

Význam přesného určení radiační bilance a intercepce pro vyhodnocení evapotranspirace a hydrologické modelování

Jitka Kofroňová

Anotace

Význam přesného určení radiační bilance a intercepce pro vyhodnocení evapotranspirace a hydrologické modelování

Příspěvek vycházející ze dvou článků se zaměřuje na analýzu vlivu měřených a modelovaných hodnot radiace a intercepce na potenciální evapotranspiraci a další složky hydrologické bilance zahrnuté v hydrologickém modelování. Odlišné metody způsobují různě velké odchylky a tím zvyšují chybovost hydrologických simulací.

Klíčová slova: Radiační bilance, Dlouhovlnná radiace, Intercepce, Potenciální evapotranspirace, Hydrologické modelování

Annotation

The importance of an accurate estimation of the radiation balance and interception for the evaluation of the evapotranspiration and hydrological modelling

This paper (based on results of two separate papers) analyzes the influence of the modelled radiation and interception on the rate of potential evapotranspiration and hydrological balance against using the measured values of these parameters. Different methods show distinct variabilities in errors which is of great importance for the hydrological predictions.

Keywords: Radiation balance; Longwave radiation; Interception; Potential evapotranspiration, Hydrological modelling

Abstrakt

Dlouhovlnná radiace jako součást radiační bilance je jedním z důležitých faktorů k určení potenciální evapotranspirace. Vzhledem k ekonomickým a technickým limitům je málokdy měřena, proto vzniklo několik přístupů k jejímu určení. S podobným přístupem se setkáváme i u procesu intercepce neboli zachytávání srážek vegetací. Je málokdy měřena a často bývá zanedbávána a pouze v určitých případech dopočítávána. Chyby, které vznikají dopočítáváním dlouhovlnné radiace a intercepce, dále ovlivňují modelování dalších složek hydrologické bilance a zejména zmíněnou potenciální evapotranspiraci. Tato studie testuje 2 hlavní přístupy k určení dlouhovlnné radiace a 6 způsobů určení intercepce v porovnání s naměřenými hodnotami na šumavském experimentálním povodí Liz. Bylo zjištěno, že přístupy určující dlouhovlnné radiace vedly k odchylkám v potenciální evapotranspiraci o 20-80 mm, a proto je nutná jejich kalibrace. U intercepce jsme zkoumali především obecné rozdíly měřených a modelovaných hodnot, kdy jednotlivé modely dosahovaly výsledných hodnot rozdílných o 25-93 mm. Tyto odchylky vedly k rozdílným simulacím dalších složek hydrologické bilance (především evapotranspirace) a jejich vyšší přesnost pro další modelování je nezbytná.

Abstract

Longwave radiation, as part of the radiation balance, is one of the main factors for estimating of the potential evapotranspiration. It is rarely measured, so computational methods have been designed. Similarly, interception is rarely directly measured and have been rather omitted or computed. A systematic error has been developed during estimation of the longwave radiation and the interception. These errors lead to deficiency in subsequent process evaluation like mentioned potential evapotranspiration or other hydrological balance components. This paper tests 2 main approaches to estimate longwave radiation and 6 approaches to estimate interception in contrast with their measured values at the Liz experimental catchment in the Bohemian Forest. We presented that widely used methods for computation led to errors in resulting potential evapotranspiration of 20-80 mm and needed calibration. In case of interception, we discussed especially the overall differences of modelled values against observed interception loss. Individual models resulted in range from 25 to 93 mm of different interception in contrast with measured values. Consequently, variable results of longwave radiation and interception lead to significant differences in prediction of other hydrological components such as potential evapotranspiration and the higher accuracy is necessary for improvement of the overall hydrological modeling.

1 Úvod

Evapotranspirace je termín označující výpar vody z povrchu. Je jedním z hlavních procesů hydrologického cyklu. Po srážkách je to druhý nejdůležitější proces vodního cyklu a některé zdroje (např. Shi et al., 2008) uvádějí, že až 65% srážek je evapotranspirací navraceno do atmosféry. Kromě hydrologického cyklu je tento proces také důležitým faktorem výměny energie mezi zemí a atmosférou (Fischer et al., 2005).

Míra evapotranspirace je dána především množstvím vody a energie. Je ovlivněna meteorologickými podmínkami (jako jsou teplota a vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, rychlost větru ad.) a charakterem povrchu (přítomnost a typ vegetace apod.). Maximální možný výpar, který je podmíněn dostatkem vody, označujeme jako potenciální evapotranspiraci (PET). Skutečný neboli aktuální výpar (AET) vody je poté možné určit dle skutečného množství vody v zájmovém území.

Jedním ze zmíněných zdrojů energie je sluneční záření. Sluneční záření neboli radiační bilance se skládá s krátkovlnného a dlouhovlnného záření. Energii potřebnou pro evapotranspiraci představuje především krátkovlnné dopadající záření a jeho vliv je dobře znám, naopak vliv dlouhovlnného záření na výpar vody je zkoumán málo (Yin et al., 2008).

Intercepce označuje proces zachytávání srážek na povrchu vegetace. Tato část srážek je významná z důvodu, že může být odpařena zpět do atmosféry a nebude se tak dostávat do povrchového odtoku nebo do půdy. Její míra tedy ovlivňuje jak výpar vody, tak další složky hydrologické bilance nebo další procesy jako třeba transpiraci rostlin, transport vodní páry a tepla apod. (Černý et al., 2014). I přes návaznost na další procesy bývá intercepce často zanedbávána, což vede ke vzniku chyb a vyšších nejistot například u předpovědních hydrologických modelů nebo u určení zmíněných komponentů hydrologické bilance (Peng et al., 2014).

Cílem tohoto příspěvku je získat informaci o rozdílech ve vlivu měřených a modelovaných hodnot radiační bilance a intercepce na komponenty hydrologické bilance, především na intercepci. Hlavními kroky tedy jsou: 1) výpočet dlouhovlnné radiační bilance dvěma základními metodami a určení jejich odchylek od měřených hodnot; 2) výpočet potenciální evapotranspirace s různými radiačními bilancemi na základě předchozího bodu; 3) odvození intercepce několika způsoby a určení jejich odchylek od měřených hodnot; 4) vyhodnocení vlivu jednotlivých veličin na hydrologické modely.

2 Metodika

Výzkum byl aplikován na datové řadě období 2010 až 2017 (intercepce až 2018).

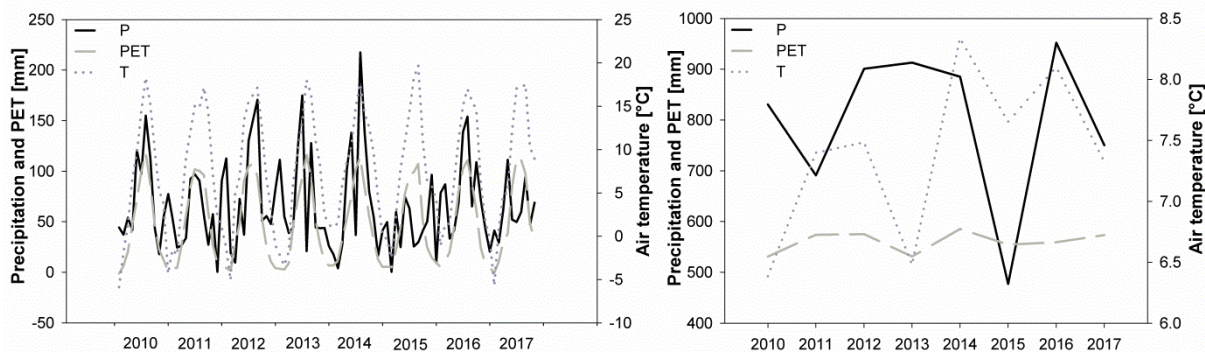
2.1 Zájmové území

Data pro daný výzkum byla získána na experimentální povodí Ústavu pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i. Jedná se o povodí Liz ležící v jehličnatém lese horského regionu Šumavy (49°04's.š., 13°41'v.d.). Nadmořská výška území se pohybuje mezi minimálními 828 m a maximálními 1074 m n. m. Dle Köppenovy klimatické klasifikace spadá území do zóny Dfb, která je charakteristická vlhkým kontinentálním klimatem s teplými léty a poměrně rovnoměrným rozložením srážek.

Dlouhodobý (1975-2017) roční průměr srážek v tomto území je přibližně 851 mm. Průměrné roční srážky pozorovaného období (2010-2017) byly nižší než dlouhodobý průměr, přesněji okolo 815 mm. Nejvlhčím rokem období byl 2016, nejsušším byl rok 2015, a to nejen za pozorované období ale od roku 1975 (obr. 1, „P“).

Intercepce byla určena jako rozdíl srážek naměřených na otevřené ploše oproti srážkám naměřených pod korunami stromů. V pozorovaném období dosahovala intercepce průměrně 217 mm za vegetační období, což s ohledem na srážky odpovídá 32,3 %. Celková suma v jednotlivých letech závisela především na velikosti srážkových epizod a množství těchto epizod v daném roce (není závislá na celkové sumě srážek).

Roční průměrné teploty v daném období byly naopak převážně vyšší než dlouhodobý průměr (6,66°C v letech 1975-2017). Jejich chod je k vidění na obrázku 1 („T“). Nejteplejším byl s průměrnými 8,3°C rok 2014. Pouze v letech 2010 a 2013 byly průměrné roční teploty nižší než dlouhodobé průměry.



Obrázek 1: Meteorologické charakteristiky v pozorovaném období: a) měsíční; b) roční.

2.2 Určení radiační bilance

Radiační bilance (R_n) je častou součástí metod výpočtu potenciální evapotranspirace (PET). Je definována vztahem:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} = (SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow}) + (LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow}) \quad (1)$$

kde radiační bilance je rozdílem bilancí krátkovlnného (R_{ns}) a dlouhovlnného záření (R_{nl}). Konkrétněji R_{ns} a R_{nl} jsou výsledkem rozdílu dopadajícího ($\downarrow$) a odraženého/emitovaného ($\uparrow$) záření

(SW z anglického „shortwave“, LW z anglického „longwave“). Všechny komponenty jsou v jednotkách MJ.m⁻².den⁻¹.

Jak již bylo zmíněno, z těchto složek musí být kvůli nedostatečným měřením dopočítávána především dlouhovlnná radiace. Jedna z možností určení R_{nl} je obecně využívaná rovnice dle FAO56 manuálu (Allen et al., 1998), vychází ze Stefan-Boltzmannova zákona a je vyjádřena:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{MAX(K)}^4 + T_{MIN(K)}^4}{2} \right] \cdot (a_1 - a_2 \sqrt{e_a}) \cdot \left(b_1 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - b_2 \right) \quad (2)$$

Tento vztah obsahuje několik koeficientů. Allen et al. (1998) je ve svém FAO56 manuálu definovali jako a₁ = 0,34, a₂ = -0,14, b₁ = 1,35, b₂ = 0,35. Rovnice pak vypadá:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{MAX(K)}^4 + T_{MIN(K)}^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (3)$$

V rovnicích 2) a 3) σ vyjadřuje Stefan-Boltzmannovu konstantu (4,895*10⁻⁹ MJ.m⁻².den⁻¹.K⁻⁴), T_{max} a T_{min} maximální a minimální teplotu [K], e_a aktuální tlak vodní páry [kPa], R_s celkovou dopadající krátkovlnnou radiaci [MJ.m⁻².den⁻¹] a R_{so} označuje vypočítanou (viz. rovnice 4) solární radiaci při bezoblačnosti [MJ.m⁻².den⁻¹].

Solární radiaci za bezoblačných podmínek je možné určit pomocí vzorce:

$$R_{so} = (c_1 + c_2 \cdot z) R_a \quad (4)$$

kde c₁ = 0,75 a c₂ = 0,00002 jsou koeficienty definované ve FAO56 (Allen et al., 1998), z je označením nadmořské výšky stanice, pro kterou tuto radiaci zjišťujeme [MJ.m⁻².den⁻¹] a R_a označuje extraterestriální radiaci [MJ.m⁻².den⁻¹].

Druhý způsob určení R_{nl} je dle manuálu FAO24 (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$R_{nl} = (\sigma T_K^4) \cdot (a_1 - a_2 \sqrt{e_a}) \cdot \left(b_1 + b_2 \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

I tento vztah obsahuje koeficienty definovány číselně jako a₁ = 0,34, a₂ = 0,044, b₁ = 0,1 a b₂ = 0,9. Při doplnění těchto koeficientů vypadá rovnice:

$$R_{nl} = (\sigma T_K^4) \cdot (0,34 - 0,044 \sqrt{e_a}) \cdot \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (6)$$

kde σ označuje opět Stefan-Boltzmannovu konstantu [4,895*10⁻⁹ MJ.m⁻².den⁻¹.K⁻⁴], T_K denní průměrnou teplotu [K], e_a aktuální tlak vodní páry [kPa], n délku slunečního svitu [hod] a N maximální délku slunečního svitu daného dne [hod].

Vzhledem k existenci několika koeficientů v obou modelech, byla na metody (FAO56 a FAO24) aplikována citlivostní analýza. Nejjednodušší způsob této analýzy je otestování vlivu jednotlivých koeficientů a jejich postupné proměny od původní hodnoty s účelem vyhodnocení účinku jejich proměny na výstupy modelu (Pianosi et al., 2016). Citlivostní analýza probíhala postupně na každém koeficientu, zatímco zbylé koeficienty byly v danou chvíli zafixovány. Na základě citlivostní analýzy všech koeficientů byla provedena kalibrace metod FAO56 a FAO24.

2.3 Určení potenciální evapotranspirace

K určení vlivu rozdílných dlouhovlnných radiací byla vybrána jedna metoda potenciální evapotranspirace (PET), která obsahuje jako jeden ze vstupů radiační bilanci. Nejdříve byly využity

naměřené hodnoty dlouhodobného záření, v dalším kroku pak hodnoty vypočítané pomocí metody FAO56 a dále hodnoty vypočítané metodou FAO24. Metoda Penman-Monteith (1965) byla vybrána jako jedna z nejběžněji používaných metod výpočtu PET. Uvádí se ve tvaru:

$$\lambda PET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho \cdot c(e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (7)$$

kde λ je latentní teplo vypařování vody, Δ vyjadřuje sklon křivky tlaku nasycené vodní páry v závislosti na teplotě [$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$], R_n radiační bilanci [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$], G tok tepla do půdy, $\rho \cdot c$ součin hustoty a specifického tepla [$1,21 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$], $(e_s - e_a)$ sytostní doplněk vzduchu [kPa], r_a aerodynamický odpor [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$], γ psychrometrickou konstantu [$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$] a r_s povrchový odpor [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$].

2.4 Určení intercepce

Již bylo zmíněno, že intercepce se většinou zanedbává. V hydrologických modelech bývá ale často zakomponována. V případech, kdy je zakomponována, je vyjádřena formou nějakého výpočtu, koeficientu, případně stanovením procentuální ztráty ze srážek.

Z tohoto důvodu jsme vyhodnotili intercepci v povodí Liz šesti různými způsoby. Prvním způsobem je zmíněný přepočít, tedy intercepce je vyjádřena pomocí vzorce (model A):

$$I = P * 0,529 + 0,856 \quad (8)$$

kde I označuje intercepční ztrátu [mm] a pomocí P vyjadřujeme naměřené srážky [mm].

Druhým způsobem je koeficient 2.2 mm. Ten je odečten z každé srážky. Tato hodnota vychází z předchozí studie na tomto území v porostu smrku ztepilého (model B, Dohnal et al., 2014). Třetí a čtvrtý způsob jsou procentuální. Model C počítá se zachycením 25% srážek, model D s 35% intercepce.

Poslední dva typy modelu vyjadřují intercepci pomocí „nádrže“ určitého objemu. Model E uvažuje intercepci o objemu 2.2 mm, model F pak o objemu 3.3 mm.

V hydrologickém modelu HBV (Bergström, 1976) byly následně provedeny simulace s naměřenými i modelovými hodnotami intercepce. V závislosti na těchto rozdílných hodnotách se analyzovala míra vlivu především na odtok a také na půdní a podzemní vodu.

2.5 Statistická analýza

Naměřená i modelovaná data byla podrobena statistické analýze. K té byla vybrána metoda RMSE („root mean-square error“) neboli střední kvadratická chyba. Tato statistika určuje rozptyl rozdělení četnosti odchylek mezi naměřenými a modelovanými hodnotami. Čím vyšší RMSE je, tím je rozptyl mezi daty větší. Metoda je vyjádřena jako:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (9)$$

kde y_i reprezentuje modelované hodnoty dne i , x_i naměřené hodnoty dne i a n počet měření.

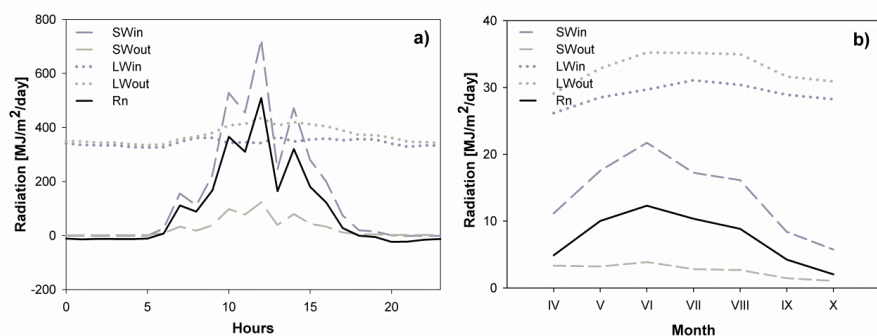
3 Výsledky a diskuse

3.1 Analýza měřené radiační bilance

Na základě měření byly analyzovány všechny složky radiační bilance v období 2010-2017. Vzhledem k absenci zimních měření je analýza zaměřena pouze na vegetační období roku, tedy období od počátku dubna do konce října.

Krátkovlnná radiace obecně dosahuje během dne pozitivních hodnot a v noci se pohybuje okolo 0 MJ.m².den (Obr. 1a)). Dopadající krátkovlnné záření v době vegetačního období nabývalo průměrné hodnoty 13,6 MJ.m⁻².den⁻¹, odražené záření mělo průměrně 2,6 MJ.m⁻².den⁻¹. Co se týče sezónního charakteru (obr. 2b)), zatímco dopadající záření se projevuje silně sezónním charakterem, u odraženého tento jev zjištěn nebyl. Během zkoumaného období (2010-2017) bilance krátkovlnného záření vykazovala klesající tendenci hodnot.

Dlouhovlnná radiace má oproti krátkovlnnému záření obecně stabilnější charakter, a to jak v denním, tak v sezónním časovém kroku. Chod v obou časových krocích je možné posoudit na obrázku 2. Denní bilance dlouhovlnného záření se v pozorovaném období pohybovala mezi -9,3 a 0 MJ.m⁻².den⁻¹ s průměrnou denní hodnotou -3,5 MJ.m⁻².den⁻¹. Měsíční hodnoty nabývaly od -4,1 do -2,3 MJ.m⁻².den⁻¹. Průměrná denní hodnota dopadajícího dlouhovlnného záření byla 29,4 MJ.m⁻².den⁻¹ a emitovaného 33 MJ.m⁻².den⁻¹.



Obrázek 2: a) denní (25.4.2014) a b) sezónní chod radiační bilance a jejích složek (data ÚH AV ČR, v.v.i.).

3.2 Analýza počítané dlouhovlnné radiace

Výsledky statistické analýzy porovnávající měřené a počítané dlouhovlnné záření jsou zobrazeny v obr. 3. Z výsledků je patrné, že metoda FAO24 vycházela obecně lépe než metoda FAO56 v porovnání s měřenými hodnotami. Metoda FAO56 často podhodnocovala míru dlouhovlnné radiace. Zatímco metoda FAO56 vykazuje výsledky RMSE vyšší než 1,4 MJ.m⁻².den⁻¹, FAO24 dosáhla odchylky do maxima 1,24 MJ.m⁻².den⁻¹.

Po provedení citlivostní analýzy jednotlivých koeficientů začleněných do obou metod, byla provedena jejich kalibrace. Jak již bylo zmíněno, přímým důvodem kalibrace je získání souboru koeficientů vhodnějších pro zájmové území, než ve kterém byly původně odvozeny. V tomto případě jde o získání přesnějšího určení dlouhovlnné radiace v konkrétních podmínkách povodí Liz. Některé koeficienty byly citlivější než jiné. Několik koeficientů se ukázalo jako poměrně neměnných, proto jejich kalibrace ani nebyla nutná. Kalibrace byla provedena jak pro podmínky jednotlivých let, tak pro celé období 2010-2017. Kalibrované koeficienty jsou zahrnuté v tabulce 1 pro FAO56 a tab. 2 pro FAO24.

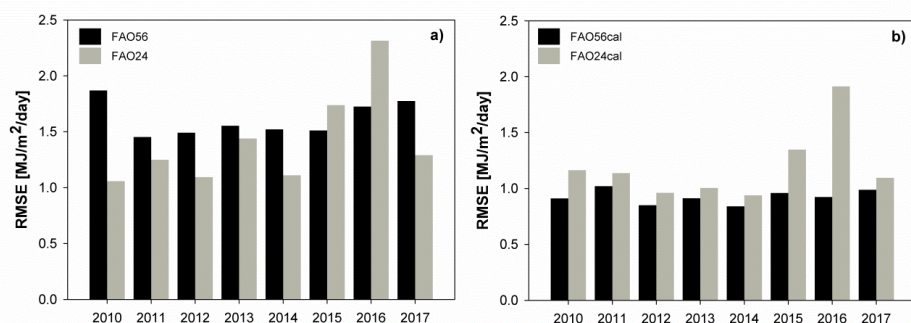
FAO56	original	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2010–2017
a1	0.34	0.34	0.32	0.35	0.33	0.325	0.315	0.35	0.35	0.3
a2	-0.14	-0.1	-0.1	-0.12	-0.101	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
b1	1.35	1.12	1.12	1.13	1.15	1.09	1.05	1.1	1.1	1.08
b2	-0.35	-0.12	-0.12	-0.13	-0.15	-0.09	-0.05	-0.1	-0.1	-0.08
c1	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
c2	0.00002	2E-05	2E-05	2E-05	2E-05	2E-05	2E-05	2E-05	2E-05	0.00002

Tabulka 1: Jednotlivé koeficienty pro metodu FAO56

FAO24	original	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2010–2017
a1	0.34	0.31	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.3	0.33	0.33
a2	0.044	0.05	0.11	0.11	0.11	0.11	0.1	0.11	0.1	0.113
b1	0.1	0.2	0.25	0.25	0.26	0.255	0.3	0.4	0.2	0.265
b2	0.9	0.8	0.75	0.75	0.74	0.745	0.7	0.6	0.8	0.735

Tabulka 2: Jednotlivé koeficienty pro metodu FAO24

Bylo vyhodnoceno, že FAO56 nabývá velkých rozdílů od naměřených hodnot dlouhodobné radiace. Kalibrace koeficientů této metody tyto rozdíly snížila, v případě RMSE to bylo téměř o 50% (viz obr. 3b)). V případě FAO24 není snížení rozdílů natolik výrazné, což ale může být výsledkem již uspokojivých výsledků metody bez kalibrovaných koeficientů (obr. 3b)).

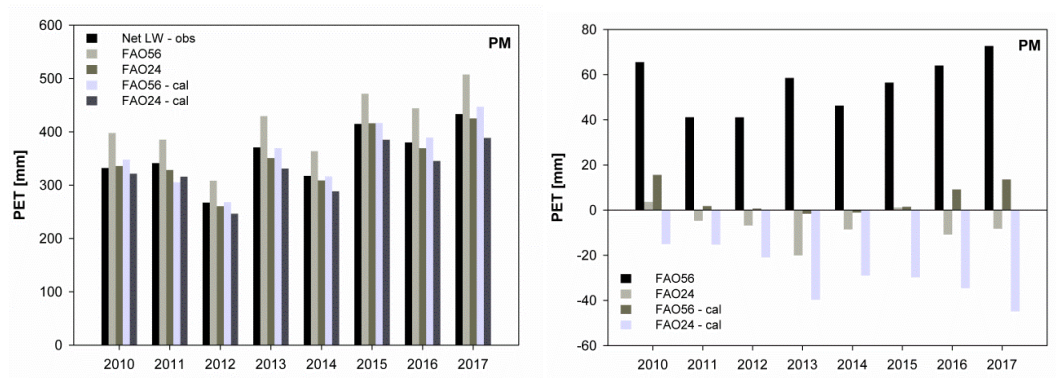


Obrázek 3: Odchytky dlouhodobné radiace od měřené počítané metodami FAO56 a FAO24 za a) užití původních podob modelů; b) užití kalibrovaných koeficientů v metodách.

3.3 Vliv různých radiačních bilancí na potenciální evapotranspiraci

Potenciální evapotranspirace (dále jako PET) byla vypočítána pomocí metody Penman-Monteith (1965, rovnice č. 7). K výpočtu byly nejdříve využity naměřené hodnoty dlouhodobného záření, v dalším kroku pak hodnoty určené metodami FAO56 a FAO24 a poslední fázi hodnoty z těchto metod po jejich kalibraci. Výsledky jsou k vidění v obrázku 4.

PET s využitím měřených hodnot radiace dosahovala 1,9-2,2 mm/den, za vegetační sezónu (od dubna do října) to pak bylo celkem 270-433 mm. Při využití FAO56 byla celková sezónní PET nadhodnocena o 40-80 mm, u FAO24 bylo dosaženo rozdílů méně než 20 mm. Kalibrací koeficientů bylo docíleno výrazného poklesu rozdílů u FAO56, výsledné hodnoty PET se velmi přiblížily (obr. 4).



Obrázek 4: Vypočítaná potenciální evapotranspirace: a) celkové hodnoty PET s využitím měřených (Net LW) a počítaných hodnot radiace; b) celkové rozdíly PET při použití metod FAO56 a FAO24 (původních i kalibrovaných – „cal“).

3.4 Vyhodnocení počítané intercepce

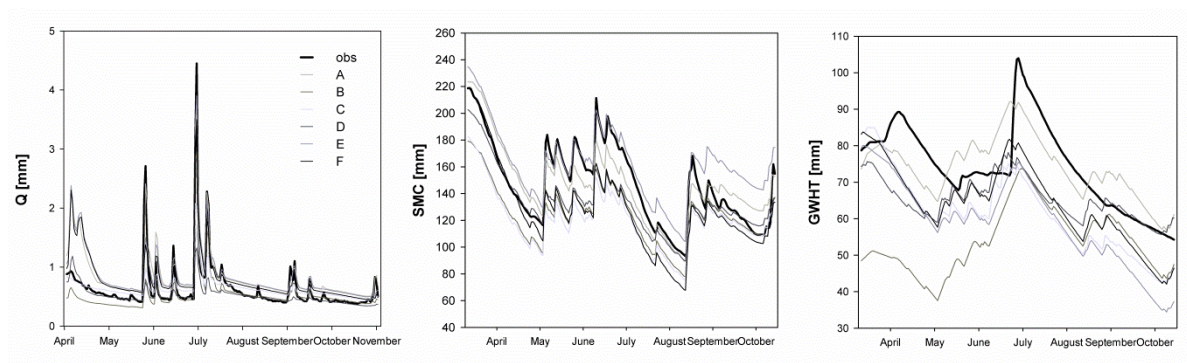
Intercepce ve vegetačních sezónách je pro všechny modely zobrazena v tabulce 3. Všechny metody se od naměřených hodnot podměrně odlišují. Kromě typu A všechny modely podhodnocovaly míru intercepce. Nejméně přesný se ukázal být model A, který se liší o přibližně 102 mm. Výrazných rozdílů dosáhl také model C s RMSE 88,82 mm. Naopak uspokojivé výsledky prezentuje model F, u kterého byla odchylka RMSE 28.55 mm (hodnoty nejsou uvedeny).

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
obs	164.6	216.8	250.6	286.3	191.6	288.7	186.7	203.5	235.9	148.3
A	226.9	336.4	428.2	354.5	287.5	395.7	272.6	300.3	229.2	260.1
B	158.2	200.6	172.0	206.1	167.2	203.7	153.9	178.4	175.6	133.0
C	142.7	147.5	113.9	161.6	140.3	191.6	77.7	161.9	121.1	125.3
D	198.6	206.5	159.5	226.2	196.4	268.3	108.7	226.6	169.5	175.4
E	144.6	181.3	155.9	176.8	154.9	190.3	135.4	161.6	164.8	118.6
F	195.9	243.8	207.1	239.9	207.4	254.5	174.6	218.1	213.4	158.7

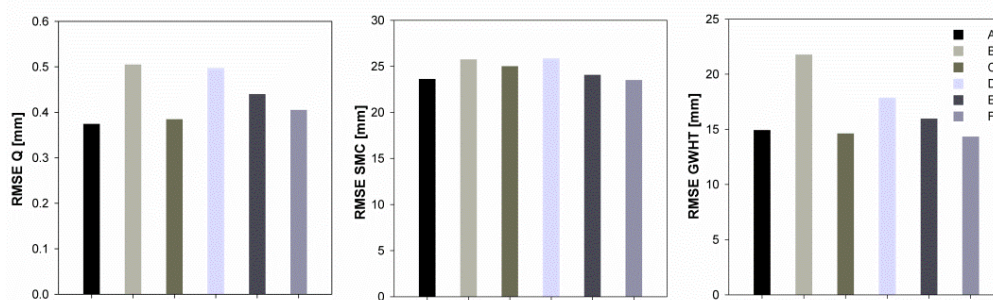
Tabulka 3: Výsledné hodnoty intercepce z modelů A-F za vegetační sezóny 2009-2018.

Při simulacích v hydrologickém modelu HBV byly následně využity výsledné intercepce z jednotlivých modelů. Sledovali jsme jejich vliv na další komponenty hydrologické bilance – odtok, půdní a podzemní vodu (viz obr. 5).

V celém pozorovaném období odtok dosahoval hodnot v rozsahu 0,33-17 mm (průměrně 0,9 mm), půdní voda 78-310 mm (průměrně 173 mm) a podzemní voda 30 – 144 mm (průměrná výška 70.5 mm). Z obr. 5 je patrné, že u odtoku jsou výsledky méně variabilní než u půdní a podzemní vody. Nejlepší shodu lze u všech charakteristik najít u modelu A a modelu F. Podobné výsledky najdeme v případě odtoku podzemní vody i u modelu C (obr. 6).



Obrázek 5: Chod odtoku (Q), půdní (SMC) a podzemní ($GWHT$) vody pod vlivem různé míry intercepce ve vegetační sezóně 2018.



Obrázek 6: Odchylky výsledných hodnot odtoku (Q), půdní (SMC) a podzemní ($GWHT$) vody od pozorovaných dat ve vegetační sezóně 2018.

4 Diskuse

Byl vyhodnocen vliv dlouhodobné radiace na potenciální evapotranspiraci a intercepce na složky hydrologické bilance (odtok, půdní a podzemní voda). Vzhledem k nepřesnému měření v zimním období (námraza, sněh), byl výzkum zaměřen pouze na vegetační období roku (počátek dubna až konec října). I některé další studie (např. Dohnal et al., 2014) se uchýlily k tomuto kroku s cílem zpřesnit výsledky a celkovou analýzu dat.

Dlouhodobné záření počítané metodou FAO56 bylo v povodí Liz nadhodnocené, a tím nadhodnocovalo i celkové výsledky PET. K podobnému výsledku v jiných podmínkách dospěl například i Carmona et al. (2017), v jiných podmínkách ovšem metoda naopak podhodnocovala (Yin et al., 2008, Matsui and Osawa, 2015). Rozdílné výsledky souvisí pravděpodobně s tím, že vznik metody FAO56 (i FAO24) se váže ke konkrétním – referenčním – podmínkám, které jsou vyjádřeny především formou jejich koeficientů. Jiné podmínky vedou pak ke vzniku nepřesností, proto je doporučována kalibrace koeficientů dle dané lokality (Allen et al., 1998, Carmona et al., 2014, Matsui and Osawa, 2015 ad.).

Zatímco metoda FAO56 pro určení dlouhodobné radiace se běžně využívá, metoda FAO24 téměř vůbec. Hlavním důvodem je především zřídka měřená délka slunečního svitu, která je v přístupu zahrnuta. Využití FAO24 ale vedlo k celkově nižším odchylkám od naměřených hodnot, kalibrace koeficientů na lokální podmínky pak nepřinesla výrazné zlepšení.

Intercepce dosahovala v našich podmínkách průměrně 32,3 % spadlých srážek. K podobnému výsledku dospěly v prostředí smrkového lesa i práce Dohnala et al. (2014), konkrétně 33-36%. Studie ukázala, že výše intercepce souvisí především s intenzitou deště. Nebyly ale zkoumány další vlivy, jakou jsou například parametry lesa v zájmové lokalitě (např. jeho stáří, prostorová variabilita stromů, struktura porostu), kterými se ve svých studiích zabývají například Peng et al. (2014), Ringgaard et al. (2014) a další.

Jednotlivé modely určení intercepce vedly k rozdílným odezvám při simulaci odtoku, půdní a podzemní vody. Rozdílné odezvy na různé intercepční ztráty z jednotlivých modelů oproti měřeným datům jsou poměrně významné. Z toho důvodu vyvstává otázka, zda je rozumné intercepce dále opomíjet, jakožto faktor ovlivňující další složky hydrologické bilance. Studie (např. Staelens et al., 2008, Herbst et al., 2008) se zabývají především mírou intercepce, tedy množstvím vody, která se na povrch vůbec nedostane. Studie, jak míra intercepce ovlivňuje komponenty hydrologické bilance, ale téměř neexistují.

5 Závěr

V rámci studie byla vyhodnocena dlouhověnná radiace a její vliv na míru evapotranspirace v povodí Liz. Také byla vyhodnocena míra intercepce zájmového území, porovnána s modelovanými hodnotami a popsán její vliv na některé komponenty hydrologické bilance. U obou jevů je problematické, že jsou málokdy měřeny, a tak se často používají různé metody k jejich určení. Nepřesné modelování často vede k chybám v predikci a simulaci dalších procesů.

V případě radiace se ukázalo, že ze dvou hlavních přístupů (FAO56 a FAO24), které jsou k určení dlouhověnného záření využívány, je FAO24 přesnější (v porovnání s naměřenými daty) než FAO56, ale méně využívaná kvůli faktoru délky slunečního svitu, který není běžně měřen. FAO56 je i z tohoto důvodu častěji využívaná metoda, ale vyžaduje proces kalibrace koeficientů na lokální podmínky. Po kalibraci dosáhla metoda uspokojivých a poměrně přesných výsledků vzhledem k naměřeným datům. Tím došlo k přesnějšímu určení potenciální evapotranspirace v lokalitě Liz.

Intercepce je často jako samostatný proces opomíjena, ale v hydrologických modelech bývá zakomponována. Výsledky několika testovaných modelů k určení intercepce v povodí Liz ukázaly, že nejlépe v porovnání s naměřenými hodnotami vychází model uvažující intercepci jako nádrž o objemu 3,3 mm. Vzhledem k různým mírám intercepce z různých modelů, byl také prokázán vliv intercepce na další složky hydrologické bilance. Z tohoto důvodu by proces intercepce neměl být zanedbáván.

6 Literatura

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 300 p.
- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI Report RHO 7, Norrköping, 134 pp.
- Carmona, F., Rivas, R., Caselles, C., 2014. Estimation of daytime downward longwave radiation under clear and cloudy skies conditions over sub-humid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 115, 281–295.
- Carmona, F., Rivas, R., Kruse, E., 2017. Estimating daily net radiation in the FAO Penman-Monteith method. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 89–95.
- Černý, T., Dohnal, M., Tesař, M., 2014. Význam intercepce v hydrologickém cyklu povodí pramenných oblastí. *Stavební obzor* 5-6, pp. 110-114.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, 179 p.
- Fisher, J.B., DeBiase, T.A., Qi, Y., Xu, M., Goldstein, A.H., 2005. Evapotranspiration methods compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. *Environmental Modelling & Software*, 20, 6, 783–796.
- Matsui, H., Osawa, K., 2015. Calibration effects of the net longwave radiation equation in Penman-type methods at Tateno, Japan. *Hydrological Research Letters*, 9, 4, 113–117.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and the environment. The state and movement of water in living organisms, XIX. Symposium of the Society for Experimental Biology, Cambridge University Press, 205-234.
- Peng, H., Zhao, Ch., Feng, Z., Xu, Z., Wang, Ch., Zhao, Y., 2014. Canopy interception by a spruce forest in the upper reach of Heihe River basin, Northwestern China. *Hydrological Processes*, 28, pp. 1734-1741.
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J.W., Rougier, J., Stephenson, D.B., Wagener, T., 2016. Sensitivity analyses of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214-232.
- Ringgaard, R., Herbst, M., Friberg, T., 2014. Partitioning forest evapotranspiration: Interception evaporation and the impact of canopy structure, local and regional advection. *Journal of Hydrology*, 517, pp. 677-690.
- Shi, T., Guan, D., Wang, A., Wu, J., Jin, C., Han, S., 2008. Comparison of three models to estimate evapotranspiration for a temperate mixed forest. *Hydrological Processes*, 22, 3431–3443.
- Staelens, J., Schrijver, A. D., Verheyen, K., Verhoest, N. E. C. (2008): Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event. characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22, pp. 33-45.
- Yin, Y., Wu, S., Zheng, D., Yang, Q., 2008. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agricultural Water Management*, 95, 77-84.