČHMÚ využívá pro měření potenciální evapotranspirace gravitační lyzimetr umístěný v OBS Doksany a 14 stanic s výparoměrem EWM. Pro měření aktuální evapotranspirace využívá mikroklimatických měření v porostech vybraných zemědělských plodin v Žabčicích a OBS Doksany a 32 stanic s měřením vlhkosti půdy pod standardním travnatým povrchem.

I přes viditelné úspěchy, jako je vybudování sítě stanic s automatizovaným měřením vlhkostí půdy a výparu, se zatím nepodařilo vybudovat nové lyzimetry. Jejich provoz totiž nelze zcela automatizovat a proto vyžaduje posílení stávající personální kapacity vyčleněné pro tato měření. Pro ČHMÚ se proto může stát vzorem Německá povětrnostní služba (DWD), které se to díky vnitřní reorganizaci měření již podařilo.

Literatura:

[1] Šantrůček, J.: Vodní režim rostlin. In.: Fyziologie rostlin. Academia, Praha, 2003, s.52-88.
[2] Lanthaler, Ch. : Lysimeter Stations and Soil Hydrology Measuring Sites in Europe – Purpose,

Equipment, Research Results, Future Developments. Diploma thesis, Graz, 2004, 147 p.
[3] Muller, J.C.: Un point sur … trente ans de lysimétrié en France (1960 – 1990). Une technique, on outil pour l´étude de l´énvironnement. INRA, Comifer, Paris, 1996, 390 p.
[4] Böhm, K.E. et al.: Lysimeter – Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte/Lysimeter – Demands, Experiences, Technical Concepts. Beiträge zur Hydrogeologie, 53, Graz, 2002, pp.115-232.
[5] Novák, V.: Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. VEDA, Bratislava, 1995, 260 s.
[6] Matejka, F. a kol.: Evapotranspirace porostu kukurice pri vysokých evaporačných požiadavkách ovzdušia. In.: Climate change – weather extremes organisms and ecosystems. International Bioclimatological Workshop, Viničky, SR, 2004.
[7] Možný, M.: Automatizace měření výparu z volné vodní hladiny. Meteorol.Zpr., 56, 5, 2003, s.150-155.

VÝPAROMĚRNÁ STANICE HLASIVO

Štěpán Buchtela

Úvod

Výzkumná stanice Hlasivo u Tábora byla vybudována v roce 1957, kdy se ve Výzkumném ústavu vodohospodářském v Praze začíná se systematickým sledováním výparu jako složky hydrologické bilance. Na stanici Hlasivo byly postupně instalovány tyto přístroje: srovnávací výparoměr (Ø 5 m), výparoměr Rónův, výparoměr Wildův, dva výparoměry GGI 3000, dva výparoměry 500 cm^2, výparoměr $1m^2$, výparoměr Class-A a výparoměr $3m^2$. V současné době je výpar měřen na výparoměru srovnávacím, GGI 3000 a Class-A (viz obr. 1 a 2). Tato stanice je jedinou nezrušenou základní výparoměrnou stanicí v ČR a řada pozorování od roku 1957 umožňuje posoudit tendence změn výparu v dlouhodobém měřítku, ale poskytuje i dostatečně rozsáhlý datový soubor pro rozbor vlivu meteorologických veličin na výpar z vody. Současně s pozorovaným výparem trvá standardní způsob pozorování základních meteorologických veličin.

Obr. 1 Srovnávací výparoměr

Obr. 2 Výparoměry Class-A, GGI 3000, v pozadí srovnávací výparoměr a meteorologické přístroje

Automatické měření

Automatická měřící stanice se systémovým programovým vybavením a s přenosem na počítač od firmy Meteoservis v.o.s. Vodňany byla na stanici Hlasivo instalována koncem roku 1998.

Systém je vybaven následujícími snímači:

- snímač pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem země
- snímač pro měření teploty hladiny výparoměru
- snímač pro měření teploty půdy v hloubce 5 cm pod povrchem
- snímač pro měření teploty půdy v hloubce 10 cm pod povrchem
- snímač pro měření teploty půdy v hloubce 20 cm pod povrchem
- snímač pro měření teploty půdy v hloubce 50 cm pod povrchem
- snímač pro měření teploty půdy v hloubce 100 cm pod povrchem
- snímače pro měření rychlosti a směru větru 10 m nad povrchem země
- snímač pro měření množství srážek
- snímač pro měření globální sluneční radiace
- snímač pro měření výšky hladiny ve výparoměru

Obr. 3 Přístroj pro automatické měření výšky hladiny ve srovnávacím výparoměru

Vyhodnocování meteorologických veličin měřených na výzkumné stanici Hlasivo a jejich další využití při odvozování mnohonásobného regresního vztahu pro výpočet výparu z vodní hladiny

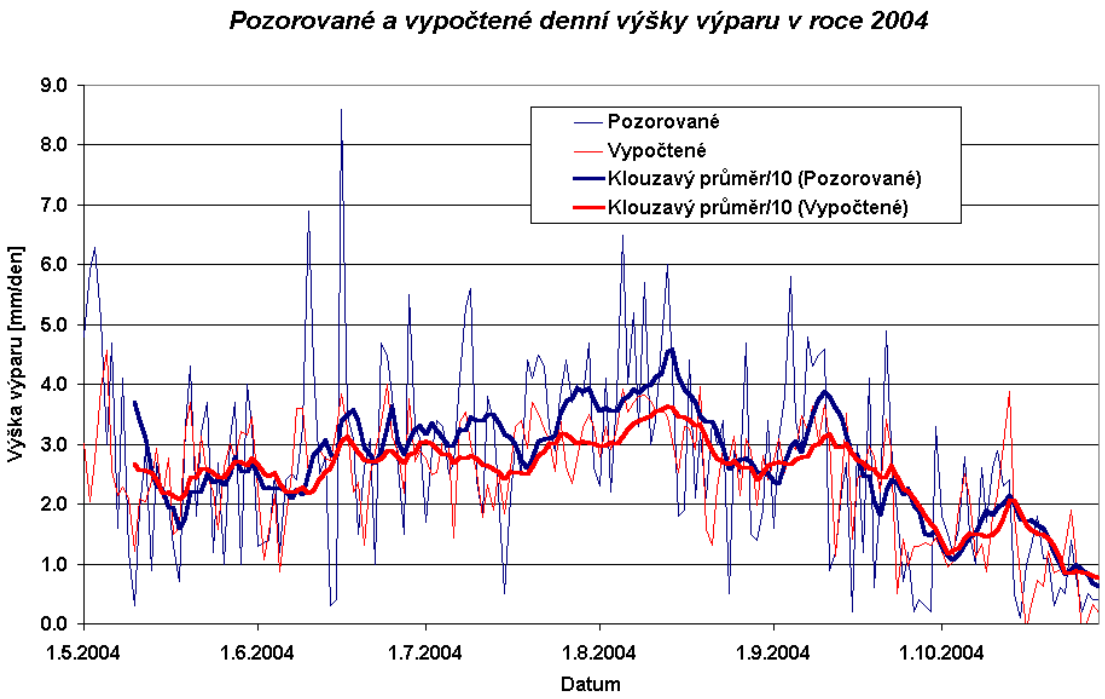
Ze stanice Hlasivo se každoročně zpracovávají a vyhodnocují tyto meteorologické veličiny: teplota vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem země, relativní vlhkost vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem země, teplota hladiny srovnávacího výparoměru, teplota půdy v hloubce 5, 10, 20, 50 a 100 cm pod povrchem, rychlost a směr větru 10 m nad povrchem země, úhrn srážek, globální sluneční radiace, změna výšky hladiny ve srovnávacím výparoměru (výpar).

Data jsou převedena ze čtvrthodinových hodnot zaznamenaných automatickou stanicí na hodnoty denní. Pro teploty a pro relativní vlhkost vzduchu jsou stanoveny průměrné denní hodnoty. Pro veličiny globální sluneční radiace a atmosférické srážky jsou stanoveny denní hodnoty jako sumy naměřených čtvrthodinových hodnot. Denní hodnota výparu je stanovena jako rozdíl počátečního stavu výšky hladiny vody ve výparoměru H_1 s připočtením výšky srážek za den S a konečného stavu výšky hladiny vody H_2 ($E = H_1 + S - H_2$).

Takto připravené soubory se stanovenými denními hodnotami měřených meteorologických veličin jsou dále zpracovány při odvozování mnohonásobných regresních vztahů pro výpočet výparu z vodní hladiny. V roce 2004 byla pro odvození vztahů využita data z období let 2001-2004 a pro výpočet koeficientů do rovnice se zvolenými nezávislými proměnnými byla použita nelineární regrese. Jako nezávislé proměnné hledaného vztahu byly v různém zastoupení a v různé kombinaci podle zvolené závislosti (lineární, mocninná, exponenciální a logaritmická) použity tyto meteorologické veličiny: teplota vzduchu (2 m nad povrchem země), teplota vody - na hladině srovnávacího výparoměru, relativní vlhkost vzduchu, globální sluneční radiace a rychlost větru. Při hledání vhodného vztahu byly nejprve do rovnice zahrnuty vždy pouze dvě nezávislé proměnné, postupně byla rovnice dále doplňována o další proměnné. Tímto postupem se ukázalo, že korelace vztahu s naměřenými daty se zvyšuje při kaž-

dém přidání další nezávislé proměnné a je nejtěsnější při zastoupení všech výše jmenovaných meteorologických veličin. Přesto se koeficienty determinace u všech nejlépe korelujících vztahů pohybují okolo hodnoty 0,5. Nicméně jak ukazuje obrázek č. 4, odchylky pozorovaných a vypočtených denních výšek výparu z vodní hladiny se podstatně redukují již při vyrovnání klouzavými průměry o velikosti intervalu 10 dní.

Vezme-li se v úvahu, že při řešení praktických úloh je potřeba téměř vždy stanovit velikost výparu za období jednoho měsíce nebo ještě za delší období, jeví se tímto postupem získané vztahy jako dostatečné pro další využití v praxi. Odvozování vztahu pro výpočet výparu z vodní hladiny bude ovšem i nadále předmětem dalšího výzkumu.



Obr. 4 Porovnání pozorovaného a podle odvozeného regresního vztahu vypočteného výparu (podle teploty vody na hladině výparoměru, vlhkosti vzduchu, sl. radiace a rychlosti větru)

Závěr

Vztahy pro výpočet výšky výparu jsou využity např. při stanovení celkové hydrologické bilance jezer vznikajících umělým zaplavováním zbytkových jam v rámci rekultivace oblasti severních Čech. Kromě již vznikajícího jezera Chabařovice zde budou v blízké době zaplavovány také další zbytkové jámy (např. jáma Most).

Sledování změn velikosti výparu z vodní hladiny bude také nabývat na významu v souvislosti s globálními klimatickými změnami na Zemi.

MĚŘENÍ TRANSPIRACE PROSTŘEDNICTVÍM TRANSPIRAČNÍHO PROUDU A ZJIŠŤOVÁNÍ OPERAČNÍCH STRUKTUR DŘEVIN VÝZNAMNÝCH PRO JEJICH HOSPODAŘENÍ S VODOU

Jan Čermák, Naděžda Naděždina

Ústav ekologie lesa, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 3, 61300 Brno, cermak@mendelu.cz

Úvod

Na semináři zaměřeným na problematiku evaporace a evapotranspirace jistě není třeba připomínat význam těchto fenoménů. Jejich znalost je významná nejen pro klimatologii či hydrologii, ale také jako objektivní informace použitelná při hodnocení funkčního stavu lesních dřevin a jejich porostů i pro lesnictví a ekologii stejně jako pro ochranu krajiny. Přírodní abiotické faktory (např. voda, teplota) a k nim se družící anthropogenní faktory (např. imise) modifikují stressovou odolnost k sekundárnímu poškození biotickými škodlivými činiteli (např. houbami a hmyzem) a tím působí jako významné predispoziční faktory. Ty často přímo a opakovaně podmiňují vznik rozsáhlých kalamit, které se pak mohou zdánlivě nečekaně odrazit ve změnách hydrologie krajiny. Voda slouží u živých organizmů jako medium všech fyziologických procesů, ale u rostlin především k termoregulaci asimilačního aparátu, který může optimálně pracovat jen v poměrně úzkém rozmezí teplot. Strom mýtního věku spotřebuje ke svému růstu kilogramy minerálních látek, tuny uhlíku, ale tisíce tun vody. Největší podíl biomasy lesních porostů tvoří dřevo, tedy vodo-vodivý systém stromů. Voda patří k nejčastějším přírodním limitujícím faktorům růstu, avšak kvantitativní údaje o dynamice spotřeby vody, využití jejich zdrojů, stresovém působení nedostatku nebo nadbytku vody a hospodaření s vodou z hlediska růstu u různých druhů dřevin jsou dosud k dispozici jen v omezeném množství. Proto problematika evaporace a evapotranspirace z biologickéo hlediska ať již v souvislosti s globálním oteplením nebo z obecnějších důvodů jistě zasluhují větší pozornost.

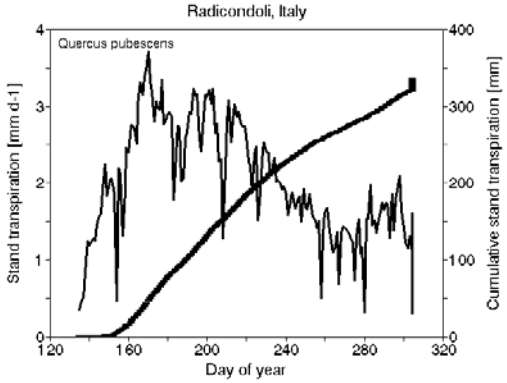
Instrumentální studie toků vody a struktur v lesních porostech

S rozvojem moderní přístrojové techniky v současné době se ukazuje významná možnost doplnit existující údaje o stavu lesních porostů a možnosti jejich ovlivnění na větších souborech vybraných pokusných lokalit pomocí citlivých kvantitativních měření fyziologických procesů. Na Ústavu ekologie lesa Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně a spolupracujících pracovištích bylo vyvinuto (a patentováno) několik nových měřících metod. Ve spolupráci s dalšími fyzikálními institucemi (např. Geofyzika Brno, Vysoké Učení Technické v Praze aj.) byly pak aplikovány další novodobé postupy při studiu celých stromů. Jde např. o dva z celkem pěti ve světě používaných a komerčně dostupných systémů pro měření toku vody (transpiračního proudu). Ty jsou založené na měření tepelné bilance kmene (Čermák a Deml 1972/74, Čermák et al. 1973, 1982, Kučera et al.1976, Kučera 1977, Čermák a Kučera 1981, Deml et al. 1993) nebo měření deformace tepelného pole (Naděždina et al. 1998, 2000, Naděždina a Čermák 1998). Posledně jmenovaná metoda dík multibodovým čidlům umožňuje zpřesnění výsledků a zejména otevírá možnosti směrového hodnocení toků při studiu architektury dřevin (Čermák a Nadeždina 2000, Nadeždina et al. 2000). Přehledy různých autorů uvádějí i některé další metody (Campbell 1991, Cohen a Standhill 1994, Swanson 1994, Smith a Allen 1996, Kostner et al. 1998).

Transpirační proud je měřen automaticky u souborů stromových vzorníků jak krátkodobě, tak i po dlouhá období (např. vegetační sezónu po dobu několika let) nezávisle na počasí a v jakýchkoli terénních podmínkách, nevyžaduje žádné pomocné stavby (jako věže, skleníky apod.) a umožňuje současné zachycení většího počtu pokusných ploch, tedy aplikaci i v rámci např. povodí, větších lesních majetků ap. Nejnovější verze citovaných metod umožňují stanovení i velmi nízkých resaturačních toků

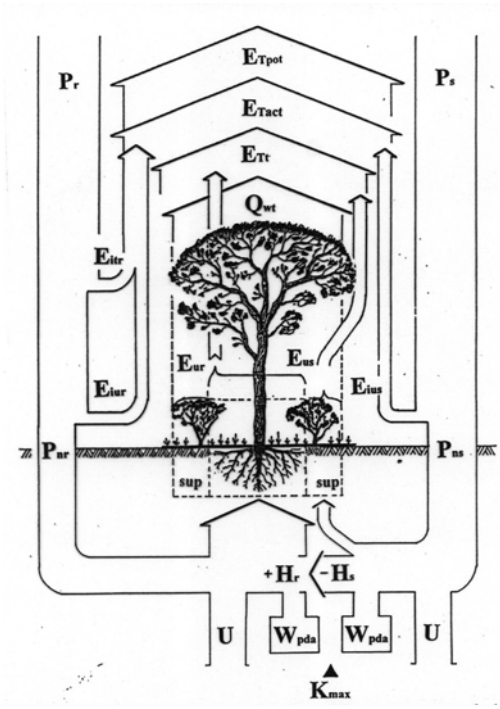
(indikátorů stresu) a určení vektorů toku (tj. určení podzemních zdrojů a míst spotřeby vody v koruně), což je pod hranicí citlivosti, resp. mimo dosah jiných metod. Ve spolupráci se zainteresovanými zahraničními institucemi se proto Mendelova univerzita účastní širšího zavádění takovýchto "celostromových" metod v rámci Evropy a USA (Tab.1).

Našimi i zahraničními výzkumnými kolektivy bylo nezávisle potvrzeno, že zmíněné metody měření toku jsou kvantitativní a to jak na úrovni jednotlivých stromů (Penka et al.1979, Schulze et



al.1985, Lundblat et al. 2001), tak lesních porostů (Meiresonne et al.1999, Gurtz a Zappa 2000, Oltchev 2000). Příklad naměřeného sezónního průběhu transpirace lesního porostu ukazuje obr.1. Aplikace těchto metod byla rozšířena i na menší objekty než stromy, tedy na výhony, semenáčky apod. Je tedy možno podobným způsobem sledovat i nízké rostlinné porosty (Rychnovská et al. 1980, Lindroth et al. 1995). Od počátku studií před téměř třiceti lety se tyto metody osvědčily pro stanovení základních parametrů transpiračního proudu u lesních i ovocných druhů dřevin (Čermák et al. 1973, 1976, 1982, 1984, 1986, 1992, 1994, Kučera a Čermák 1989, Penka et al. 1976, 1983, Martin et al. 1995, Bauerle et al. 1999, Cienciala et al. 2000), shrnutých v několika souborných přehledech (Čermák 1986, 1994a, 1994b, 1996, Čermák a Kučera 1989, 1994, Pallardy et al. 1995). Zvláštní práce byly věnovány způsobům přepočtu dat transpirace ze stromových vzorníků na lesní porosty (Čermák et al. 1982, 1996, Čermák a Michálek 1991, Čermák a Kučera 1990, Čermák et al. 2004), při kterých bylo za účelem přepočtu ze stromů a pokusných ploch na větší měřítko použito lesních taxačních dat (Čermák a Kučera 1987), kombinace s metodami dálkového průzkumu (Balek et al. 1986, Čermák a Kučera 1990) nebo hydrologických modelů (Gurtz a Zappa 2000, Oltchev 2000). Řada studií se týkala stanovení denní a sezonní dynamiky transpirace lesních porostů v temperátní zoně Evropy a USA (Čermák et al. 1982, 1983, 1987, 1991, 1995, 1998, Penka et al. 1983, Heimann et al. 1991, Balek et al. 1983, 1985, 1986, Cienciala et al. 1992, 1994, 1995, Hinckley et al.1993, Martin et al. 1997, Meiresonne et al. 2000 aj.). Podobné postupy se osvědčily v mediteranních lesích (Jimenez et al. 1996, 1999) i v tropických oblastech (Cienciala et al. 2000). Výsledky posloužily jako podklad výpočtů vodní bilance lesních porostů (viz příklad schematického znázornění toků vody v kontinuu půda-strom-atmosféra v lužním lese na Břeclavsku na obr.2), posuzování chování různých druhů dřevin v porostech a regionálních hydrologických studiích, aj.

Analýza absolutních hodnot transpirace i dynamiky transpiračního proudu se osvědčila



při diagnostice zdravotního stavu stromů s rozlišením korun a kořenových systémů (Čermák a Kučera 1990a, 1990b, 1990c, 1990d, Naděžhdina a Čermák 1999). V kombinaci s pedologickými metodami byly podobné údaje použity při intaktních studiích vztahů funkce a struktury vzrostlých stromů, např. hloubky a šířky zakořenění (Čermák et al. 1980, Čermák a Kučera 1990), efektivních rozměrů a tvarů korun (Čermák et al. 1982, Čermák a Kučera 1990d) extrémním změnám toku (Čermák a Kučera 1991), specifickým

parametrům vodivého systému kmene (Čermák a Kučera 1990, Čermák et al. 1992, Naděždina a Čermák 1998a, 1998b, Naděždina et al. 2000, Morales et al. 2000, Jimenez et al. 2000). To vše jsou nezbytné parametry pro aplikaci podrobnějších hydrologických modelů. Specifickou otázkou je např. možnost optimální regulace závlah v sadech na základě měření transpiračního proudu v kmenech stromů (Nadezhdina 1998a, 1998b, 2000). U některých druhů dřevin bylo sledováno hospodaření s vodou a souvislosti transpirace s růstem (Čermák et al. 1987, Krejzar et al. 1998, Tatarinov a Čermák 1999). Některé studie byly věnovány srovnání listnatých a jehličnatých porostů a chování různých druhů a sociálních skupin stromů za podmínek kontrastního zásobování vodou (Čermák 1986, Čermák a Kučera 1991, Čermák a Naděždina 2000). Analýza transpiračního proudu a struktury stromů byla prakticky aplikována v lesnictví při hodnocení stability a vitality porostů. Tak např. byly vysvětleny důvody náhlého odumírání vyspělých buků v proředěných porostech (Matyssek et al. 1991, Čermák et al. 1993a, 1993b), středně starých smrků ve smíšených porostech (Čermák et al. 1984, 1985) a vzrostlých dubů v lužních lesích po melioračních úpravách krajiny (Čermák a Prax 2001, Čermák et al.1991). Zhodnocení efektivity listoví je jedním ze zakladních předpokladů optimalizace struktury porostů (Čermák 1998) s tím, ze ještě dokonalejší informace poskytují studie zahrnující kořenové systemy (Čermák a Naděždina 2000). Z tohoto hlediska se ukázalo významným i posouzení kompetice plevelných podrostních listnatých druhů a lesnicky významných druhu porostu (Nadezhdina et al. 2000). Analýza transpiračního proudu, růstu a struktury byla podobně použita i při posuzování stability systému strom-budovy ve městech (Čermák et al. 1980, 1981, 1986, Prax a Čermák 2003).

V rámci komplexních studií lesních dřevin byla studována i jejich struktura, jmenovitě distribuce listoví (Čermák et al. 1989, 1998a, 1998b, Morales et al. 1996a 1996b, Nadezhdina et al. 1997, Tatarinov et al. 1997). Index listové plochy a nověji také distribuci listoví v korunách porostů umožňují různé optické techniky (např. Licor či nová konstrukce ČSAV) včetně objektivu "rybí oko". Některé z nich jsou schopné stanovit distribuci i u jednotlivých stromů, kterou bývalo možné studovat jen geometricky. Příklad stanovení distribuce jehličí ve smrkovém porostu je uveden na obr. 3. Mezi nově použité fyzikální metody pro studium kořenových systémů přímo aplikovatelné na úrovni stromů a porostů a to bez nutnosti obtížné extrapolace z jednotlivých málo rozměrných orgánů na celé stromy, patří např. podzemní, resp. geofyzikální radar (Hruška et al. 1999, Čermák et al. 1997, 2000, Šustek et al. 1999a, 1999b). Studie kořenových systémů umožňují i další metody, např. téměř bezeškodná exkavační technika supersonického proudu vzduchu – obr. 4 kde je uveden příklad aplikace u smrkového porostu (Čermák et al. 1998b, Stokes et al. 2001, Naděždina a Čermák 2003). Kvantifikaci absorpčních povrchů kořenových systémů celých stromů umožňuje modifikovaná metoda měření elektrické impedance půdy a stromů (Staněk 1997, Aubrecht et al. 2003). Distribuci absorpčních kořenů v půdě lze nepřímo odvodit prostřednictvím zjištění radiálního profilu transpiračního proudu v bělové části dřeva kmene spojující různé části stromu (Nadezhdina a Čermák 2000). Kombinace takovýchto údajů s celkovými hodnotami transpiračního proudu umožňuje posouzení efektivity vodivého systému různých druhů dřevin (Čermák et al. 1989, 2000, Krejzar a Kravka 1998), energeticky podmíněné růstové limity stromů (Čermák et al. 1998) a zjištění řady dalších ekologicky i hydrologicky významných parametrů lesních dřevin, které jsou obtížně získatelné jinými metodami.

Z á v ě r

V současné době je na Ústavu ekologie lesa Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně používán komplex moderních měřících a vyhodnocovacích systémů schopných zjišťovat parametry vodního provozu, architektury a růstu na úrovni celých stromů a lesních porostů. Komplex byl ověřován doma i v zahraničí přibližně na padesáti lokalitách a dlouhodobě se osvědčuje ve velmi rozdílných prostředích. Transpirace a další charakteristiky stromů jsou získávané v jakýchkoli terénních podmínkách a jsou na základě mnohaletých zkušeností podle potřeby interpretovány jak z klimatologického či hydrologického, tak z ekologického či lesnického hlediska. Je tak stanovována dynamika spotřeby vody lesními porosty, plantážemi nebo ovocnými sady jako jedna z rozhodujících položek vodní bilance. Jsou identifikovány faktory limitující transpiraci ať již jde o nedostatek vody v půdě nebo její nadbytek spojený s nedostatkem vzduchu, zdravotní stav porostů apod. Na evapotranspiraci rostlinných porostů mají význam nejen terénní a půdní parametry lokality a nadzemní charakteristiky vodivého systému stromů ale také méně dostupné parametry podzemní. Je tedy třeba dobře je znát, chybějící znalosti doplňovat dnes již dostupným přístrojovým měřením a počítat s nimi i v příslušných modelch povodí či krajiny. Výsledky jsou použitelné pro optimalizaci porostní struktury, zhodnocení vitality a funkční stability porostů, jako podklad pro návrhy opatření směřujících ke zlepšení současného stavu apod. To platí jak v místním, tak po zahrnutí většího počtu přímo sledovaných lokalit i v širším měřítku.

Literatura

Aubrecht L. Čermák J. Koller J. and Staněk Z. **2000**. “Electrical methods for sapwood measurements” (in Czech). In: Proc."Elektřina a lesní stromy", Faculty of Nat.History & Pedagog.Faculty, Ostrava Univ., Ostrava, Czech Rep. 14-21 pp., October 11, 2000.

Aubrecht L. Čermák J. Koller J. Plocek J. and Staněk Z. **2000**. “Temperature, voltage and frequency dependence of live woody tissue resistivity” (in Czech). In: Proc."Elektřina a lesní stromy", Faculty of Nat.History & Pedagog.Faculty, Ostrava Univ., Ostrava, Czech Rep. 22-28 pp., October 11, 2000.

Balek J. Čermák J. Kučera J. **1983**. A direct method for forest transpiration measurement. J.of Hydrology 66: 123-131.

Balek J. Čermák J. Kučera J. Palouš M. Prax A. **1985**. "The possibilities to estimate transpiration by remote sensing" (in Czech.). Vodohospodarský časopis 33(5): 497-505.

Balek J. Čermák J. Kučera J. Prax A. Palouš M. **1986**. Regional transpiration assessment by remote sensing. In: Proc. Cocoa Beech Workshop, "Hydrological application of space technology" Florida, August 1985. IAHS Publ. No.160: 141-148.

Bauerle WL. Hinckley TM. Čermák J. Kučera J. Bible K. **1999**. The canopy water relations of old-growth Douglas-fir trees. Trees 13: 211-217.

Čermák J. Deml M. Penka M. **1973**. A new method of sap flow rate determination in trees. Biologia Plantarum (Praha) 15(3): 171-178.

Čermák J. Deml M. **1974**. "Method of water transport measurements in woody species, especially in adult trees" (in Czech). Patent (Certification of authorship) CSFR, No.155622 (P.V.5997-1972).

Čermák J. Palát M. Penka M. **1976**. Transpiration flow rate in fully-grown tree *Prunus avium* L. by heat balance method estimated, in connection with some meteorological factors. Biologia Plantarum (Praha) 18(2): 111-118.

Čermák J. Kučera J. Penka M. **1976**. Improvement of the method of sap flow rate determination in adult trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. Biologia Plantarum (Praha) 18(2): 105-110.

Čermák J. Huzulák J. Penka M. **1980**. Water potential and sap flow rate in adult trees with moist and dry soil as used for the assessment of the root system depth. Biologia Plantarum (Praha) 22: 34-41.

Čermák J. Kučera J. **1981**. The compensation of natural temperature gradient in the measuring point during the sap flow rate determination in trees. Biologia Plantarum (Praha) 23(6): 469-471.

Čermák J. Úlehla J. Kučera J. Penka M. (**1982**. Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robur* L.) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. Biologia Plantarum (Praha) 24(6): 446-460.

Čermák J. Kučera J. Simon J. Dušek V. **1983**. The electric conductance of seedlings stems and the water content of spruce and pine on course of desiccation. Biologia Plantarum (Praha) 25(6): 468-471.

Čermák J. Jeník J. Kučera J. Židek V. **1984**. Xylem water flow in a crack willow tree (*Salix fragilis* L.) in relation to diurnal changes of environment. Oecologia (Berlin) 64: 145-151.

Čermák J. Prax A. Kučera J. **1986**. "Ecological conditions of permanent coexistence of fully grown trees and constructions in housing developments" (in Czech). In: Proc."Zakladani (staveb) na objemově nestálých zeminách se zohledněním vlivu vegetace" (p.31-78), Dům techniky ČSVTS Brno.

Čermák J. Kučera J. Prax A. Balek J. **1986**. "Transpiration and water regime of the pine stand in the sand-rock region of poor pine forests" (in Czech). In: Proc.Symp.VSZ v Brně "Funkce lesů v životním prostředi" (p.67-73), Brno.

Čermák J. **1986**. Short- and long-term response of transpiration flow rate in full-grown trees to water stress. In: Proc. l8th IUFRO World Congress, Whole-Plant Physiology Working Party (S 2.01-15) 7-21.Sept 1986, Ljubljana, Yugoslavia, Yugoslav IUFRO World Congress Organiz. Committee (ed.), Plesko Ljubljana pp.187-193.

Čermák J. Kučera J. Štěpánková M. **1987**. "Water consumption of fully grown oak in floodplain forest during transient period after cessation of floods" (in Czech). Acta Univ.Agric. (Brno), Ser.C, 56(1-4): 5-25.

Čermák J.and Kučera J. **1987**. Transpiration of fully grown trees and stands of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) estimated by the tree-trunk heat balance method. In: Proc.Forest Hydrology and Watershed Measurements, Vancouver,Canada Aug.1987, Swanson RH. Bernier PY. and Wood ward PD. (eds.). Publ.No.167, IAHS-AISH, Wallingford, UK, 311-317pp.

Čermák J. **1989**. "A practical functional parameter of assimilating organs of trees and forest stands - solar equivalent leaf area" (in Czech). Lesnictvi-Forestry 35(8): 695-707.

Čermák J. **1989**. Solar equivalent leaf area as the efficient biometric parameter of individual leaves, trees and stands. Tree Physiology 5: 269-289.

Čermák J. Kučera J. **1990**. Water uptake in healthy and ill trees under drought and hypoxia and non-invasive assessment of the effective size of root systems. (p. 185-195) In: Proc. COST 612 Workshop "Above and belowground interactions in forest trees in acidified soils" Persson H. (ed.), Simlangsdalen, May 21-23.1990, Sweden.

Čermák J. Kučera J. **1990**. Scaling up transpiration data between trees, stands and watersheds. Silva Carelica 15:101-20.

Čermák J. Kučera J. **1990**. Changes in transpiration of healthy mature trees due to environmental conditions and of those with damaged water conductive system. In: Proc. Cs.MAB Natl.Comm./IUFRO Internat. Workshop "Verification of hypotheses and possibilities of recovery of forest ecosystems", Klimo E. Materna J. (eds.), p.275-286, Beskydy Mt., Czechoslovakia, Sep.4-8, 1989. Agr.Univ.Brno.

Čermák J. Kučera J. **1991**. Extremely fast changes of xylem water flow rate in mature trees, caused by atmospheric, soil and mechanical factors. 181-190pp. In: Proc.CEC Int.Workshop "Methodologies to assess the impacts of climatic changes on vegetation: Analysis of water transport in plants and cavitation of xylem transport in plants and cavitation of xylem conduits". Raschi A.Borghetti M.(eds.),May 29-31.1991.Firenze, Italy.

Čermák J. **1991**. "Transpiration of trees and its significance in forest ecology" (in Czech). Habilitation Thesis, Agr.Univ.Brno 95p.

Čermák J. Michálek J. **1991**. "Selection of sample trees in forest stands using the "quantils of total" (in Czech). Lesnictvi (Forestry) 37(1): 49-60.

Čermák J. Kučera J. Štěpánková M. **1991**. Water consumption of full-grown oak (*Quercus robur* L.) in a floodplain forest after the cessation of flooding. In: "Floodplain forest ecosystem II", Penka M. Vyskot M. Klimo E. Vašíček F. (eds.), p.397-417, Elsevier (Developments in Agricult.& Managed Forest Ecology 15B), Amsterdam-Oxford-N.York-Tokyo.

Čermák J. Cienciala E. Kučera J. Lindroth A. Hallgren J-E. **1992**. Radial velocity profiles of water flow in stems of spruce and oak and response of spruce tree to severing. Tree Physiology 10: 367-380.

Čermák J. Kučera J. Janíček R. **1992**. The "Roof" project in Rajec. In: Proc. Experimental manipulations of Ecosystems: Symposium in Copenhagen, May 18-20,1992. (7 p.).

Čermák J. Matyssek R. Kučera J. **1993**. Rapid response of large, drought stressed beech trees to irrigation. Tree Physiology, 12: 281-290.

Čermák J. Matyssek R. Kučera J. **1993**. "The causes of beech decline on heavy soils after sudden reduction of stand density" (in Czech). Lesnictví-Forestry 39(5): 175-183.

Čermák J. Cienciala E. Kučera J. Lindroth A. Bednářová E. **1995**. Individual variation of sap flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: A pilot study at the central NOPEX site. J.of Hydrol.168:17-27.

Čermák J. **1998**. Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forests in southern Moravia. Tree Physiol. 18:727-737.

Čermák J. and Nadezhdina N. **1998**. Sapwood as the scaling parameter - defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? Ann.Sci.For.55: 509-521.

Čermák J. Riguzzi F. and Ceulemns R. **1998**. Scaling up from the individual trees to the stand level in Scots pine: 1. Needle distribution, overall crown and root geometry. Ann.Sci.For.55: 63-88.

Čermák J. and Nadezhdina N. **1998**. Brief review of present techniques used for sap flow measurements in intact plants. Proc. 4th. International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Židlochovice, Czech Republic, Oct.3-5,1998. 4-11 pp. IUFRO Publications. Publishing house of Mendel Univ.Brno.

Čermák J. Nadezhdina N. Raschi A. Tognetti R. **1998**. Sap flow in Quercus pubescens and Q.cerris stands in Italy. Proc. 4th. International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Židlochovice, Czech Republic, Oct.3-5, 1998. 134-141 pp. IUFRO Publications. Publishing house of Mendel Univ.Brno.

Čermák J. and Nadezhdina N. **1998**. Radial profile of sap flow and scaling from the measuring point to the whole tree level. Proc. 4th. International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Židlochovice, Czech Republic, Oct.3-5, 1998. Abstr.142 p. IUFRO Publications. Publishing house of Mendel Univ.Brno.

Čermák J. **1999**. Vertical distribution of foliage in Moravian floodplain forests. Ekologia (Bratisl.),Sup.1999,Vol.18:15-24.

Čermák J. Hruška J. Martinková M. Prax A. **2000**. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. Plant and Soil 219(1-2): 103-115.

Čermák J. and Nadezhdina N. **2000**. Some new methods for studies of root structure and physiology in large trees (in Czech). In: Proc."Elektřina a lesní stromy", Faculty of Nat.History & Pedagog.Faculty, Ostrava Univ., Ostrava, Czech Rep. 5-13 pp., October 11, 2000.

Čermák J. and Nadezhdina N. **2000**. Water relations in mixed versus pure stand. In: Proc. of the International Conference, H.Hasenauer (ed.): Forest Ecosystem Restoration (Ecological and Economical Impacts of Restoration Processes in Secondary Conferous Forests), pp.70-76, Vienna, Austria, 10-12. April, 2000.

Čermák J. and Prax A. **2001**. Water balance of the floodplain forests in southern Moravia considering rooted and root-free compartments under contrasting water supply and its ecological consequences. Ann.Sci.For. 58: 1-12.

Čermák,J. Kučera,J. Prax A. Bednářová E. Tatarinov F. Nadyezhdin V. **2001**: Long-term course of transpiration in a floodplain forest in southern Moravia associated with changes of underground water table. Ekologia (Bratisl.) Vol.20, Suppl.1: 92-115. (195)

Čermák J. Jimenez MS. Gonzales-Rodriguez AM. Morales D. **2002**: Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: Efficiency of water conducting system in *Laurus azorica* trees. Trees 16: 538-546.

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

Chiesi M. Maselli F. Bindi M. Fibbi L. Bonora L. Raschi A. Čermák J. Nadezhdina N. **2001**: Calibration and application of forest-BCG in a Mediterraen area by the use of conventional and remote sensing data. Ecological Modeling 154:251-262.

Cienciala E. Lindroth A. Čermák J. Hallgren J-E. Kučera J. **1992**. Assessment of transpiration estimates for *Picea abies* trees during a growing season. Trees 6: 121-127.

Cienciala E. Lindroth A. Čermák J. Hallgren J-E. and Kučera J. **1994**. The effect of water availability on transpiration, water potential and growth of *Picea abies* during a growing season. J.of Hydrology 155: 57-71.

Cienciala E. Kučera J. Lindroth A. Čermák J. Grelle A. Halldin S. **1997**. Canopy transpiration from a boreal forest in Sweden during a dry year. Agricultural and Forest Meteorology 86: 157-167.

Cienciala,E., Kučera,J., Malmer,A. **2000**: Tree sap flow and stand transpiration of two Acacia mangium plantations in Sabah, Borneo. J.of Hydrology 236:109-120.

Edwards WRN. Becker P. and Čermák J. **1996**. A unified nomenclature for sap flow measurements. Tree Physiol.17: 65-67. (136)

Gartner,K., Leitgeb,E., Nadezhdina,N., English,M. and Čermák,J. **2003**: Soil moisture and diurnal variation of sap flow in birch and Norway spruce. Effects of the summer drought 2003. In: Conference on water and society. Needs, Challenges and Restrictions, BOKU Vienna,

Nov.19-21,2003. p.59
Gurtz,A. a Zappa,B. **2000**: Partner final report. In: The response of water flows of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land use changes. Research report IC15-CT98-0120, Oct.2000.Hinckley,T.M., Brooks,J.R.,
Heimann J. Čermák J. Kučera J. Gruber F. **1991**. "Measurements of the sap flow rate in spruce in Langen Bramke, Harz (in German). (p.196-200). In: Berichte des Forschungszentrums Waldekosysteme, Reihe B, Bd.22. Beitrage zur Tagung der Okosystem Forschungszentren in Gottingen vom 24.-26.10.1990.
Hinckley TM. Brooks JR. Čermák J. Ceulemans R. Kučera J. Meinzer FC. and Roberts DA. **1993**. Water flux in a hybrid poplar stand. Tree Physiology 14: 1005-1018.
Hruška J. Čermák J. Šustek S. **1999**. Mapping of tree root systems by means of the ground penetrating radar. Tree Physiology 19: 125-130.
Huzulák,J., Štěpánková,M. **1984**: Water potential and saturation deficit of one-year shoots of Norway spruce. In: Vašíček,F. (ed.): "Ecophysiological and ecomorphological studies of individual trees in the spruce ecosystems of the Drahanska vrchovina uplands (Czechoslovakia)".p.64-70. Folia Univ.Agric.Fac.Silv.A,Brno.
Jimenez,M.S., Nadezhdina,N., Čermák,J., Morales,D. (**2000**): Radial variation in sap flow rate in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. Tree physiology 20(17): 1149-1156.
Janssens IA. Sampson DA. Čermák J. Meiresonne L. Riguzzi F. Overloop S. Ceulemans R. **1999**. Above- and belowground phytomass and carbon storage in a Belgian Scots pine stand. Ann.For.Sci. 56:81-90.
Jimenez MS. Morales D. Kučera J. and Čermák J. **1999**. The annual course of transpiration in a laurel forest of Tenerife. Estimation with Myrica faya. Phyton 39(4): 85-90.
Jimenez,M.S., Nadezhdina,N., Čermák,J., Morales,D. (**2000**): Radial variation in sap flow rate in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. Tree physiology 20(17): 1149-1156.
Janssens IA. Sampson DA. Čermák J. Meiresonne L. Riguzzi F. Overloop S. Ceulemans R. **1999**. Above- and belowground phytomass and carbon storage in a Belgian Scots pine stand. Ann.For.Sci. 56:81-90.
Jimenez MS. Čermák J. Kučera J. Morales D. **1996**. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: The annual course of sap flow in Laurus trees and stand. J.of Hydrology 183(3-4): 305-319.
Jimenez MS. Morales D. Kučera J. and Čermák J. **1999**. The annual course of transpiration in a laurel forest of Tenerife. Estimation with Myrica faya. Phyton 39(4): 85-90.
Jimenez,M.S., Nadezhdina,N., Čermák,J., Morales,D. (**2000**): Radial variation in sap flow rate in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. Tree physiology 20(17): 1149-1156.
Kostner,B., Falge,E., Alsheimer,M., Geyer,R. & Tenhunen,J.D. **1998**: Estimating tree canopy water use via xylem sapflow in an old Norway spruce forest and a comparison with simulation-based canopy transpiration estimates. Ann.Sci.For. 55:125-139.
Kostner B. Granier A. Čermák J. **1998**. Sap flow measurements in forest stands-methods and uncertainties. Ann. Sci. For. 55:13-27.
Kravka M. Krejzar T. and Čermák J. **1999**. Water content in stem wood of large pine and spruce trees in natural forests in central Sweden. Agricultural and Forest Meteorology 98-99: 555-562.
Krejzar.T. and Kravka,M. **1998**: Sap flow and vessel distribution in annual rings and petiols of large oaks. Lesnictvi-Forestry 44(5):193-201.
Kučera J. **1977**. "A system for water flux measurements in plants" (in Czech). Patent (Cert.of authorship) CSFR No.185039 (P.V. 2651-1976).
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.
Leitgeb,E., Gartner,K., Nadezdina,N., English,M., Čermák,J. **2002**: Ecological effects of pioneer species on soil moisture regimee in an early successional stage, following wind-throw in a spruce stand. Proceedings of the IUFRO Conference on Restoration of Boreal and Temperate Forests. Vejle, Denmark, May 2002. Gardiner,E.S., Breland,L.J. [Comp.] Reports / Skov & Landskab, (11): 193-194.

Lindroth A. Čermák J. Kučera J. Cienciala E. Eckersten H. **1995**. Sap flow by heat balance method applied to small size *Salix*-trees in a short-rotation forest. Biomass and Bioenergy, Elsevier Sci.,Ltd. Vol.8,No.1:7-15.
Martin TA. Brown K. Čermák J. Ceulemans R. Kučera J. Meinzer R. Rombolt J. Sprugel D. and Hinckley TM. **1997**. Crown conductance and tree and stand transpiration in a second-growth *Abies amabilis* forest. Can.J.For.Res. 27(6): 797-808.
Meiresonne L. Nadezhdina N. Čermák J. Van Slycken J. Ceulemans R. **1999**. Transpiration of a monoclonal poplar stand in Flanders (Belgium). Agricultural and Forest Meteorology 96: 165-179.
Meiresonne L, D.A. Sampson, A.S. Kowalski, I.A. Janssens, N. Nadezhdina, J. Čermák, J. Van Slycken and R. Ceulemans. **2003**. Water flux estimates from a Belgian scots pine stand: a comparison of different approaches. J.of Hydrology, 270(3-4): 230-252.

Morales D. Gonzalez-Rodriguez AM. Čermák J. & Jimenez MS. **1996**. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: The vertical profiles of leaf characteristics. Phyton (Horn, Austria) 36(2):1-13.
Morales D. Jimenez MS. Gonzalez-Rodriguez AM. and Čermák J. **1996**. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: I.The site stand structure and leaf distribution. Trees 11: 34-40.
Morales D. Jimenez MS. Gonzalez-Rodriguez AM. and Čermák J. (**1996**. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: II. Leaf distribution patterns in individual trees. Trees 11: 41-46.
Morales D. Jimenez MS. Gonzalez-Rodriguez AM. Čermák J. **2002**: Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: Vessel distribution in stems and in petioles of *Laurus azorica* trees. Trees 16: 529-537.
Nadezhdina N. Čermák J. **1997**. Automatic control unit for irrigation systems based on sensing the plant water status. An.Inst.Sup.Agronom., 46: 149-157.
Nadezhdina N. Čermák J. Nadezhdin V. **1998**. Heat field deformation method for sap flow measurements. Proc. 4th. International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Židlochovice, Czech Republic, Oct.3-5, 1998. 72-92 pp. IUFRO Publ. Publ. house of Mendel Univ.Brno.
Nadezhdina N. Čermák J. **1998**. Response of sap flow rate along tree stem and coarse root radii to changes of water supply. (p.81) In: Proc.Internat.Symp. "The supporting roots - structure and function" (A.Stokes, ed.), Bordeaux, France, 20-24 July 1998.
Nadezhdina N. and Čermák J. **1998**. "The technique and instrumentation for estimation the sap flow rate in plants". Patent No.286438 (PV-1587-98).
Nadezhdina N. **1999**. Sap flow index as an indicator of plant water status. Tree Physiology 19: 885-891.
Nadezhdina N. and Čermák J. **1999**. Responses of sap flow rate along tree stem and coarse root radii to changes of water supply. Plant and Soil 12:1-12. (In: Proc. The Supporting Roots of Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology, A.Stokes, ed., pp.227-238, Klouwen

Acad.Publ., Dordrecht-Boston-London, 430 p.).
Nadezhdina N. **1999**. Woody plant behavior and stress assessment based on sap flow measurement. Application in forestry and horticulture. Assoc.Prof.Thesis at the Mendel University of Agric.and Forestry in Brno, Czech Rep., 118p.
Nadezhdina N. Jimenez MS. Čermák J. Morales D. **2000**. Changes in sap flow rate along radius in laurel forest trees of different social positions in Tenerife, Canary Islands. Ann.Sci.For. (submitted).
Nadezhdina N. and Čermák J. **2000**. Changes in sap flow rate in tree trunks and roots after mechanical damage. pp.167-175. In: Proc.Int.Conf., Spruce Monocultures in Central Europe - Problems and Prospects. (Klimo,E., Hager,H. and Kulhavý,J. (eds.). 22-25 June, 1998. EFI Proceedings No.33: 167-175, 2000.
Nadezhdina N. Čermák J. Tributsch H. **2000**. Heat field around the linear heater used for sap flow measurement by the HFD-method as observed by the infra-red camera. 155-161pp. In: 5th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Tognetti,R. and Raschi A. (eds.), Firenze, Italy, 9-10 Nov.2000. Fondazione per la Meteorologie Applicata, 2003.
Nadezhdina N. Čermák J. Ceulemans R. **2002**: Radial pattern of sap flow in woody stems related to positioning of sensors and scaling errors in dominant and understorey species. Tree Physiology 22:907-918.
Nadezhdina, N. and Čermák, J. **2003**: Instrumental methods for studies of structure and funcion of root systems in large trees. J.of Experimental Botany 54 (387): 1511-1521.
Nadezhdina N, Čermák J, Neruda J, Prax A, Ulrich R, Nadezhdin V, Gašpárek J, Pokorný E. **2004**: Roots under the load of heavy machinery in spruce trees. European J.For.Res. (in press)
Nadezhdina N. Tatarinov F. Ceulemans R. **2004**. Leaf area and biomass of *Rhododendron* understorey in a stand of Scots pine. Forest Ecology and Management 187: 235-246.
Nadezhdina N., J.Čermák, H. Tributsch. **2004**. Infra-red images of sap flow in stems of lime trees under natural and experimental conditions. Ann.Sci.For.61: 203-213.
Nadezdina N, Ferreira M.I, Silva R, Pacheco C.A, Meiresonne L, Minnaert M, Gartner K. **2004**: Variable function of tree root systems depicted through long-term sap flow observations in roots and different stem xylem layers. In: COST E38 Proc. Woody Root Processes under a Changing Environment, Radoglou P. (ed.), p.31, Thessaloniki-Greece, 27-20.October 2004.
Nadezhdina,N., Čermák,J., Nadyezhdin,V., Gašpárek,J., Ulrich,R., Neruda,J. **2004**: Roots under the load of heavy machinery in spruce trees. II. Responses of sap flow in stems and roots. European J.of Forest Research (submitted).
Oltchev,A. **2000**: Partner final report. In: The response of water flows of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land use changes. Research report IC15-CT98-0120, Oct.2000.
Oltchev,A., Čermák,J., Nadezhdina,N., Tatarinov,F., Tischenko,A. , Ibrom,A. and Gravenhorst,G. **2002**: Transpiration of a mixed forest stand: field measurements and simulation using SVAT models. Boreal Environ.Research, 7(4):389-397.
Oltchev,A., Čermák,J., Gurtz,J., Tischenko,A., Kiely,G., Nadezhdina,N., Zappa,M., Lebedeva,N., Vitvar,T., Albertson, J.D., Tatarinov,F., Tischenko,D., Nadezhdin,V., Kozlov,B., Ibrom,A., Vygodskaya,N., Gravenhorst,G. **2002**: The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land-use changes. Physics and Chemistry of the Earth 27: 675-690.

Pallardy SG. Čermák J. Ewers FW. Kaufmann MR. Parker WC. and Sperry JS. **1995**. Water transport dynamics in trees and stands. In: Smith PG. and Hinckley TM. (eds.): Resource Physiology of Conifers - Acquisition, Allocation and Utilization, p.301-389. Acad.Press. San Diego, N.York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto.
Penka M. Štěpánek V. Čermák J. (**1972**. A study of the water regime in oak (*Quercus robur* L.). Acta Univ.Agric. (Brno), Ser.C, 42: 121-137.
Penka M. Čermák J. Deml M. **1973**. Water transport estimates in adult trees based on measurement of heat transfer by mass flow. Acta Univ.Agric.,(Brno), Ser.C, 42: 3-23.
Penka M. Čermák J. Palát M. **1976**. Behavior of the transpiration flow rate and its variations due to weather conditions observed in full-grown tree of Prunus avium L. Acta Univ.Agric. (Brno), Ser.C, 45(3-4): 123-147.
Penka M. Čermák J. Štěpánek V. Palát M. **1979**. Diurnal courses of transpiration rate and transpiration flow rate as determined by the gravimetric and thermometric methods in a full-grown oak tree (*Quercus robur* L). Acta Univ.Agric. Brno,Ser C,48(1-4):3-30. Penka M. Čermák J. Prax A. Úlehla J. Židek V. **1983**. "Water consumption of oak (*Quercus robur* L.) in the alluvium of the Dyje river in non-limiting moisture conditions" (in Czech). Lesnictvi-Forestry 29(6): 481-496.
Phillips,N.G., Ryan,M.G., Bond,B.J., McDowell,N.G., Hinckley,T.M. and Čermák,J. **2003**. Reliance on stored water with tree size in three species in the Pacific Northwest. Tree Physiology 23: 237-245.
Pietsch S. Hasenauer H. Kučera J. and Čermák J. **2003**: Modelling the effects of hydrological changes on the carbon and nitrogen balance of oak in floodplains. Tree Physiology 23: 735-746.
Prax,P. and Čermák,J. **2003**: Urban tree root systems and tree survival near sewers and another constructions. 1-10pp. In: Proc. NATO ARW Enhancing Urban Environment: Environmental Upgrading of Municipal Pollution Control Facilities and Restoration of Urban Waters. Rome, Italy, Nov.5-8, 2003.
Rychnovská M. Čermák J. Šmíd P. **1980**. Water output in a stand of *Phragmites communis* Trin. A comparison of three methods. Acta Scientia Naturalis (Brno) 14(2): 1-27.
Schulze E-D. Čermák J. Matyssek R. Penka M. Zimermann R. Vašíček F. Gries W. Kučera J. **1985**. Canopy transpiration and flow rate fluxes in the xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees-a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. Oecologia(Berlin)66:475-483
Smith,D.M., Allen,S.J. **1996**: Measurement of sap flow in plant stems. J.Exp.Bot. 47(305): 1833-1844.
Stokes A. Fourcaud T. Hruška J. Čermák J. Nadyezhdina N. Nadyezhdin V. Praus L. **2002**: An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees *in situ*. I. Ground penetrating radar. Journal of Arboriculture 28-1:1-9.
Šustek S. Druckmuller F. **1999**. "Application of image analysis for selection of planting material in forestry" (in Czech). Lesnictví-Forestry 45(1): 48-50.
Šustek S. Hruška J. Druckmuller M. Michalek T. **1999**. "Root surfaces in the large oak tree estimated by image analysis of the map obtained by the ground penetrating radar" (in Czech). Lesnictvi-Forestry 45(3): 139-143.
Swanson,R.H. **1994**: Significant historical development in thermal methods for measuring sap flow in trees. Agricultural and Forest Meteorology, 72:113-132.
Tatarinov F. Čermák J. **1999**. Daily and seasonal variation of stem radius in oak. Ann.Sci.For. 56: 579-590.
Tatarinov F. Čermák J. Kučera.J. Prax,A. **2000**. Transpiration of spruce in a mature plantation in Drahanska Vrchovina uplands, Moravia. I. Variation between individual trees. Ekologia (Bratislava), Vol.19, Suppl. 1: 48-62.

Tab. 1

Studie vodního provozu a architektury stromů a lesních porostů prováděné Ústavem ekologie lesa Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně v České republice a v zahraničí (významnější lokality).

Lokality		Druhy	Roky
Česko	- Soběšice	Quercus petraea, Betula alba	1973-1977
	-"-	Pseudotsuga, Quercus, Pinus sylv., Tilia cor., Acer pseud.	2000-2004
	- Lednice	Quercus robur, Fraxinus excelsior, Tilia cordata	1972-1998
	- Lanžhot	Quercus robur, Fraxinus excelsior	1998-2000
	- Rajec	Picea abies	1978-1999
	- Liběchovka	Pinus sylvestris, Betula alba	1979-1980
	- Hodonín	Quercus robur	1980-1981
	- Hartvíkov	Picea abies	1977
	- Želízy	Pinus sylvestris	1978
	- ŠLP Křtiny	Picea abies, Fagus sylvatica	2001-2004
	- Trnávka	Picea abies	1978
	- Nedamov	Picea abies, Quercus robur	1981-1985
	- Světlá n/S.	Picea abies	1985-1986
	- Křivoklátsko	Quercus petraea, Picea abies	1988-1990
	- Litovelsko	Quercus robur, Tilia cordata	1998-1999
Německo	- Bayerwald:	Larix europaea, Picea abies	1983
	- Hartz:	Picea abies	1988-1992
	- Gottingen:	Quercus petraea, Fagus sylvatica	2000
	- Harz-	Picea abies	1988
	- Harz-	Picea abies, Fagus sylvatica	2003
	- Ulm	Picea abies, Fagus sylvatica	2004
Švédsko	- Skogaby:	Picea abies	1992
	- Uppsala:	Salix alba	1993
	- Uppsala:	Picea abies, Pinus sylvestris	1994-1998
	- Simlangsdalen	Picea abies, Fagus sylvatica, Quercus petraea	2002
Holandsko	- Kotveik:	Pseudotsuga taxifolia	1992
Španělsko	- Tenerife-Garcia	Laurus azorica, Persea indica, Myrica faya,	1992-1998
	-"-	Ilex perado, Erica arborea,	
	- Tenerife-Naran	Vitis vinifera, five species of fruit trees	1999
	- Pyreneas	Quercus pubescens	2004
Švýcarsko	- Hegiwald:	Fagus sylvatica	1989
Itálie	- Radicondoli:	Quercus pubescens, Q.cerris, Pinus pinea, Cupressus,	1997-1999
	- San Vito	Picea abies	1995
	- Andria	Olea europea	2002-2003
Belgie	- Brasschaat	Pinus sylvestris, Prunus, Rhododendron,	1995-2000
	- Balegem	Populus interamericana	1997
	- Wilrijk	Populus tremula, Quercus robur	2000,2004
Rusko	- prameny Volhy:	Picea abies, Populus trem., Betula al., Alnus inc, Sorbus au.,	1999-2000
USA	- Harvard Forest:	Quercus rubra, Betula sp., Acer sp.	1991-1992
	- Cedar river WA:	Abies amabilis	1994
	- Wind river WA:	Pseudotsuga taxifolia	1996
	- Olympia WA:	Picea mariana	1999
Rakousko	- Kreisbach:	Picea abies, Fagus sylvatica	2000
	- Furstenfed.	Betula alba, Picea abies, Populus tremula	2001-2004
Portugalsko	- Atalaia	Prunus persica, Vitis vinifera	2001

OVĚŘOVÁNÍ NĚMECKÉHO SYSTÉMU AMBER V ČESKU

Martin Možný, Daniel Bareš

Summary
AMBER system verification in Czech republic
Presented paper is aimed to an objective verification of the operationally forecasted by the Amber system for the Czech republic. The paper deals with comparison Amber system of measurements in Doksany observatory. System inclusive of the actualy weather, weather forecast for 5 days, specifications for spreading, fertilizer applications, agronomical practices, irrigations, specifications about pest gradations and individual informations for farmers (hop and wine growers). Numerical soil moisture forecats are significat data to the improving the quality of forecasts.

1.Úvod

V posledních letech poskytuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) pro zájemce ze zemědělského sektoru operativní informace pouze ve formě obecně upravených meteorologických informací. Tento stav je podle [1] dlouhodobě neúnosný, a proto i ze strany zemědělců méně žádaný. Ve vyspělých zemích mají tyto systémy komplexní charakter, neboť vycházejí nejenom z meteorologických údajů, ale i ze znalostí vztahů mezi zemědělskou výrobou a počasím.

Německá povětrnostní služba (DWD) provozuje rozsáhlý agrometeorologický poradní systém s názvem AMBER. Díky pochopení centrálního agrometeorologického pracoviště DWD v Braunschweigu (AF) jsme se rozhodli ověřit tento systém v Česku. Celý proces ověřování jsme rozdělili do několika fází. Vzhledem k omezenému rozsahu tohoto příspěvku jsme se zaměřili na seznámením s celým systémem a technologií jeho vytváření a na analýzu aktuálních denních výstupů v zimním období.

2. Seznámení se systémem a technologií jeho vytváření

Informační výstupy tohoto systému, počítané z parametrů aktuálního počasí, jednak z předpovědi počasí, jsou zasílány uživatelům (faxem, e-mailem) každý den do 10. hodiny. V zimním období je distribuována stručnější verze o jedné straně, ve vegetačním období má až třicet stran textu. Do výpočtu vstupují nejenom údaje ze synoptických a fenologických stanic SRN, ale jsou využívána synoptická měření Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) ze západních a jižních Čech, neboť ČHMÚ poskytuje DWD online veškerá synoptická data.

Vlastní výpočet, zpracování a odeslání výstupů probíhá v zcela automatizovaném režimu z AF pro celé SRN během několika málo minut, pouze jeden pracovník zajišťuje případné reklamace, když se k uživateli zpráva nedostane. Výstupy jsou odesílány buď přímo, nebo prostřednictvím podřízených agrometeorologických pracovišť, umístěných v jednotlivých spolkových zemích, kteří mohou výstupy (ve formátu Microsoft Word) upravit, případně doplnit. Denní výstupy zahrnují vedle zhodnocení aktuálního stavu i jejich předpověď na 5 dnů dopředu. Jedná se detailní prognózu počasí, fytopatologických a agrotechnických podmínek, doporučení pro závlahy a hnojení apod.

Předpovědní numerický model DWD pracuje s dostatečně jemným rozlišením, navíc má implementován velmi kvalitní půdní model, jehož možnosti dále rozšiřují dílčí modely AF. Celý systém AMBER je velmi rozsáhlý, skládá se několika desítek hlavních modelů a několika set pomocných submodelů. Značnou část modelů převzalo AF ze zahraničí, před jejich začleněním do systému došlo k jejich důkladnému odzkoušení a adaptaci na německé podmínky, neboť AF disponuje velmi kvalitními mikroklimatickými měřeními, které umožňují komplexní validaci modelů. Navíc pracovník, který je pověřen konkrétní validací, se může soustředit pouze na toto řešení a není na rozdíl od běžné praxe například v ČHMÚ pověřován dalšími úkoly. Jeden z modelů s názvem AMBAV [2] zajišťuje výpočet potenciální a reálné evapotranspirace pro 14 zemědělských kultur, včetně vlhkosti

půdy a je počítán s ohledem na různé typy půd. Pro výpočet evapotranspirace se využívá metoda Penman-Monteith v úpravě DWD.

3. Analýza aktuálních denních výstupů v zimním období

Od prosince 2004 jsou v denním kroku zasílány z AF do Doksan přes e-mail výstupy systému vypočtené přímo pro observatoř ČHMÚ v Doksanech. Denní výstupy zahrnují vedle zhodnocení aktuálního stavu (-2 dny zpět) i jejich předpověď na 5 dnů dopředu. Výstupy obsahují: teplotu vzduchu ve 2 m (minimum a maximum, trend), průměrnou denní vlhkost vzduchu, srážky (denní úhrn v mm, výška sněhové pokrývky, pravděpodobnost srážek > 0 a > 5 mm, výskyt srážek v noci, dopoledne, odpoledne a večer), nebezpečí náledí (začátek, konec), měsíční svit (počet hod), rychlost větru (maximální nad 12 m/s, rychlost a směr větru v 7, 13 a 19 hod UTC), půdní stav (index promrznutí, stav půdy v 5 mm a 3 cm, zpracovatelnost půdy lehké a těžké), hloubku promrznutí (bez a s porostem, rozmrzlá vrstva), minimální teplotu nad povrchem (bez porostu, nad trávníkem), půdní teplotu v 5 cm (minimum, písčitá a jílovitá půda, bez a s porostem), vlhkost půdy v % VVK (ozim, písčitá a jílovitá půda), výpar (písčitá půda, ozim) a průsak vody (v hloubce 60 cm). V tab.1 je uveden originální výstup modelu AMBER spočítaný v AF pro Doksany ze dne 24.2.2005.

Pro hodnocení jsme využili celé zimní období (prosinec až únor) 2004/2005, výpočet za roky 1995-2004 nebyl v době psaní příspěvku ještě k dispozici. Zaměřili jsme se na analýzu rozptylu chyb předpovídaných hodnot s cílem detekovat jejich případnou systematickou chybu. S výjimkou výparu, srážek a vlhkosti půdy nebyla tato chyba detekována. Na obr.1 je znázorněn chod skutečně změřené (slabá modrá čára) a předpovídané (silná červená čára) vlhkosti písčité půdy v hloubce 5 cm pod ozimou pšenicí v období od 4.1. do 14.2.2005 v Doksanech. Z obrázku je patrná větší dynamika chodu skutečné vlhkosti oproti předpovídané. V přízemní vrstvě písčité půdy totiž dochází k velkému kolísání vlhkosti půdy, které lze jen velmi obtížně postihnout pomocí modelů počítaných ze standardních meteorologických dat. I proto vybudoval ČHMÚ rozsáhlou síť stanic s měřením vlhkosti půdy (31 stanic k 31.12.2004), zatímco DWD disponuje měřením vlhkosti půdy pouze na 5 stanicích. Navíc ve zprávě synop, ze které pocházejí vstupní data do modelu, nejsou údaje o vlhkosti půdy obsaženy, proto nelze provést korekci předpovědi. Na obr. 2 je znázorněna histogramem četnost rozdílů mezi předpovídanými a skutečně změřenými denními úhrny srážek za období od 4.1. do 14.2.2005 v Doksanech. Z obrázku je patrné časté nadhodnocování srážek modelem DWD. Na obr. 3 je znázorněna histogramem četnost rozdílů mezi předpovídaným a skutečně změřeným denním úhrnem výparu z písčité půdy s ozimou pšenicí za období od 4.1. do 14.2.2005 v Doksanech. Z obrázku je patrné časté podhodnocování výparu modelem DWD. Nadhodnocování srážek a naopak podhodnocování výparu do určité míry vysvětluje výše zmiňované nezachycení dynamiky skutečné vlhkosti písčité půdy.

Chyba předpovědi se logicky s přibývající délkou zvyšuje. Předpověď je konzistentní, neboť pokud je předpověď na 24 hodin zatížena chybou, pak předpověď na 48 hodin je u většiny případů ještě o něco horší, popřípadě stejná. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u předpovědi na 24 h dopředu, kde průměrná úspěšnost předpovědi byla 92 %. Z hlediska zemědělského uživatele velmi příjemně překvapila vysoká úspěšnost předpovědi rychlosti větru v 7, 13 a 19 hod UTC a výskyt srážek během dne. Průměrná chyba předpovědi minimální a maximální teploty nepřekročila ± 2 ^{o}C.

4. Závěr

DWD disponuje po organizační stránce skvěle propracovanou agrometeorologickou službou, která je schopna operativně řešit aktuální problémy a celý systém AMBER průběžně doplňovat dle požadavků uživatelů. ČHMÚ by po dohodě s DWD mohl převzít jejich know-how a připravit systém, který by šel úspěšně provozovat v podmínkách ČR.

Literatura:

[1] Rožnovský, J.: Úvodní slovo. In.: Climate change – weather extremes organisms and ecosystems. International Bioclimatological Workshop, Viničky, SR, 2004.

[2] Löpmeier, F.J.: Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. Z.f.Bewässerungswirtsch. 29, 2, 1994, 157-167.

REFERENČNÍ EVAPOTRANSPIRACE

Mojmír Kohut

Abstract:
REFERENTIAL EVAPOTRANSPIRATION

The presented contribution analyses in detail the algorithm for the calculation of referential evapotranspiration of a hypothetical surface, by the universally recommended and world-wide-regarded FAO method, which is based on the Penman-Monteith approach. Besides all formulae, which are absolutely necessary for the solution of this problem, the contribution quotes the derivation of the basic relationship for the calculation of referential evapotranspiration from the original Penman-Monteith combination equation for the calculation of potential evapotranspiration. Emphasis is put on the determination, or simplification of the aerodynamic and surface resistance, including other characteristics. The contribution further points to certain peculiarities, which are a reason for a small modification of this method when it is used in our conditions, mainly with respect to the availability of climatic data when making everyday calculations. The referential evapotranspiration of a hypothetical surface which is very close to grass stand is one of the possible ways of evaluation of evaporation, evaporation being a basic balance element in the countryside.

Key words: referential evapotranspiration, FAO method, potential evapotranspiration, Penman-Monteith, evaporation.

1. Úvod

Předkládaný příspěvek popisuje jeden z možných způsobů výpočtu referenční evapotranspirace hypotetického povrchu všeobecně doporučovanou a uznávanou metodikou FAO, založenou na Penman-Monteithově přístupu. Neklade si za cíl srovnat všechny způsoby výpočtů zmíněnou metodikou, avšak soustřeďuje se pouze na vyhodnocení referenční evapotranspirace v denním intervalu.

V české a slovenské odborné literatuře je řada publikací, věnovaných problematice potenciální a aktuální evapotranspirace včetně analýz různých metod výpočtů. Naopak počet prací, které se zabývají pouze výpočtem referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle metodiky FAO, je podstatně nižší.

Výpočet a určení referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle metodiky FAO je obecných přístupem k řešení problematiky výparu (evaporace, evapotranspirace). Referenční evapotranspirací se v tomto smyslu rozumí evapotranspirace z hypotetického povrchu velmi podobnému standardnímu travnímu porostu, který se vyznačuje během celého kalendářního roku konstantní výškou (0,12 m), konstantním albedem (0,23), konstantním povrchovým odporem (70 $s.m^{-1}$), plným (maximálním) zápojem a optimálním zásobováním srážkovou vodou. Jinými slovy, výpočet proběhne pro den nebo jinou časovou jednotku (metodika FAO uvádí též zpracování pro časové intervaly hodina, 10 dní a měsíc) na základě vstupu základních meteorologických údajů (teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, rychlost větru a trvání slunečního svitu), přičemž všechny ostatní parametry jsou nastaveny na konstantní hladinu. Tímto způsobem lze tedy relativně snadně porovnávat jednotlivé navzájem odlišné oblasti.

Je nutno podotknout, že ve všech dále uváděných vztazích byla pro jednoduchost a srozumitelnost ponecháno původní značení proměnných, které může být poněkud odlišné od našich zvyklostí.

2. Referenční evapotranspirace – odvození základní rovnice

Základní rovnice pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu ET_0 metodikou FAO vychází z originální Penman-Monteithovy kombinační rovnice pro výpočet potenciální evapotranspirace ve tvaru:

$$\lambda * ET = \frac{\Delta * (R_n - G) + \rho_a * c_p * \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \qquad (1)$$

kde: ET = intenzita evapotranspirace [$kg.m^{-2}.s^{-1}$],
λ = skupenské (latentní) teplo vypařování neboli měrné teplo vypařování, $\lambda = 2{,}45\ MJ.kg^{-1}$,
Δ = derivace tlaku nasycené vodní páry podle teploty vzduchu [$kPa.\ ^oC^{-1}$],
R_n = radiační bilance na povrch [$kJ.m^{-2}.s^{-1}$],
G = tok tepla v půdě [$kJ.m^{-2}.s^{-1}$],
ρ_a = hustota vzduchu při dané teplotě vzduchu a atmosférickém tlaku [$kg.m^{-3}$],
c_p = specifické (měrné) teplo vzduchu [$kJ.kg^{-1}.^oC^{-1}$],
e_s = tlak nasycené vodní páry při teplotě vzduchu [kPa],
e_a = aktuální tlak vodní páry [kPa],
Rozdíl $e_s - e_a$ je sytostní doplněk.
r_a = aerodynamický odpor (rezistence) [$s.m^{-1}$],
r_s = povrchový odpor (rezistence) plodiny [$s.m^{-1}$],
γ = psychrometrická konstanta [$kPa.^oC^{-1}$], $\gamma = 0{,}66$ pro teplotu vzduchu ve ^oC a tlak vodní páry v mb nebo hPa.

Dle rovnice (1) byl odvozen základní vzorec pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu metodikou FAO:

$$ET_0 = \frac{0{,}408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273{,}16} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0{,}34 * u_2)} \qquad (2)$$

kde: ET_0 = referenční evapotranspirace hypotetického povrchu [$mm.den^{-1}$],
Δ = derivace tlaku nasycené vodní páry podle teploty vzduchu [$kPa.^oC^{-1}$],
R_n = radiační bilance na povrch plodiny [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
G = tok tepla v půdě [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
γ = psychrometrická konstanta [$kPa.^oC^{-1}$],
T = průměrná denní teplota vzduchu ve 2 m nad povrchem [^oC],
u_2 = průměrná denní rychlost větru ve 2 m nad povrchem [$m.s^{-1}$],
e_s = průměrný denní tlak nasycení vodní páry při teplotě vzduchu ve 2 m nad povrchem [kPa],

e_a = průměrný denní aktuální tlak vodní páry vypočítaný podle teploty vzduchu ve 2 m nad povrchem [kPa],
Rozdíl $e_s - e_a$ je sytostní doplněk [kPa].

K odvození vztahu (2) pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu z původní Penman-Monteithovy kombinační rovnice (1) jsou nutné následující úpravy.

2.1. Úprava aerodynamického odporu (rezistence) r_a

Přenos tepla a vodní páry z vypařujícího povrchu do vrstvy bezprostředně přiléhající k povrchu plodiny je určen aerodynamickou rezistencí podle vztahu:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{0m}}\right] * \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{0h}}\right]}{\hat{e}^2 * u_z} \qquad (3)$$

kde: r_a = aerodynamický odpor (rezistence) [$s.m^{-1}$],
z_m = výška měření rychlosti větru [m],
z_h = výška měření vlhkosti vzduchu [m],
d = efektivní výška porostu [m],
z_{0m} = parametr (součinitel) dynamické drsnosti [m],
z_{0h} = parametr (součinitel) dynamické drsnosti pro přenos tepla a vodní páry [m],
κ = Kármánova konstanta, $\kappa = 0{,}41$ [-],
u_z = rychlost větru ve výšce měření z [$m.s^{-1}$].

Přijmeme-li základní předpoklady, že výška travního porostu je po celý rok konstantní (h = 0,12 m) a měření meteorologických veličin probíhá ve standardní výšce 2 m nad povrchem ($z_m = z_h = 2$ m pro teplotu vzduchu a vlhkost vzduchu, rychlost větru je nutno na tuto hladinu přepočítat) a použijeme-li základní zjednodušující vztahy ($d = 2/3 * h$, $z_{0m} = 0{,}123 * h$, $z_{0h} = 0{,}1 * z_{0m}$), potom rovnici (3) pro výpočet aerodynamického odporu lze přepsat do zjednodušeného tvaru, který se používá k výpočtu referenční evapotranspirace hypotetického povrchu:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{2-(2/3*0{,}12)}{0{,}123*0{,}12}\right] * \ln\left[\frac{2-(2/3*0{,}12)}{0{,}1*(0{,}123*0{,}12)}\right]}{0{,}41^2 * u_2} = \frac{207{,}664}{u_2} \approx \frac{208}{u_2} \qquad (4)$$

2.2. Úprava povrchového odporu (rezistence) r_s

Pro výpočet se používá jednoduchý vzorec:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{act}} \qquad (5)$$

kde: r_s = povrchový odpor (rezistence) [$s.m^{-1}$],

r_l = stomatální odpor (rezistence) optimálně osvětleného listu, r_l = 100 $s.m^{-1}$,
LAI_{act}= aktivní index plochy listové [m^2 (plocha listoví).m^{-2} (plocha povrchu půdy)], pro který v případě travního porostu platí základní vztah:

$$LAI_{act} = 0{,}5 * 24 * h \qquad (6)$$

kde: h = výška standardního travního porostu [m], h = 0,12 m.

Dosazením do rovnice (5) dostaneme závěrečnou hodnotu povrchového odporu r_s, která se používá v metodice FAO k výpočtu referenční evapotranspirace travního porostu:

$$r_s = \frac{100}{0{,}5 * 24 * 0{,}12} = 69{,}444 \approx 70 \qquad (7)$$

Správně definovaný povrchový odpor je všeobecně rozhodující pro dosažení uspokojivých výsledků evapotranspirace. Je výrazně variabilní, a to v závislosti na typu a stáří plodiny a na takových vnějších faktorech jako je např. stav půdní vlhkosti.

2.3. Dokončení úpravy základního vztahu (1)

V základní rovnici (1) lze upravit a zjednodušit výraz (ρ_a * c_p) / r_a na pravé straně čitatele, a to pomocí vztahů:

$$\gamma = \frac{c_p * P}{\varepsilon * \lambda} \Rightarrow c_p = \frac{\gamma * \varepsilon * \lambda}{P} \qquad (8)$$

$$\rho_a = \frac{P}{1{,}01 * (T + 273{,}16) * R} \qquad (9)$$

S použitím vztahu (4) výsledkem bude rovnice:

$$\frac{c_p * \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma * \varepsilon * \lambda}{1{,}01 * (T + 273{,}16) * R} * \frac{u_2}{208} \qquad (10)$$

kde: c_p = specifické (měrné) teplo při konstantním atmosférickém tlaku [$MJ.kg^{-1}.°C^{-1}$],
ρ_a = průměrná hustota vzduchu při konstantním atmosférickém tlaku [$kg.m^{-3}$],
r_a = aerodynamická rezistence [$s.m^{-1}$],
γ = psychrometrická konstanta [$kPa.°C^{-1}$],
ε = poměr molekulárních hmotností vodní páry a suchého vzduchu [-], ε = 0,622,
λ = latentní teplo výparu [$MJ.kg^{-1}$],
u_2 = průměrná denní rychlost větru na hladině 2 m nad povrchem [$m.s^{-1}$],
R = specifická plynová konstanta [$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$], R = 0,287 $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$,
T = průměrná denní teplota vzduchu [°C],
P = atmosférický tlak [kPa].

Rovnice (10) je vyjádřena v jednotkách $MJ.m^{-2}.°C^{-1}.s^{-1}$. Po přenásobení počtem sekund dne dostaneme závěrečný tvar rovnice (10) v jednotkách $MJ.m^{-2}.°C^{-1}.den^{-1}$:

$$\frac{c_p * \rho_a}{r_a} = 86400 * \frac{0{,}622 * \gamma * \lambda}{1{,}01 * (T + 273{,}16) * 0{,}287 * 208} * u_2 \qquad (11)$$

nebo (po vydělení $\lambda = 2{,}45$):

$$\frac{c_p * \rho_a}{r_a} = \gamma * \frac{891{,}328}{T + 273{,}16} * u_2 \approx \gamma * \frac{900}{T + 273{,}16} * u_2 \qquad (12)$$

Základní Penman-Monteithova rovnice pro výpočet potenciální evapotranspirace travního porostu (1) se úpravami 2.1, 2.2 a 2.3 modifikovala na zjednodušenou Penman-Monteithovu rovnici pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu (2) podle metodiky FAO. Výraz 0,408 ve vztahu (2) je reciprokou hodnotou specifického (měrného) tepla vypařování λ.

3. Referenční evapotranspirace hypotetického povrchu – podrobná analýza výpočetních algoritmů

Metodika FAO Penman-Monteith umožňuje výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu ET_0 pro různé časové intervaly (měsíc, 10 dní, den, hodina apod.). Standardní výpočty, prováděné v rámci ČHMÚ, se vztahují na zpracování referenční evapotranspirace pro jednotlivé dny. Předmětem následující podrobné analýzy je právě tento způsob výpočtů, který např. je v současné době aplikován při řešení problematiky evaporace a evapotranspirace v Atlasu podnebí ČR.

Originální metodika FAO doporučuje následující vstupní meteorologická data:

- průměrná denní teplota vzduchu [^oC], počítaná z maximální a minimální teploty vzduchu jako jejich součet dělený dvěma (pro dílčí výpočty jsou nutné extrémní denní teplotní údaje).
- průměrná denní relativní vlhkost vzduchu [kPa], počítaná z maximální a minimální relativní vlhkosti vzduchu (pro dílčí výpočty jsou nutné extrémní denní údaje o vlhkosti vzduchu).
- denní trvání slunečního svitu [hod].
- průměrná denní rychlost větru, počítaná ze tří termínů 07, 14, 21 hod. [$m.s^{-1}$].

Vedle výše uvedených meteorologických dat je nutno znát geografické souřadnice výpočetního místa (klimatologické stanice), a to jeho nadmořskou výšku a zeměpisnou šířku.

Výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle vztahu (2) je vhodné rozdělit do několika dílčích etap. Zde je nutno upozornit na skutečnost, že k vyčíslení určitých charakteristik se mohou používat poněkud rozdílné vzorce, které se mohou odlišovat v hodnotách konstant. Vedle originálního označení proměnných jsou taktéž zachovány všechny vzorce, které jsou doporučovány metodikou FAO. Stejně tak

byly ponechány všechny jednotky, i když v některých případech se v naší praxi používají jednotky poněkud jiné (např. tlak vodní páry u nás většinou v hPa, metodika FAO v kPa). Vzhledem k našim specifickým podmínkám a zvláště dostupnosti některých dat z dlouhodobého pohledu některé algoritmy musí být poněkud modifikovány.

3.1. Pomocné výpočty, vyhodnocení vybraných parametrů

A1. Přepočet průměrné denní rychlosti větru z hladiny měření na standardní hladinu 2 m nad povrchem:

$$u_2 = u_z * \frac{4{,}87}{\ln(67{,}8 * z - 5{,}42)} \tag{13}$$

kde: u_2 = průměrná denní rychlost větru na hladině 2 m nad povrchem [$m.s^{-1}$],
u_z = průměrná denní rychlost větru měřená na hladině z metrů nad povrchem [$m.s^{-1}$],
z = výška měření nad povrchem.

Rychlost větru se obvykle měří na hladině 10 m nad povrchem. Z tohoto důvodu je nutný přepočet s ohledem na logaritmický profil rychlosti větru.

A2. Přepočet atmosférického tlaku v závislosti na nadmořské výšce výpočetního místa (stanice):

$$P = 101{,}3 * \left(\frac{293{,}16 - 0{,}0065 * z}{293{,}16} \right)^{5{,}26} \tag{14}$$

kde: P = atmosférický tlak [kPa],
z = nadmořská výška výpočetního místa (stanice) [m n. m.].

A3. Výpočet průměrné denní teploty vzduchu:

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \tag{15}$$

kde: T_{mean} = průměrná denní teplota vzduchu [°C],
T_{max} = maximální denní teplota vzduchu [°C],
T_{min} = minimální denní teplota vzduchu [°C].

A4. Sklon křivky napětí vodních par při dané průměrné denní teplotě vzduchu:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0{,}6108 * \exp\left(\frac{17{,}27 * T_{mean}}{T_{mean} + 237{,}3} \right) \right]}{\left(T_{mean} + 237{,}3\right)^2} \qquad (16)$$

kde: Δ = sklon křivky napětí vodních par při dané průměrné denní teplotě vzduchu [kPa.°C^{-1}],
T_{mean} = průměrná denní teplota vzduchu [°C].

A5. Výpočet psychrometrické konstanty:

$$\tilde{a} = \frac{c_p * P}{\mathring{a} * \ddot{e}} = 0{,}665 * 10^{-3} * P \qquad (17)$$

kde: γ = psychrometrická konstanta [kPa.°C^{-1}],
c_p = specifické teplo při konstantním tlaku, $c_p = 1{,}013.10^{-3}$ [MJ.kg^{-1}.°C^{-1}],
P = atmosférický tlak [kPa],
ε = poměr molekulárních hmotností vodní páry a suchého vzduchu [-], $\varepsilon = 0{,}622$,
λ = latentní teplo výparné, $\lambda = 2{,}45$ [MJ. kg^{-1}].

3.2. Vlhkostní charakteristiky, určení sytostního doplňku

B1. Výpočet tlaku nasycené vodní páry pro denní maximální a denní minimální teplotu vzduchu.
Obecně je možno použít následující vzorec:

$$e^0(T) = 0{,}6108 * \exp\left(\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3} \right) \qquad (18)$$

kde: $e^0(T)$ = tlak nasycené vodní páry při teplotě T [kPa],
T = obecně jakákoliv teplota vzduchu [°C].

Výpočet podle vzorce (18) je nutno provést pro denní maximální a denní minimální teplotu vzduchu. Průměrný denní tlak nasycené vodní páry potom dostaneme pomocí vztahu:

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \qquad (19)$$

kde: e_s = průměrný denní tlak nasycené vodní páry [kPa],
$e^0(T_{max})$ = tlak nasycené vodní páry pro denní maximální teplotu vzduchu [kPa],
$e^0(T_{min})$ = tlak nasycené vodní páry pro denní minimální teplotu vzduchu [kPa].

B2. Výpočet průměrného denního aktuálního tlaku vodní páry pomocí maximální denní a minimální denní relativní vlhkosti vzduchu:

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) * \frac{RH_{max}}{100} + e^0(T_{max}) * \frac{RH_{min}}{100}}{2} \qquad (20)$$

kde: e_a = průměrný denní aktuální tlak vodní páry [kPa],
$e^0(T_{min})$ = tlak nasycené vodní páry pro denní minimální teplotu vzduchu [kPa],
$e^0(T_{max})$ = tlak nasycené vodní páry pro denní maximální teplotu vzduchu [kPa],
RH_{max} = denní maximum relativní vlhkosti vzduchu [%],
RH_{min} = denní minimum relativní vlhkosti vzduchu [%].

Výpočet $e^0(T_{min})$ a $e^0(T_{max})$ proběhne podle vztahu (18). Při aplikaci rovnice (20) v našich podmínkách nastávají jisté problémy. Budeme-li zpracovávat dlouhodobé řady referenční evapotranspirace travního porostu, v denním kroku, nebudeme mít k dispozici extrémní údaje o relativní vlhkosti vzduchu v intervalu jednotlivých dní. Přesný postup podle metodiky FAO bychom tedy mohli zachovat pouze v případě, že bychom zpracování prováděli pouze za období automatických měření v síti klimatologických stanic ČHMÚ, tj. přibližně za období od druhé poloviny 90. let minulého století, kdy u vybraných stanic máme k dispozici řady 15ti minutových dat, z nichž lze již vybrat maximální a minimální hodnotu relativní vlhkosti vzduchu.
Metodika FAO však nabízí i náhradní řešení pro případy absence vlhkostních extrémů vzduchu. Doporučuje se následující vztah:

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} * \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \qquad (21)$$

kde RH_{mean} je podle metodiky FAO průměrná relativní vlhkost vzduchu, definovaná jako průměr mezi RH_{max} a RH_{min}. Zde je v metodice nesrovnalost, neboť extrémy relativní vlhkosti vzduchu nám nejsou známy. Tento problém lze v praxi alespoň přibližně řešit tím, že do rovnice (21) dosadíme průměrnou denní relativní vlhkost, vypočítanou obvyklým způsobem. Rovnice (21) je méně průkazná než rovnice (20).

B3. Průměrný denní sytostní doplněk určíme jako rozdíl průměrného denního tlaku nasycené vodní páry a průměrného denního aktuálního tlaku vodní páry, tj. e_s - e_a. Výsledek bude v kPa.

3.3. Pomocné výpočty, využité k řešení radiačních členů

C1. Určení juliánského dne v roce:

$$JD = \text{int}\left(275 * \frac{M}{9} - 30 + D\right) + \text{const} \qquad (22)$$

kde: JD = juliánský den, tj. pořadové číslo dne v nepřestupném nebo přestupném roce [-],
M = pořadové číslo měsíce v roce [-],
D = pořadové číslo dne v měsíci [-],
const = konstanta, jejíž hodnota přímo závisí na měsíci a celkovém počtu dní v roce:
- pro leden a únor nepřestupného a přestupného roku platí: const = 0,
- pro březen až prosinec nepřestupného roku platí: const = -2,
- pro březen až prosinec přestupného roku platí: const = -1.

C2. Převod zeměpisné šířky ze stupňů a minut na stupně a desetiny stupně:

$$SS^{\circ}MM' = SS^{\circ} + \frac{MM'}{60} \qquad (23)$$

kde: SS° = stupně zeměpisné šířky [-],
MM´ = minuty zeměpisné šířky [-].
Převedený údaj je pro severní polokouli kladný, pro jižní záporný.

C3. Převod zeměpisné šířky ze stupňů a desetin stupňů na radiány:

$$[\text{rad}] = \frac{\pi}{180} * [\text{stupně, desetiny}] \qquad (24)$$

3.4. Jednotlivé složky radiace

D1. Extraterestrická radiace na horní hranici atmosféry:

Globální (extraterestrická) radiace představuje záření, dopadající na jednotku horizontální plochy na vnější hranici atmosféry. Pro místa s obdobnou zeměpisnou šířkou je přibližně stejné, mění se pouze v průběhu roku. Nad zemskou atmosférou neexistuje vliv oblačnosti, zákalu ani znečištění ovzduší, a proto dávka sluneční energie je zde v libovolném časovém okamžiku nejvyšší. Vedle solární konstanty se musí brát v úvahu též úhel dopadu slunečních paprsků v daném místě na horní hranici atmosféry.
Výpočet se provede podle vzorce:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{sc} * d_r * (\omega_s * \sin\varphi * \sin\delta + \cos\varphi * \cos\delta * \sin\omega_s) \qquad (25)$$

kde: R_a = extraterestrická radiace na horní hranici atmosféry [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
G_{sc} = solární konstanta [$MJ.m^{-2}.min^{-1}$], G_{sc} = 0,0820 $MJ.m^{-2}.min^{-1}$,
d_r = inverzní relativní vzdálenost Země-Slunce [-]:

$$d_r = 1 + 0{,}033 * \cos\left(\frac{2 * \pi}{365} * JD\right) \qquad (26)$$

ω_s = hodinový úhel východu Slunce [rad]:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi * \tan\delta) \qquad (27)$$

nebo (za předpokladu absence funkce arccos)

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{-\tan\varphi * \tan\delta}{X^{0,5}}\right) \qquad (28)$$

kde:

$$X = 1 - (\tan\varphi)^2 * (\tan\delta)^2 \quad (X = 0{,}00001, \text{ jestliže } X \leq 0) \qquad (29)$$

φ = zeměpisná šířka [rad] vyjádřená podle rovnice (24),
δ = solární deklinace [rad]:

$$\delta = 0{,}409 * \sin\left(\frac{2 * \pi}{365} * JD - 1{,}39\right) \qquad (30)$$

D2. Maximální trvání slunečního svitu:

$$N = \frac{24}{\pi} * \omega_s \qquad (31)$$

kde: ω_s = hodinový úhel východu Slunce [rad], viz vztah (27),

Poměr měřeného slunečního svitu k maximálně možnému je relativní sluneční svit. Tato charakteristika vstupuje do dalších výpočtů.

D3. Solární krátkovlnná radiace:

$$R_s = R_a * \left(a_s + b_s * \frac{n}{N}\right) \qquad (32)$$

kde: R_s = solární krátkovlnná radiace nad povrchem, opravená o vliv oblačnosti [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
R_a = extraterestrická radiace na horní hranici atmosféry [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
a_s, b_s = Angstrőmovy koeficienty [-]. Jejich hodnoty se liší v závislosti na zeměpisné šířce a podle ročních období. Pokud pro dané výpočetní místo (stanici) nejsou tyto koeficienty nakalibrovány, což při komplexním zpracování bývá v naprosté většině případů, metodika FAO používá hodnoty $a_s = 0{,}25$ a $b_s = 0{,}50$.

n = měřený sluneční svit [hod],
N = maximální trvání slunečního svitu [hod], viz vztah (27).

Angstrőmův vzorec (32) se používá ze předpokladu, že nejsou k dispozici měření globální radiace. Pro případy, kdy nejsou k dispozici kalibrované Angstrőmovy koeficienty, metodika FAO dále doporučuje zavést opravu v podobě výrazu R_s/R_{so} (tzv. relativní krátkovlnná radiace), kde

$$R_{so} = R_a * \left(0{,}75 + 2 * 10^{-5} * z\right) \qquad (33)$$

kde: R_{so} = solární krátkovlnná radiace za předpokladu bezoblačné oblohy [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
R_a = extraterestrická radiace na horní hranici atmosféry [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
z = nadmořská výška výpočetního místa (stanice) [m n. m.].

D4. Radiační bilance krátkovlnného záření:

$$R_{ns} = (1 - \acute{a}) * R_s \qquad (34)$$

kde: R_{ns} = radiační bilance krátkovlnného záření [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
α = albedo (odrazivost) povrchu, metodika FAO pro travní porost používá α = 0,23 [-],
R_s = krátkovlnná radiace nad povrchem [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],

D5. Radiační bilance dlouhovlnného záření:

$$R_{nl} = \acute{o} * \left[\frac{(T_{max} + 273{,}16)^4 + (T_{min} + 273{,}16)^4}{2}\right] * \left(0{,}34 - 0{,}14 * \sqrt{e_a}\right) * \left(1{,}35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0{,}35\right)$$

(35)

kde: R_{nl} = radiační bilance dlouhovlnného záření [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
σ = Stefan-Boltzmannova konstanta [$4{,}903.10^{-9}$ $MJ.K^{-4}.m^{-2}.den^{-1}$],
T_{max} = denní maximální teplota vzduchu [°C],
T_{min} = denní minimální teplota vzduchu [°C],
e_a = průměrný denní aktuální tlak vodní páry [kPa],
R_s/R_{so}= relativní krátkovlnná radiace (podmínka: $R_s / R_{so} \leq 1$) [-],
R_s = solární krátkovlnná radiace [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$], viz vztah (32).
R_{so} = solární krátkovlnná radiace za předpokladu bezoblačné oblohy, kdy platí n = N,
n = měřený sluneční svit [hod],

D6. Celková radiační bilance:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \qquad (36)$$

kde: R_n = celková radiační bilance [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$],
R_{ns} = radiační bilance krátkovlnného záření [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$], viz vztah (34),
R_{nl} = radiační bilance dlouhovlnného záření [$MJ.m^{-2}.den^{-1}$], viz vztah (35).

Poznámka k toku tepla v půdě (G):
Metodika FAO pro denní periodu výpočtu nepředpokládá s tokem tepla v půdě, $G \approx 0$.

Určením radiační bilance máme k dispozici všechny dílčí rovnice pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle metodiky FAO Penman-Monteith.

4. Závěr

Příspěvek kompletně analyzuje algoritmus výpočtu referenční evapotranspirace hypotetického povrchu doporučenou metodikou FAO Penman-Monteith za předpokladu výpočtů v denním kroku. Poukazuje na některé zvláštnosti, které jsou důvodem drobné modifikace této metody při jejím využití v našich podmínkách. Vedle popisu jednotlivých výpočetních postupů uvádí též způsob odvození základního vzorce této metody hodnocení evapotranspirace travního porostu ze standardního vztahu potenciální evapotranspirace metodou Penman-Monteith. Referenční evapotranspirace hypotetického povrchu je jedním ze způsobů hodnocení výparu jako základního bilančního prvku v krajině.

Poděkování:
Předkládaný příspěvek vznikl s využitím výsledků, získaných pomocí projektu NAZV QF3100 „Posouzení nárůstu klimatického sucha v zemědělství a zmírňování jeho důsledků závlahami“.

5. Literatura

1. Allen R.G., Jensen M.E., Wright J.L., Burman R.D.: Operational estimates of evapotranspiration. Agronomy Journal, 81(4), pp. 650-662, 1989.
2. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.: Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization, FAO Irrigation and Drainage Papers No. 56, pp. 301, Rome 1998.
3. Allen R.G., Pruitt W.O.: FAO-24 reference evapotransipration coefficients. Journal Irrig. And Drainage Engineering, ASCE 117(5), pp. 758-773, 1991.
4. Allen R.G., Smith M., Perrier A., Pereira L.S.: An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 43(2), pp. 1-34, 1994a.
5. Allen R.G., Smith M., Pereira L.S., Perrier A.: An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 43(2), pp. 35-92, 1994b.
6. Bos M.G., Vos J., Feddes R.A.: CRIWAR 2.0. A simulation model on Crop Irrigation Water Requirements. ILRI publication 46, pp. 117, Wageningen 1996.

7. Brutsaert W.: Evaporation into the Atmosphere. D.Reidel Publishing Co., pp. 299, Dordrecht 1982.

8. Burman R., Pochop L.O.: Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Elsevier Science B.V., pp. 275, Amsterodam 1994.

9. Cain J.D.: Modelling evaporation from plant canopies. Institute of Hydrology Wallingford, Report No. 132, pp. 42, Wallingford 1998.

10. Doorenbos J., Pruitt W.O.: Guidelines for Predicing Crop Water Reqiurements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd ed. FAO, pp. 156, Rome 1977.

11. Feddes R.A., Lenselink K.J.: Evapotranspiration. In: Drainage Principles and Applications, H.P. Ritzema (ed.), ILRI, pp. 1125, Wageningen 1994.

12. Gardner C.M.K. (ed.): The MORECS Discussion Meeting, April 1981. Institute of Hydrology, Report No. 78, pp. 57, Wallingford 1981.

13. Gardner C.M.K., Field M.: An evaluation of the succes of MORECS, a meteorological model, in estimating soil moisture deficits. Agricultural Meteorology, 29, pp. 269-284, Elsevier, Amsterodam 1983.

14. Hough M.N., Jones R.J.A.: The United Kingdom Meteorological Office rainfall and evaporation calculation systém: MORECS version 2.0 – an overview. Hydrology and Earth Systém Sciences, 1(2), pp. 227-239, 1997.

15. Hough M., Palmer S., Weir A., Lee M., Barrie I.: The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation Ssystém MORECS version 2.0 (1995). An update to Hydrological Memorandum No. 45, pp. 80, Meteorological Office, Bracknell, Meteorological Office, Wolverhampton, 1997.

16. Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G. (eds.): Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, ASCE, pp. 360, New York 1990.

17. Monteith J.L., Unsworth M.H.: Principles of Environmental Physics, Edward Arnold, 2nd ed., pp. 291, London 1990.

18. Novák V.: Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. SAV, Bratislava 1995, 260 str.

19. Penman H.L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. A, 193, pp. 120-145, 1948.

20. Smith M., Allen R.G., Monteith J.L., Perrier A., Pereira L.S., Segeren A.: Report of the Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization, FAO Report, pp. 60, Rome 1992.

21. Thompson N., Barrie I.A., Ayles M.: The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System: MORECS (July 1981). Met 08 (Hydrometeorological Services, Hydrological Memorandum No. 45, pp. 72, Bracknell 1981.

22. Verhoef A., Feddes R.A.: Preliminary Review of Revised FAO Radiation and Temperature Methods. Food and Agricultural Organization, Land and Water Development Division, pp. 116, Rome 1991.

VZŤAH MEDZI POTENCIÁLNOU A REFERENČNOU EVAPOTRANSPIRÁCIOU

František Matejka, Taťjana Hurtalová

Summary

The contribution aims to analyze relationships between the potential and reference evapotranspiration rates taking into account distinctions in their concepts. A close linear relationship was found between the reference and potential evapotranspiration calculated by Penman. The conditions are specified in which the daily totals of reference evapotranspiration can exceed corresponding values of the potential evapotranspiration. Using a mathematical model of the water exchange between plant stands and the atmosphere, the reference crop is better characterized and influence of its characteristics on evapotranspiration is quantitatively expressed. In conclusions, the different interpretations of the potential and reference evapotranspiration results are discussed from the point of view of possible applications in irrigation scheduling.

Key words: evaporative surface, vegetation, microclimate, reference crop, stomatal resistance.

Úvod

Sumárny výpar vody z listov rastlín a z povrchu pôdy pod nimi, nazývaný evapotranspirácia, má veľký význam pre rozvoj poznania vo viacerých vedných disciplínách, akými sú napr. hydrológia, ekológia, meteorológia ale tiež z hľadiska praktického využitia pri riadení závlah alebo v oblasti ochrany a tvorby životného prostredia. Okrem aktuálnej evapotranspirácie, alebo niekedy súčasne s ňou, sa však často používajú aj pojmy potenciálnej evapotranspirácie a referenčnej evapotranspirácie. Spoločným motívom pre vznik koncepcie potenciálnej evapotranspirácie alebo referenčnej evapotranspirácie, bola požiadavka vylúčiť vplyv zmien charakteristík porastu na intenzitu evapotranspirácie. Definícia potenciálnej evapotranspirácie bola formulovaná tak, aby umožnila stanoviť intenzitu evapotranspirácie hypotetického porastu s bližšie neurčenými, ale stálymi, biometrickými a aerodynamickými charakteristikami (Irmak a Haman, 2003), čo umožnilo použiť výsledky stanovenia potenciálnej evapotranspirácie na kvantifikáciu evaporačných požiadaviek ovzdušia. Naproti tomu, v koncepcii referenčnej evapotranspirácie, vhodnejšej pre aplikácie v oblasti riadenia závlah, je porast špecifikovaný parametrami rozhrania medzi vyparujúcim povrchom a atmosférou (Allen a kol., 1998).

Hodnoty potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie sa niekedy pokladajú za rovnocenné charakteristiky evaporačných požiadaviek atmosféry (Jensen a kol., 1990). V skutočnosti však môžu byť, v závislosti od metodiky stanovenia týchto veličín a merania vstupných dát, medzi ich korešpondujúcimi hodnotami značné rozdiely. Cieľom predloženého príspevku je analyzovať tieto rozdiely, identifikovať ich príčiny a posúdiť možnosti interpretácie a aplikácie výsledkov stanovenia potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie.

Potenciálna evapotranspirácia

Pojem potenciálnej evapotranspirácie použili pravdepodobne ako prví Penman (1948) pri analýze výparu z pôdy nasýtenej vodou a Thornthwaite (1948) v súvise s problematikou klimatickej rajonizácie. V tejto koncepcii sa pod potenciálnou evapotranspiráciou rozumie "the evapotranspiration rate of a short green crop, completely shading the ground, of uniform height and never short of water" (Penman, 1948). V priebehu času sa ukázalo, že táto definícia nie je celkom jednoznačná a môže viesť k rôznym nedorozumeniam. Problémy spô-

sobuje v prvom rade to, že vyparujúci povrch nie je dosť presne špecifikovaný. Viacerí autori vzťahujú túto definíciu k pravidelne kosenému nízkemu trávnemu porastu, ktorý je štandardným povrchom pre sieť klimatologických staníc. Z tohto predpokladu vychádzal už Penman (1948), ktorý vo svojom vzťahu, navrhnutom pre výpočet potenciálnej evapotranspirácie, stanovil funkciu, popisujúcu závislosť intenzity výparu od rýchlosti prúdenia vzduchu pre hustý, kosený trávny porast. Takto stanovené denné sumy potenciálnej evapotranspirácie sú vo veľmi dobrej zhode so zodpovedajúcimi výsledkami meraní evapotranspirácie zo zavlažovaného hustého, krátko strihaného trávnika. Existuje však viacero druhov porastov, ktoré možno charakterizovať ako „short green crop“. Pritom sa denné sumy evapotranspirácie týchto porastov môžu navzájom líšiť o 10 až 30 percent (Irmak a Haman, 2003).

Ďalším faktorom, ktorý môže spôsobovať rozdiely v hodnotách potenciálnej evapotranspirácie je výber metodiky jej stanovenia. Keďže Penman-Monteithova metóda (Monteith, 1965) je pomerne náročná z hľadiska získavania potrebných vstupných dát, je celkom pochopiteľná snaha zjednodušiť si situáciu pomocou empirických vzťahov, pre ktoré stačí mať k dispozícii výsledky meraní len jedeného alebo dvoch základných meteorologických prvkov. Typickým príkladom takéhoto prístupu môže byť výpočet potenciálnej evapotranspirácie metódami, ktoré navrhli Thornthweit (1948), Blaney a Criddle (1950), Budyko (1956), Jensen a Haise (1963), Hargreaves (1974), Jensen a kol. (1990). Vzhľadom na to, že žiadna z týchto metód neberie do úvahy celý komplex meteorologických faktorov, ktoré ovplyvňujú potenciálnu evapotranspiráciu, výsledky získané týmito metódami sa môžu navzájom značne líšiť (McKenney a Rosenberg, 1993).

Nemožno však vylúčiť ani rozdiely vo výsledkoch stanovenia potenciálnej evapotranspirácie spôsobené nie celkom presným definovaním podmienok, za ktorých majú byť získané vstupné údaje pre výpočet potenciálnej evapotranspirácie. Podstata problému spočíva v tom, že často potrebujeme stanoviť potenciálnu evapotranspiráciu za dlhší časový interval, prípadne aj počas celého roku, a to nielen v obdobiach, kedy je porast dostatočne zásobený pôdnou vodou, ale často aj v podmienkach pôdneho sucha. Pritom je známe, že hodnoty teploty vzduchu a sýtostného doplnku nad porastom trpiacim vodným stresom sú obvykle nezanedbateľne vyššie v porovnaní so situáciou nad zavlaženým porastom (Havlík a Možný, 1990). Keďže výsledky stanovenie potenciálnej evapotranspirácie významným spôsobom určuje teplota a vlhkosť vzduchu nad vyparujúcim povrchom, získavame v takýchto prípadoch hodnoty potenciálnej evapotranspirácie, ktoré v zmysle svojej definície vlastne ani za potenciálnu evapotranspiráciu nemôžu byť pokladané.

V súvise s definíciou a interpretáciou pojmu potenciálnej evapotranspirácie zostáva teda dosť nejasností a otvorených otázok. Toto bolo tiež jedným z dôvodov, prečo sa začiatkom sedemdesiatych rokov minulého storočia objavili pokusy hľadať k pojmu „potenciálna evapotranspirácia“ vhodnejšiu a jednoznačne definovanú alternatívu. Jedným z výsledkov takýchto snáh je koncepcia referenčnej evapotranspirácie.

Referenčná evapotranspirácia

Potenciálna evapotranspirácia, slúžiaca ako štandardná charakteristika evaporačných požiadaviek ovzdušia, často používaná v klimatológii, nie je dosť dobre prakticky aplikovateľná pri optimalizácii vodného režimu porastov poľných plodín, pretože sa podľa svojej definície nevzťahuje k presne špecifikovanému porastu. Preto sa už od polovice minulého storočia hľadala k potenciálnej evapotranspirácii vhodná alternatíva pre vyjadrenie evapotranspirácie konkrétneho referenčného porastu, dostatočne zásobeného pôdnou vodou, takže intenzita jeho evapotranspirácie nie je limitovaná obsahom vody v pôde. V tejto súvislosti sa koncepcia referenčnej evapotranspirácie po prvý raz objavila v polovici sedemdesiatych rokov minulého storočia (Doorenbos a Pruitt, 1975). Tento pojem bol neskôr oficiálne znovu zadefinovaný panelom expertov FAO a za referenčnú evapotranspiráciu sa odvtedy všeobecne pokladá „the rate of evapotranspiration from a hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m., a fixed surface resistance of 70 s/m and an albedo equal to 0.23, closely resembling an extensive surface of green

grass" (Smith a kol., 1991). V nadväznosti na tento dokument bola neskôr pre stanovenie takto definovanej referenčnej evapotranspirácie odporúčaná Penman-Monteithova metóda (Monteith, J.L., 1965), úspešne adaptovaná k definovanému referenčnému povrchu (Allen a kol., 1998). Posledne menovaná publikácia obsahuje aj presné požiadavky kladené na postup pri získavaní experimentálnych dát a návrh metodiky pre posúdenie ich homogenity a doplnenie prípadných chýbajúcich údajov.

Pri takto jednoznačne definovanej referenčnej evapotranspirácii jej hodnoty nezávisia od vlastností pôdy, druhu porastu ani jeho vývojového štádia a sú určované výlučne meteorologickými faktormi. Referenčná evapotranspirácia teda charakterizuje evaporačné požiadavky ovzdušia v uvažovanom období pre danú lokalitu a súčasne môže slúžiť ako základ pre stanovenie konkrétnych hodnôt aktuálnej evapotranspirácie rôznych porastov pomocou plodinových koeficientov.

Rozdiely medzi hodnotami potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie

Z hľadiska porovnania hodnôt potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie je v prvom rade dôležitý fakt, že pre stanovenie referenčnej evapotranspirácie je všeobecne akceptovaná jednotná metodika (Allen a kol., 1998). Naproti tomu, pre výpočet potenciálnej evapotranspirácie sa používa celý rad metód, ktoré sa líšia vo východiskových predpokladoch, vo vstupných údajoch i v časovom kroku. Následkom toho sa výrazne líšia aj samotné hodnoty potenciálnej evapotranspirácie stanovené rôznymi metódami. McKenney a Rosenberg (1993) zistili, že v ročných sumách potenciálnej evapotranspirácie môžu, v závislosti od použitej metódy, v niektorých prípadoch vzniknúť rozdiely presahujúce 100 % (obr. 1). Už len z tohto dôvodu je vzájomné porovnanie potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie principiálne nemožné.

I v prípade výpočtu potenciálnej evapotranspirácie Penmanovou metódou, z ktorej vychádza aj stanovenie referenčnej evapotranspirácie, môže byť variabilita získaných výsledkov značne veľká. V literatúre totiž existujú rôzne vyjadrenia funkčnej závislosti Penmanovej potenciálnej evapotranspirácie od rýchlosti vetra. Napriek tomu sa však dá odôvodnene predpokladať, že denné sumy referenčnej evapotranspirácie budú blízke k zodpovedajúcim denným sumám potenciálnej evapotranspirácie stanovenej Penmanovou metódou, keďže z tohto postupu vychádza aj štandardná metodika stanovenia referenčnej evapotranspirácie. Platnosť tohto predpokladu bola overená pomocou experimentálnych podkladov pozostávajúcich z výsledkov meraní radiačnej bilancie, rýchlosti vetra, teploty a vlhkosti vzduchu získaných v roku 2002 na Meteorologickom observatóriu Geofyzikálneho ústavu SAV v Mlyňanoch ($\phi = 48^o$ 19', $\lambda = 18^o$ 22', 198 m n. m.).

V zvolenom období bola stanovená referenčná evapotranspirácia použitím štandardnej metodiky FAO (Allen a kol., 1998). V súlade s touto metodikou boli denné sumy referenčnej evapotranspirácie počítané podľa vzťahu

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T+273} u(e_a - e_s)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \tag{1}$$

kde ET_0 znamená dennú sumu referenčnej evapotranspirácie [mm/d], Δ označuje deriváciu tlaku nasýtenej vodnej pary podľa teploty [kPa/^{0}C], R_n je radiačná bilancia [MJ/m^{2}d], γ je termodynamická psychrometrická konštanta [kPa/^{0}C], u je rýchlosť vetra vo výške 2 metre nad vyparujúcim povrchom [m/s] a symboly e_a, e_s značia tlak vodnej pary, resp., tlak nasýtenej vodnej pary [kPa] v tej istej výškovej hladine.

Potenciálna evapotranspirácia bola počítaná podľa Penmana (1948) s pôvodným vyjadrením závislosti evapotranspirácie od rýchlosti vetra

$$ET_0 = 0.408\frac{\Delta R_n + 6.43\gamma f(u)(e_a - e_s)}{\Delta + \gamma} \tag{2}$$

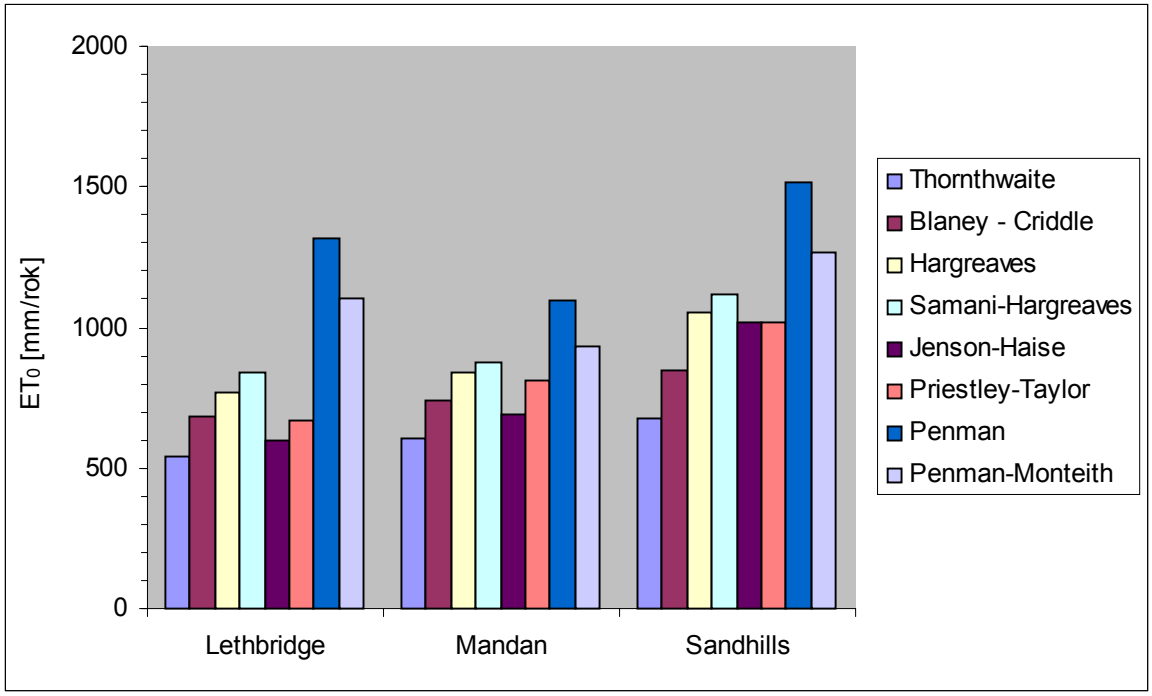
kde $f(u) = 1 + 0.537u$. Význam jednotlivých symbolov je rovnaký ako vo vzťahu (1).

Zo získaných výsledkov vyplynulo, že pri použitej metodike výpočtov, denné sumy potenciálnej evapotranspirácie systematicky prevyšujú referenčnú evapotranspiráciu.

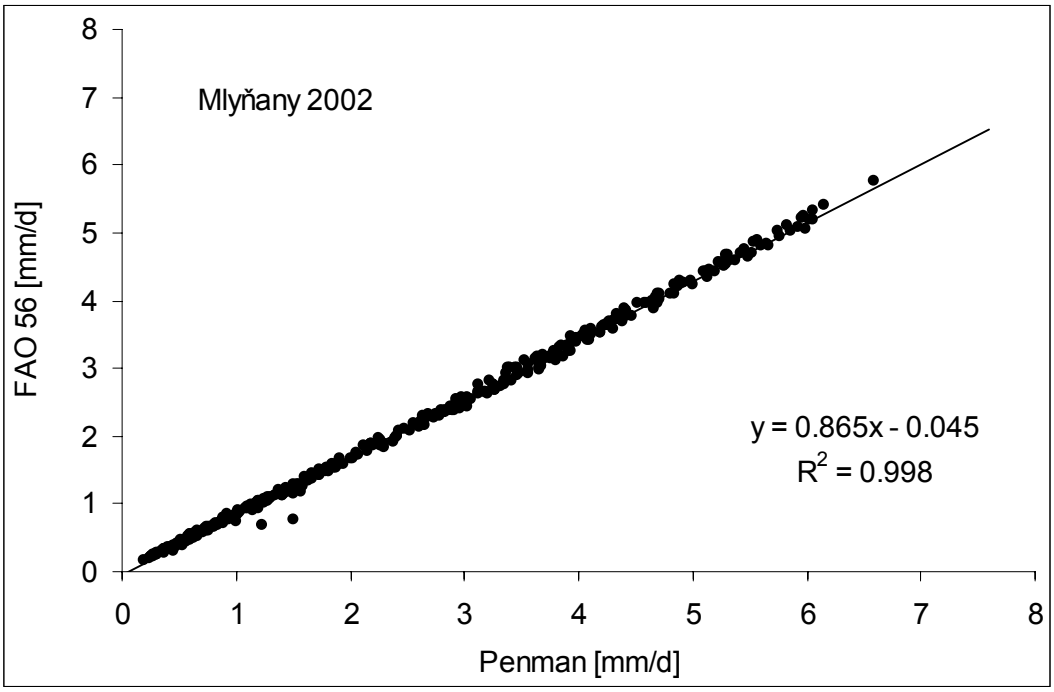
Pritom medzi obidvomi porovnávanými veličinami existuje tesný štatistický vzťah, ktorý možno vyjadriť lineárnou závislosťou (obr. 2).

V dôsledku toho sa denná suma referenčnej evapotranspirácie rovná v priemere 84,2 % z dennej sumy zodpovedajúcej potenciálnej evapotranspirácie. Rozdiely medzi mesačnými sumami potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie sa počas roku pohybujú v rozmedzí od 0,4 mm/deň do 0,93 mm/deň, pričom najväčšie hodnoty týchto rozdielov sa vyskytli na jar a začiatkom leta a najmenšie boli v zimnom období (obr. 3).

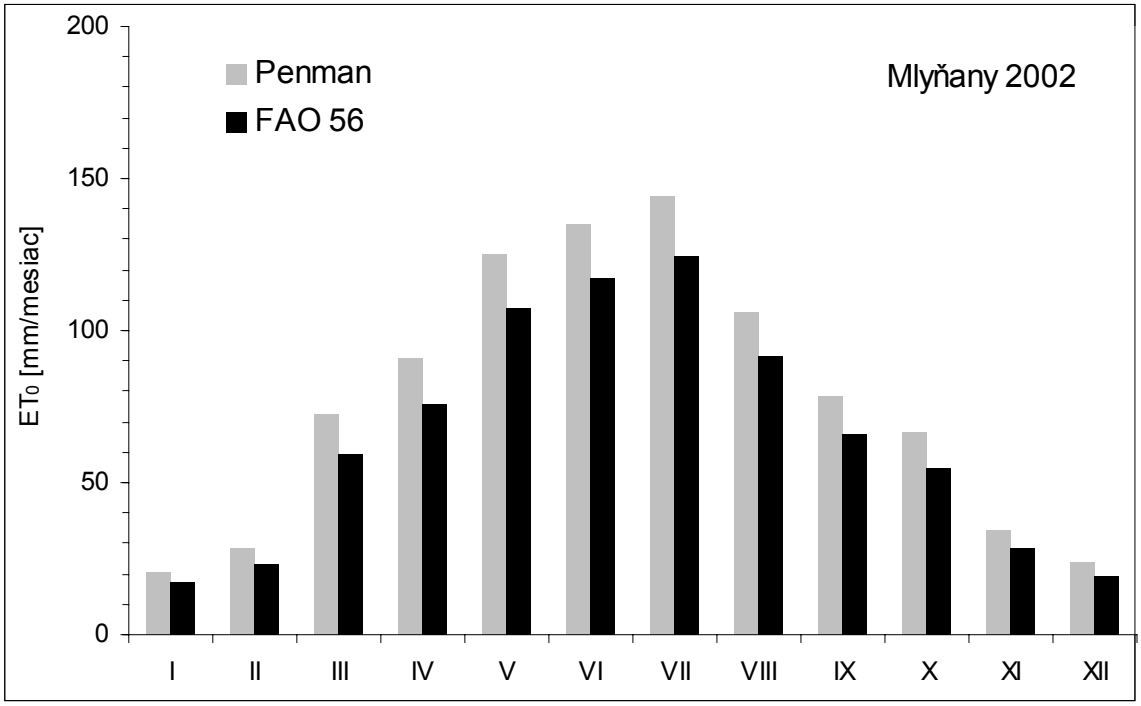
Na tomto mieste môže vzniknúť otázka, či je možné, aby denná suma referenčnej evapotranspirácie prekročila zodpovedajúcu hodnotu potenciálnej evapotranspirácie. Podrobná analýza vzťahov (1) a (2) vedie k záveru, podľa ktorého takáto situácia môže vzniknúť len za predpokladu, že by sa pri nízkej radiačnej bilancii vyskytli vysoké hodnoty teploty vzduchu a sýtostného doplnku. Napríklad, pri dennej sume radiačnej bilancie 1 MJ/m^2 za deň, by musela priemerná denná teplota vzduchu prekročiť 20 ^{0}C a sýtostný doplnok by musel dosiahnuť aspoň 1 kPa. V našich klimatických podmienkach je však takáto kombinácia meteorologických prvkov prakticky nemožná. Je teda takmer vylúčené, aby pri použitej metóde výpočtov, referenčná evapotranspirácia prekročila potenciálnu evapotranspiráciu. Treba však súčasne zdôrazniť, že pokiaľ by sme zvolili pre výpočet potenciálnej evapotranspirácie inú metódu, veľmi pravdepodobne by jej denné sumy nedosiahli úroveň denných súm referenčnej evapotranspirácie, keďže Penmanov vzťah vedie v porovnaní s inými metódami k vyšším výsledkom (McKenney a Rosenberg, 1993).



Obr. 1. Porovnanie ročných súm potenciálnej evapotranspirácie stanovenej rôznymi metódami pre tri lokality v USA (podľa McKenney a Rosengerg, 1993).



Obr. 2. Vzťah medzi dennými sumami potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie súčasne stanovenými Penmanovou metódou a metodikou podľa FAO na Meteorologickom observatóriu GFÚ SAV v Mlyňanoch počas roku 2002.



Obr. 3. Porovnanie mesačných súm potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie súčasne stanovených Penmanovou metódou a metodikou podľa FAO na Meteorologickom observatóriu GFÚ SAV v Mlyňanoch počas roku 2002.

Na tomto mieste sa tiež žiada pripomenúť, že zatiaľ čo vzorec (2) platí len na úrovni denných súm, vzťah (1) možno po príslušnej úprave použiť aj s hodinovým krokom a denné sumy referenčnej evapotranspirácie sa potom môžu stanoviť ako súčet hodinových súm. V takomto prípade však nemožno počítať s konštantnou hodnotou rezistencie porastu, ktorá je definične fixovaná na hodnote 70 s/m, ale treba pri výpočtoch

rešpektovať denný chod tejto veličiny (Lecina a kol., 2003). V tom prípade je však nevyhnutné doplniť štandardnú metodiku FAO algoritmami niektorého z dostupných matematických modelov, umožňujúcich simulovať dennú dynamiku hodnôt prieduchovej rezistencie porastu, resp., rezistencie vyparujúceho povrchu ako celku, čo kladie vyššie nároky na vstupné údaje.

Záver a diskusia

Zistený tesný lineárny vzťah medzi dennými sumami potenciálnej a referenčnej evapotranspirácie znamená na jednej strane isté zjednodušenie, pretože umožňuje jednoduchý a pomerne presný vzájomný prepočet potenciálnej evapotranspirácie na referenčnú alebo naopak. Súčasne však celkom prirodzene vzniká otázka, či nie je existencia oboch týchto pojmov duplicitou, a ak áno, ktorý z nich stráca svoj význam ako charakteristika vysušovacej schopnosti atmosféry, resp., ako referenčná hodnota, umožňujúca stanoviť potenciálne a následne aj aktuálne požiadavky rastlín na ich zásobenie pôdnou vodou.

Doteraz publikované poznatky svedčia tom, že koncepcia potenciálnej evapotranspirácie bola často úspešne využitá v súvise s klimatologickou rajonizáciou a pri klimatologickej charakteristike jednotlivých regiónov a lokalít. Napriek tomu však doteraz nie je celkom jasné ako možno v súlade s definíciou potenciálnej evapotranspirácie správne interpretovať jej hodnoty v zimnom období pri absencii vegetácie. Značným problémom je aj skutočnosť, že pre stanovenie potenciálnej evapotranspirácie sa používajú rôzne metódy, vychádzajúce z rozdielnych predpokladov a používajúce rozdielny stupeň zjednodušenia a empírie, takže ich výsledky sú často principiálne neporovnateľné.

Potenciálna evapotranspirácia sa však ukázala ako nie celkom vyhovujúca z hľadiska jej využitia pri optimalizácii vodného režimu rastlinných porastov, hlavne preto, že v jej definícii nie je dosť presne špecifikovaný vyparujúci povrch. To bolo snáď hlavným dôvodom pre vznik koncepcie referenčnej evapotranspirácie s jednoznačne definovaným referenčným porastom. Ďalšou výhodou koncepcie referenčnej evapotranspirácie je takmer všeobecne akceptovaná jednotná metodika jej stanovenia.

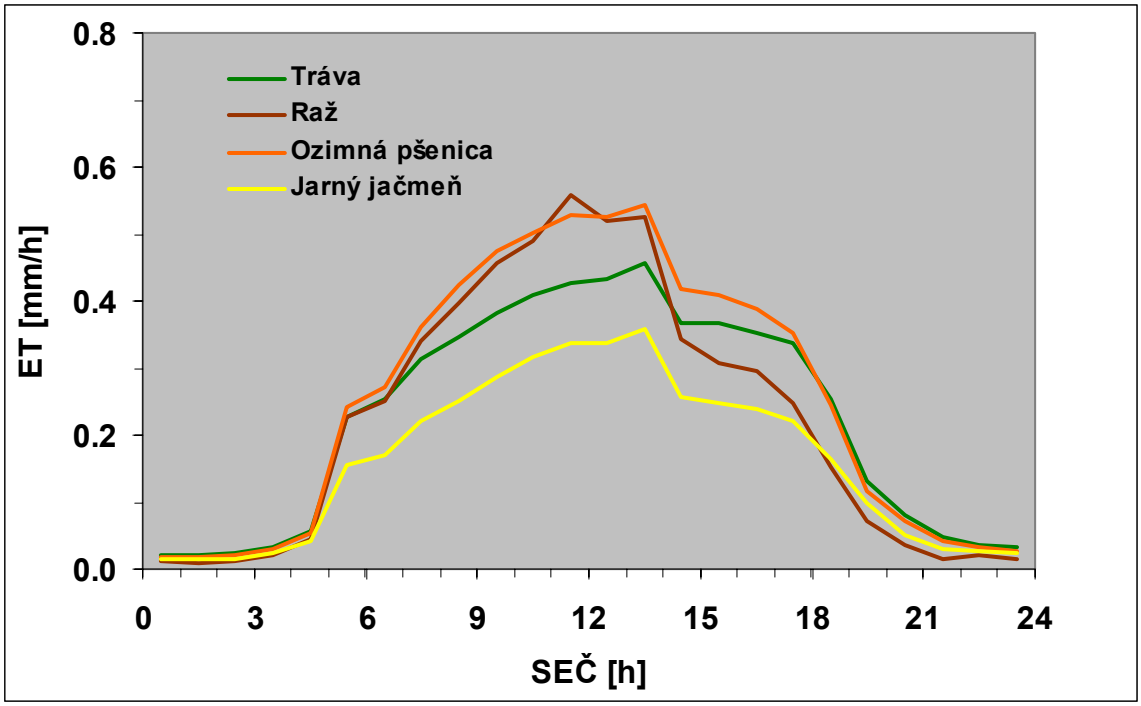
Ukazuje sa však, že ani toto nie je ideálnym riešením. Pre praktické využitie v oblasti riadenia závlah predstavuje totiž isté obmedzenie tá skutočnosť, že definícia referenčnej evapotranspirácie sa týka výlučne hustého, zapojeného porastu v pokročilom štádiu svojho vývoja. Takýto referenčný porast má zrejme oveľa vyššie požiadavky na pôdnu vodu než rovnaký druh porastu, ktorý je však riedky a nedostatočne vyvinutý. Prepočet referenčnej evapotranspirácie na aktuálnu evapotranspiráciu konkrétneho porastu je v metodike FAO (Allen a kol., 1998) riešený na úrovni sezónnych chodov pomocou plodinových koeficientov.

V mnohých prípadoch sú však z hľadiska vodného režimu rastlinných porastov rozhodujúce jednotlivé dni, alebo situácia v poludňajších hodinách dní s extrémnymi evaporačnými požiadavkami ovzdušia. Túto skutočnosť možno ilustrovať na konkrétnom príklade stanovenia denných chodov evapotranspirácie trávy v porovnaní s ďalšími tromi porastami počas vybraného jasného letného dňa. Všetky sledované porasty rástli v jednej lokalite v rovnakých pôdnych podmienkach a v priebehu vybraného dňa boli dostatočne zásobené pôdnou vodou. Pre analýzu dennej dynamiky evapotranspirácie bol v tomto prípade využitý experimentálne verifikovaný matematický model interakčných vzťahov v systéme pôda-porast-amosféra (Matejka, 1977). Výsledky modelových simulácií poukazujú na značné rozdiely v intenzite evapotranspirácie jednotlivých porastov vyskytujúcich sa hlavne v poludňajších hodinách jasných letných dní (obr. 4).

Aktuálna koncepcia referenčnej evapotranspirácie teda nedostatočne zohľadňuje vplyv biometrických charakteristík porastu, akými sú napríklad index listovej pokryvnosti, alebo stupeň rozvoja koreňového systému. V súčasnej dobe existuje celý rad experimentálne verifikovaných matematických modelov výmeny tepla a vodnej pary medzi rastlinným porastom a okolitým ovzduším, ktorých výsledky jednoznačne dokazujú nezanedbateľný vplyv biometrických charakteristík porastu na intenzitu evapotranspirácie a môžu byť využité ma simuláciu evapotranspirácie konkrétnych porastov v daných pôdnych a meteorologických podmienkach. V tejto súvislosti sa v posledných dvoch desaťročiach často kládol dôraz na mo-

delovú simuláciu evapotranspirácie porastu s presne špecifikovanými biometrickými charakteristikami za predpokladu, že je porast dostatočne zásobený pôdnou vodou a obsah vody v pôde teda nie je limitujúcim faktorom pre intenzitu evapotranspirácie. Pre takto chápanú evapotranspiráciu porastu sa v anglicky písanej literatúre zaužívalo označenie „drought-free evapotranspiration“. Takáto koncepcia evapotranspirácie sa v posledných rokoch často využíva pri stanovení požiadaviek rastlín na zásobenie pôdnou vodou pre daný porast rastúci v konkrétnych environmentálnych podmienkach.

Záverom možno konštatovať, že definícia pojmu potenciálnej evapotranspirácie nešpecifikuje dosť presne vyparujúci povrch, ani podmienky získavania experimentálnych podkladov. Okrem toho, nie je vypracovaná jednotná metodika stanovenia tejto veličiny, čo vedie k značným rozdielom v stanovených hodnotách potenciálnej evapotranspirácie a spôsobuje nedorozumenia pri ich interpretácii. Tieto problémy sa nevyskytujú pri používaní koncepcie referenčnej evapotranspirácie, ktorá je definovaná jednoznačne a všeobecne akceptovaná metodika jej stanovenia je rozpracovaná do najmenších detailov. Je teda celkom opodstatnené, preferovať referenčnú evapotranspiráciu ako štandard pre posudzovanie evaporačných požiadaviek ovzdušia ako aj pri hodnotení vlahovej potreby porastov poľných plodín.



Obr. 4. Denná dynamika evapotranspirácie štyroch porastov, rastúcich v jednej lokalite počas jasného letného dňa.

Poďakovanie. *Autori ďakujú Grantovej agentúre VEGA (projekt č. 2/5006/25) za finančnú podporu pri riešení uvedeného projektu.*

Použitá literatúra:

[1] ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S. RAES, D., SMITH, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy, 300 p.

[2] BUDYKO, M.I., 1956: Teplovoj balans zemnoj poverchnosti. Leningrad, Gidrometeoizdat, 255 s.
[3] BLANEY, H.F. AND CRIDDLE, W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conservation Service Tech. Paper No. 96, 48 p.
[4] DOORENBOS, J. AND PRUITT, W.O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p.
[5] HARGREAVES, G.H., 1974. Estimation of potential and crop evaporation. Trans. ASAE, 17, 701-704.
[6] HAVLÍK, V., MOŽNÝ, M., 1990: Vliv kapkové závlahy na teplotní režim v porostu kukuřice. Met. zprávy, 43, 42-47.
[7] IRMAK, S., HAMAN, D.Z., 2003: Evapotranspiration: Potential or Reference? ABE 343, Inst. of Food and Agric. Sci., University of Florida., http://edis.ifas.ufl.edu.
[8] JENSEN, M.E. AND HAISE, H.R., 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. J. Irrig. Drainage Div. ASCE, 89,15-41.
[9] JENSEN, M.E., BURMAN, R.D. AND ALLEN, R.G. (Editors), 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. Manual and Reports on Engineering Practice No. 70, Am. Soc. Civil Eng., New York, 360 p.
[10] McKENNEY, M, S., ROSENBERG, N.J., 1993: Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. Agric. and Forest Meteorol., 64, 81-110.
[11] LECINA S., MARTÍNEZ-COB, A., PÉREZ, P.J., VILLALOBOS, F.J., BASELGA, J.J., 2003: Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman–Monteith equation under semiarid conditions. Agric. Water Manage., 60, 181–198.
[12] MATEJKA, F., 1977: A three layer SVAT model for homogeneous land surfaces. Contrib. Geophys. Inst. of SAS, Ser. Meteorol., Vol. 17, 45-53.
[13] MONTEITH, J.L., 1965. Evaporation and Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Cambridge, 19, 205-234.
[14] PENMAN, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London, A193: 120-146.
[15] SMITH, M., ALLEN, G.R., MONTEITH, G.L., PERRIER, A., PEREIRA, L., SEGEREN, A., 1991: Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. UN-FAO, Rome, 54 p.
[16] THORNTHWAITE, C. W., 1948: An approach toward a rational classification of climate. Geograph. Rev., 38, 55-94.

koeficient mezi PET a ETA a chybějící data ETA (včetně nulových nočních hodnot) se do souboru doplní hodnotami PET vynásobenými regresním koeficientem. Toto je důležité při výpočtu průměrů. Pokud chybí pět nulových hodnot, výsledný průměr je výrazně vyšší než má být! Pomocí dalšího programu se udělají denní průměry a vypočítají se denní sumy u veličin, kde to má smysl (např. suma ETA, PET, globální a čisté radiace). Stanovení denních sumárních hodnot má význam především pro zjišťování celovegetačních (popř. za jiné časové období) sum, pro vymezení vhodnosti indikátorů bude pozornost zaměřena na hodnoty okolo poledne v období pěkného počasí, tzn. v období relativní přesnosti zmíněné metody.

4. Závěr a souhrn

Tento příspěvek uvádí podrobnou metodiku výpočtu aktuální evapotranspirace metodou energetické bilance a Bowenova poměru a vybraných indikátorů vodního stresu (Bowenův poměr, rozdíl teplot mezi teplotou povrchu a vzduchu, relativní evapotranspirace) s naznačením řešení určitých problémů, které s sebou zmíněná metoda nese. Je chápán jako první – teoretická část – výzkumu, na kterou bude navazovat praktické posouzení a zhodnocení vhodnosti vybraných indikátorů vodního stresu včetně vymezení platnosti jejich užití pro podmínky ČR.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva zemědělství ČR v rámci etapy výzkumného záměru MZE 0002704901-08 „Vliv rozmístění a využívání trvalých travních porostů na kvalitativní a kvantitativní parametry půdy a vody“

5. Literatura

Allen, R. G., Pereira, L., S., Raes, D.& Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration, FAO irrigation and drainage paper, 56, Rome, 300 s.

Angus D.E. & Watts, P.J. (1984) Evapotranspiration - How good is the Bowen Ratio method ?, Agric. Water. Management, 8, 133 –150.

Baver, L.B., Gardner, W.H. & Gardner, W.R. (1972) Soil physics, 4th issue, John Wiley & Sons, Inc., New York. 498 s.

Erhler, W.L.(1973) Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. Agron. J. 65, 404 – 409.

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Jr., Reginato, R.J. & Hatfield, J.L.(1981) Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteor. 24, 45 – 55.

Jackson, R.D., Reginato, R.J. & Idso, S.B. (1977) Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. Water Resources Res., 13(3), 651 - 656.

Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. & Pinter, P.J., Jr. (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Res., 17(4), 1133 – 1138.

Keener, M.E. & Kircher, P.L. (1983) The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. Agric. Meteor., 28, 339 – 349.

Monteith, J.L.(1973) Principles of Environmental Physics. Edward Arnold (Publishers) Limited, London, 241 s.

Novák V.(1995) Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania, VEDA, vydavatelstvo Slovenskej akadémie ved, Bratislava, 253 s.

Oliva, R.N., Steiner, J.J. & Young, W.C., III (1994) Red Clover Seed Production: I. Crop Water Requirements and Irrigation Timing, Crop Science, 34, 184-192.

Olufayo, A., Baldy, C., Ruelle, P. & Aidaoui, A.(1994) Relationships between water stress indicators and grain yield of irrigated sorghum (Sorghum bicolor (L) Moench), 17th ICID European Regional Conference on Irrigation and Drainage, Varna, Bulgaria, 69 – 75.

Paw U, K.T.(1984) A theoretical basis for the leaf equivalence point temperature. Agric. Meteor., 30, 247-256.

Penman, H.L.(1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London, A193, 120 – 146.

Procházka, J. et al. (2001) Vliv hospodaření na vegetaci a toky energie, vody a látek v malých povodích na Šumavě. Silva Gabreta, 6, 199-224.

Thom A.S. (1975) Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: Vegetation and the atmosphere. Vol. 1. Red. J.L. Monteith, New York, Academic Press, 128 s.
Woodward F.I., Sheehy J.E. (1983) Principles and Measurements in Environmental Biology, Butterworths, London.

Abstrakt

Je uvedena metodika analýzy vodního stresu travního porostu vycházející ze zavedení indikátorů vodního stresu založených na atmosférických meteorologických činitelích a charakteristikách porostu. Za navržené indikátory byly zvoleny denní hodnoty: relativní evapotranspirace (poměr aktuální evapotranspirace ETA a potenciální evapotranspirace podle Penmana), Bowenův poměr (β) a rozdíl mezi maximální teplotou povrchu a vzduchu ve 2 m. Výpočet ETA je odvozen na základě metody energetické bilance a β vycházející z teorie turbulentní difúze a využívající výškový gradient teploty vzduchu a tlaku vodní páry. Vhodnost indikátorů vodního stresu bude posuzována porovnáním jejich hodnot s hodnotami půdního vodního potenciálu. Je popsána přístrojová technika zabezpečující veškerá vstupní data.

Klíčová slova: metoda energetické bilance, Bowenův poměr, relativní evapotranspirace, teplota vegetačního povrchu, teplota vzduchu, vodní stres, travní porost

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 nejvýznamnějších 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.

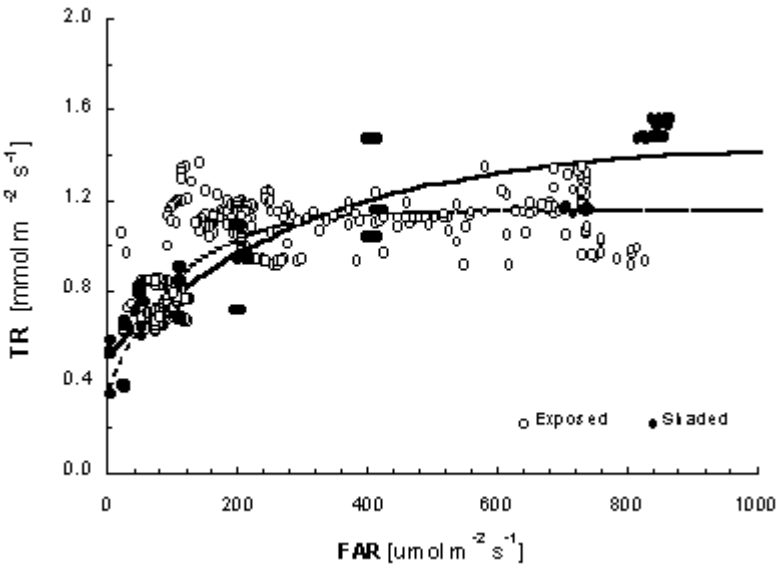
V ekofyziologii lesních dřevin jsou k ocenění složek výparu v současnosti používány nejčastěji metody: i) gazometrické (GEM), ii) termodynamické, a iii) vířivé kovariance (EC).

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 variantách 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_2 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_2 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^{-1}). Popis lokality a porostní plochy uvádí *např.* Pokorný a Šalanská (2001).

Transpirace na úrovni jehlice-letorost byla měřena gazometricky pomocí infračerveného analyzátoru plynu CIRAS-1 (PP Systems, Anglie), a to zvlášť pro slunný a zvlášť stinný typ asimilačního aparátu za různé ozářenosti 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 mechanismus 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 inklinačním 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 ms^{-1}) až po 0,01 (jehlice smrku sitka ve větru 5 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 jedinec 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 transpirační 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 diferenci 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 pře-

počtový aparát resp. kvantifikace LAI slunného a stinného typu listoví a podrobná časová a prostorová mapa FAR ozářenosti slunného a stinného typu listoví. HPV metoda kromě transpirace zachycuje pohyb vody v rostlině způsobený dosycováním pletiv vodou. 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., Farquahar, 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. Measurments of CO2 assimilation by plants in the field and the laboratory. Photosynthesis and Production in a Changing Environment. A Field and Labortory Manual. D. O. Hall, J. M. O. Scurlock, H. R. Bolhar-Nordenkampf, 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. Fotosynteticky model porostu rákosu (Phragmites sommunis 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 deň s medzinárodnou účasťou. Transport vody, chemikálií a energie v systéme poda – rastlina – atmosféra.“ (Bratislava 16.11. 2000)

Šalanská, P., Pokorný, R., 2001. Sap flux of Noprway 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 CO2 concentration in sun and shade shoots of Norway spruce. Photosynthetica 37(3): 433-445.

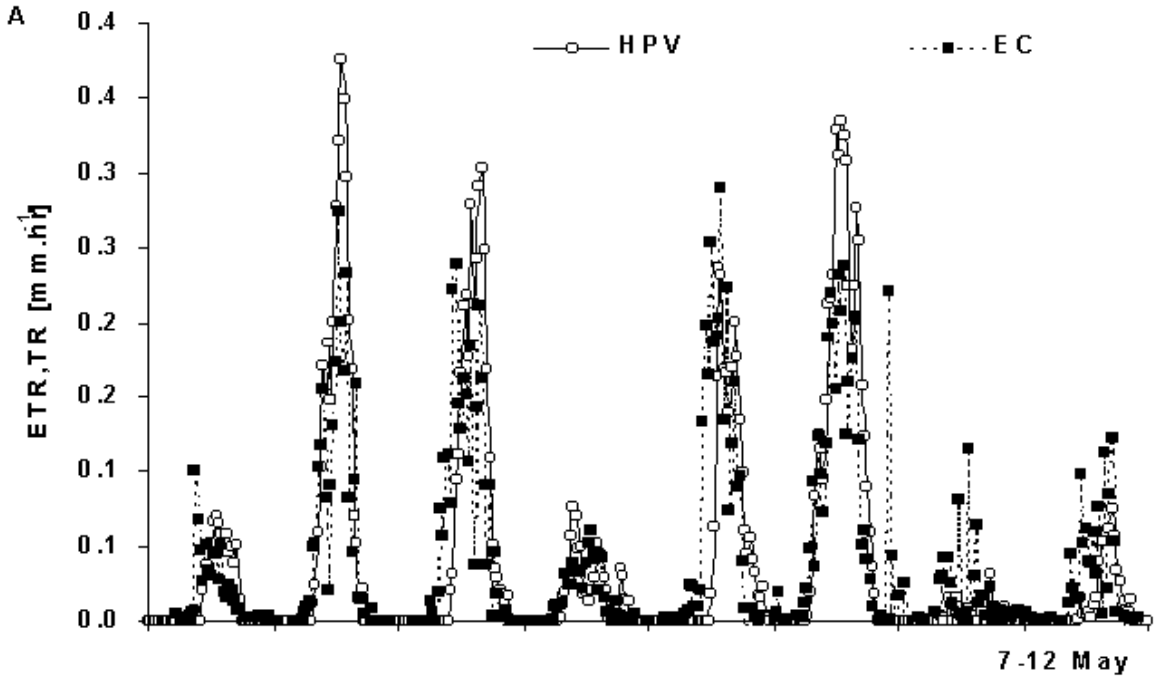
Vertessy, R.A., Benyon, R.G., O'Sullivan, S.K., Gribben, P.R., 1995. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. Tree Physiol., 15, 559-567.

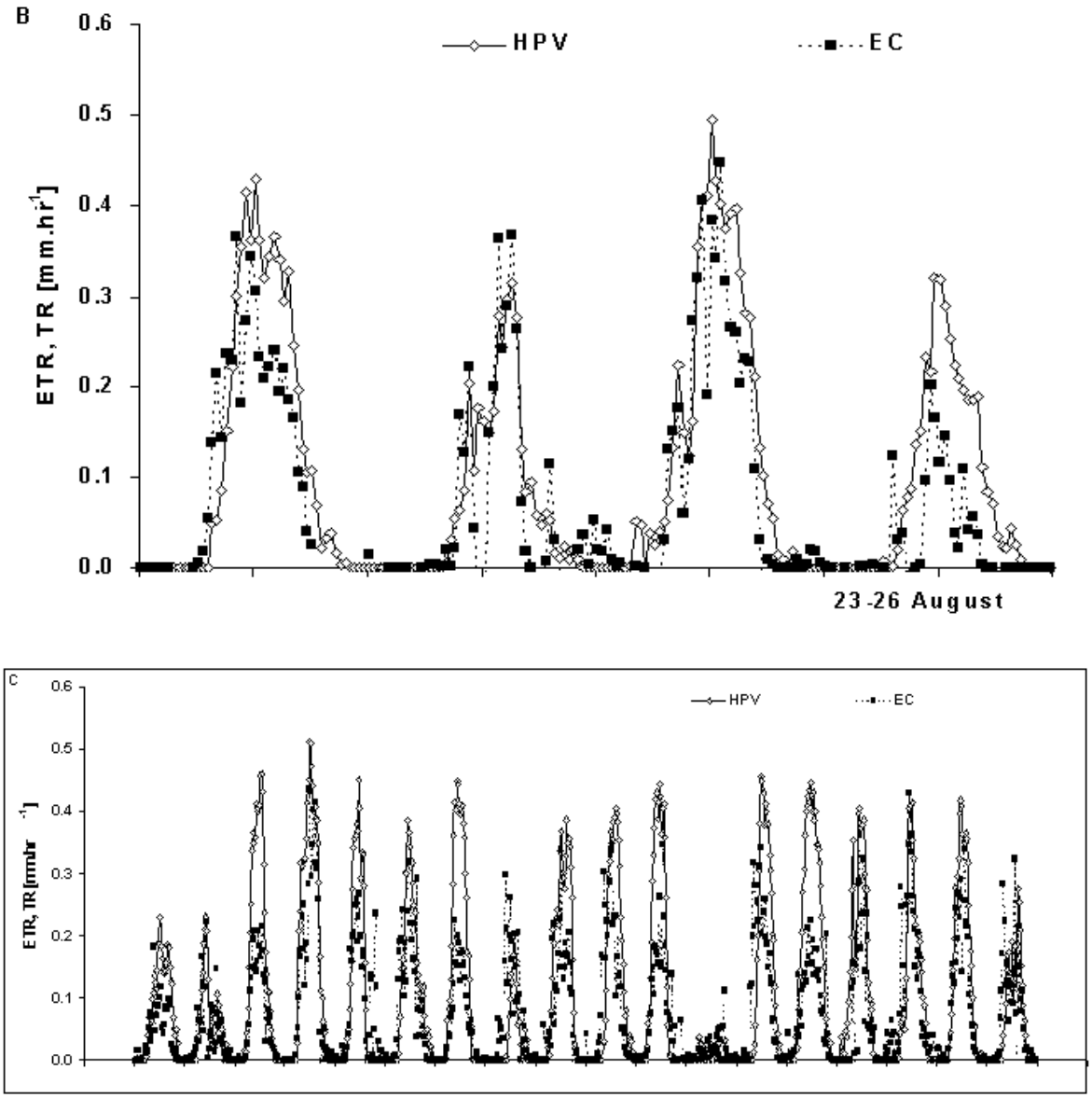
Wilson, K. B., Hanson, P. J., et al. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. Agricultural and Forest Meteorology 106(2): 153-168.

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.

STANOVENIE EVAPOTRANSPIRÁCIE SMREKOVÉHO PORASTU METÓDOU S DENDROMETRICKÝM PRÍSTUPOM

Katarína Střelcová, Jiří Kučera

Summary
Results of spruce stand transpiration evaluation in changing environmental conditions are presented in this paper. Sap flow of model spruce trees was estimated by direct, non-destructive and continuous measurements by tree-trunk heat balance method (THB) with internal heating and sensing of temperature. The model spruce trees transpiration as well as approximate model spruce stand transpiration were estimated on the basis of these measurements using dendrometrical approach. Experimental research works were carried out in natural spruce forest in upper altitudinal zone for spruce occurrence in National nature reserve Zadná Poľana in part Predná Poľana (1347 m asl.) in the Central Slovakia. Sap flow velocity was measured from June 14th to July 26th 2002 on five spruce trees. Stand evapotranspiration estimated during this period reached 138 mm, precipitation was 81 mm. Relation of spruce sap flow velocity to microclimate factors during this period was close, mainly to global radiation and saturation deficit.

Key words: dendrometrical approach, sap flow, thermal heat balance method, meteorological factors, natural spruce forest

Úvod

Pojem evapotranspirácia lesných ekosystémov v sebe zahŕňa tri dôležité zložky. Sú to: neproduktívny (fyzikálny) výpar, pozostávajúci z výparu zachytenej zrážkovej vody najmä v korunách lesných drevín - *intercepcia* a výparu z pôdy - *evaporácia* a produktívny (fyziologický) výpar z lesných drevín, krovín a bylín, tj. výdaj vody rastlinami prevažne cez prieduchy listov a ihlíc - *transpirácia*. Vzhľadom na variabilitu fyzicko-geogafických podmienok a zrážkových úhrnov našej krajiny je rozdelenie evaporanspirácie na jej území nerovnomerné – z južného Slovenska sa vyparí až 95% zrážok, kým z horských oblastí len asi 30% ročného úhrnu zrážok. Napr. v lokalite Žihárec, ktorá reprezentuje najteplejšiu oblasť Slovenska, sa za rok vyparí z vodnej hladiny priemerne 740 mm vody – s extrémami 636 a 844 mm (PETROVIČ 1993). Priemerná hodnota výparu z vodnej hladiny v najteplejšom mesiaci (júli) je 122 mm s priemerným denným úhrnom 4 mm. Z porastu trávy v Hurbanove sa za rok vyparí priemerne 474 mm vody, z lesa až 527 mm (TOMLAIN 1980, 1991). Intenzitu evapotranspirácie ovplyvňujú podľa NOVÁKA (2001) predovšetkým dva faktory: príkon energie potrebnej na fázovú premenu a dostatok (alebo nedostatok) vody. Asi 25% intenzity evapotranspirácie môže byť ovplyvnených vlastnosťami prízemnej vrstvy atmosféry a vyparujúceho povrchu.

Pri dostatku vody je sezónny priebeh riadený predovšetkým chodom príkonu energie k vyparujúcemu povrchu a má približne sínusoidný priebeh. Pri nedostatku vody v pôde je tento priebeh modifikovaný obsahom vody v pôde. Denné chody evapotranspirácie v podmienkach dostatku vody v pôde spravidla určujú denné chody tokov energie, s maximom okolo poludnia a s nízkymi intenzitami evapotanspirácie v noci. Ak je pôdna voda limitujúcim faktorom, intenzita evapotranspirácie klesá a závisí od dostupnosti vody v pôde. V súčasnosti pravdepodobne ako dôsledok globálnych klimatických zmien sme čoraz častejšie svedkami extrémnych poveternostných a klimatických javov, ktoré výrazne ovplyvňujú hydrologický cyklus a zásobovanie vodou. V poslednom desaťročí došlo k zvýšenému výskytu povodní (roky 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2004), ale aj extrémne teplých a suchých periód (roky 1992-1994, 1998, 2000, 2003), kedy došlo k obmedzeniu zásob fyziologicky prístupnej

vody v pôde. Je veľmi pravdepodobné, že nedostatok vody v pôde spolu s vysokou imisnou záťažou a nepôvodnosťou sa podpísali pod chradnutie smrekových porastov v mnohých oblastiach Slovenska. V najbližších rokoch sa predpokladá vyššia frekvencia vegetačných období s nižšími úhrnmi zrážok zapríčinená globálnym otepľovaním atmosféry (MINĎÁŠ a ŠKVARENINA 2003), čo bude mať za následok zmenu bioklimatických podmienok pre výskyt jednotlivých druhov drevín s následným ústupom smreka a expanziou buka v 4. a 5. lesnom vegetačnom stupni (ŠKVARENA *et al* 2004).

Podiel evapotranspirácie na vodnej bilancii povodia, či ekosystému závisí prevažne od: 1) klimatických pomerov stanovišťa, tj. od množstva a rozloženia zrážok, vlhkosti pôdy a od tzv. evaporačných požiadaviek ovzdušia, ktoré predstavujú spolupôsobenie viacerých meteorologických prvkov (teplota, vlhkosť, prúdenie a tlak vzduchu), 2) vegetačného krytu a jeho vlastností, nakoľko výpar z vegetácie (transpirácia) je určovaný nielen fyzikálnymi zákonitosťami, ale i anatomickými, morfologickými a fyziologickými vlastnosťami rastlín. Množstvo vody vyparené z lesných porastov je určované najmä drevinovým zložením, vekom, štruktúrou i zdravotným stavom porastov, tj. vzájomnými vzťahmi medzi lesným porastom a okolitým prostredím.

Pri hodnotení vplyvu lesov na evapotranspiráciu a bilanciu vody v povodí nie sú dôležité absolútne hodnoty, ale porovnanie množstva vyparenej vody z lesa, trávnatých plôch a plôch s poľnohospodárskymi plodinami. Nakoľko priame meranie evapotranspirácie z týchto území je z metodického hľadiska náročné, až nemožné, na jej stanovenie sa využívajú nepriame metódy výpočtu. Výsledky meraní transpirácie pomocou merania transpiračného prúdu v jednotlivých stromoch je možné extrapolovať na celý porast a tak získať odhad evapotranspirácie z lesného územia pri zanedbaní výparu z pôdy, ktorý je pri zapojenom poraste minimálny (ČERMÁK a KUČERA 1990, STŘELCOVÁ *et al.*, 2004).

Metodické otázky stanovenia výparu z lesa

Získanie exaktných údajov o výpare z drevín (transpirácii), poprípade celých lesných porastov je metodicky i technicky náročné. Výber vhodnej metódy navyše komplikuje rôznorodosť vnútorných i vonkajších činiteľov, ktorými je transpirácia ovplyvňovaná. Pre stanovenie transpirácie drevín a porastov bolo vyvinuté veľké množstvo metód za pomoci ktorých sa stanovuje:

- transpirácia jednotlivých asimilačných orgánov, príp. vetiev,
- transpirácia jednotlivých stromov,
- transpirácia celých lesných porastov.

KAUFMANN A KELLIHER (1991) odporúčajú pri výbere metódy na stanovenie transpirácie zohľadniť tieto otázky:

- V akom čase sú požadované údaje (rok, deň, hodina, alebo okamžite)?
- Je výsledok požadovaný podľa druhov rastlín?
- Sú potrebné údaje podľa rôznych úrovní v poraste, alebo pre jednotlivé stromy?
- Aké je prístrojové vybavenie, náročnosť na čas a prácu?

Podľa nášho názoru je dôležité zodpovedať i ďalšiu otázku:

- Na akej úrovni zovšeobecnenia chceme pracovať (strom, porast, povodie, región)?

Zodpovedanie týchto otázok môže pomôcť pri určení najvhodnejšej metódy, ktorá poskytne potrebné údaje s požadovanou presnosťou a spoľahlivosťou.

Porovnanie metód stanovenia evapotranspirácie porastov je komplikované, pretože každá metóda sa vyvinula na iný účel. Nakoľko žiadna z metód stanovenia nie je ideálna, jej výber vyžaduje v každom prípade určitý kompromis. Dostupné metódy sú často nepriame a neposkytujú údaje v požadovanom časovom intervale a na potrebnej ploche. Získané výsledky sú zaťažené chybou z titulu započítania ostatných foriem výparu. Väčšina z metód je náročná na vstupné údaje a meraciu techniku. Výber vhodnej metódy teda nezávisí len od zámeru experimentu a druhu rastlín, ale aj od požadovaných výsledkov v priestore a čase, dostupného prístrojového vybavenia, pracovných síl a finančných prostriedkov.

Využitie metódy s dendrometrickým prístupom podľa Čermáka a Kučeru pre výpočet výparu modelového lesného porastu

Aktuálnu transpiráciu na hektár modelového smrekového porastu (Q_{wt}) sme odvodili na základe meraných hodnôt transpiračného prúdu metódou THB na modelových stromoch smreka vo vegetačnom období v roku 2003 (tab. 2) v lokalite Predná Poľana (tab. 1) a početnosti stromov v jednotlivých hrúbkových triedach v poraste (podľa meraní SANIGU v roku 2004 – ústne podanie), výpočtom podľa ČERMÁKA a KUČERU (1990), ktorý je uvádzame v tejto práci podrobnejšie vzhľadom na zameranie seminára.

Metóda s dendrometrickým prístupom (ČERMÁK a KUČERA 1990) využíva pri stanovení transpirácie porastu priamo merané hodnoty transpiračného prúdu na úrovni celých stromov. Autori metódy (1990) zastávajú názor, že pri výpočtoch transpirácie porastov je výhodnejšie použiť kontinuálne nedeštrukčné merania transpiračného prúdu na vybratých vzorníkoch stromov reprezentujúcich porast. Za pomoci vhodných dendrometrických parametrov je možné údaje reálne namerané na vzorníkoch prepočítať na porast, prípadne povodie. Pri extrapolácii ("upscaling" z anglickej literatúry) transpirácie zo vzorníkov na celý porast, alebo jednotku plochy porastu je potrebný starostlivý výber skupiny vzorníkov stromov reprezentujúcich daný porast. V dospelom homogénnom poraste by táto skupina mala mať minimálne 3, vhodnejšie je 6–15 vzorových stromov. Počet vzorníkov závisí od variability porastu a požadovanej presnosti výsledkov (SWANSON 1970, ČERMÁK 1989a, b, ČERMÁK a KUČERA 1990). Vzorové stromy by mali byť vyberané zohľadnením rozdelenia stromov podľa vybraného vhodného biometrického parametra, s prihliadnutím na zdravotný stav stromov, ktorý sa obyčajne pri modelovaní transpirácie porastu prehliada.

Pri výbere skupiny vzorníkov za použitia biometrických parametrov je otázne, či je správne posudzovať správanie celého porastu podľa skupiny vzorníkov. Tento problém sa môže vyskytnúť hlavne vtedy, ak stanovujeme transpiráciu porastu so stromami rôzneho sociálneho postavenia. Stromy s rozdielnym sociálnym postavením sa okrem iného líšia i množstvom a distribúciou asimilačných orgánov. ČERMÁK (1989a, b) udáva, že najväčšie, dominantné stromy transpirujú 2/3 z celkového množstva a najmenšie, potlačené stromy len asi 1/10. Za účelom lepšieho využitia meracej techniky inštalovanej na vzorníkoch v poraste je preto výhodnejšia inštalácia nie podľa početností stromov v triedach, ale podľa množstva, ktoré stromy predstavujú podľa biometrického parametra použitého pri extrapolácii údajov (ČERMÁK a MICHÁLEK 1991). ČERMÁK (1989a, b) testoval sedem biometrických parametrov pri prepočtoch transpirácie (transpiračného prúdu) meraného na jednotlivých vzorníkoch duba na jednotku plochy porastu lužného lesa. Išlo o kruhovú základňu, objem hrubiny, horizontálnu projekčnú plochu korún a parametre asimilačmých orgánov: projekčnú plochu, hmotnosť sušiny, hmotnosť asimilačných orgánov a autorom definovanú solárnu ekvivalentnú plochu asimilačných orgánov (A_s). Použitie A_s pri prepočtoch transpirácie vedie v porovnaní so všetkými ostatnými testovanými parametrami k najpresnejším výsledkom.

Vlastné prepočty transpirácie pokusných stromov (Q_{wt}) na jednotku plochy porastu (Q_{ws}) boli robené dvoma spôsobmi: jednak na základe jednoduchého pomeru testovaných biometrických parametrov stromov (B_t) a porastu (B_s) a jednak na základe regresných rovníc vzťahu vzťahu Q_{wt} a B_t. V prvom prípade ide o výpočet za pomoci vzťahu:

$$Q_{ws}=Q_{wt}(B_s/B_t)$$

v druhom prípade bola pre odvodenie transpirácie použitá rovnica:

$$Q_{ws} = \sum_{1}^{k} n_i . Q_{wt_i}$$

kde: k je počet hrúbkových tried druhu v danom poraste, n_i je počet stromov v jednotlivých hrúbkových triedach, pričom

$$Q_{wti}=a_0+a_1.B_{ti},$$

kde: Q_{wti} je transpirácia priemerného stromu určitej hrúbkovej triedy, a_0, a_1 sú členy regres-

nej rovnice príslušného biometrického parametra a B_{ti} je priemerná hodnota biometrického parametra každej hrúbkovej triedy.

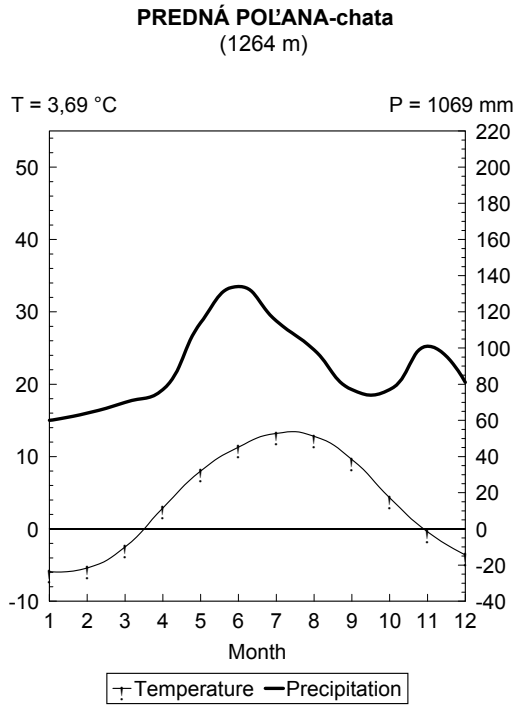
Tento dendrometrický prístup k stanoveniu transpirácie v kombinácii s meraniami transpirácie na úrovni celých stromov (metódou tepelnej bilancie podľa ČERMÁKA *et al.*, 1973) namiesto modelovania procesu transpirácie za pomoci mnohých premenných sa javí byť výhodnejší a jednoduchší pri prepočte ("upscaling") na celý porast. Výsledky získané priamym meraním transpirácie môžu byť tiež použité pri testovaní platnosti fyziologických modelov založených na meraniach na asimilačných orgánoch, alebo pri sledovaní vodného stresu stromov.

Tab. 1: Charakteristika výskumného objektu Predná Poľana

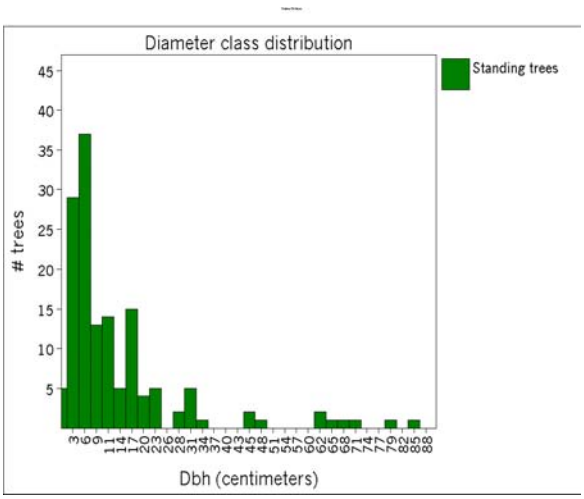
Miesto	**Predná Poľana (stožiar) (porast 530a)**
Zemepisná dĺžka	19° 28‘
Zemepisná šírka	48° 37‘
Nadmorská výška	1347 m n. m.
Expozícia	južná
Lesná správa	Očová
Lesný závod	Kriváň
Sklon	5 – 25 %
Reliéf terénu	vrcholová roveň, mierny svah, balvanitý
Geologický podklad	vulkanity
Pôdne pomery	andozeme
Priemerná ročná teplota	3,5 – 4,0 °C
Priemerný ročný zrážkový úhrn	900 – 1100 mm
Klimatická oblasť	chladná, horská
Lesný vegetačný stupeň	7
Klimageografický typ	Horská klíma, subtyp studená
Skupiny lesných typov	*Sorbeto – Piceetum*
	Acereto – Piceetum
Priemerný vek porastov (530 a)	190 rokov
Zastúpenie drevín	Sm – 93 %, bk – 4 %, jr – 3 %

Biometrická charakteristika meraných stromov je uvedená v tabuľke 2. Klimadiagram skúmanej lokality je uvedený na obrázku 2. Výpar z pôdy a prízemnej vegetácie sme v zapojenom poraste považovali z hľadiska mesačnej a ročnej bilancie za zanedbateľný. Transpiráciu priemerného stromu určitej hrúbkovej triedy (Q_{wti}) sme vypočítali zo scalingovej krivky vyjadrenej regresnou rovnicou, ktorá je uvedená na obrázku 4.

Na obrázku 5 sú výsledky odhadu transpirácie modelového smrekového porastu na základe reálnych meraní transpiračného prúdu na piatich modelových stromoch a porovnanie takto získaných hodnôt s meteorologickými charakteristikami. Za sledované obdobie (31 dní) porast vyparil 138 mm vody pri zrážkach 81 mm. Je zrejmé, že pre transpiráciu bola využitá voda v pôde akumulovaná v jarnom období. Denné úhrny transpirácie smrekového porastu sú ovplyvnené dennou sumou globálneho žiarenia (GR) a sýtostným doplkom (dE), ktorý integruje vplyv teploty a vlhkosti vzduchu.



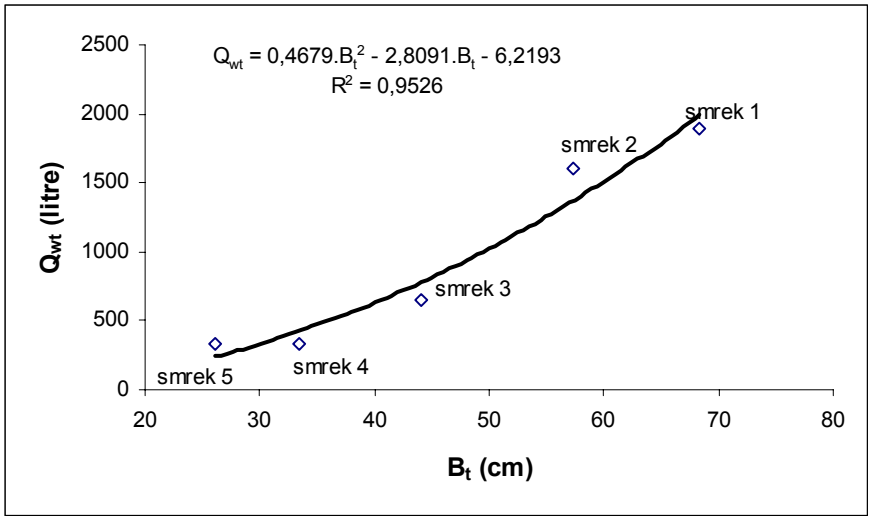
Obr. 2: Klimadiagram výskumného objektu Predná Poľana (podľa meraní SHMÚ pri horskom hoteli Poľana)



Obr. 3: Histogram hrúbkových početností na výskumnej ploche Predná Poľana

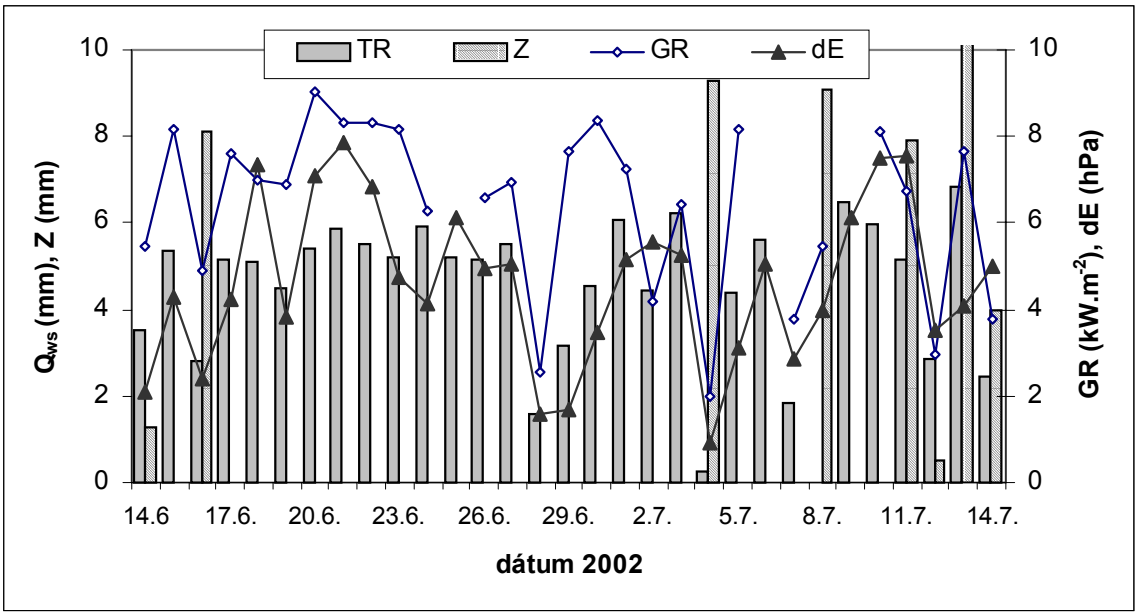
Tab. 2: Biometrické charakteristiky modelových stromov smreka

Strom	Obvod$_{1,3}$ (cm) bez kôry	Hrúbka d $_{1,3}$ (cm)	Výška (m)
smrek 1	198,7	68,5	28
smrek 2	172,5	57,3	27
smrek 3	130,2	44	24
smrek 4	99,9	33,4	24
smrek 5	78,9	26,1	23



Obr. 4: Scalingová regresná krivka pre výpočet transpirácie modelového smrekového porastu (Q_{ws}) na základe početnosti v jednotlivých hrúbkových triedach (B_t je priemerná hodnota hrúbky kmeňa $d_{1,3}$ v hrúbkovej triede) a meraných hodnôt transpiračného prúdu na piatich modelových smrekoch v období 14. 6. 2002 – 26. 7. 2002

Výsledky odhadu transpirácie bukového porastu sme publikovali v prácach STŘELCOVÁ a MINĎÁŠ 1998, STŘELCOVÁ *et al.* 2004. Tieto sme porovnávali s potenciálnou evapotranspirácoiou trávneho porastu počítanou podľa TÜRCA (1961). Odhad denných úhrnov transpirácie porastu je počas niektorých dní nižší než potenciálna evapotranspirácia podľa Türca (PET), počas suchého a teplého počasia však hodnoty počítané z meraní transpiračného prúdu (T) presahujú hodnoty PET. Ďalší nesúlad medzi PET a T je počas dní so zrážkami počas väčšej časti dňa, kedy sú hodnoty PET v niektorých prípadoch relatívne vysoké, zatiaľ čo T je nulová. Príčina je v skutočnosti, že pri výpočte podľa Türca sa neuvažuje so zrážkami a s nimi súvisiacou vysokou vlhkosťou vzduchu, ktorá reálny výpar významne znižuje. Pri reálnych meraniach sa inhibičný účinok zrážok výrazne prejavuje poklesom transpiračného prúdu k nulovým hodnotám. Najväčší rozdiel medzi PET a T je v máji, kedy je potrebné zobrať do úvahy skutočnosť, že reálna transpirácia bola limitovaná stupňom vývinu asimilačného aparátu. Pri plne vyvinutých listoch bukov (jún, júl a august) sú hodnoty T relatívne vysoké v porovnaní s PET. Túto situáciu možno vysvetliť veľkou odparovacou plochou bukového porastu (index listovej plochy LAI = 5,89) v porovnaní s trávnym porastom, s ktorým sa počíta pri výpočte PET podľa Türca. Navyše nad lesným porastom dochádza k intenzívnej turbulentnej výmene vodnej pary v hraničnej vrstve atmosféry, ktorá transpiráciu zvyšuje a pri empirickom výpočte evapotranspirácie sa s ňou neuvažuje. V júli je úhrn potenciálnej evapotranspirácie (PET) blízky zrážkovému úhrnu (Z). V tomto období stromy čerpali zásoby vody z pôdy akumulované v jarnom období, čo malo za následok zníženie potenciálu pôdnej vody v auguste na hodnotu –500 až –800 hPa, čo je podľa PAPRITZA *et al.* (1991) hodnota, pri ktorej by mohlo dôjsť k obmedzeniu transpirácie buka.



Obr. 5: Vypočítané hodnoty transpirácie smrekového porastu Qws v lokalite Predná Poľana pomocou scalingovej regresnej krivky pre obdobie maximálnej fyziologickej aktivity porastu 14.6. – 14.7. 2002 pri dostatočnej zásobe pôdnej vody (objemová vlhkosť 58 - 84 % za uvedené obdobie v profile pôdy 0-50 cm) a hodnoty meteorologických prvkov: zrážky Z, denné sumy globálnej radiácie GR a sýtostný doplnok dE, ktoré v prípade dostatočnej zásoby pôdnej vody určujú množstvo vody vyparenej porastom

Záver

Zovšeobecnením našich meraní a výpočtov, ako aj podľa iných autorov (TOMLAIN 1993, ŠÚTOR 1998, NOVÁK 2001) môžeme konštatovať, že evapotranspirácia lesov v porovnateľných podmienkach je asi o 10 – 15% vyššia ako trávneho porastu. Spôsobuje to predovšetkým vysoká intercepcia lesných porastov (fyzikálny výpar) a vyššia transpirácia (fyziologický výpar) z dôvodu niekoľkonásobne väčšej listovej plochy na 1 m^2 (vysoký LAI – leaf area index). Výsledky publikované viacerými autormi, ako aj naše, o množstve vyparenej vody z lesných cenóz sú vo všetkých prípadoch kvalifikovaným odhadom, vzhľadom na metodickú náročnosť hydrologických experimentálnych meraní, obtiažne zovšeobecňovanie získaných výsledkov, ako aj výnimočnú zložitosť a rôznorodosť lesných ekosystémov. Výpočet transpirácie celého lesného porastu na základe meraní transpiračného prúdu však považujeme za reálny odhad, nakoľko sa pri ňom využívajú hodnoty transpiračného prúdu merané kontinuálne počas celého vegetačného obdobia na modelových vzorníkoch. Nedostatok vidíme v tom, že pri tejto metóde nie je možné započítať výpar z pôdy a z intercepcie, čiže tzv. neproduktívny výpar, čo môže výsledok mierne podhodnotiť. Z dôvodu častého poškodzovania lesných porastov suchom (extréme teplé a suché periódy v rokoch 1992-1994, 1998, 2000, 2003, kedy došlo k obmedzeniu zásob fyziologicky prístupnej vody v pôde), by sa mal stať výskum transpirácie a vodnej bilancie drevín a lesných porastov neoddeliteľnou súčasťou monitorovania zdravotného stavu lesa, keďže voda ako jedna z najdôležitejších zložiek lesných ekosystémov môže významným spôsobom ovplyvňovať fyziologické procesy v lesných ekosystémoch a tým aj ich zdravotný stav a celkovú produkciu biomasy.

Poďakovanie

Táto práca bola čiastočne podporená finančnými prostriedkami z vedeckých projektov č. 1/2357/05, 1/4159/04 a 1/0635/03 Komisie VEGA ekologické vedy.

Použitá literatúra

ČERMÁK, J., DEML, M., PENKA, M., 1973: A New Method of Sap Flow Rate Determination in Trees. *Biologia Plantarum* 15:171-178.

ČERMÁK, J., 1989a: Solar Equivalent Leaf Area: an Efficient Biometrical Parameter of Individual Leaves, Trees and Stands. *Tree Physiology* 5:269-289.

ČERMÁK, J., 1989b: Praktický funkční parametr asimilačního aparátu stromů a porostů - solární ekvivalentní plocha listů. *Lesnictví* 35:695-705.ČERMÁK, J., NADEHŽDINA, N., 1998: Brief review of present techniques used for sap flow measurements in intact plants. *In:* Proceedings from 4th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. IUFRO Publications, Publishing house of Mendel University: 4-11.

ČERMÁK, J., KUČERA, J., 1990: Scaling up Transpiration Data between Trees, Stands and Watersheds. *Silva Carelica* 15:101-120.

ČERMÁK, J., MICHÁLEK, J., 1991: Výběr stromových vzorníků v lesních porostech na základě "úhrnových kvantilů". *Lesnictví* 37:49-60.

KAUFMANN, M. R., KELLIHER, F. M., 1991: Estimating Tree Transpiration rates in Forest Stands. *In*: J.P. Lassoie, T.M. Hinckley (*eds*.), Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology. CRC Press, Boca Raton, Fl.:117-140.

MINĎÁŠ, J., ŠKVARENINA, J. (*eds*.), 2003: Lesy Slovenska a globálne klimatické zmeny. EFRA Zvolen, Lesnícky výskumný ústav Zvolen. ISBN 80-228-1209-9: 44-49.

NOVÁK, V., 2001: Evapotranspirácia a jej rozdelenie na území Slovenska. *Životné prostredie* 35: 133-137.

PAPRITZ, A., SCHNEEBELI, M., ATTINGER, W., FLÜHLER, H., 1991: Schnelle Transportvorgänge im Wurzelrum. Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz. Ergebisse aus dem Nationalen Forschugsprogamm 14, Band 6, Belastung von Waldböden. VDF, Zürich: 33—96.

PETROVIČ, P., 1993: Vertical hydrological balance in Žihárec for the period 1961-1990. *In*: Becker, A., Sevruk, B., Lapin, M. (*eds.):* Evaporation, Water Balance and Deposition, Proc. of Symposium on Precipitation and Evapotranspiration. Bratislava: 211-218.

SWANSON, R. H., 1970: Sampling for Direct Transpiration Estimates. *Journal of Hydrology* 9:-77.

ŠÚTOR, J., 1998: Hydrologické problémy lesných ekosystémov. *Lesnícky časopis* 44: 475-483.

STŘELCOVÁ, K., MINĎÁŠ, J., 1998: Denná dynamika transpiračného prúdu buka lesného vo vzťahu k meteorlogickým podmienkam. *In*: Atmosférická depozícia a ekofyziologické procesy v ekosystémoch. Škvarenina et al. (*eds*.): 209–213.

STŘELCOVÁ , K., MATEJKA, F., KUČERA J., 2004: Beech stand transpiration assessment – two methodical approaches. Ekológia 22, Supplement 2/2004: 147-162.

ŠKVARENINA, J., KRIŽOVÁ, E., TOMLAIN, J., 2004: Impact of the climate change on the water balance of altitudinal vegetation stages in Slovakia. *Ekológia (Bratislava*) 23, Supplement 2/2004: 13-29.

TOMLAIN, J., 1980: Výpar z povrchu pôdy a jeho rozloženie na území ČSSR. *Vodohohospodársky časopis* 28: 170-205.

TOMLAIN, J., 1991: Waldevapotanspiration und ihre Verteilung auf dem Territorium der ČSSR. *Acta Meteorologica, Universitatis Comenianae, Ser. Meterologia*, 20: 3-19.

TOMLAIN, J., 1993: Distribution of evapotranspiration on the territory of Slovakia. *In:* Becker, A., Sevruk, B., Lapin, M. (*eds*.): Evaporation, Water Balance and Deposition, Proc. of Symposium on Precipitation and Evapotranspiration. Bratislava: 211-218.

TÜRC, L.,1961: Évaluation des besoins en eau d'irrigation evapotranspiration potenielle. *Annales Agronomie* 12:13-49.

VÝVOJ EVAPOTRANSPIÁCIE POČAS VEĽKÉHO VEGETAČNÉHO OBDOBIA VO VÝŠKOVOM PROFILE SLOVENSKA Z POHĽADU MOŽNÉHO VÝVOJA KLÍMY

Bernard Šiška, František Špánik, Dušan Igaz

Summary

Dependence of evapotranspiration during long vegetative period on altitude profile of Slovakia from the point of view of possible climate impacts

On the base of climatic data from 27 climatic stations on the territory of Slovak republic potential and actual evapotraspiration as well as evapotranspiration deficit are evaluated in dependence on altitude profile for period of years 1951-1980 (reference period of years), time horizons of years 2010, 2035 and 2075.

Evapotranspiration parameters are evaluated for vegetative period that is defined by occurrence of daily mean air temperature t≥5°C. Significant changes in evapotranspiration were calculated especially towards higher altitude in more distanced time horizons.

Key words: evapotranspiration. Slovakia, altitude

Úvod

Evapotranspirácia ako významná zložka vodnej bilancie prostredia je vhodným ukazovateľom pre posúdenie vlahových pomerov územia v časopriestorovom vyjadrení. Zatiaľ čo potenciálna evapotranspirácia môže byť využitá ako ukazovateľ pre stanovenie potreby vody pri maximálnej produktivite ekosystémov, presné stanovenie aktuálnej evapotranspirácie môže viesť k veľmi presným stanoveniam produkcie biomasy (STEINER *et al*., 1986, NOVÁK, VIDOVIČ, 1985) a aj v otázkach modelovania je prospešné sa touto otázkou zaoberať detailnejšie. V podmienkach Slovenskej republiky boli vzťahy medzi produkciou biomasy a evapotranspiráciou rozpracované pre niektoré poľné plodiny ako ozimná pšenica, cukrová repa a kukurica (VIDOVIČ, NOVÁK 1985, ŠIŠKA, 1992, HUZULÁK, J., MATEJKA, F., 1985)

V porovnaní so zrážkami bola potenciálna evapotranspirácia tiež využitá ako ukazovateľ zavlaženia v krajinnom priestore (KURPELOVÁ, COUFAL, ČULÍK, 1975), resp. kritérium suchosti územia (TOMLAIN, 1997).

Evapotranspirácia je podmienená v priestore predovšetkým energetickou bilanciou aktívneho povrchu a podmienkami turbulentného prenosu vodnej pary z porastu do atmosféry. Z hľadiska rastlinného krytu a pôdneho prostredia je podstatná tiež dostupnosť vody k vyparovaniu.

Cieľom tohto príspevku je vyhodnotiť zmeny úhrnov potenciálnej a aktuálnej evapotranspirácie, ako aj evapotranspiračného deficitu vo výškovom profile Slovenska z pohľadu možného vývoja klímy počas veľkého vegetačného obdobia.

Materiál a metódy

Modelový výpočet mesačných úhrnov potenciálnej (E_0), aktuálnej evapotranspirácie (E) a evapotranspiračného defictu (E_0-E), vlhkosti pôdy ($\overline{W}$) sa realizovali spoločným riešením rovníc energetickej a vodnej bilancie povrchovej vrstvy pôdy (TOMLAIN, 1978).

Potenciálna evapotranspirácia bola stanovená rovnicou prenosu vodnej pary v atmosfére, teplota vyparujúceho povrchu z rovnice energetickej bilancie (Tomlain, 1979) a aktuálna evapotranspirácia podľa vzťahu

$$E = E_0 \frac{\overline{W}}{W_o}, \qquad (1)$$

kde $\overline{W}$ je priemerná vlhkosť najvyššieho horizontu pôdy (bola stanovená z rovnice vodnej bilancie) a W_0 je kritická vlhkosť pôdy.

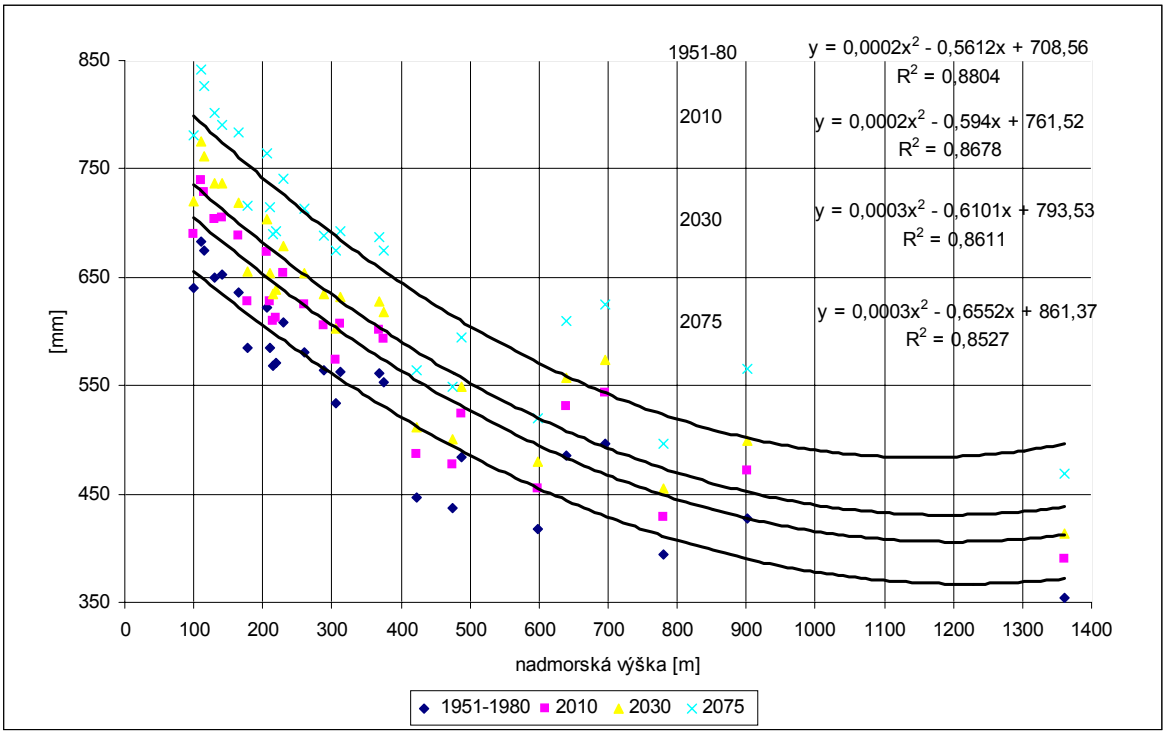
Z rovnice (1) je zrejmé, že pri $\overline{W} < W_0$ pomer $\frac{E}{E_o} = \frac{\overline{W}}{W_o}$, t.j. $\frac{E}{E_o}$ je funkciou vlhkosti pôdy. Vstupnými údajmi modelu, ktorý bol rozpracovaný na Katedre meteorológie a klimatológie Fakulty matematiky, fyziky a informatiky UK v Bratislave, sú teplota a vlhkosť vzduchu, oblačnosť, atmosferické zrážky a počet dní so snehovou pokrývkou, čo sú meteorologické prvky pravidelne merané v sieti meteorolgických staníc.

Prehodnotenie vývoja ukazovateľov evapotranspirácie boli využité meteorologické údaje z 27 klimatických staníc, ktoré reprezentujú územie v priestore Slovenska. Veľké vegetačné obdobie je limitované nástupom a ukončením priemernej dennej teploty vzduchu t≥5°C.

Výsledky a hodnotenie

V predloženej práci je graficky a štatisticky analyzovaná zmena úhrnov potenciálnej (E_0) a aktuálnej evapotranspirácie (E), ako aj evapotranspiračného deficitu (E_0–E) za veľké vegetačné obdobie (VVO; t ≥ 5,0 °C) v závislosti od nadmorskej výšky poľnohospodársky využívanej krajiny Slovenska k rokom 1951 – 1980 a k časovým horizontom rokov 2010, 2030 a 2075.

Obr. 1 Úhrny E_0 za VVO referenčného časového radu rokov 1951-1980 a k časovým horizontom rokov 2010, 2030 a 2075



Zmena úhrnu potenciálnej evapotranspirácie (E_0 v mm)

Potenciálnou sa chápe maximálne možná evapotranspirácia pri daných meteorologických podmienkach a dostatočne vlhkej povrchovej vrstve pôdy. Rozloženie E_0 podľa nadmorskej výšky na Slovensku vyplýva z obr. 1. Závislosť E_0 od nadmorskej výšky k uvedeným časovým horizontom je matematicko-štatisticky vysoko preukazná; funkčné vzťahy najlepšie vyjadrujú rovnice kvadratickej paraboly.

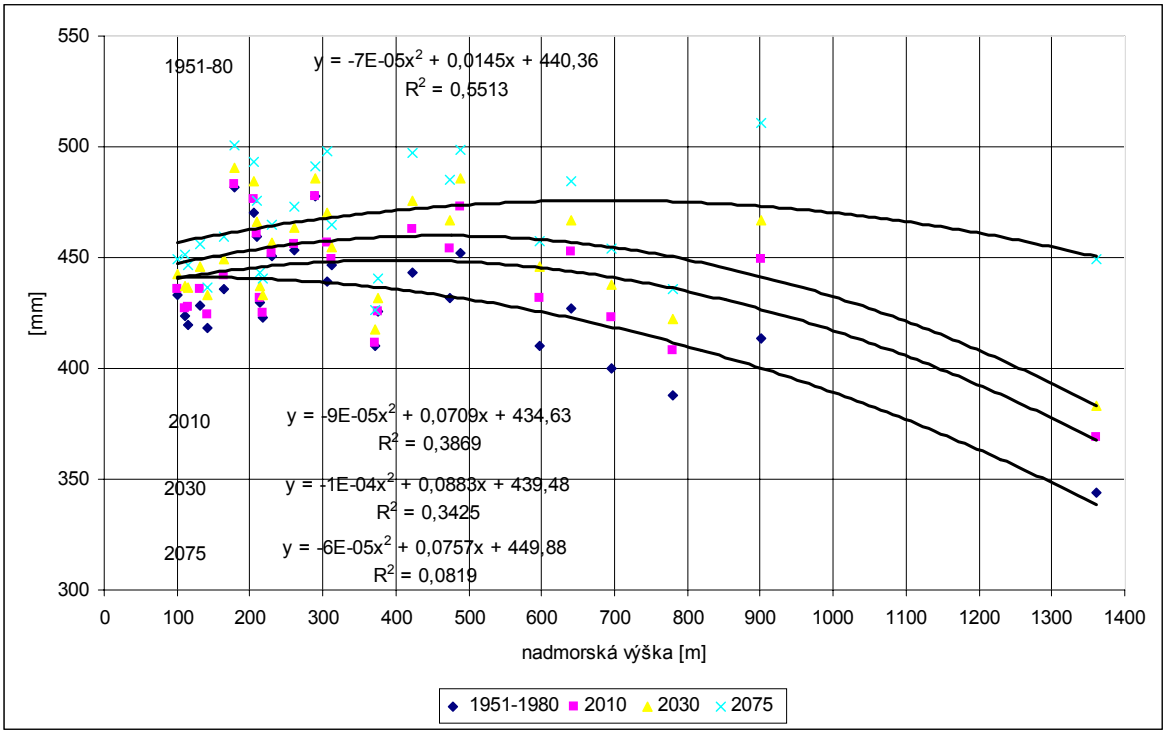
Predpokladané zvyšovanie teploty vzduchu a v nadväznosti predlžovanie VVO spôsobujú jednoznačné zvyšovanie E_0 k uvedeným časovým horizontom.

Pre nížinné – južné časti Slovenska (klimatická stanica Hurbanovo) platí zvýšenie E_0:
k roku 2010 o 55 mm, t.j. o 7 %
k roku 2030 o 87 mm, t.j. o 13 %
k roku 2075 o 153 mm, t.j. o 23 %

Pre vyššie položené – severné časti Slovenska (klimatická stanica Liptovský Hrádok) platí zvýšenie E_0:
k roku 2010 o 45 mm, t.j. o 9 %
k roku 2030 o 72 mm, t.j. o 15 %
k roku 2075 o 123 mm, t.j. o 25 %

Zmena úhrnu aktuálnej evapotranspirácie (*E* v mm)

Aktuálna – skutočná evapotranspirácia predstavuje množstvo vody vyparené z pôdy pokrytej vegetáciou pri danom stave pôdnej vlhkosti. Je silne ovplyvňovaná fyzikálnymi charakteristikami prostredia, v ktorých dominuje nadmorská výška stanovišťa. Rozloženie *E* podľa nadmorskej výšky na Slovensku podáva obr. 2. Závislosť *E* od nadmorskej výšky je vyjadrená exponenciálnymi rovnicami, vzťah však už nie je taký tesný ako pri E_0.



Obr. 2 Úhrny E za VVO referenčného časového radu rokov 1951-1980 a k časovým horizontom rokov 2010, 2030 a 2075

Pre nížinné – južné časti Slovenska (klimatická stanica Hurbanovo) platí zvýšenie *E*:
k roku 2010 o 7 mm, t.j. o 2 %
k roku 2030 o 17 mm, t.j. o 4 %
k roku 2075 o 27 mm, t.j. o 6 %

Pre vyššie položené – severné časti Slovenska (klimatická stanica Liptovský Hrádok) platí zvýšenie *E*:
k roku 2010 o 26 mm, t.j. o 6 %
k roku 2030 o 40 mm, t.j. o 9 %
k roku 2075 o 57 mm, t.j. o 13 %

Zmena úhrnu evapotranspiračného deficitu (E_0–*E* v mm)

Rozdiel medzi potenciálnou a aktuálnou evapotranspiráciou charakterizuje dostatok či nedostatok vody v pôde pre optimálny rast plodín. Rozloženie $E_0 - E$ podľa nadmorskej výšky na Slovensku podáva obr. 3. Funkčné vzťahy E_0–*E* od nadmorskej výšky sú matematickoštatisticky vysoko preukazné najlepšie vyjadrené logaritmickými rovnicami.

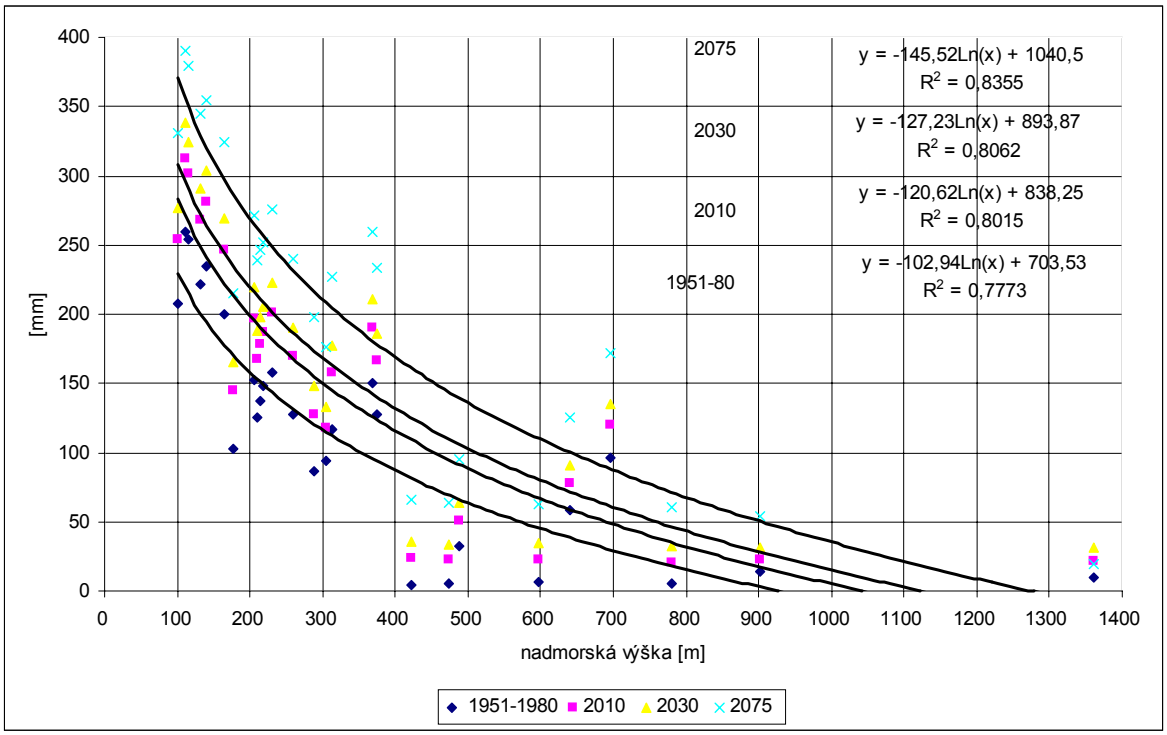
Z hľadiska vodnej bilancie podmienenej úhrnom zrážok, teplotou vzduchu, vlhkosťou vzduchu i ďalších faktorov, predpokladá sa zvyšovanie ročného deficitu evapotranspirácie.

Pre nížinné – južné časti Slovenska (klimatická stanica Hurbanovo) platí zvýšenie:

k roku 2010 o 47 mm, t.j. o 18 %
k roku 2030 o 70 mm, t.j. o 28 %
k roku 2075 o 126 mm, t.j. o 50 %

Pre vyššie položené – severné časti Slovenska (klimatická stanica Liptovský Hrádok) platí zvýšenie:

k roku 2010 o 19 mm, t.j. o 32 %
k roku 2030 o 32 mm, t.j. o 54 %
k roku 2075 o 66 mm, t.j. o 111 %



Obr. 3 Úhrny E_0-E za VVO referenčného časového radu rokov 1951-1980 a k časovým horizontom rokov 2010, 2030 a 2075

Závery

Potenciálna a aktuálna evapotranspirácia a evapotranspiračný deficit boli na území Slovenska vyhodnotené na základe údajov z 27 klimatických staníc vybraných so zreteľom na výškový profil Slovenska.

Výsledky boli zhodnotené k časovým horizontom rokov 1951-1980, 2010, 2030 a 2075 pre vegetačné obdobie definovaným výskytom priemernej dennej teploty vzduchu t≥5°C.

Významné zmeny boli zaznamenané hlavne vo vyššie položených lokalitách Slovenska a vzdialenejších časových horizontoch

Literatúra

HUZULÁK, J. - MATEJKA, F.: Analýza mikroklímy porastu. Bratislava 1985, s. 1 – 256.

KURPELOVÁ, M. - COUFAL, J. - ČULÍK, K., 1975: Agroklimatické podmienky ČSSR, Bratslav, 1975

LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I., MELO, M. (1999): Modifikované GCMs scenáre časových radov teploty vzduchu a zrážok pre Slovensko. In: Atmosféra 21.storočia, organizmy a ekosystémy, Bioklim. prac. dni, Zvolen, 207-214

STEINER, J.L. – SMITH, R.C.G. – MEYER, W.S. –ADENEY, J.A., 1985: Water use, foliage temperature and yield of irrigated wheat in SE Australia. Australian Journal of Agricultural research, 36, 1985, 1-11.

ŠIŠKA, B.: Aktuálna a potenciálna evapotranspirácia vo vzťahu k potenciálnej produkcii ozimnej pšenice v Západoslovenskom kraji. Kandidátska dizertačná práca, VŠP Nitra, 1992, 100 s.
TOMLAIN, J., 1979: Metódy určovania potenciálneho a skutočného výparu z povrchu pôdy. Meteorologické zprávy, 32, 1979, 2 , 72-79
TOMLAIN, J., 1997: Modelový výpočet dôsledkov očakávanej zmeny klímy na obsah vody v pôde na Slovensku. NKP SR, N°7, Bratislava, s. 68-83.
VIDOVIČ, J., - NOVÁK, V.1987: Závislosť úrody kukurice od evapotranspirácie porastu. Rostlinná výroba 33, 1987, 6,663-670