

VLIV TRANSPIRACE POROSTŮ NA VNITRODENNÍ PRŮTOK V RECIPIENTU ZALESNĚNÉHO MIKROPOVODÍ V PAHORKATINNÉ OBLASTI V BEZESRÁŽKOVÝCH PERIODÁCH

INFLUENCE OF STAND TRANSPIRATION ON DIURNAL STREAMFLOW IN THE RECIPIENT IN AN UPLAND FORESTED MICROWATERSHED DURING PRECIPITATION-FREE PERIODS

PETR KUPEC ✉ - JAN DEUSCHER

Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav tvorby a ochrany krajiny, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic

✉ e-mail: petr.kupec@mendelu.cz

ABSTRACT

Studies focused on diurnal changes of streamflow in forest recipients are presently used as one of the possibilities how to understand landscape hydrological processes, and most importantly also for the assessment of the influence of climate and land use changes on landscape ecosystems. Wide research focused on gathering the basic parameters of the water balance (precipitation characteristics, forest stand transpiration characteristics, recipient streamflow characteristics and soil moisture characteristics) was conducted in the area of experimental forested microwatershed Kanice located in the territory of Forest Training Enterprise Masarykův les Křtiny (Czech Republic). The main goal of the research was to clarify the proportional relation between the forest stand transpiration and the amount of water in the recipient channel. Mentioned relation was evaluated within defined several days lasting precipitation-free periods in order to minimize the potential influence of precipitation on considered relation. Obtained results identified the forest stand transpiration as the most significant factor influencing the recipient streamflow under these conditions. The recipient streamflow declines during the day and its growth during the night up to the initial point before the decline start were observed in coincidence to forest stand transpiration diurnal course. Average amplitude of streamflow decline reached 18% of the initial morning value. Delay of approximately two hours was observed between the recipient streamflow decline and the forest stand transpiration increase. Relatively low amplitude of the recipient streamflow decline during the precipitation-free periods shows strong ability of forest vegetation to stabilize recipient streamflow within the dry periods.

Klíčová slova: mikropovodí; vnitrodenní kolísání průtoku; vnitrodenní kolísání transpirace; příbřežní vegetace; hydrologická propojenost

Key words: microwatershed; diurnal streamflow; diurnal transpiration; riparian vegetation; hydrological connectivity

ÚVOD

Experimentální povodí jsou v lesnictví celosvětově dlouhodobě zakládána jako primární nástroj pro hodnocení vlivu lesních porostů na hydrologický režim krajiny, resp. lesnických zásahů na vodní bilanci krajiny (HIBBERT 1967; BOSCH, HEWLETT 1982; BROWN et al. 2005; VARHOLA et al. 2010; HRACHOWITZ et al. 2013). Obecně se dá říci, že reakce průtoku na změnu ve vegetačním krytu závisí na průměrných ročních srážkách (mean annual precipitation – MAP) a na srážkách v roce provedení zásahu a je řešena většinou na platformě dlouhodobých bilančních dat v jednotlivých hydrologických letech. Mezi dosud nedostatečně objasněné otázky spadá zejména (BROWN et al. 2005): (i) vliv vegetace na měsíční či denní průtoky, přestože tento může být i zásadnější, než její vliv na celkový odtok roční, (ii) poklesy průtoků v suchých periodách, ačkoliv obecně jsou vnitrodenní změny průtoku vyšší ve vlhkých obdobích, nicméně suchá (bezesrážková) období představují zpravidla větší poměrnou část celkového průtoku. Zásadním důvodem, proč je naše porozumění těchto procesů limitováno, je nedostatek měřených aktuálních dat z různých typů povodí a období

(HRACHOWITZ et al. 2013). V České republice a okolních státech Evropy jsou dostupná aktuální data zejména z horských oblastí, kde se MAP pohybuje nad 900 mm. Mezi výjimečné výstupy z pahorkatinných oblastí (s MAP okolo 600 mm) lze v rámci ČR aktuálně zařadit zejména ŠVIHLA et al. (2010), KULASOVÁ et al. (2014), LAMAČOVÁ et al. (2014), ŠACH et al. (2014) nebo KOVÁŘ, BAČINOVÁ (2015); v rámci blízké Evropy pak např. GRIBOVSKI et al. (2008), SZILAGYI et al. (2008), MÁTYÁS, SUN (2014) – Maďarsko, CAREY et al. (2013) – síť povodí 'North Watch', Švédsko.

Vnitrodenní cyklus průtoku v recipientech je většinou významně variabilní a jeho poznání umožňuje pochopení některých dominantních hydrologických procesů, které ovlivňují vodní bilanci krajinných systémů. V povodích, která jsou primárně ovlivňována evapotranspiračními a infiltračními procesy (zalesněná území střední Evropy) vykazují recipienty nejsilnější vnitrodenní kolísání během letních měsíců, když je celkový průtok nízký a amplitudy poklesu představují vysoké procento z celkového průtoku (SCOTT, SMITH 1997; LUNDQUIST, CAYAN 2002; ČERNOHOUS, ŠACH 2008; GRIBOVSKI et al. 2008). Nejvýrazněji

se toto kolísání projevuje v malých a středně velkých povodích, ale jeho zdroj a způsob, jakým je tento signál v rámci povodí přenášen, je stále málo znám (GRAHAM et al. 2013). Nejvíce je vnitrodenní kolísání spojováno s transpirací porostů v blízkosti koryta toku, tzn. příbřežní vegetaci, přestože zatím neexistuje obecně uznávaný model, který by vysvětloval, jak k poklesu průtoku vlivem transpirace příbřežních porostů dochází (BOND et al. 2002; GRIBOVSKI et al. 2008; WONDZELL et al. 2009). Současné studie naznačují, že zdroje půdní vody dostupné pro transpiraci a pro odtok se mohou nacházet v části půdy s odlišnými velikostmi pórů, a tím pádem od sebe mohou být navzájem hydrologicky separované (EVARISTO et al. 2015; GOOD et al. 2015). Vztah transpirace a průtoku je obtížné správně vyhodnotit také z důvodu časové odezvy nikoliv pouze mezi transpirací a průtokem (MOORE et al. 2011), ale také mezi vodou v půdě a průtokem (GRIBOVSKI et al. 2008; SZILAGYI et al. 2008).

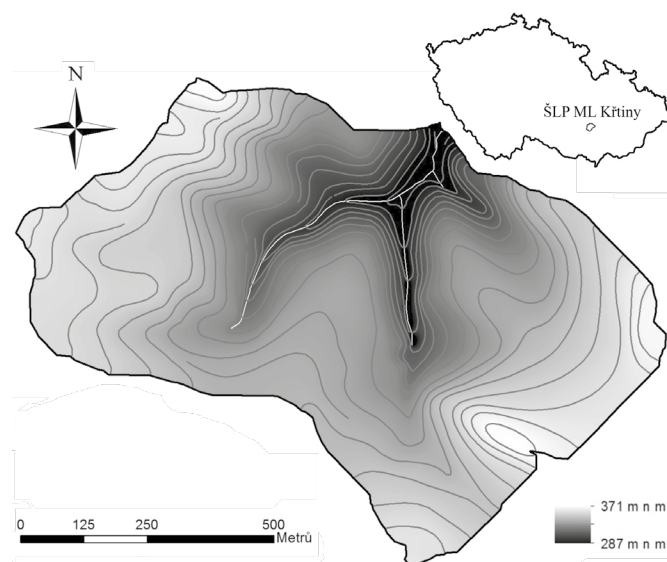
Tento článek se snaží přispět k současnému chápání vnitrodenního kolísání průtoku a transpirace v zalesněném mikropovodí pomocí identifikace jejich trendů a dynamiky (SCOTT, SMITH 1997; LUNDQUIST, CAYAN 2002; BROWN et al. 2005) v bezesrážkových periodách, kdy lze očekávat jeho nejvyšší poměrnou hodnotu vzhledem k celkovému průtoku, a tudíž by mělo být nejzřetelněji pozorovatelné. Obdobný přístup se ukázal jako vhodný pro hodnocení krátkodobých měření průtoku ve stejném povodí (DEUTSCHER, KUPEC 2014). V tomto případě byl výzkum rozšířen o měření transpiračního proudu s následujícími cíli: (i) ověřit, že vnitrodenní dynamika průtoku koreluje s dynamikou transpirace porostů a (ii) určit délku časové odezvy mezi ranním nástupem transpirace a následným poklesem průtoku.

MATERIÁL A METODIKA

Lokalita

Experimentální povodí se nachází na území Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny Mendelovy univerzity v Brně (ŠLP) u obce Kanice (viz obr. 1). Povodí zabírá plochu 65 ha s průměrnou nadmořskou výškou 332 m n. m., MAP 610 mm/rok a dlouhodobou průměrnou roční teplotou 7 °C (tab. 1). Povodí se nachází v geo-

morfologickém celku Dražanská vrchovina, podcelku Adamovská vrchovina a je charakteristické prudkými svahy a tokem, který je tvořen dvěma hlavními přítoky s délkou hlavního toku 640 m (obr. 1, tab. 1). Mateční horninou je převážně granodiorit, půdy jsou tvořeny zejména kambizeměmi (obr. 2, tab. 1). Lesní porosty jsou soustředěny do 3. a 4. LVS a pokrývají prakticky celé území. Jsou tvořeny smíšenými lesy s vyrovnaným zastoupením buku lesního, dubu zimního, borovice lesní, habru obecného a modřínu opadavého a vtroušenými lípou srdčitou a smrkem ztepilým (tab. 1). Převládajícím souborem



Obr. 1.

Lokalizace a zjednodušený digitální model terénu experimentálního mikropovodí Kanice

Fig. 1.

Situation and simplified digital terrain model of the experimental microwatershed Kanice

Tab. 1.

Základní charakteristiky experimentálního mikropovodí Kanice
Basic characteristics of experimental microwatershed Kanice

| Charakteristiky povodí/Watershed characteristics | | | Plocha/ Area (ha) | Procento plochy/ Area percentage (%) |
|--|-------------------------------|--|----------------------|---|
| Plocha povodí (ha) ¹ | 65,2 | Lesnatost ¹¹ | 63,9 | 98 |
| Dlouhodobé průměrné srážky MAP (mm) ² | 610 | Listnaté porosty ¹² | 37 | 57 |
| Délka hlavního toku (m) ³ | 640 | Jehličnaté porosty starší 40 let ¹³ | 19 | 30 |
| Expozice ⁴ | severní | Jehličnaté porosty mladší 40 let ¹⁴ | 8 | 13 |
| Maximální nadmořská výška (m n. m.) ⁵ | 371 | Louky/Meadows | 1 | 2 |
| Minimální nadmořská výška (m n. m.) ⁶ | 287 | Kambizemě/Cambisols | 51 | 79 |
| Střední nadmořská výška (m n. m.) ⁷ | 341 | Luvizemě/Luvisols | 9 | 13 |
| Průměrná nadmořská výška (m n. m.) ⁸ | 332 | Hnědozemě/Brown soils | 3 | 5 |
| Průměrný sklon povodí (%) ⁹ | 17 | Koluvizemě/Coluvisols | 2 | 3 |
| Zastoupení dřevin ¹⁰ | BK29, DBZ20, BO19, HB17, MD15 | | | |

Captions: ¹watershed area; ²long-term annual precipitations; ³main stream length; ⁴exposure; ⁵maximum altitude (m); ⁶minimum altitude (m); ⁷medium altitude; ⁸average altitude; ⁹slope; ¹⁰tree species share; ¹¹forest cover; ¹²broadleaved stands; ¹³conifer stands aged over 40 years; ¹⁴conifer stands aged under 40 years; BK – beech, DBZ – sessile oak, BO – pine, HB – hornbeam, MD – larch

lesních typů je 3H – hlinitá dubová bučina. Dále jsou zde zastoupeny 3B, 3S, 3D a 4H.

Sběr a vyhodnocování dat

Měření byla prováděna během vegetační sezóny v roce 2012 od května do října. Srážky a teploty vzduchu byly měřeny automatickou klimatickou stanicí (Vantage Vue, Davis, California) umístěnou na volné ploše v nejvyšší části povodí v arboretu Řícmanice (viz obr. 2). Z těchto dat byly bezesrážkové periody definovány jako období s maximálními denními srážkami do 0,2 mm, kterým předcházely tři dny taktéž beze srážek. Takto bylo identifikováno 8 bezesrážkových period (viz obr. 3) v rozsahu 4–17 dnů. V těchto obdobích byl hodnocen vzájemný vztah průtoku a transpirace.

Ve vybraných dnech uvnitř bezesrážkových period byl měřen průtok v závěrném profilu recipientu na masce Thomsonova přelivu. Měření byla prováděna ultrazvukovým hladinoměrným čidlem (US1200) v kombinaci s dataloggerem (M4016-RV, obojí Fiedler-Mágr, České Budějovice) s intervalem zápisu 5 minut. Bylo provedeno celkem 8 měření spadajících do osmi bezesrážkových period (17. 5., 27. 5., 7. 6., 18. 6., 24. 6., 23. 8., 7. 9. a 4. 10.) (obr. 3). Vnitrodenní dynamika průtoku byla hodnocena pomocí analýzy trendů hodinových průměrů ze všech měření vztažených k dennímu maximu pozorovanému okolo 9:00 ráno. V textu dále uváděné odtoky byly stanoveny jako průměrný průtok v korytě recipientu v bezesrážkových periodách vztažený k ploše povodí tak, aby ho bylo možno porovnat s celkovou transpirací porostů na odpovídající plošné jednotce (m²).

Výše transpirace byla stanovena na základě měření transpiračního proudu na vzorníkových stromech metodou tepelné bilance kmene. Vzorníkové stromy byly vybrány ve třech typech porostů, které reprezentovaly variabilitu v druhovém a věkovém složení v rámci porostů

celého povodí: (1) listnaté porosty, (2) jehličnaté porosty starší 40 let věku a (3) jehličnaté porosty mladší – do 40 let věku. Měření probíhala v sedmi měřicích hnízdech v porostech rozprostřených dle následujícího složení a věku: *Picea abies* 33; *Picea abies* 52; *Tilia cordata*, *Carpinus betulus* 63; *Pinus sylvestris*, *Larix decidua* 65; *Pinus sylvestris* 33; *Tilia cordata*, *Larix decidua* 96; *Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, *Tilia cordata*, *Carpinus betulus* 54. V každém hnízdě bylo osazeno 6–12 stromů.

Ze vzorníkových stromů byl proveden přepočít na úroveň celého porostu na základě regresní analýzy mezi průměrem kmene v prsní výšce a odpovídající spotřebě vody stromem (ČERMÁK et al. 2004). Měření transpiračního proudu probíhala kontinuálně od května do října. Pro modelování transpirace byl použit upravený Penman-Monteithův model (ALLEN et al. 1998) a jeho výstupy pak byly srovnány s referenční evapotranspirací (PET) a byl proveden výpočet koeficientu plodiny (ALLEN et al. 1989). Výše uvedené tři typy lesních porostů tak prezentují tři transpirační typy: (1) listnaté porosty s nejvyšší úrovní transpirace (průměrně 56 % PET, max. 4 mm/den), (2) starší jehličnaté porosty nad 40 let věku (průměrně 41 % PET, max. 2,7 mm/den) a (3) mladší jehličnaté porosty pod 40 let věku (průměrně 33 % PET, max. 2,6 mm/den). Vnitrodenní dynamika transpirace byla hodnocena z hodinových průměrů získaných ve dnech spadajících do vylišených bezesrážkových period (obr. 3). Celková transpirace porostů povodí byla vypočtena jako průměrná transpirace jednotlivých porostních typů vážených jejich plochou (obr. 2). Analýza trendů byla zpracována na těchto vážených hodinových průměrech vztažených k dennímu maximu pozorovanému okolo 14:00.

Doplňkově byla prováděna měření vlhkosti půdy v hloubkách 5, 10, 20, 30 a 40 cm (Profile probe sensor, Ekotechnika, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, Anglie). Celkem bylo povodí osazeno deseti sondami na obě strany od závěrného profilu toku podél rozvodnice ve 20–50 m



Obr. 2.

Relevantní charakteristiky experimentálního mikropovodí Kanice s lokalizací jednotlivých měření

Fig. 2.

Relevant characteristics of the experimental microwatershed Kanice with the localization of individual measurements (climatic station, sap flow, soil moisture, streamflow, soil probe)

vzdálených rozestupech (obr. 2). Ambulantní odečty vlhkostí byly prováděny v přibližně dvoutýdenních intervalech během řešeného období (9. 7., 24. 7., 15. 8., 27. 8., 4. 9., 13. 9. a 4. 10.). Cílem těchto měření bylo ověření vlhkostní situace v půdním profilu ve sledovaných bezsrážkových periodách a zejména pak ověření, že v těchto obdobích nedocházelo k tak výraznému vyprázdnění zásob vody v půdě, aby to mohlo způsobit omezení maximální transpirace (LAGERGREN, LINDROTH 2002), což by mohlo negativně ovlivnit následné hodnocení vztahu průtoku a transpirace.

Závěrečné vyhodnocení vztahu transpirace a průtoku je prezentováno jako trendová analýza hodinových průměrů sledovaných veličin s cílem ukázat vzorce v jejich denní dynamice při minimálním ovlivnění srážkami. Trendová analýza byla zpracována poměrně k maximální denní hodnotě průtoku dosažené v průměru okolo 9:00 ráno.

VÝSLEDKY

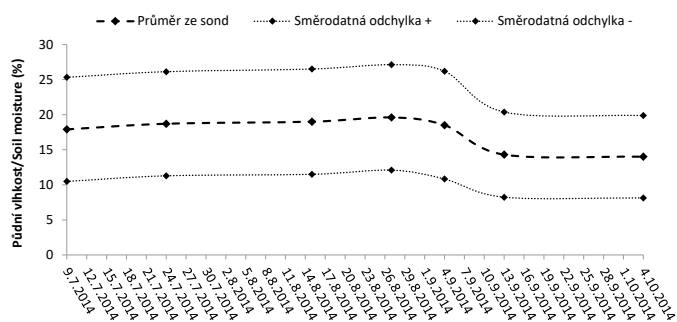
Vlhkost půdy

Data z jednotlivých sond byla podrobena základní analýze variability trendů, která ukázala, že pouze sonda v nejvyšší blízkosti toku (cca 2 m od břehu) vykazovala statisticky významně odlišné hodnoty, pravděpodobně vlivem kolísání hladiny podzemní vody a zaplavování. Zbývajících 9 sond vykazovalo trendově shodné výsledky a během řešeného vegetačního období v nich byly hodnoty půdní vlhkosti velmi stabilní (obr. 4). Jedinou výjimkou bylo období v září, kdy vlhkost klesla z 19,5 % na 14,5 %.

Vnitrodenní dynamika transpirace

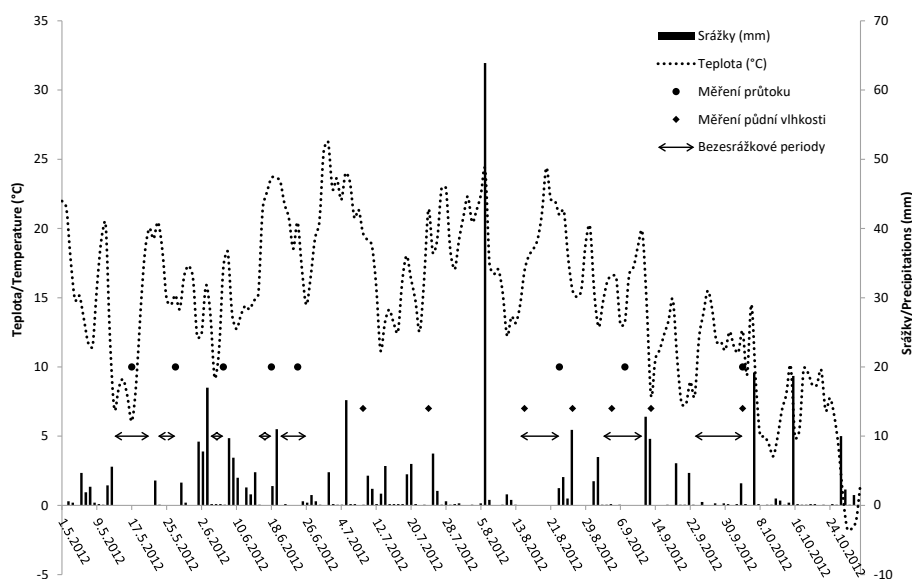
Měření transpiračního proudu na vzorníkových stromech identifikovala tři odlišně transpirující typy porostů. Tyto odlišnosti byly patrné v maximální denní úrovni transpirace, ovšem jejich trendová dynamika byla shodná (obr. 5). Během sledovaných bezsrážkových period docházelo k nejvýraznějšímu nástupu transpirace mezi 8:00–11:00

hod. Maxima bylo dosahováno okolo 14:00, s průměrem 0,24 mm/hod. Následně bylo pozorováno snížení intenzity transpirace inverzní k rannímu nárůstu. Po západu slunce byla pozorovaná transpirace velmi nízká, ale nikoliv nulová, což naznačuje doplňování zásob vody v kmenech stromů. Obdobná vnitrodenní dynamika byla přítomna po celé vegetační období. Nicméně srovnání bezsrážkových period s celým vegetačním obdobím ukázalo, že zejména vlivem zvýšených evapotranspiračních požadavků v bezsrážkových periodách dosahovala transpirace v průměru o 13 % vyšších hodnot než ve zbytku období.



Obr. 4. Výsledky šetření půdní vlhkosti v experimentálním mikropovodí Kanice v roce 2012

Fig. 4. Results of soil moisture measurements within the experimental microwatershed Kanice in 2012 (Průměr ze sond – Average from probes; Směrodatná odchylka – Standard deviation)



Obr. 3. Klimadiagram a identifikace sledovaných bezsrážkových period včetně dní s měřením

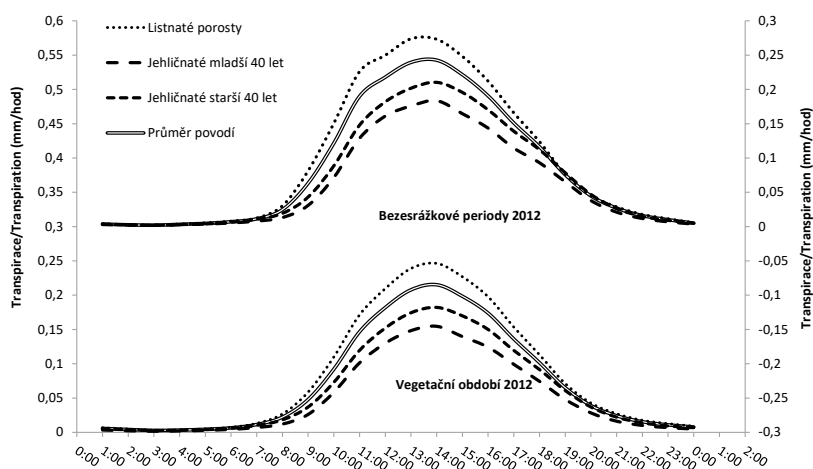
Fig. 3. Climagraph and identification of observed precipitation-free periods including the days of measurements (Měření průtoku – Flow measurement; Měření půdní vlhkosti – Soil moisture measurement)

Vnitrodenní dynamika průtoku

Měření průtoku ukázala, že ve sledovaných bezsrážkových periodách docházelo k vnitrodennímu kolísání s různou intenzitou několikrát denně (obr. 6). Pokles průtoku byl pozorován od rána po většinu dne mezi 9:00–17:00. Během večera mezi 19:00–0:00 bylo možno pozorovat pomalý nárůst průtoku. Následně byl průtok relativně stabilní. Průtok dosahoval maxima v průměru 0,46 l/s, což odpovídá intenzitě odtoku 0,00251 mm/hod a bylo ho dosahováno ráno okolo 9:00. Minima dosahoval v průměru 0,37 l/s, což odpovídá intenzitě odtoku 0,00205 mm/hod a bylo ho dosahováno okolo 17:00. Tento denní pokles průtoku v porovnání s maximální ranní hodnotou dosahoval až 18 % a bylo možno ho pozorovat v bezsrážkových periodách každý den.

Vzájemný vztah vnitrodenní dynamiky průtoku a transpirace

Nárůst transpirace byl pozorován ráno okolo 7:00 a bylo možno jej inverzně korelovat s poklesem průtoku začínajícím okolo 9:00, přibližně dvě hodiny po něm (obr. 5 a 6, resp. společně obr. 7). Během odpoledního poklesu transpirace pokračoval pokles průtoku až do 17:00 (přibližně tři hodiny po dosažení maximální transpirace okolo 14:00). Od 19:00 začal průtok narůstat prakticky po dobu celé noci v souladu s téměř nulovou transpirací, které bylo dosaženo přibližně ve 21:00. Během bezsrážkových period dosahovala celková průměrná transpirace na řešeném povodí 1,993 mm/den, zatímco odtok korytem recipientu činil 0,056 mm/den. Srovnání těchto dvou veličin ukázalo, že transpirace z povodí dosahovala 35krát vyšších hodnot než průtok (obr. 7).

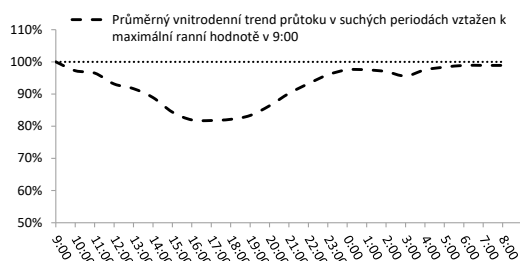


Obr. 5.

Srovnání vnitrodenní dynamiky jednotlivých transpiračních typů porostů v bezsrážkových periodách a ve vegetačním období v roce 2012 na experimentálním mikropovodí Kanice

Fig. 5.

Comparison of diurnal dynamics of particular forest stands transpiration types during the participation-free periods and the whole growing season in 2012, experimental micro-watershed Kanice (Listnaté porosty – Broadleaved stands, Jehličnaté mladší 40 let – Conifer stands aged under 40 years, Jehličnaté starší 40 let – Conifer stands aged over 40 years, Průměr povodí – Watershed average; Bezesrážkové periody – Precipitation-free periods, Vegetační období – Growing season)

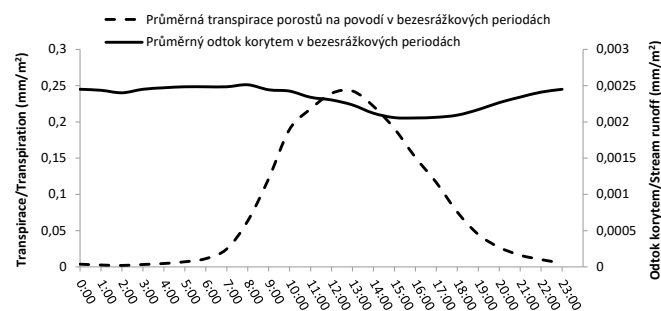


Obr. 6.

Průměrný trend vnitrodenních průtoků v recipientu vztážený k maximální ranní hodnotě v 9:00 v bezsrážkových periodách roku 2012, experimentální mikropovodí Kanice

Fig. 6.

Mean diurnal streamflow dynamics in the recipient related to the maximal morning streamflow value at 9:00, during precipitation-free periods 2012, experimental microwatershed Kanice



Obr. 7.

Vztah vnitrodenní dynamiky transpirace lesních porostů a odtoku v bezsrážkových periodách roku 2012 v experimentálním mikropovodí Kanice

Fig. 7.

Relation between diurnal dynamics of forest stands transpiration and stream runoff during precipitation-free periods 2012, experimental microwatershed Kanice (solid line = average transpiration on the watershed in precipitation-free periods; dashed line = average stream runoff in precipitation-free periods)

DISKUSE

Cílem výzkumu prezentovaného v tomto článku bylo identifikovat vzájemný vztah mezi vnitrodenními změnami v transpiraci a průtoku na zalesněném pahorkatinném mikropovodí v bezesrážkových periodách vegetačního období. Vzhledem k tomu, že kontrolní měření vlhkosti půdy neukázala dramatický nedostatek půdní vláhy, který by mohl zapříčinit omezení intenzity transpirace, byla transpirace v těchto podmínkách nejvýznamnějším faktorem, který ovlivňoval velikost průtoku v závěrném profilu recipientu. Vzájemný vztah sledovaných veličin byl velmi zřetelný a provázaný.

Ve výše popsaných podmínkách je transpirace nejvýznamnější složkou celkové evapotranspirace. V průměru dosahuje transpirace porostů během roku 61 % z výparu ekosystému (SCHLESINGER, JASECHKO 2014). Během vegetačního období a zejména během slunných a suchých dní to může být i mnohem více a transpirace v těchto dnech často dosahuje prakticky stejných hodnot jako celková evapotranspirace (GRELLÉ et al. 1997). Transpirace během dne obvykle vykazuje symetrický vzor prudkým ranním nástupem a mírně pozvolnějším poklesem v odpoledních hodinách po dosažení poledního maxima. Tento je vysvětlován jako využívání zásob vody v kmenech stromů, což způsobuje zpomalení sacích procesů a funguje v tom případě jako polštářový efekt pro zpomalení vlivu na průtok. Při rychle se měnícím počasí a při špatné dostupnosti půdní vody může být až polovina vody pro transpiraci rychle vyčerpána ze zásob v lýku (GOLDSTEIN et al. 1998; ZWEIFEL et al. 2000; ČERMÁK et al. 2007; URBAN et al. 2015).

Vzájemný vztah dynamiky vnitrodenního průtoku a transpirace může být charakterizován jako záporná korelace mezi transpirací a průtokem, jelikož lze očekávat, že zvyšující se transpirace vyvolá snížení průtoku (GRAHAM et al. 2013), plně v souladu s našimi výsledky. Pozorovaný denní pokles a noční nárůst průtoku podporuje hypotézu, že voda v povodí, kterou je plněn průtok v korytě, je během dne transpirací vyčerpávána a během noci pak může docházet k jejímu zpětnému doplnění (BREN 1997; WONDZELL et al. 2009; GRAHAM et al. 2013), zejména vlivem redistribuce vody v půdním profilu kořenovými systémy (ČERMÁK et al. 2014). Někteří autoři tento jev označují pojmem hydraulický lift (např. ŠACH, ČERNOHOUS 2015). Nicméně udávaná výše denního poklesu je v literatuře značně nejednoznačná, a to od 10 % až do 50 % (CONSTANTZ et al. 1994; LUNDQUIST, CAYAN 2002; MOORE et al. 2011; GRAHAM et al. 2013). Dle našich výsledků z pahorkatinného povodí dosahoval tento pokles 18 %. Při srovnání uvedených citačních zdrojů a jednotlivých experimentálních povodí se ukazuje, že vyšší amplituda poklesu je přítomna v povodích s nižším zastoupením dřevinné vegetace. I z tohoto srovnání se zdá, že výše denního poklesu je úzce spjata s vegetací na povodí. Výsledky z blízkého nezalesněného povodí (DEUTSCHER, KUPEC 2014) ukázaly v předchozím roce (2011) denní pokles blízkí se 40 %, což indikuje výrazný stabilizační vliv lesních porostů na vnitrodenní dynamiku průtoku.

Denní suma transpirace z povodí byla během bezesrážkových period v průměru 35krát vyšší než denní suma průtoku. To naznačuje, že za těchto podmínek pouze omezená část povodí skutečně přispívá k tvorbě průtoku. Je známo, že vnitrodenní kolísání transpirace porostů způsobuje kolísání ve výšce hladiny podzemní vody v příbřežní zóně, zejména v obdobích s nízkým průtokem, a že toto kolísání zpětně ovlivňuje průtok v korytě (GRIBOVSKI et al. 2008; WONDZELL et al. 2009). Také se ví, že plošné povodí nepřispívá k tvorbě průtoku rovnoměrně, výraznější vliv vykazují zejména příbřežní zóny a terénní deprese (SAYAMA, McDONNELL 2009). Správná definice hranic této hydrologicky propojené příbřežní zóny by mohla mít zásadní význam pro hospodaření v lesích a v krajině vůbec. V současné době jsou příbřežní zóny používány jak interakční prvky v zemědělské krajině a ozeleněné pásy o šířce 20–30 m jsou brány jako plně funkční pro zajištění zvýšené kvality vody a až 100% odstraňování nitrátů, zatímco pásy širší než uvedené 30 m nevykazují žádný dodatečný efekt (FENNESSY, CRONK 1997). Pokud je nám známo, ve střední Evropě se zatím podobná opatření v lesním hospodaření nezavádějí.

Srovnání průtoku na řešeném povodí Kanice během dvou let 2011 (DEUTSCHER, KUPEC 2014) a 2012 ukázalo, že rok 2011 byl vodnější. V roce 2011 dosahoval průměrný průtok v bezesrážkových periodách vegetačního období 0,8 l/s oproti 0,4 l/s v roce 2012. Amplituda denního poklesu průtoku dosahovala 15 % v roce 2011 a 18 % v roce 2012. Přes rozdílné hydrologické podmínky ve srovnávaných letech, vnitrodenní dynamika průtoku byla v obou případech prakticky stejná s denním poklesem průtoku a nočním nárůstem, dle předpokládaných změn v intenzitě transpirace.

ZÁVĚR

Během bezesrážkových period ve vegetačním období fungovala transpirace porostů jako nejvýznamnější faktor ovlivňující vnitrodenní dynamiku průtoku v recipientu. Vztah transpirace a průtoku vykazoval negativní korelaci, která se projevovala poklesem průtoku během dne a následným nárůstem během noci, až na původní úroveň. Nejvyšší průtok byl v průměru dosahován okolo 9:00 a nejnižší okolo 17:00. Vnitrodenní pokles průtoku dosahoval 18 % ranní hodnoty. Pozorovaná prodleva mezi nastupující transpirací a poklesem průtoku dosahovala přibližně dvě hodiny. Relativně nízké vnitrodenní kolísání průtoku indikuje výrazný stabilizační vliv lesních porostů na množství vody v recipientu. Zároveň se ukázalo, že ve zkoumaných bezesrážkových periodách byl průměr celkové denní transpirace z povodí 35krát vyšší než průměrný denní odtok, což poukazuje na to, že v těchto podmínkách přispívá k tvorbě průtoku pouze malá část povodí, pravděpodobně zejména příbřežní zóna, zatímco převažující část povodí je od ní hydrologicky separovaná.

Poděkování:

Tento výzkum byl podpořen Interní grantovou agenturou Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně, jako projekt číslo 32/2012.

LITERATURA

- ALLEN R.G., JENSEN M.E., WRIGHT J.L., BURMAN R.D. 1989. Operational estimates of evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81 (4): 650–662.
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO: 300 s. FAO irrigation and drainage paper, 56.
- BOND B.J., JONES J.A., MOORE G., PHILLIPS N., POST D., McDONNELL J.J. 2002. The zone of vegetation influence on baseflow revealed by diel patterns of streamflow and vegetation water use in a headwater basin. *Hydrological Processes*, 16 (8): 1671–1677. DOI: 10.1002/hyp.5022.
- BOSCH J.M., HEWLETT J.D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55 (1-4): 3–23.
- BREN L.J. 1997. Effects of slope vegetation removal on the diurnal variations of a small mountain stream. *Water Resources Research*, 33 (2): 321–331.
- BROWN A.E., ZHANG L., MCMAHON T.A., WESTERN A.W., VERTESSY R.A. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310: 28–61.
- CAREY S.K., TETZLAFF D., BUTTLE J., LAUDON H., McDONNELL J., MCGUIRE K., SEIBERT J., SOULSBY C.H., SHANLEY J. 2013. Use of color maps and wavelet coherence to discern seasonal and interannual climate influences on streamflow variability in northern catchments. *Water Resources Research*, 49: 6194–6207. DOI: 10.1002/wrcr.20469.

- CONSTANTZ J., THOMAS C.L., ZELLWEGER G. 1994. Influence of diurnal variations in stream temperature on streamflow loss and groundwater recharge. *Water Resources Research*, 30 (12): 3253–3264. DOI: 10.1029/94wr01968.
- ČERMÁK J., KUČERA J., NADEZHINA N. 2004. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*, 18: 529–546. DOI: 10.1007/s00468-004-0339-6.
- ČERMÁK J., KUČERA J., BAUERLE W.L., PHILLIPS N., HINCKLEY T.M. 2007. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 27:181–198.
- ČERMÁK J., NADEZHINA N., TRCALA M., SIMON J. 2014. Open field-applicable instrumental methods for structural and functional assessment of whole trees and stands. *iForest - Biogeoscience and Forestry*, 8: 226–278. DOI: 10.3832/ifer1116-008.
- ČERNOHOUS V., ŠACH F. 2008. Daily baseflow variations and forest evapotranspiration. *Ekológia*, 27 (2): 189–195.
- DEUTSCHER J., KUPEC P. 2014. Monitoring and validating the temporal dynamics of interday streamflow from two upland head micro-watersheds with different vegetative conditions during dry periods of the growing season in the Bohemian Massif, Czech Republic. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186: 3837–3846. DOI: 10.1007/s10661-014-3661-5.
- EVARISTO J., JASECHKO S., McDONNELL J.J. 2015. Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow. *Nature*, 525: 91–94. DOI: 10.1038/nature14983.
- FENNESSY M.S., CRONK J.K. 1997. The effectiveness and restoration potential of riparian ecotones for the management of nonpoint source pollution, particularly nitrate. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 27 (4): 285–317. DOI: 10.1080/10643389709388502.
- GOLDSTEIN G., ANDRADE J.L., MEINZER F.C., HOLBROOK N.M., CAVELIER J., JACKSON P., CELIS A. 1998. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant Cell Environment*, 21: 397–406.
- GOOD S.P., NOONE D., BOWEN G. 2015. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, 349 (6244): 175–177. DOI: 10.1126/science.aaa5931.
- GRAHAM C.B., BARNARD H.R., KAVANAGH K.L., MCNAMARA J.P. 2013. Catchment scale controls the temporal connection of transpiration and diel fluctuations in streamflow. *Hydrological Processes*, 27: 2541–2556. DOI: 10.1002/Hyp.9334.
- GRELLE A., LUNDBERG A., LINDROTH A., MOREN A.S., CIENCIALA E. 1997. Evaporation components of a boreal forest: variations during the growing season. *Journal of Hydrology*, 197: 70–87.
- GRIBOVSKI Z., KALICZ P., SZILÁGYI J., KUCSARA M. 2008. Riparian zone evapotranspiration from diurnal groundwater level fluctuations. *Journal of Hydrology*, 349: 6–17.
- HIBBERT A.R. 1967. Forest treatment effects on water yield. In: Sopper, W.E., Lull, H.W. (eds.): *International Symposium for Hydrology*. Pergamon, Oxford: 527–543.
- HRACHOWITZ M., SAVENIJE H.H.G., BLÖSCHL G., McDONNELL J.J., SIVAPALAN M., POMEROY J.W., ARHEIMER B., BLUME T., CLARK M.P., EHRET U., FENICIA F., FREER J.E., GELFAN A., GUPTA H.V., HUGHES D.A., HUT R.W., MONTANARI A., PANDE S., TETZLAFF D., TROCH P.A., UHLENBROOK S., WAGENER T., WINSEMIUS H.C., WOODS R.A., ZEHE E., CUDENNEC C. 2013. A decade of predictions in ungauged basins (PUB) – a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (6): 1198–1255. DOI: 10.1080/02626667.2013.803183.
- KOVÁŘ P., BAČINOVÁ H. 2015. Impact of evapotranspiration on diurnal discharge fluctuation determined by the Fourier series model in dry periods. *Soil and Water Research*, 10, (4): 210–217.
- KULASOVA A., BLAZKOVA S., BEVEN K., REZACOVA D., CAJTHAM J. 2014. Vegetation pattern as an indicator of saturated areas in a Czech headwater catchment. *Hydrological Processes*, 28: 5297–5308. DOI:10.1002/hyp.10239.
- LAGERGREN F., LINDROTH A. 2002. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112: 67–85.
- LAMAČOVÁ A., HRUŠKA J., KRÁM P., STUCHLÍK E., FARDA A., CHUMAN T., FOTOVÁ D. 2014. Runoff trends analysis and future projections of hydrological patterns in small forested catchments. *Soil & Water Research*, 9, (4): 169–181.
- LUNDQUIST J.D., CAYAN D.R. 2002. Seasonal and spatial patterns in diurnal cycles in streamflow in the western United States. *Journal of Hydrometeorology*, 3: 591–603.
- MÁTYÁS C., SUN G. 2014. Forests in a water limited world under climate change. *Environmental Research Letters*, 9(8): 085001. DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/085001.
- MOORE G.W., JONES J.A., BOND B. J. 2011. How soil moisture mediates the influence of transpiration on streamflow at hourly to interannual scales in a forested catchment. *Hydrological Processes*, 25: 3701–3710. DOI: 10.1002/Hyp.8095.
- SAYAMA T., McDONNELL J.J. 2009. A new time-space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale. *Water Resources Research*, 45: W07401. DOI: 10.1029/2008WR007549.
- SCOTT D.F., SMITH R.E. 1997. Preliminary empirical models to predict reductions in total and low flows resulting from afforestation. *Water SA*, 23 (2): 135–140.
- SCHLESINGER W.H., JASECHKO S. 2014. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*: 115–117. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.01.011.
- SZILÁGYI J., GRIBOVSKI Z., KALICZ P., KUCSARA M. 2008. On diurnal riparian zone groundwater-level and streamflow fluctuations. *Journal of Hydrology*, 349: 1–5. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.09.014.
- ŠACH F., ŠVIHLA V., ČERNOHOUS V., KANTOR P. 2014. Management of mountain forests in the hydrology of a landscape, the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 60 (1): 42–50.
- ŠACH F., ČERNOHOUS, V. 2015. Hydraulický lift buku pro smrk: potenciálně významný ekosystémový proces pro pěstování smrkových porostů v souvislosti s klimatickou změnou oteplování. *Zprávy lesnického výzkumu*, 60 (1): 53–63.
- ŠVIHLA V., ČERNOHOUS V., ŠACH F. 2010. Hydrologická bilance elementární odtokové plochy lesního povodí v Orlických horách. *Zprávy lesnického výzkumu*, 55 (3): 201–210.
- URBAN J., ČERMÁK J., CEULEMANS R. 2015. Above- and below-ground biomass, surface and volume, and stored water in a mature Scots pine stand. *European Journal of Forest Research*, 134: 61–74.
- VARHOLA A., COOPS N.C., WEILER M., MOORE R.D. 2010. Forest canopy effects on snow accumulation and ablation: an integrative review of empirical results. *Journal of Hydrology*, 392 (3-4): 219–233. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.08.009.
- WONDZELL S.M., GOOSEFF M.B., MCGLYNN B.L. 2009. An analysis of alternative conceptual models relating hyporheic exchange flow to diel fluctuations in discharge during baseflow recession. *Hydrological Processes*, 24: 686–694. DOI: 10.1002/hyp.7507.
- ZWEIFEL R., ITEM H., HÄSLER R. 2000. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. *Trees*, 15: 50–57. DOI: 10.1007/s004680000072.

INFLUENCE OF STAND TRANSPIRATION ON DIURNAL STREAMFLOW IN THE RECIPIENT IN AN UPLAND FORESTED MICROWATERSHED DURING PRECIPITATION-FREE PERIODS

SUMMARY

The study of diurnal dynamics of streamflow is commonly used to understand some of the dominant hydrological processes that affect the water balance of landscape ecosystems. In most of middle-European catchments that are infiltration-evapotranspiration dominated, the diurnal variance is the strongest during summer in periods of low-flow, and comprises a significant percentage of total streamflow (SCOTT, SMITH 1997; LUNDQUIST, CAYAN 2002; GRIBOVSKI et al. 2008). Diurnal variation is currently being connected mostly to the transpiration of riparian vegetation, even though there is no commonly accepted model that would explain how it works (BOND et al. 2002; GRIBOVSKI et al. 2008; WONDZELL et al. 2009). Recent studies suggest that water available for transpiration and for streamflow generation can come from different parts of the watershed and can be hydrologically separated (EVARISTO et al. 2015; GOOD et al. 2015). The aim of this paper is to contribute to current understanding of diurnal variations in streamflow and stand transpiration.

During the 2012 growing season, streamflow and transpiration among other relevant parameters of the water balance were measured in an experimental forested upland microwatershed Kanice, Czech Republic in order to identify their diurnal variations and their mutual relationship (Fig. 2, Tab. 1). Their relationship was evaluated during precipitation-free periods when the diurnal variations are expected to be best visible (SCOTT, SMITH 1997; LUNDQUIST CAYAN 2002; BROWN et al. 2005).

During the studied periods, stand transpiration functioned as the most important factor altering streamflow in the recipient. The relationship between the two variables indicated negative correlation that was exhibited as a decrease of streamflow during the day and an increase at night back up to its initial morning value (Fig. 5, 6 and 7). The highest streamflow was observed in the morning around 9:00 and the lowest around 17:00, while transpiration reached its maximum around 14:00. The mentioned diurnal decrease in streamflow reached up to 18%. The observed lag time between the increase of transpiration and decrease of streamflow reached approximately two hours. The relatively small diurnal variations of streamflow under described conditions indicated a significant stabilizing effect of forest stands on the amount of water in the recipient. At the same time, during the examined precipitation-free periods the mean total daily transpiration was 35 times higher than total daily discharge. This indicates that under these conditions, only a rather small distinct area contributes to streamflow generation (probably the riparian zone), while the rest of the basin is hydrologically separated.

Zasláno: 03. 02. 2017

Přijato do tisku/Accepted: 07. 06. 2017