

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY

Katedra fyzické geografie a geoekologie



VLIV EVAPOTRANSPIRACE NA HYDROLOGICKÉ MODELÝ

EVAPOTRANSPIRATION IMPACT ON HYDROLOGICAL MODELING

(diplomová práce)

Anna Macounová

Vedoucí práce: RNDr. Jan Daňhelka Ph.D.

2009

Ráda bych poděkovala RNDr. Janu Daňhelkovi Ph.D. za vedení diplomové práce a za cenné rady a připomínky.

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracovala sama a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje.

Praha, srpen 2009

Abstrakt

Tato práce představuje proces evapotranspirace z hlediska jejího použití v hydrologických modelech. Je otestován vliv evapotranspirace jako vstupní hodnoty na výsledky simulace srážko-odtokového modelu Sacramento (SAC-SMA), který je součástí hydrologického předpovědního systému AquaLog používaného pro operativní předpovědi v povodí Labe. Problematika je řešena na modelovém povodí řeky Litavky, jehož fyzickogeografické charakteristiky jsou prezentovány z hlediska ovlivnění míry evapotranspirace.

V práci byly provedeny simulace s rozdílným vstupem evapotranspirace pro období 2001 až 2005 pro posouzení citlivosti modelu Sacramento z hlediska generovaného výsledného celkového odtoku a jeho jednotlivých dílčích složek, ale rovněž i z hlediska ovlivnění dalších simulovaných procesů, zejména zaplnění jednotlivých půdních zón modelu.

Výsledky prokázaly výraznou citlivost modelu, a to zejména jeho pomalých procesů spojených s generováním ztráty evapotranspirací a s tvorbou základní složky odtoku v modelu a s tím související bilancí zaplnění zejména zón vázané vody a spodní zóny primární vody.

Klíčová slova: evapotranspirace, hydrologické modely, Sacramento, AquaLog, Litavka.

Abstract

This work presents the evapotranspiration from the point of view of its impact on hydrological modeling. We have tested the influence of different input evapotranspiration on the simulation outputs of rainfall-runoff model Sacramento (SAC-SMA), which is the component of the hydrological forecasting system AquaLog used for flood forecasting in the Czech part of Elbe river basin. Litavka river basin was selected for this case study. We present physical geographical characteristics of the basin from the point of view of influence of the evapotranspiration rate.

Simulation using different computed evapotranspiration daily timeseries for 2001 – 2005 inputted SAC-SMA and total runoff, runoff composition, zones saturation were evaluated. Results proved that SAC-SMA sensitivity to evapotranspiration is of great concern especially for the long time and slow developing processes in the basin. Evapotranspiration loss, base flow generation and connected saturation of tension water zones and lower zone primary free water were identified to be the most affected states and processes.

Key words: Evapotranspiration, Hydrological models, Sacramento, AquaLog, Litavka River.

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Charakteristika modelového povodí a použitých prostředků.....	8
2.1. Charakteristika povodí Litavky.....	8
2.1.1. Základní charakteristiky povodí.....	8
2.1.2. Klimatické podmínky.....	10
2.1.2.1. Teplota vzduchu.....	10
2.1.2.2. Srážky.....	11
2.1.3. Vegetační pokryv.....	12
2.1.4. Půdní podmínky.....	13
2.2. Evapotranspirace.....	14
2.2.1. Potenciální evapotranspirace.....	15
2.2.2. Aktuální evapotranspirace.....	17
2.2.3. Evapotranspirace v modelu SAC-SMA.....	17
2.3. Hydrologické modelování odtoku.....	19
2.3.1. Modelovací systém AquaLog.....	20
2.3.2. Model SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting Model).....	21
3. Metodika.....	24
3.1. Použitá data.....	24
3.1.1. Vodoměrné stanice.....	24
3.1.2. Vstupní data.....	24
3.1.2.1. Průtok.....	24
3.1.2.2. Teplota vzduchu.....	25
3.1.2.3. Srážky.....	25
3.1.2.4. Potenciální evapotranspirace.....	25
3.2. Metoda výpočtů.....	25
3.3. Hydrologické simulace v systému AquaLog.....	26
4. Výsledky.....	30
4.1.1. Vyhodnocení vstupních dat.....	30
4.1.1.1. Srážky.....	30
4.1.1.2. Teplota vzduchu.....	32
4.1.1.3. Aktuální a potenciální evapotranspirace.....	35
4.1.2. Zpracování výsledků simulace.....	42
4.1.2.1. Průtok.....	42

4.1.2.2. Obsah horní zóny vázané vody (UZTW)	46
4.1.2.3. Obsah horní zóny volné vody (UZFW)	51
4.1.2.4. Obsah spodní zóny vázané vody (LZTW)	54
4.1.2.5. Obsah spodní zóny volné vody primární (LZFP)	59
4.1.2.6. Základní odtok primární (BFP)	61
4.1.2.7. Obsah spodní zóny volné vody suplementární (LZFS)	63
4.1.2.8. Základní odtok suplementární (BFS)	64
4.1.2.9. Denní variabilita potenciální evapotranspirace.....	66
4.1.3. Shrnutí výsledků simulací.....	68
5. Diskuze.....	70
6. Závěr.....	73
7. Použitá literatura.....	75
8. Seznam obrázků a tabulek.....	78
8.1. Obrázky.....	78
8.2. Tabulky.....	80

1. Úvod

Cíl práce

Evapotranspirace je jedním ze základních procesů hydrologického cyklu. Jako taková je určitým způsobem postižena ve všech hydrologických modelech simulujících delší časová období s různou intenzitou srážek a odtoku. Její postižení v předpovědních modelech a systémech je však většinou více či méně schematizováno a zjednodušeno z důvodu nedostupnosti dat potřebných k jejímu výpočtu v reálném čase a na základě předpokladu dominantního vlivu srážek na tvorbu odtoku.

Hlavním cílem této práce je zjištění citlivosti modelu SAC-SMA, resp. operativně používaného hydrologického předpovědního systému AquaLog na hodnoty použité evapotranspirace na modelovém povodí Litavky.

Díličními cíly pak jsou popsání povodí Litavky z hlediska fyzickogeografických charakteristik ovlivňujících míru evapotranspirace a popsání základních metod odhadu evapotranspirace.

Pro dosažení vytyčených cílů bude v teoretické části práce podána stručná fyzickogeografická charakteristika povodí Litavky a popsána metodika výpočtu potenciální evapotranspirace na základě dostupných meteorologických dat. Dále bude stručně popsán použitý hydrologický předpovědní systém AquaLog s důrazem na srážko-odtokovou komponentu systému (model SAC-SMA). V praktické části práce pak budou provedeny simulace s variabilními hodnotami popisujícími evapotranspiraci. Výsledky simulací budou popsány a interpretovány z hlediska vlivu na simulaci odtoku a stavových proměnných hydrologického modelu povodí Litavky.

Struktura práce

Práce je členěna do tří hlavních částí. První z nich je teoretická část obsahující popis modelového povodí, metod výpočtu evapotranspirace, systému AquaLog a modelu SAC-SMA. Druhá část se věnuje popisu dat a metodiky použité pro zpracování práce. Třetí část prezentuje dosažené výsledky a jejich interpretaci. Součástí práce je kritické zhodnocení postupu a dosažených výsledků v diskuzi a závěr shrnující základní postupy a zjištěná fakta.

2. Charakteristika modelového povodí a použitých prostředků

Na následujících stranách je podána stručná fyzickogeografická charakteristika povodí Litavky, které bylo zvoleno jako modelové povodí, a krátce popsána metoda určení evapotranspirace. Popsán je také model SAC-SMA jako srážko-odtoková komponenta hydrologické předpovědního a modelovacího systému AquaLog použitého pro simulace odtoku při změnách evapotranspiračních hodnotách.

2.1. Charakteristika povodí Litavky

Hlavním tématem této práce je evapotranspirace. Na tu má vliv většina fyzickogeografických vlastností povodí. V následujícím textu budou zmíněny pouze ty nejvýznamnější, tedy klimatické podmínky, půdní charakteristiky a vegetační pokryv zájmového území povodí Litavky. Podrobný popis ostatních složek fyzickogeografického prostředí byl podán v bakalářské práci autorky (Macounová, 2007).

2.1.1. Základní charakteristiky povodí

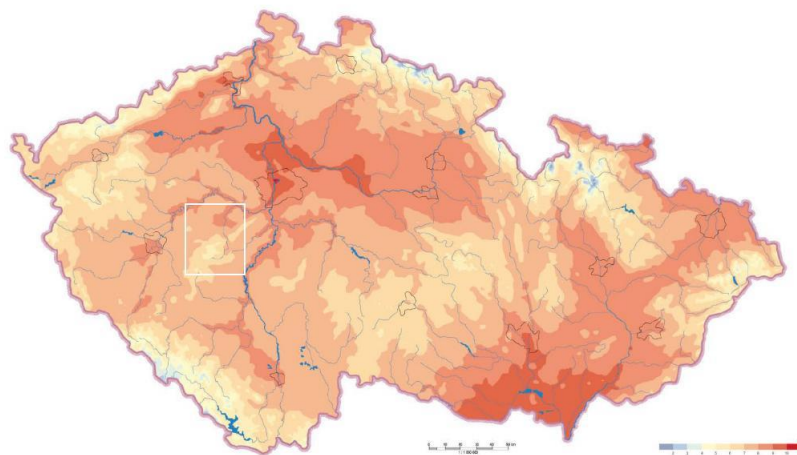
Povodí Litavky má protáhlý tvar od jihu k severu, tímto směrem teče také řeka Litavka. Povodí je nesouměrné, protože Litavka většinu významnějších přítoků přijímá z levé strany. Litavka má celkovou délkou 53,74 km, plochu povodí 629 km² a průtok u ústí je 2,57 m³.s⁻¹ (ČHMÚ, 2009). Litavka pramení ve výšce 765 m n. m. na svazích Brd asi 2 km severovýchodně od Nepomuku v zalesněné oblasti, na většině svého toku však protéká zemědělskou krajinou (Štefáček, 2008). V horní části toku je ochranné vodárenské pásmo, které slouží k ochraně vodních nádrží Láz, Pílská a Obecnice sloužících jako zdroj pitné vody pro příbramskou aglomeraci. Prvních několik kilometrů teče z Brd jihovýchodním směrem přes obec Láz, poté se před Bohutínem stáčí k severovýchodu až severu. Svým údolním tokem odděluje nejprve centrální Brdy od jejich východní části – Hřebenů, pak se rozlévá do otevřené krajiny a stále severním směrem teče ke Zdicím, kde se obrací k severovýchodu. Přes Králův Dvůr protéká do Berouna, kde v nadmořské výšce 218 m ústí zprava do Berounky na jejím 35. km (ShoCart, 2004).

2.1.2. Klimatické podmínky

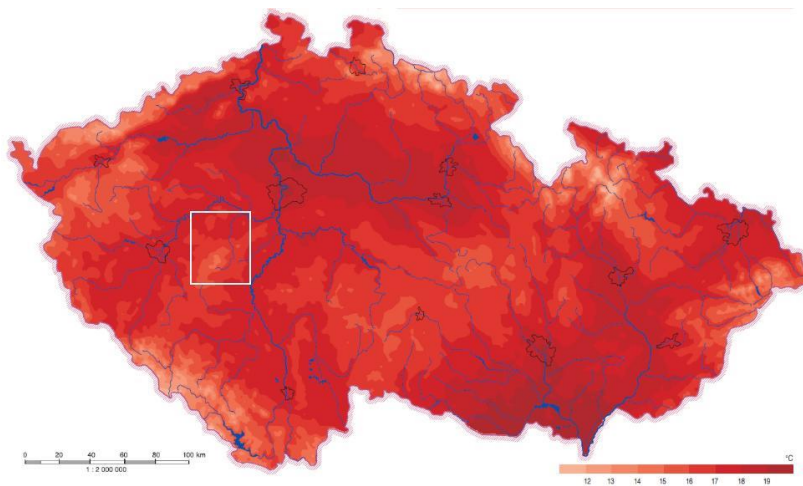
Hlavními klimatickými faktory, které ovlivňují míru evapotranspirace jsou teplota vzduchu a atmosférické srážky. Tyto prvky jsou zároveň i základními a často i jedinými vstupními daty pro většinu hydrologických modelů.

2.1.2.1. Teplota vzduchu

Průměrná roční teplota vzduchu se v zájmovém území liší v závislosti na nadmořské výšce (obr. 2.2). V jihozápadní oblasti povodí Litavky, nejvyšších polohách Brd, dosahuje 5 až 6 °C, horní tok v oblasti VVP Brdy-Jince má průměrnou teplotu 6 až 7 °C, střední tok v okolí Hořovic a Hostomic 7 až 8 °C a dolní tok v okolí Zdic a Berouna 8 až 9 °C. Teplota se zvyšuje ve všech ročních obdobích směrem k severní části povodí, která je níže položena, nejteplejším měsícem je červenec, kdy je průměrná teplota v severní části povodí Litavky 18 až 19 °C (obr. 2.3), a naopak nejstudenějším měsícem je leden, kdy průměrná teplota vzduchu v pramenné oblasti Brd dosahuje -4 až -3 °C (Tolasz a kol., 2007).



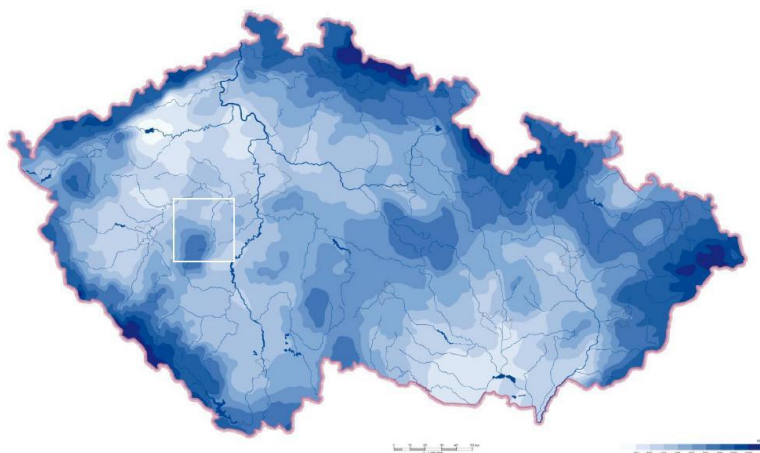
Obr. 2.2 - Průměrná roční teplota vzduchu (Tolasz a kol., 2007)



Obr. 2.3 - Průměrná červencová teplota vzduchu (Tolasz a kol., 2007)

2.1.2.2. Srážky

Srážkové úhrny v povodí Litavky také korespondují s nadmořskou výškou. Nejvíce srážek spadne v pramenné oblasti Brd, kde roční průměr dosahuje 700 až 800 mm (obr. 2.4). Úhrny se snižují směrem k ústí, kde průměr dosahuje jen 500 až 550 mm. Nejdeštivějším měsícem je červen, kdy spadne průměrně 80 mm, naopak nejsušším měsícem je leden, kdy průměrný úhrn dosahuje jen 35 mm. V jednotlivých ročních obdobích vypadne 15 až 30 % celkových ročních srážek, což znamená poměrně vyrovnaný roční chod řadící území k oceánickému typu podnebí.



Obr. 2.4 - Průměrný roční úhrn srážek (Tolasz a kol., 2007)

Brdy způsobují překážku pro větrné proudění, tudíž mají také vliv na vypadávání srážek, které je s prouděním vzduchu spojeno. Srážkový stín Hřebenů, nejvyšší části Brd, se projevuje hlavně v zimním období, kdy převažuje západní proudění vzduchu. To přináší velké množství srážek, které jsou ale zastaveny právě Hřebeny. V letním období se zde projevuje spíše jihozápadní nebo severovýchodní proudění vzduchu (Tolasz a kol., 2007).

V létě pak podobně jako na většině území významnou část celkových úhrnů tvoří srážky konvektivního charakteru. Z hlediska míry evapotranspirace je charakter srážek významný vzhledem k rozdílnému doplňování zásob vody v půdě a zásob podzemních vod, které mohou být využívány k evapotranspiračnímu procesu. Konvektivní srážky mají velkou intenzitu a většinou velmi krátký průběh, což vede k povrchovému odtoku a jen minimální infiltraci do půdy. Proto tento druh srážek méně přispívá k doplňování půdních zón.

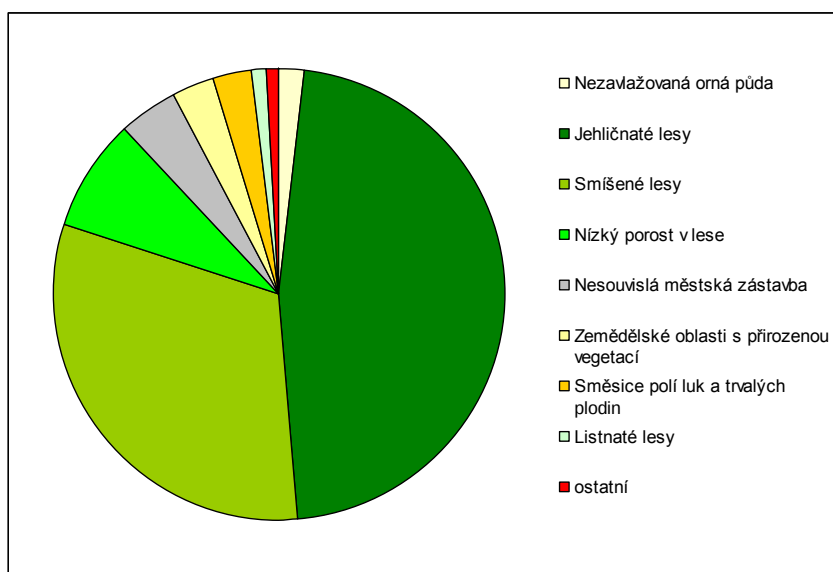
Pro simulaci hydrologického cyklu za použití modelu je také důležitá přítomnost sněhové pokrývky v zimních měsících. Průměrný sezónní počet dní se sněhem se odvíjí od nadmořské výšky, ve vyšších oblastech Brd to je 80 až 90 dní, v nižších polohách počet dní klesá na 60 až 70. Nejvíce sněhových srážek je v prosinci (Tolasz a kol., 2007). Tání

sněhové pokrývky není pravidelné, ale většinou k němu dochází v povodí Litavky od konce února do konce března. V tomto období se tedy začínají doplňovat zásoby podzemní vody, čemuž v zimním období sněhová pokrývka brání.

2.1.3. Vegetační pokryv

Land use v povodí Litavky tvoří převážně nezavlažovaná orná půda (47 %), dalších 40 % území zabírají lesní porosty, z toho je 31 % jehličnatých, 8 % smíšených a 0,8 % listnatých (Zdroj geografických dat pro GIS – archiv PřF UK, 2007). Jehličnaté lesy se nejvíce vyskytují v souvislém porostu ve VVP Brdy-Jince a na Hřebenech, lesy smíšené v Křivoklátské vrchovině na SZ území. Lesní porosty mají velký vliv na evapotranspiraci, neboť vysokou intercepcí a retencí relativně snižují povrchový (rychlý) odtok z území. Zároveň však zadrženou vodu spotřebovávají na evapotranspiraci, která je zde významně vyšší než z referenčního povrchu. Intercepcí zadržují nejvíce vody lesy jehličnaté, konkrétně smrkové (zadrží až 26 % spadlého deště), méně listnaté a smíšené, konkrétně buk (zadrží jen 8 % spadlého deště). U buku také dochází k intenzivnějšímu stékání vody po kmeni, je zde 15krát vyšší než u smrku (Košulič, 2005).

Další typy využití území představují asi 2 % území louky, pastviny, sady a zahrady a 2,5 % zemědělské oblasti s přirozenou vegetací. Přes 4 % území je zastavěno nebo je zde jinak zabráněno růstu vegetace (těžba, haldy, skládky, infrastruktura, atd.)

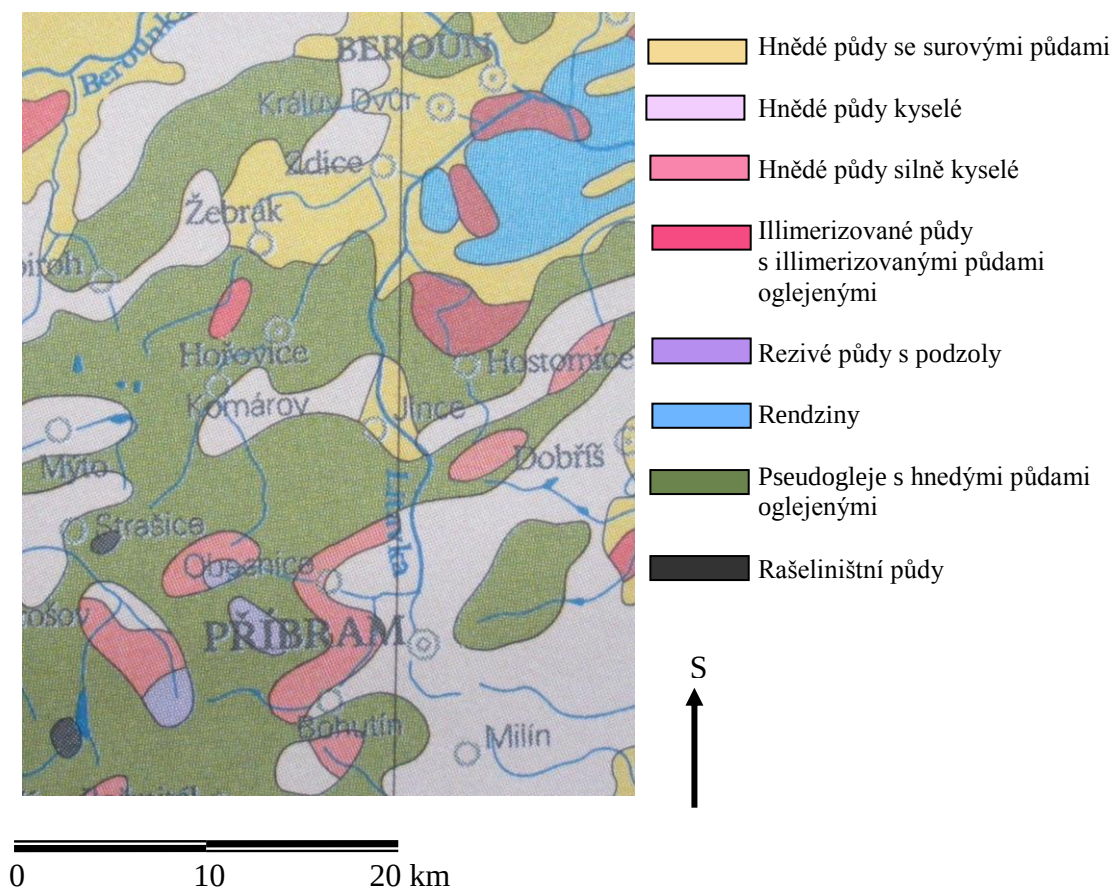


Obr. 2.5 – Land use povodí Litavky (%) (Zdroj geografických dat pro GIS – archiv PřF UK, 2007)

2.1.4. Půdní podmínky

Úroveň evaporace (fyzikálního výparu) ovlivňují také půdní poměry, a to půdní vlhkost, intenzita vztlínání vody v půdě nebo hloubka hladiny podzemní vody. Jemná struktura půdy úhrnný výpar zvyšuje, stejně jako tmavá barva půdního povrchu. Na vodou nasycených půdách závisí výpar na klimatických podmínkách, zejména teplotě vzduchu, jeho vlhkosti a na pohybu vzduchu. V ideálních podmínkách může dosahovat hodnot 10 až 15 mm za den, v podmínkách zemědělských půd dosahuje výše několika desetin až 15 mm denně (Havlíček a kol., 1986).

V celém povodí Litavky převažují kambizemě, vyskytují se nejvíce v nadmořské výšce 450 až 800 m n. m. a jsou vázány na členitý reliéf. Dalším častým půdním typem jsou pseudogleje. Jejich půdotvorným substrátem jsou často sprašové hlíny, jíly nebo odvápněné slínovce. Pod humusovým horizontem je mocný oglejený horizont bělošedě zabarvený s výskytem železitých bročků. Nachází se hlavně v oblasti Jinců, jižní části Hořovické brázdy a také ve Zbirožské vrchovině, v méně členitém terénu, kde nedochází k dostatečnému laterálnímu odvodnění půd (Němeček, Tomášek, 1983). V oblasti soutoku Litavky s Berouňkou, okolí Hostomic a Suchomastů se vyskytují půdy illimerizované. Jejich typický výskyt je od 250 do 500 m n. m. Jílem obohacený horizont je těžko propustný, a tedy zadržuje srážkovou vodu. V Karlštejnské vrchovině na vápencích se vyskytují rendziny. Jsou mělké, kamenité, se středním až vyšším obsahem humusu. V pramenné oblasti, v oblasti VVP Brdy-Jince a v nivních oblastech menších toků se nacházejí gleje. Pod mělkým humusovým horizontem je glejový horizont, který je trvale ovlivněný vysokou hladinou podzemní vody. Pro okolí větších říčních toků (Litavka, Červený potok, Suchomastský nebo Stroupínský potok) jsou typické fluvizemě – nivní půdy. Rankery, které jsou typické pro střední a vyšší polohy členitého reliéfu, můžeme najít v Brdské oblasti a Hořovické brázdě. Jsou charakteristické mocným humusovým horizontem, který přechází přímo do substrátu (Tomášek, 2003). Rozložení půdních typů v povodí Litavky je znázorněno na obr. 2.6.



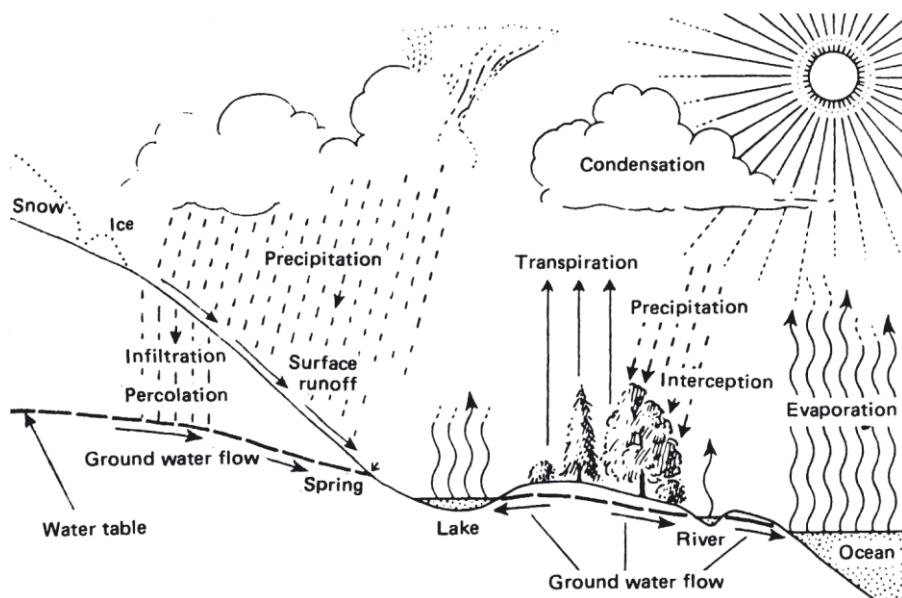
Obr. 2.6 - Mapa půdních typů (Tomášek, 2003)

2.2. Evapotranspirace

Podstatným procesem hydrologického cyklu a hydrologické bilance povodí je evapotranspirace. Způsoby různého výpočetního určení evapotranspirace byly podrobně popsány v bakalářské práci autorky (Macounová, 2007).

Evapotranspirace je fyzikální proces, kterým se voda z kapalného či tuhého stavu přeměňuje na vodní páru. Jde zároveň o primární proces, kterým se voda dostává do hydrologického cyklu. Společně se srážkami a odtokem se podílí na hydrologické bilanci v krajině a společně s odtokem a intercepcí tvoří ztrátovou složku bilance povodí. Příjmovou složku tvoří srážky, povrchový a podpovrchový odtok vody do povodí (Tolasz a kol., 2007).

Schéma hydrologického cyklu povodí je uvedeno na obr. 2.7.



Obr 2.7 - Hydrologický cyklus: *Snow* – sníh, *Ice* – ledovec, *Precipitation* – srážky, *Surface runoff* – povrchový odtok, *Infiltration* – infiltrace, *Percolation* – perkolace, *Ground water flow* – proud podzemní vody, *Water table* - vodní hladina, *Spring* - potok, *Lake* – jezero, *River* – řeka, *Ocean* – oceán, *Evaporation* – evaporace, *Condensation* – kondenzace, *Transpiration* - transpirace (Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wasserwirtschaft und Hydroinformatic, 2007)

Přesná míra evapotranspirace je velmi obtížně stanovitelná, má značné denní i sezónní výkyvy a je závislá na mnoha fyzikálních faktorech. Přímé měření evapotranspirace je kvůli specifickým podmínkám fyzikálních parametrů velmi obtížné. Proto se k měření využívají nepřímé metody, které dokáží evapotranspiraci vyčíslit díky znalosti hydrometeorologických dat běžně měřených na klimatických stanicích (Allen et al. 1998).

2.2.1. Potenciální evapotranspirace

Potenciální evapotranspirace představuje velikost evapotranspirace, která by nastala v daném místě pokrytém souvislým vegetačním porostem za podmínky nelimitujícího přísunu vody. Je to tedy maximální možný výpar a transpirace, vypočítány pomocí metody Penman-Monteith, což je modifikovaná Penmanova metoda, která je závislá na několika parametrech (radiace, tepelný tok v půdě, deficit tlaku vodní páry ve vzduchu, hustota vzduchu za konstantního tlaku, vztah tlaku nasycení vodní páry a teploty, aerodynamický odpor aj.). Je odvozována pro takzvaný referenční povrch (travní povrch) a pro další typy vegetačního pokryvu upravována dle empiricky odvozených koeficientů.

Rovnice (rov. 1) výpočtu podle metody Penman-Monteith (Allen a kol., 1998):

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

ET ... evapotranspirace [mm],

R_n ... radiační bilance zemského povrchu [W.m⁻²],

G ... tok tepla v půdě [kJ.m⁻².s⁻¹],

(e_s - e_a) ... sytostní doplněk [kPa],

ρ_a ... relativní vlhkost vzduchu, ρ_a = 1,293 [kg.m⁻³],

c_p ... specifické teplo vzduchu, c_a = 1005,50 [J.kg⁻¹.K⁻¹],

Δ ... sklon koexistenční křivky fázového diagramu [kPa.°C⁻¹],

γ ... psychometrická konstanta γ = 0,0663 [kPa.°C⁻¹],

r_s ... stomatální odpor [s.m⁻¹],

r_a ... aerodynamický odpor [s.m⁻¹].

Metoda Penman-Monteith není vhodná pro přímé použití v operativních modelech vzhledem k množství vstupních dat, které jsou potřeba k výpočtu. Operativní modely počítají v krátkém časovém kroku a všechny potřebné informace nejsou dostupné v dostatečném množství v online režimu, které operativní modely využívají. Proto je výpočet potenciální evapotranspirace často parametrizován, v případě modelu SAC-SMA jako roční křivka chodu potenciální evapotranspirace. Nebo je použita výrazná schematizace, kdy je evapotranspirace odhadována pouze na základě teploty vzduchu a srážek, což jsou nejběžněji využívaná data v hydrologickém modelování.

Výpočet evapotranspirace je přitom možný i dalšími jednoduššími metodami, které jsou založené na menším množství vstupních dat, a některé faktory zanedbávají či parametrizují. Kvůli tomu jsou však méně přesné. Například metoda Blaney-Criddle je založená pouze na údajích o teplotě vzduchu, proto je vhodná pouze pro delší časová období (Gupta, 2001). Další metody, jako např. radiační nebo Penmanova metoda, jsou podrobněji popsány v bakalářské práci autorky (Macounová 2007).

2.2.2. Aktuální evapotranspirace

Aktuální evapotranspirace je množství vody, které se skutečně odpaří v reálných přírodních podmínkách, její hodnota závisí na potenciální evapotranspiraci a dostupné vodě pro evapotranspiraci (Allen et al., 1998). Aktuální evapotranspiraci lze spočítat na základě evapotranspirace potenciální. Jejich vzájemný vztah je dán rovnicí (rov. 2):

$$E_a = k_s k_c E_p, \text{ kde}$$

E_a ... aktuální evapotranspirace [mm],

E_p ... potenciální evapotranspirace [mm],

k_s ... půdní koeficient pro E_a ,

k_c ... koeficient půdního pokryvu, jehož hodnota se mění podle vzrůstu vegetace.

Ve vztahu je velmi důležitý koeficient půdního pokryvu a půdní koeficient (Allen et al., 1998).

2.2.3. Evapotranspirace v modelu SAC-SMA

Evapotranspirace je důležitou složkou kontinuálních hydrologických modelů, které se zabývají změnami vlhkosti v půdních zónách mezi srážkovými událostmi, kdy voda do půdy vstupuje v důsledku infiltrace srážek (tání) a naopak je z půdy odebírána odtokem a právě evapotranspirací.

Naopak událostní hydrologické modely řeší krátkodobé epizody odtoku z intenzivních srážek, kdy dominuje tvorba rychlých složek odtoku. V takovém případě je evapotranspirace jako relativně málo intenzivní proces ve vztahu k příčinné srážce zanedbávána. Dalším faktorem je, že v průběhu srážek je evapotranspirace velmi malá v důsledku předpokládané vysoké vlhkosti vzduchu.

Ztráty vody evapotranspirací jsou významné zejména díky vegetačnímu pokryvu (lesy a zemědělské plochy) nacházejícího se v povodí, voda je odebírána buď z vegetace, nebo z půdních zón, kam zasahuje kořenový systém vegetace (více než 1 m). Evapotranspirace je tedy pro kontinuální modely, které řeší vodní bilanci v delším časovém období, velmi významným parametrem.

Voda pro evapotranspiraci je v modelu SAC-SMA dostupná z půdních zón vázané vody – horní zóna vázané vody (UZTW) a spodní zóna vázané vody (LZTW). Tyto zóny poskytují vodu pro ztrátu evapotranspirací, současně voda v těchto zónách není dostupná pro tvorbu odtoku.

Model SAC-SMA používá pro popis evapotranspirace parametr ET demand, což je křivka průměrných měsíčních hodnot potenciální evapotranspirace vzniklá kalibrací. Kalibrace je prováděna testováním shody simulovaného a pozorovaného hydrogramu. Hledají se nejvhodnější parametry, aby nastala nejlepší shoda simulace a pozorování pro kalibrované povodí. Jedním z kalibrovaných parametrů je tedy i ET demand. Jeho hodnoty jsou odvozeny tak, aby zůstaly fyzikálně smysluplné, avšak především aby zabezpečily správnost hydrologické bilance v povodí v průběhu kalibrace. Jejich hodnotou tak mohou být kompenzovány například nepřesnosti v měření průtoku nebo v odvození srážkových úhrnů vstupujících do modelu. Kalibrací vznikne schematizovaná křivka chodu hodnot potenciální evapotranspirace, která je použita místo operativně vypočítaných hodnot na základě aktuálních meteorologických a vegetačních podmínek.

Průměrné měsíční hodnoty ET demand pro model Sacramento jsou stanoveny na základě dlouhodobé kalibrace vodní bilance povodí a měly by tedy vypovídat o průměrné hodnotě potenciální evapotranspirace v daném měsíci. Přitom však nejde přímo o fyzikální vyjádření hodnoty evapotranspirace, ale o kalibrovaný parametr modelu, který by se měl fyzikálnímu vyjádření blížit.

Hodnoty parametru ET demand pro zájmová povodí (obr. 2.8), mají předpokládaný roční chod, nejvyšší hodnoty v letním období, kdy je nejvyšší výpar, nejnižší naopak v zimním. V tabulce jsou uvedeny hodnoty ET demand, které byly vypočteny z řad hodnot denní potenciální evapotranspirace vypočtených metodou Penman-Monteith pro jednotlivé roky v hodnoceném období (2001 až 2005) a pro dílčí části povodí. Byly uvažovány průměr (ET demand AVG), medián (ET demand MED) a průměr z 1. a 4. kvartilu (ET demand QD). K simulacím byly kromě těchto vypočítaných hodnot využity také originální hodnoty ET demand z nastavení operativního modelu SAC-SMA (dále jen ET demand ORIG) které vznikly kalibrací pro zájmovou oblast povodí, také pro období let 2001 až 2005.

Hodnoty ORIG vykazují větší extrémy než ostatní hodnoty, nižší hodnoty v zimě a vyšší v létě. Odlišnosti mezi povodími jsou dány rozdílným chodem srážek během roku. I přes celkově hydrologicky smysluplný chod hodnot zde jsou některé výjimky zaviněné právě ročním chodem srážek a teploty pro jednotlivá povodí, bráným v úvahu právě pro výpočet metodou Penman-Monteith. Vyšší maximální hodnoty jsou zaznamenány u Berouna než u Čenkova, dřívější maximum pak nastává u hodnot vypočítaných metodou Penman-Monteith (AVG, MED a QD) než u hodnot ORIG.

	ORIG		AVG		MED		QD	
	Čenkov	Beroun	Čenkov	Beroun	Čenkov	Beroun	Čenkov	Beroun
leden	0.10	0.10	0.37	0.43	0.35	0.43	0.30	0.34
únor	0.30	0.10	0.51	0.60	0.68	0.78	0.44	0.50
březen	0.51	0.10	0.71	0.77	0.76	0.72	0.65	0.65
duben	1.20	0.60	1.20	1.30	1.63	1.86	1.19	1.22
květen	2.20	2.20	1.72	1.79	2.21	2.24	1.64	1.60
červen	2.90	3.40	2.10	2.03	1.91	1.75	2.03	1.98
červenec	3.20	3.10	1.99	1.90	1.77	1.74	1.95	1.92
srpen	2.80	2.20	1.91	1.90	1.71	1.45	1.88	1.78
září	2.30	2.20	1.05	1.08	0.76	0.66	1.04	1.02
říjen	1.30	1.60	0.63	0.68	0.66	0.75	0.54	0.57
listopad	0.40	0.20	0.30	0.31	0.32	0.39	0.27	0.28
prosinec	0.10	0.10	0.23	0.28	0.21	0.22	0.22	0.27

Tabulka. 2.1 – Tabulka měsíčních průměrů denních hodnot parametru ET demand (mm) pro Čenkov a Beroun, 2001 až 2005

Aktuální evapotranspirace je modelem označována jako celková evapotranspirace, tedy skutečná ztráta vody evapotranspirací. Hodnota je vždy nižší než hodnota potenciální evapotranspirace, resp. hodnota ET demand. Míra aktuální evapotranspirace je dána příslušnou hodnotou ET demand, teplotou vzduchu a zejména naplněním zmiňovaných půdních zón modelu SAC-SMA tedy množstvím vody, která je v půdě a vegetaci dostupná pro evapotranspiraci. Přitom je její míra v průběhu dne rozdělena podle sinusové křivky zohledňující denní chod řídicích meteorologických prvků.

Evapotranspirace má na výsledky modelu největší vliv v obdobích sucha, kdy odebráním vody z půdy zmenšuje celkové nasycení, které pak následně znamená i menší celkový odtok z povodí. Zároveň tak určuje počáteční podmínky před následující srážkovou událostí. Při nadhodnocení ztráty evapotranspirací dojde k podhodnocení průtoku během sucha a následně podhodnocení průtoku během srážkového období, nástupu povodně nebo její kulminace v důsledku větší volné kapacity půdních zón před povodňovou situací.

2.3. Hydrologické modelování odtoku

V druhé polovině 20. století byla vyvinuta řada programových prostředků pro simulaci odtoku a hydrologické bilance povodí. Použité modely lze rozdělit na základě různých kritérií. Z hlediska jejich konstrukce je lze dělit na deterministické a stochastické. Deterministické modely jednoznačně spojují příčinné faktory (vstupy, parametry a počáteční podmínky modelu) s následkem (výsledným odtokem). U stochastických modelů je tento

jednoznačný vztah rozmlžen aplikací pravděpodobnostních funkcí. Deterministické modely lze dále dělit na plně fyzikální - koncepční a blackbox modely. Koncepční modely (grey box) jsou založeny na základě fyzikálních zákonů, jejichž rovnice jsou pro operativní provoz modelů zjednodušovány, proto je lze považovat za koncepční. Pro složité vazby obsahují také empiricky odvozené vztahy (Jeníček, 2005). Koncepční modely se tedy snaží zjednodušeným způsobem vystihnout podstatu hydrologických procesů odehrávajících se v povodí pomocí parametrizovaných rovnic.

2.3.1. Modelovací systém AquaLog

AquaLog je vodohospodářský modelovací systém určený pro podporu rozhodovacích procesů v oblasti vodního hospodářství. Jedná se o integrovaný programový prostředek určený pro simulace, předpovědi a řízení odtokového procesu a kvality vody v historickém i v reálném čase (AquaLogic, 2009).

Systém byl vyvinut pro ČHMÚ firmou AquaLogic a je inspirován předpovědním systémem NWSRFS (National Weather Service River Forecast System) Národní meteorologické služby (NWS) v USA. AquaLog byl do pravidelného provozu postupně uváděn mezi roky 1999 až 2001 a operativně je používán od počátku roku 2002 (Daňhelka, 2007).

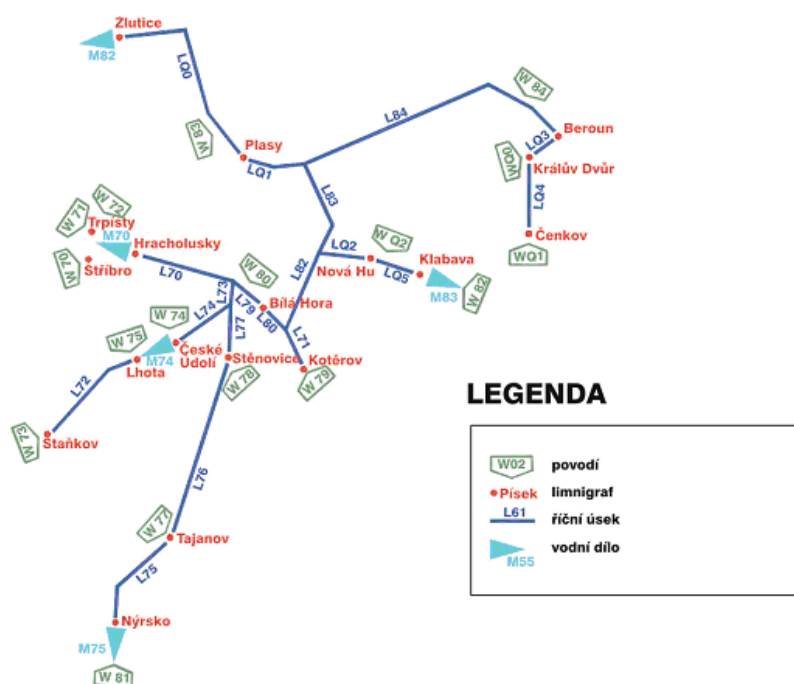
Slouží tedy jako nástroj v operativní hydrologii, pro odvození návrhových charakteristik vodohospodářských opatření nebo při sledování kritických situací. AquaLog umožňuje numerické simulace vytváření a tání sněhové pokrývky, transformace dešťové srážky (resp. odtoku z tání)-odtok, transformace průtoků v říčních korytech, simulace a řízení provozu nádrží a modelování transport-difúzních procesů v povrchových vodách (AquaLogic, 2009).

Součástí systému jsou modelovací techniky, které umožňují simulaci a předpověď srážko-odtokových procesů. Pro výpočty byly v rámci této práce použity pouze modelovací techniky SAC-SMA, SNOW 17 a TDR. Model tání sněhu SNOW 17 umožňuje simulaci procesů tání a vytváření sněhové pokrývky. Jako vstupní data jsou potřebné údaje o teplotě vzduchu a množství srážek. Model matematicky vyjadřuje mocnost sněhové vrstvy, plošný rozsah sněhové pokrývky, výměnu tepla mezi sněhem a vzduchem a mezi sněhem a půdou a retenci tekuté vodní fáze. Model TDR (Transport Diffusion Model) je transport-difúzní model, který umožňuje rozlišení pohybu vody v korytě vodního toku a nivě s rozdílnými parametry v závislosti na velikosti průtoku (AquaLogic, 2009).

Model tání sněhu SNOW 17 a srážko-odtokový model SAC-SMA se mohou také členit do samostatných zón např. na základě nadmořské výšky, typu zemního pokryvu a podobně.

Podstatnou vlastností AquaLogu je možnost operativně měnit některé parametry a stavové proměnné (např. počáteční hodnoty nasycení jednotlivých zón v modelu Sacramento nebo hodnoty některých parametrů). Tato funkce umožnila právě zkoumání vlivu změny hodnot evapotranspirace na výsledky modelovacího systému.

Na obr. 2.8 je znázorněno schéma hydrologického předpovědního systému AquaLog pro povodí Berounky.



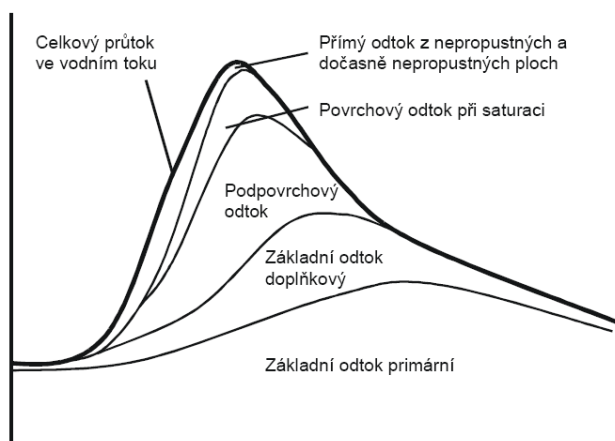
Obr. 2.8 - Schéma hydrologického předpovědního systému AquaLog pro povodí Berounky (ČHMÚ, 2004)

2.3.2. Model SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting Model)

Model Sacramento je srážko-odtokovým komponentem předpovědního systému AquaLog. Právě zapojení SAC-SMA do systému umožňuje vliv evapotranspirace na simulaci vodní bilance v povodí.

SAC-SMA je srážko-odtokový model systému NWSRFS (National Weather Service River Forecast System) vyvíjený od poloviny 70. let 20. století Národní meteorologickou službou NWS v USA. Umožňuje simulaci pohybu vody v povodí a často je kombinován s modelem SNOW 17 pro použití v podmínkách s výskytem sněhu v zimním období.

Model SAC-SMA představuje povodí jako soustavu vertikálních a horizontálních zón. Horní zóny vodu zadržují (intercepce) nebo je odčerpávána vegetací (evapotranspirace) nebo se infiltrací dostává do nižších zón (půdní vláh a zásoby podzemní vody). Po naplnění jednotlivých zón dochází k odtoku jeho různými složkami (obr. 2.9), a to buď k přímému odtoku (z dočasně nepropustné plochy vzniklé po nasycení půdní zóny), odtoku z nepropustných ploch (povrchový odtok), podpovrchovému odtoku (po nasycení zón, které mají spojení s vegetačním krytem) nebo podzemnímu odtoku, a to primárnímu nebo suplementárnímu (sezónní složka celkového odtoku) (Aqualogic, 2009).



Obr. 2.9 – Separace hydrogramu na jednotlivé složky odtoku modelu SAC-SMA (Daňhelka, 2007)

Systém zón simuluje pohyb vody v půdě. Po srážkové události, pokud voda spadne na propustnou plochu, začnou se nejdříve plnit horní zóny, které simulují rychlé složky odtoku z povodí. Pak se začnou plnit spodní zóny, které simulují pomalé složky odtoku. Zóny volné vody se sice nemůžou podílet na odtoku, ale jsou dostupné pro evapotranspiraci. Narozdíl od zón vody vázané, které se na odtoku podílí, ale pro evapotranspiraci dostupné nejsou.

Srážková voda tedy nejdříve začne plnit horní zónu vázané vody (UZTW), kde představuje půdní vlhkost. Saturací se dostane do druhé horní zóny volné vody (UZFW) a odtud je buď odvedena podpovrchovým odtokem, nebo se perkolací dále dostane do spodních zón. Při výpočtu je tento vertikální pohyb preferován před horizontálním pohybem, tedy podpovrchovým odtokem (Daňhelka, 2007).

Jednotlivé parametry modelu SAC-SMA charakterizují proces srážky/tání-odtok. Je zde navíc zohledněno mnoho dalších faktorů, jako korekční faktory pro dešťové a sněhové srážky, teplotní a výškové gradienty, nadmořská výška teploměrných stanic, jednotkový

hydrogram (charakterizující transformační účinky povodí) a ET demand (evapotranspirační potřeba reprezentující dlouhodobé měsíční úhrny evapotranspirace) (Aqualogic, 2009).

Rozlišujeme tři druhy spodních zón, spodní zónu vázané vody (LZTW) s vodou dostupnou pro evapotranspiraci a dvě zóny volné vody. Zóna volné vody se dělí na primární (LZFP) a suplementární (LZFS). Tyto dvě zóny představují množství vody, které je dostupné pro odvodnění a základní odtok (BFP a BFS) nebo pro podzemní odtok, který se neprojeví v říčním korytě. Spodní zóny jsou plněny perkolací simultánně a odvodňují se nezávisle rozdílnou rychlostí produkující základní odtok. Rychlost perkolace z horních do spodních zón je závislá na saturaci spodních zón (za období sucha je nejvyšší). Odtok ze spodních zón je rozdílný. Odtok z primární spodní zóny probíhá kontinuálně, tedy i v suchém období, zatímco odtok ze suplementární spodní zóny má význam především po srážkových událostech, kdy vyrovnává jejich simulace. Během suchého období není většinou generován (Daňhelka, 2005).

V zimním období srážko-odtokový model úzce spolupracuje s modelem sněhovým SNOW 17, který modeluje tání sněhu. Po průchodu sněhovou pokrývkou voda opět vstupuje do srážko-odtokového modelu SAC-SMA. Správný odhad odtoku závisí na přesné simulaci plošného rozsahu sněhové pokrývky a správném stanovení infiltrace zmrzlé půdy (Daňhelka, 2007).

Výsledek vodní bilance v půdě je uveden v mm vodního sloupce a výsledný odtok je transformován do koryta toku speciální variantou jednotkového hydrogramu, který je strmější než ten klasický. Speciální jednotkový hydrogram je zde použit kvůli tomu, aby nedocházelo ke zpoždění pohybu vody v povodí, protože je do výpočtu zahrnut i podpovrchový odtok a ne jen povrchový, jak je tomu u klasického jednotkového hydrogramu (Daňhelka, 2007).

3. Metodika

3.1. Použitá data

3.1.1. Vodoměrné stanice

Limnigrafická stanice Čenkov se nachází asi 10 km severně od Příbrami. Leží na 28,8. říčním km řeky Litavky a plocha povodí ke stanici je 157,16 km² (25 % povodí) (ČHMÚ, 2009). Obec Čenkov leží uprostřed zalesněné oblasti Brd, na okraji VVP Brdy-Jince. Stanice Čenkov reprezentuje horní část povodí. Tato část povodí je mnohem více zalesněná, leží ve vyšších nadmořských výškách a je zde větší sklonitost svahů. Tyto fyzickogeografické charakteristiky mimo jiné ovlivňují následně prezentované výsledky.

Stanice Beroun leží na 1. říčním km, plocha povodí ke stanici je 628,96 km² (99,5 % povodí) (ČHMÚ, 2009). Stanice reprezentuje dolní část povodí od Čenkova po ústí v Berouně. Na území se nachází převážně zemědělské půdy nebo nesouvislá městská zástavba, u ústí také zástavba města Beroun, v severovýchodní oblasti je dominantní Český kras s vápencovým podložím. Právě rozdílné podmínky dílčích povodí mohou vysvětlovat odlišné výsledky parametrů.

3.1.2. Vstupní data

Pro přesnost hydrologických simulací je zásadní přesnost a v případě operativního provozu i aktuálnost vstupních dat. Jsou to informace o meteorologických (teplota vzduchu a srážky) a hydrologických (průtoky) veličinách.

Jako vstupní data byly pro práci použity kromě potenciální evapotranspirace také denní údaje o srážkách a teplotě pro jednotlivé části povodí a hodnoty průtoků z vodoměrných stanic – Čenkov a Beroun.

3.1.2.1. Průtok

Průtok jako jeden z hlavních vstupů hydrologických modelů je zjišťován převážně nepřímou metodou převodem z vodních stavů za pomoci konsumpční křivky. Pro operativní provoz je používán hodinový krok, v našem případě je použit 24 hodinový krok (získaná data z jednotlivých stanic jsou denní údaje). Data byla získána z vodoměrných stanic Čenkov a Beroun, jsou to denní průměrné hodnoty průtoků za období let 2001 až 2005. Data poskytl ČHMÚ jako data pro primární zpracování dat, mělo by tedy jít o data očištěná o některé nepřesnosti dané způsobem měření vodních stavů a jejich převedení na průtoky.

3.1.2.2. Teplota vzduchu

Teplota vzduchu vstupuje do modelu ve formě průměrné plošné hodnoty pro jednotlivá dílčí definovaná povodí (Mean Areal Temperature - MAT). Potřebné řady denní teploty jsou v modelu dosazovány na základě metody Thiessenových polygonů při zohlednění vertikálního teplotního gradientu. Přitom byly použity definice vah z operativního nastavení modelu pro povodí Litavky jak je používáno v provozu ČHMÚ. Použité denní průměrné hodnoty teploty vzduchu za období 2001 až 2005 ze stanic Neumětely, Plzeň, Praha-Libuš, Příbram a Rožmitál byly poskytnuty ČHMÚ a byly vypočteny ze standardních termínovaných měření teploty vzduchu v 7:00, 14:00 a 21:00 hodin středoevropského času (SEČ). Z těchto údajů se vypočítá průměrná denní teplota $((t_{07} + t_{14} + 2t_{21})/4)$.

3.1.2.3. Srážky

Srážky vstupují do hydrologického modelu opět ve formě plošné informace, průměrná plošná srážka (Mean Areal Precipitation - MAP). Pro dílčí povodí Čenkov a Beroun byly vypočteny pomocí Thiessenových polygonů. Přitom byly použity definice vah (ploch polygonů) z operativního nastavení modelu pro povodí Litavky, jak je používáno v provozu ČHMÚ. Z ČHMÚ byly poskytnuty řady denních hodnot naměřených srážkových úhrnů za období 2001 až 2005 ze stanic Beroun, Hvozdec, Neumětely, Podlesí, Příbram, Rožmitál, Rpety, Zaječov, Zbiroh a Zdice. Jde o data získávána z operativních i manuálně obsluhovaných srážkoměrů a jde o hodnoty vztažené vždy k 7. hodině ráno.

3.1.2.4. Potenciální evapotranspirace

Potenciální evapotranspirace je v hydrologickém modelu použita ve formě průměrné roční křivky ET demand. Ta byla stanovena na základě výpočtu hodnoty potenciální evapotranspirace pro dílčí části povodí metodou Penman-Monteith na základě meteorologických dat (viz výše uvedená rov. 1) poskytnutých ČHMÚ. Byly poskytnuty řady denních meteorologických hodnot pro období let 2001 až 2005.

3.2. Metoda výpočtů

Cílem práce je zjištění citlivosti modelu SAC-SMA, resp. systému AquaLog v modelovém povodí na rozdílné hodnoty parametru ET demand.

Pro zjištění nepřesností modelu byly porovnávány výsledky simulací s použitím originálních hodnot ET demand používaných v operativním provozu modelu v ČHMÚ a odvozených na základě kalibrace odtoku a hodnot ET demand odvozených na základě

vypočítané evapotranspirace založené na meteorologických datech a metodě Penman-Monteith. Hodnoty byly vypočítány zvlášť pro dvě dílčí povodí Litavky – horní část povodí po vodoměrnou stanici Čenkov (dále označováno jako Čenkov) a dolní část povodí od Čenkova po vodoměrnou stanici v Berouně (dále označovanou jako Beroun).

Jako vstupní data byly použity denní hodnoty potenciální evapotranspirace vypočtené pro povodí Čenkov a Beroun pro období od roku 2001 do roku 2005. Časové období bylo vybráno díky existenci potřebných dat pro výpočet evapotranspirace (zejména díky zprovoznění stanice v Příbrami poskytující data o větru a záření) a současně je vhodné i díky výskytu odlišných meteorologických podmínek – zejména jde o rok 2002 (kdy bylo povodí zasaženo extrémní srážkovou situací v srpnu a došlo ke vzniku povodňového odtoku v povodí) a naopak velice suchý rok 2003 (kdy v letním období došlo k dlouhodobému výskytu meteorologického i hydrologického sucha).

Denní hodnoty potenciální evapotranspirace pro období let 2001 až 2005 byly vypočítány na základě meteorologických dat získaných z ČHMÚ.

Z řad vypočtených hodnot denní potenciální evapotranspirace pro jednotlivé roky v hodnoceném období (2001 až 2005) a pro dílčí části povodí byly vypočteny charakteristické roční průběhy potenciální evapotranspirace na bázi kalendářních měsíců, kdy byly uvažovány průměr (ET demand AVG), medián (ET demand MED) a průměr z 1. a 4. kvartilu (ET demand QD). K simulacím byly kromě těchto vypočítaných hodnot využity také originální hodnoty ET demand z nastavení operativního modelu SAC-SMA – dále jen ET demand ORIG, které vznikly kalibrací pro zájmovou oblast povodí, také pro období let 2001 až 2005.

Tyto hodnoty ET demand byly postupně dosazovány do modelu SAC-SMA jako požadovaná evapotranspirace (ET demand) – křivka měsíčních průměrných hodnot potenciální evapotranspirace. Pro každou verzi hodnot byla provedena simulace a získána data o simulovaných průtocích a o stavových a vstupních proměnných v modelu, které sloužily pro další porovnání simulací jednotlivých datových řad.

3.3. Hydrologické simulace v systému AquaLog

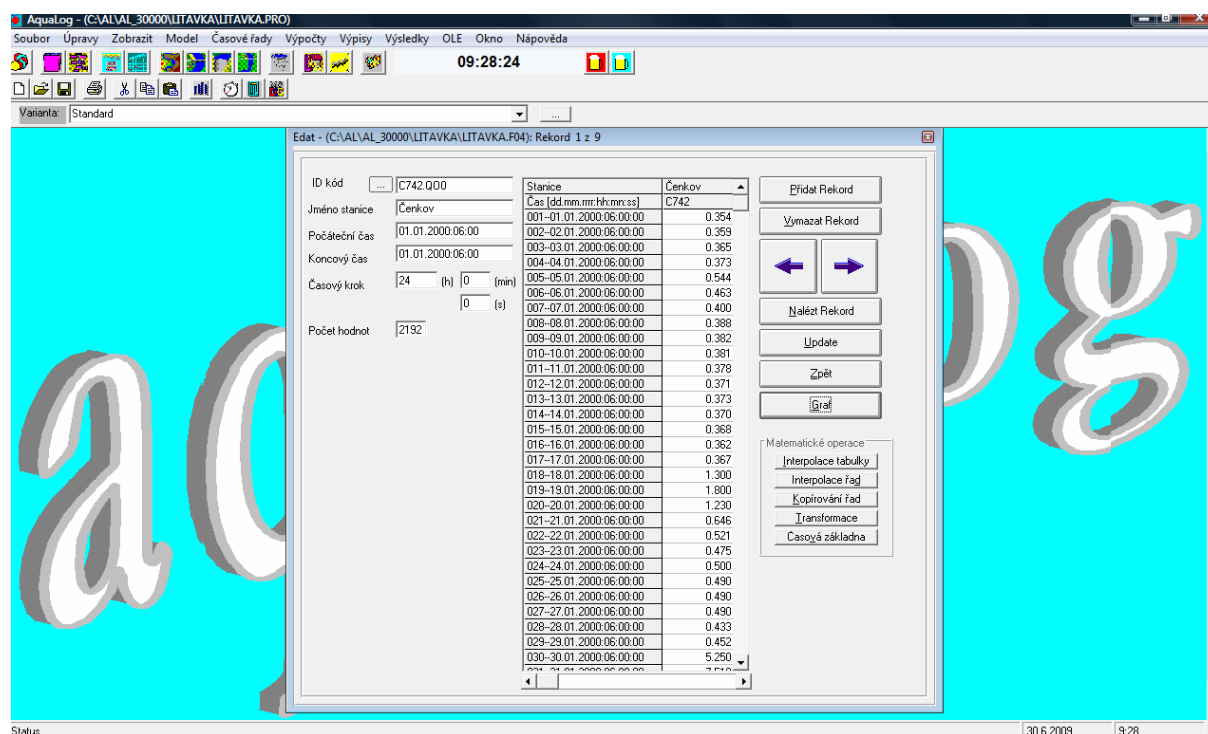
Pro hydrologickou simulaci částí povodí Čenkov a Beroun byla použita verze systému AquaLog 5.0 a hodnoty parametrů používané v ČHMÚ pro operativní provoz systému v zájmovém povodí.

Nejdříve byly upraveny parametry a nastavení modelu tak, aby umožňovaly přímý vstup jedné hodnoty pro definovaná dílčí povodí modelu (v operativním běhu jsou používána data z jednotlivých meteorologických stanic a na ně aplikovány přednastavené váhy). Použití

jednoho vstupu srážek, teploty a průtoku pro každé mezipovodí tak zjednodušuje práci s daty a jejich editaci v modelu.

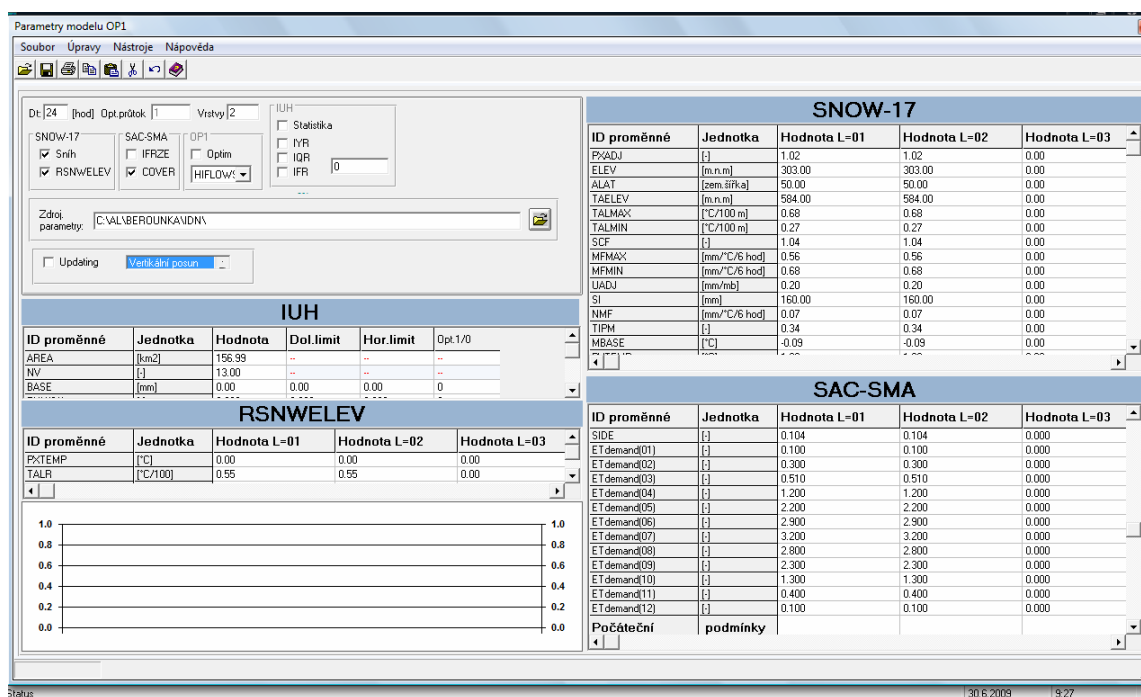
Současně byla provedena úprava související s odlišným používaným krokem výpočtu. Zatímco operativní verze používá hodinový krok, simulace v našem případě byla provedena v kroku 24 hodin, což si vyžádalo odpovídající úpravu jednotkového hydrogramu – tedy zkrácení jeho délky a zmenšení objemu v poměru 1:24. Ostatní parametry nebyly upravovány.

Postup provedení vlastních simulací zahrnuje editaci časových řad (modul Edat) v AquaLogu. Pro jednotlivé Rekordy stanic (srážky, teplota, průtok) byly vyplněny hodnoty ve 24 hodinovém kroku po celé období (2001 až 2005), časový krok odpovídá vstupním datům, jež jsou také v 24 hodinovém kroku (obr. 3.1).



Obr. 3.1 - Ukázka editačního prostředí EDAT systému AquaLog

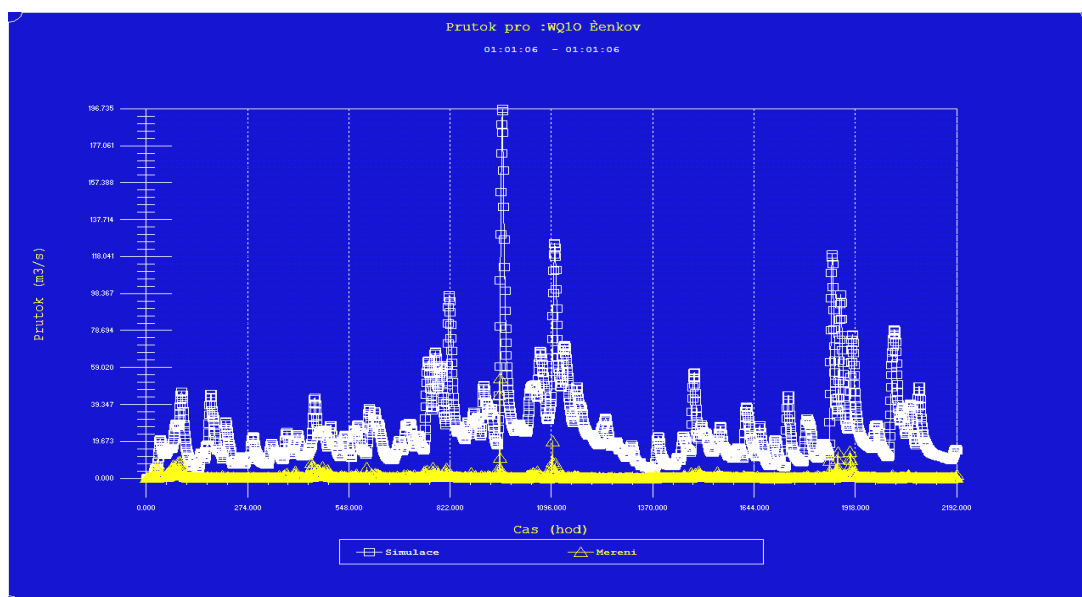
V systému AquaLog byly následně vytvořeny čtyři rozdílné sady parametrů (F01), vždy pro jinou hodnotu parametru ET demand (ORIG, AVG, MED a QD). Přes editaci parametrů modulu Builder byly do modelu SAC-SMA postupně dosazovány jednotlivé hodnoty parametru ET demand (ORIG, AVG, MED a QD), a tím vznikla pro každou hodnotu jiná sada parametrů (soubory *.F01), která byla použita v následující simulaci (obr. 3.2).



Obr. 3.2 - Ukázka editačního prostředí parametrů modelu SAC-SMA v systému AquaLog

Poté byly provedeny simulace celého vybraného období, kdy byla použita stejná vstupní data, avšak simulace byly provedeny s různými parametry ET demand použitím vytvořených *.F01 souborů (obr 3.3).

Výsledky byly archivovány a dále zpracovávány v prostředí MS Excel, pomocí něhož byly vytvořeny jednotlivé grafy.



Obr. 3.3 - Ukázka simulace průtoku systémem AquaLog pro povodí Čenkov (bílá – simulace, žlutá – měření)

Pro zjištění vlivu rozdílných hodnot ET demand na výsledky simulace byly porovnány nejen hodnoty výsledného odtoku, ale i další simulované stavové a vstupní proměnné v modelu. Konkrétně byly vyhodnoceny řady denních simulovaných hodnot aktuální a potenciální evapotranspirace, průtok a hodnoty jednotlivých půdních zón: horní zóna vázané vody (UZTW) a její deficit, horní zóna volné vody (UZFW), dolní zóna vázané vody (LZTW) a její deficit, dolní zóna volné primární podzemní vody (LZFPW) a dolní zóna volné suplementární (sezónní) podzemní vody (LZFSW). Dále byly sledovány také základní odtoky ze spodních zón: primární základní odtok (BFP) a suplementární základní odtok (BFS).

Z výstupních hodnot modelu, který nasimuloval denní údaje jednotlivých výstupů a stavových hodnot, byly vypočítány hodnoty a sestrojeny grafy pro měsíční aritmetický průměr denních hodnot let 2001 až 2005 (AVG), měsíční medián denních hodnot let 2001 až 2005 (MED) a měsíční průměr 1. a 4. kvartilu denních hodnot let 2001 až 2005 (QD). Prezentovány jsou grafy denního chodu hodnot za celé zkoumané období 2001 až 2005, měsíční průměr denních hodnot za jednotlivé měsíce celého období (2001 až 2005) a roční průměr denních hodnot za jednotlivé roky (2001 až 2005). U denního chodu hodnot je zobrazen klouzavý průměr s periodou 31, který zahlučuje rozkolísanost a zachycuje hlavní trend průběhu znázorněného časového úseku (měsíc).

4. Výsledky

Hlavním výstupem získaným simulacemi jsou simulované odtoky a simulovaná celková (aktuální) evapotranspirace. Vzhledem k tomu, že model operuje s plošnými hodnotami za povodí, které jsou vyjádřeny nejčastěji v mm (tedy průměrné výšce vodního sloupce v povodí, jež podstupuje daný hydrologický proces), jsou i výsledky prezentovány nejčastěji v této jednotce. Není-li v následujícím textu uvedeno jinak, jsou prezentované hodnoty vyjádřeny v mm za den (denní úhrn srážek, denní míra evapotranspirace, bazální odtok), a to i v případě vypočtení průměrů za delší období – tedy např. měsíční průměr denní míry evapotranspirace.

4.1.1. Vyhodnocení vstupních dat

Data vstupující do hydrologického modelu byla vyhodnocena podobně jako výstupy pro účel možného porovnání výsledků právě v závislosti na známých vstupních hodnotách.

4.1.1.1. Srážky

Měsíční průběh průměrných denních úhrnů srážek za hodnocené období pro část povodí Čenkov se vyznačoval vysokými průměrnými úhrny na začátku roku (leden 2,1 mm), pak až do dubna srážky klesaly, duben byl nejsušší měsíc s průměrnými denními srážkami 1 mm. Pak hodnota srážek narůstala až k červencovému maximu (3,4 mm), letní období mělo největší srážkové úhrny, a to díky výskytu konvektivních srážek. Poté hodnoty srážek opět klesaly k druhému říjnovému minimu (1,3 mm), na konci roku se opět srážkové úhrny mírně zvýšily. Tento roční chod srážek s letním maximem je typický pro celé území kontinentálního charakteru, pro tuto část povodí (a pro oblasti s vyšší nadmořskou výškou) jsou ovšem výrazné i srážky v zimním období zapříčiněné právě návětrným efektem Brd, který způsobuje vypadávání srážek přinášených západním prouděním větru.

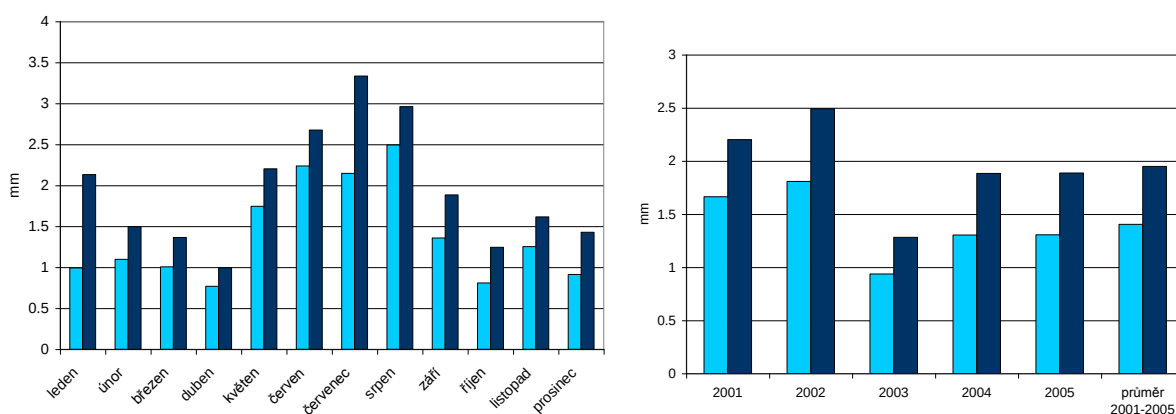
Roční průměrné denní hodnoty byly nejvyšší v roce 2002 (2,5 mm), kdy celoroční průměr zvyšovala hlavně srážková činnost v srpnu, a nejnižší v roce 2003 (1,3 mm), kdy byly celoročně nízké srážkové úhrny. Průměrná hodnota denního úhrnu za celé zkoumané období byla 1,9 mm a průměrný roční úhrn za zkoumané období 712 mm.

Oproti tomu srážkové úhrny pro část povodí Beroun měly odlišný průběh. Zimní srážkové úhrny se zde neprojevíly tak významně a celkový úhrn byl nižší. V měsících leden, únor a březen se hodnoty pohybovaly kolem 1 mm. Opět zde nastalo dubnové minimum (0,7 mm), pak narůstaly letní srážkové úhrny, maximum zde bylo až v srpnu (2,5 mm)

a následně druhé minimum v říjnu (0,8 mm). V listopadu se úhrny opět zvýšily na 1,3 mm. Roční průměrné denní úhrny měly podobný průběh jako v prvním případě, maximum v roce 2002 (1,8 mm) a minimum v roce 2003 (0,9 mm). Průměr denního úhrnu za zkoumané období představovala hodnota 1,4 mm, průměr ročního úhrnu srážek za zkoumané období hodnota 513 mm.

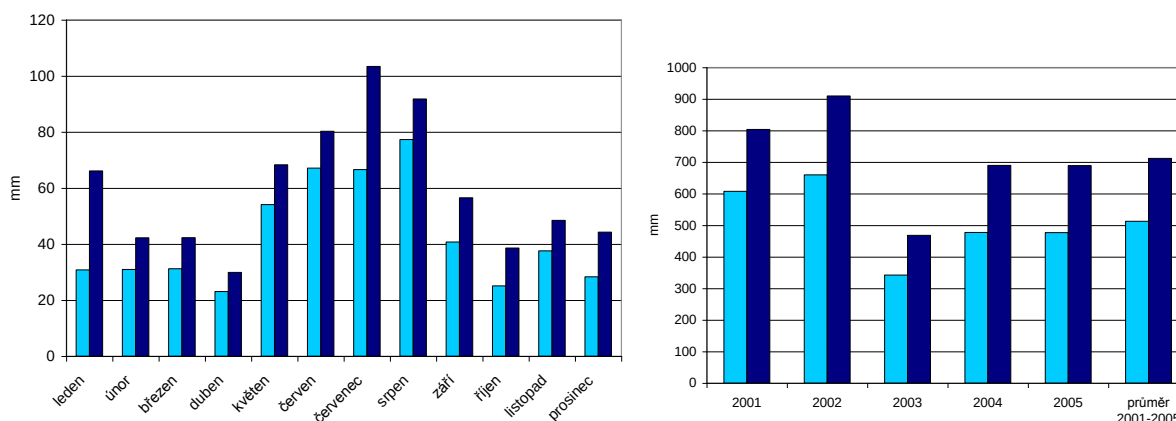
Průběh jednotlivých hodnot je patrný z obrázků 4.1 a 4.2.

Rozdíl v úhrnu srážek mezi částmi povodí je zapříčiněn rozdílnou nadmořskou výškou jednotlivých částí povodí, má zde také vliv srážkový stín Brd. Převládá zde totiž západní a jihozápadní proudění větru, které je výrazné hlavně v zimním období, a právě v horní části povodí Čenkov se projevuje návětrný efekt. Naopak v dolní části povodí Beroun se projevuje závětrný efekt způsobený Brdy.



Legenda: ■ Čenkov, ■ Beroun

Obr. 4.1 – Měsíční a roční průměry denních úhrnů srážek pro povodí Čenkov a Beroun, 2001 až 2005 (Zdroj meteorologických a hydrologických dat - ČHMÚ)



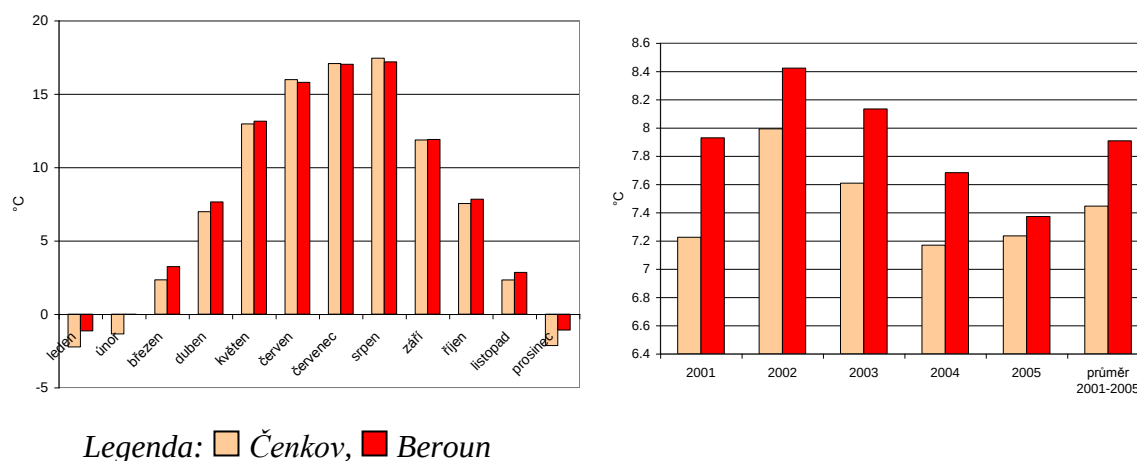
Legenda: ■ Čenkov, ■ Beroun

Obr. 4.2 – Měsíční a roční úhrny srážek pro povodí Čenkov a Beroun, 2001 až 2005 (Zdroj meteorologických a hydrologických dat - ČHMÚ)

4.1.1.2. Teplota vzduchu

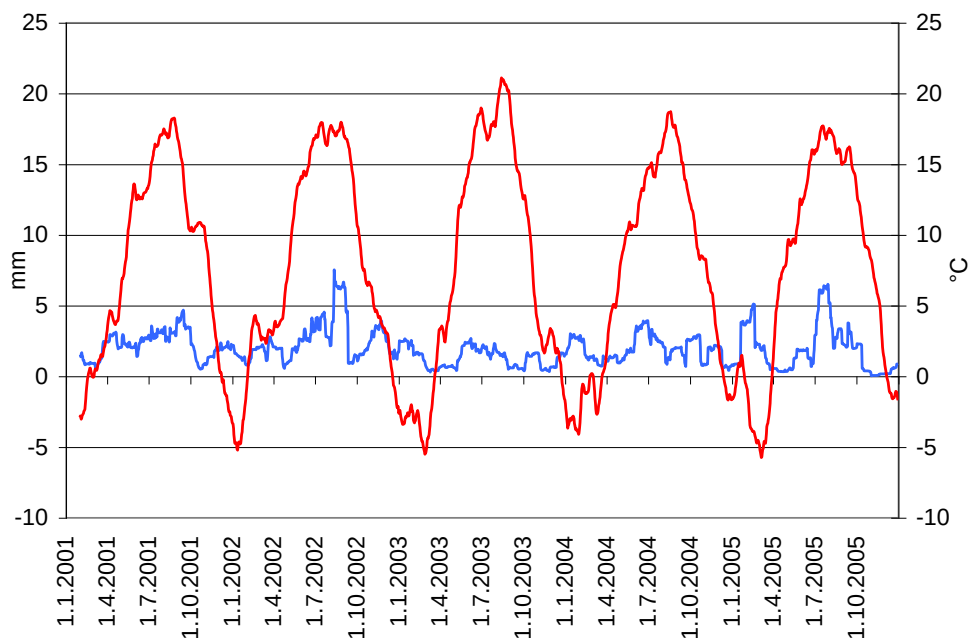
Teplota vzduchu měla pro obě části povodí velice podobný průběh (obr. 4.3). Teplota vzduchu se narozdíl od srážek na relativně malém území nemění tak významně. Měsíční průměrná teplota měla v obou případech podobné hodnoty, lišily se jen nepatrně, více v zimních měsících, kdy došlo k zachování negativního vertikálního gradientu – tedy v nižší nadmořské výšce (Beroun) byla teplota vyšší než ve vyšší nadmořské výšce (Čenkov). Naopak od června do září byly hodnoty nepatrně vyšší pro část povodí Čenkov, což je patrně v důsledku ne zcela vhodného odvození vah jednotlivých meteorologických stanic pro výpočet vstupní průměrné teploty vzduchu (MAT) v operativním nastavení modelu, které bylo převzato i pro účely této práce.

Roční maximum nastalo v obou případech v srpnu (Čenkov 17,4 °C, Beroun 17,2 °C), minimum pak v lednu (Čenkov -2,2 °C, Beroun -1,1 °C). Roční průměrné hodnoty teploty zaznamenané v jednotlivých letech zkoumaného období se lišily více, obě části povodí zaznamenaly nejvyšší průměrnou teplotu v roce 2002 (Čenkov 8 °C, Beroun 8,4 °C). Jako nejstudenější rok pro povodí Čenkov se projevil rok 2004 (7,2 °C), pro povodí Beroun rok 2005 (7,3 °C). Průměrná teplota za celé období vystoupila výše pro část povodí Beroun, kde dosahovala 7,9 °C, zatímco v horní části povodí byla o půl stupně nižší (7,4 °C).



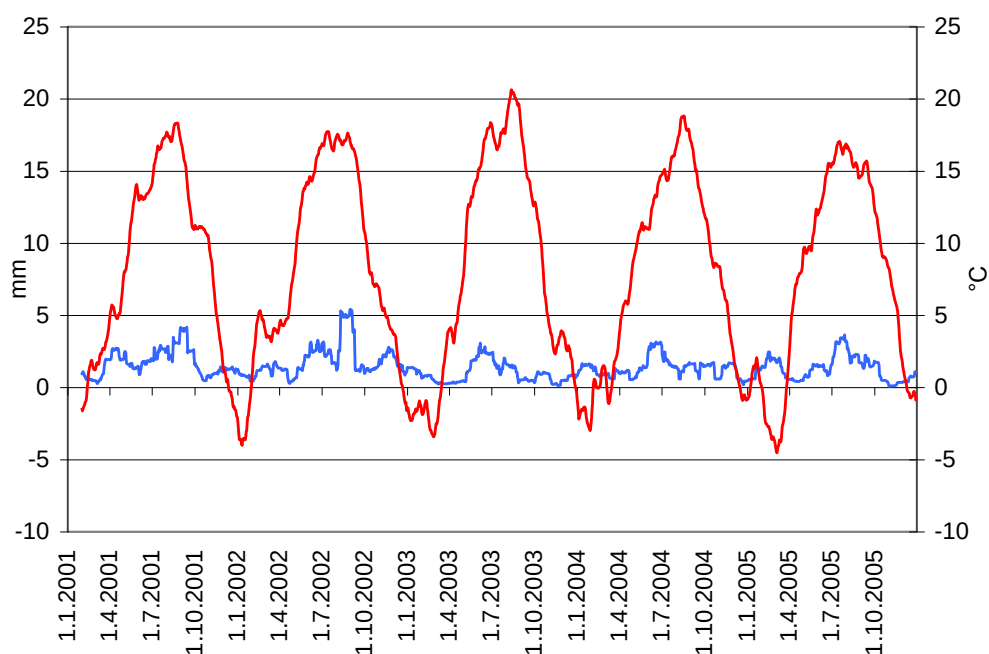
Obr. 4.3 – Měsíční a roční průměrná teplota vzduchu pro povodí Čenkov a Beroun, 2001 až 2005 (Zdroj meteorologických a hydrologických dat - ČHMÚ)

Teplota vzduchu i srážky mají zásadní vliv na evapotranspiraci a tím pádem také na vodní bilanci v půdních zónách. Proto je důležité sledovat jejich vzájemný vztah během celého období i během jednotlivých částí roku. Na následujících grafech je znázorněn průběh hodnot srážkových úhrnů a teploty vzduchu pro zájmová území v období 2001 až 2005.



Legenda: ■ srážky ■ teplota vzduchu

Obr. 4.4 - Denní hodnoty úhrnu srážek a teploty vzduchu (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005 (Zdroj meteorologických a hydrologických dat - ČHMÚ)



Legenda: ■ srážky ■ teplota vzduchu

Obr. 4.5 - Denní hodnoty úhrnu srážek a teploty vzduchu (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005 (Zdroj meteorologických a hydrologických dat - ČHMÚ)

Z předchozích grafů (obr. 4.4 a obr. 4.5) je zřejmý průběh průměrné denní teploty během celého zkoumaného období. Obě části povodí mají velice podobný průběh hodnot. I když nejvyšší průměrnou roční teplotu vykazuje rok 2002, z grafů je patrné, že nejteplejší léto bylo v roce 2003. Je to zapříčiněno vyšší teplotou v zimním období právě v roce 2002. Protože ale pro evapotranspiraci je mnohem významnější situace v letním období, lze předpokládat vyšší potenciální evapotranspiraci právě v roce 2003. Naopak nejnižší roční průměrná teplota nastala pro Čenkov v roce 2004, což zapříčinilo hlavně chladnější jaro a podzim než v roce 2005, který byl nejstudenější pro Beroun. V Berouně navíc teplota v zimním období roku 2005 klesala na nižší hodnoty, také na konci roku klesla pod bod mrazu dříve než v roce 2004. I na přelomu léta a podzimu průměrná teplota dříve klesla pod hranici 10°C. Na grafech je také patrná povodňová epizoda v srpnu 2002, kdy se projevuje značný výkyv v chodu srážek, pro Čenkov je zřejmý ještě další výkyv na začátku července 2005, kdy se zde vyskytovaly vysoké srážky.

Srážky a teplota vzduchu mají hlavní vliv na průběh vodní bilance v povodí a na průtokové stavy. Výraznými událostmi sledovaného období, jak již bylo naznačeno, byl rok 2002 bohatý na srážky (hlavně povodňově v srpnu tohoto roku), a pak suché období v roce 2003.

Povodňová situace v srpnu 2002 zasáhla významně i Litavku. Povodí Berounky zasáhla hlavně druhá povodňová vlna, první zasáhla zejména horní část povodí, ale i pravostranné přítoky na středním a dolním toku (Klabava a právě Litavka). První vlna způsobila vzestup průtoků, ale zejména nasycení zmíněných částí povodí. Proto druhá, intenzivnější vlna srážek zapříčinila katastrofální rozvodnění Berounky od Plzně až po soutok s Vltavou (Lett, Soukalová, Šercl, 2002).

Srážky během první vlny na povodí Čenkov dosáhly 6. 8. 2002 24,86 mm a 7. 8. 2002 26,76 mm za den. Přitom srpnový denní průměr je 2,96 mm. Při druhé vlně 11. 8. 2002 pak dosahovaly 35,8 mm a 12. 8. 2002 78,95 mm za den, což způsobilo zvýšení průtoku 12. 8. 2002 na 44,4 m.s⁻¹ a 13. 8. 2002 na 53,4 m.s⁻¹, pak průtok začal klesat (průměrná denní srpnová pozorovaná hodnota je přitom 1,3 m.s⁻¹). V Berouně došlo k obdobné situaci, úhrn srážek 6. 8. 2002 byl 17 mm a 7. 8. 2002 29,4 mm za den, 11. 8. 2002 34,6 mm a 12. 8. 2002 52,2 mm za den (srpnový denní průměr je 2,5 mm). Průtok se zvýšil 12.8.2002 na 62 m.s⁻¹ a 13. 8. 2002 dokonce na 132 m.s⁻¹ (průměrná denní srpnová pozorovaná hodnota je 3,5 m.s⁻¹) (Zdroj meteorologických a hydrologických dat – ČHMÚ).

Naopak suché období 2003 s mimořádně vysokými hodnotami teploty vzduchu a nízkými srážkami v létě 2003 způsobila mimořádná cirkulace atmosféry v letním období

(tab. 4.1). Měsíc květen byl teplotně silně nadnormální (Čenkov 14 °C, Beroun 14,3 °C) a srážkově normální, červen mimořádně teplotně nadnormální a srážkově silně podnormální, červenec jen mírně teplotně nadnormální a byl nejchladnější z letních měsíců a srážkově normální a srpen byl teplotně mimořádně nadnormální a srážkově podnormální. Mimořádnost léta nespočívala ani tak v absolutně nejvyšší teplotě, ale v délce trvání nadprůměrné teploty. Srážky v roce 2003 byly podprůměrné, většina srážek v letním období měla navíc charakter intenzivních krátkodobých přeháněk nebo bouřek. Díky malé vlhkosti vzduchu s vysokou teplotou byly hodnoty potenciální evapotranspirace v letním období roku 2003 podstatně vyšší než jejich dlouhodobý průměr (Němec, Pavlík, Tolasz, Valter, 2003).

	Čenkov		Beroun	
	průměr 2001-2005	2003	průměr 2001-2005	2003
teplota (°C)				
květen	12.96	14.05	13.15	14.30
červen	15.98	19.05	15.80	18.45
červenec	17.08	17.64	17.02	17.57
srpen	17.44	19.92	17.19	19.32
září	11.86	12.63	11.90	12.63
srážky (mm)				
květen	2.20	2.38	1.74	2.15
červen	2.67	1.66	2.24	2.13
červenec	3.33	2.26	2.15	1.92
srpen	2.96	0.57	2.49	0.37
září	1.88	0.47	1.36	0.42

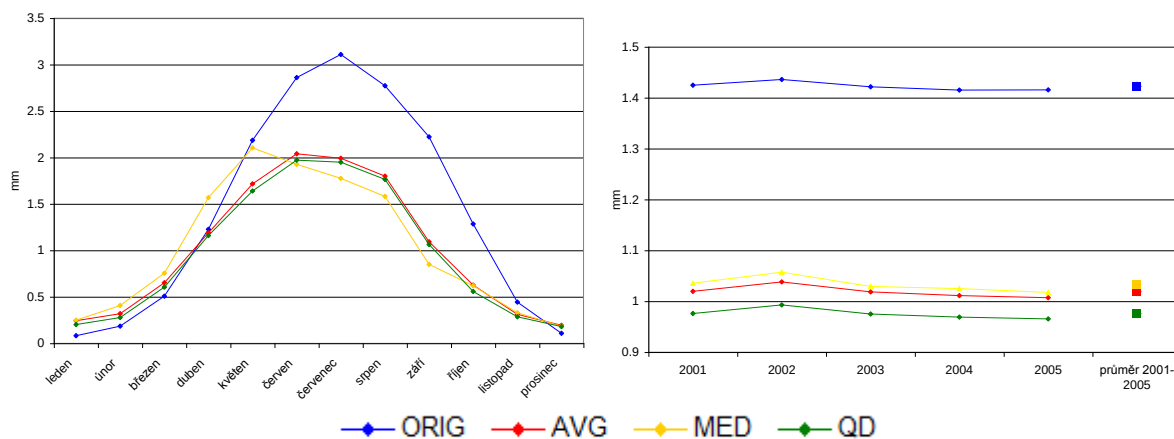
Tabulka. 4.1 - Průměrné měsíční hodnoty teploty a srážek – průměr 2001 až 2005 a rok 2003 (Zdroj meteorologických a hydrologických dat - ČHMÚ)

4.1.1.3. Aktuální a potenciální evapotranspirace

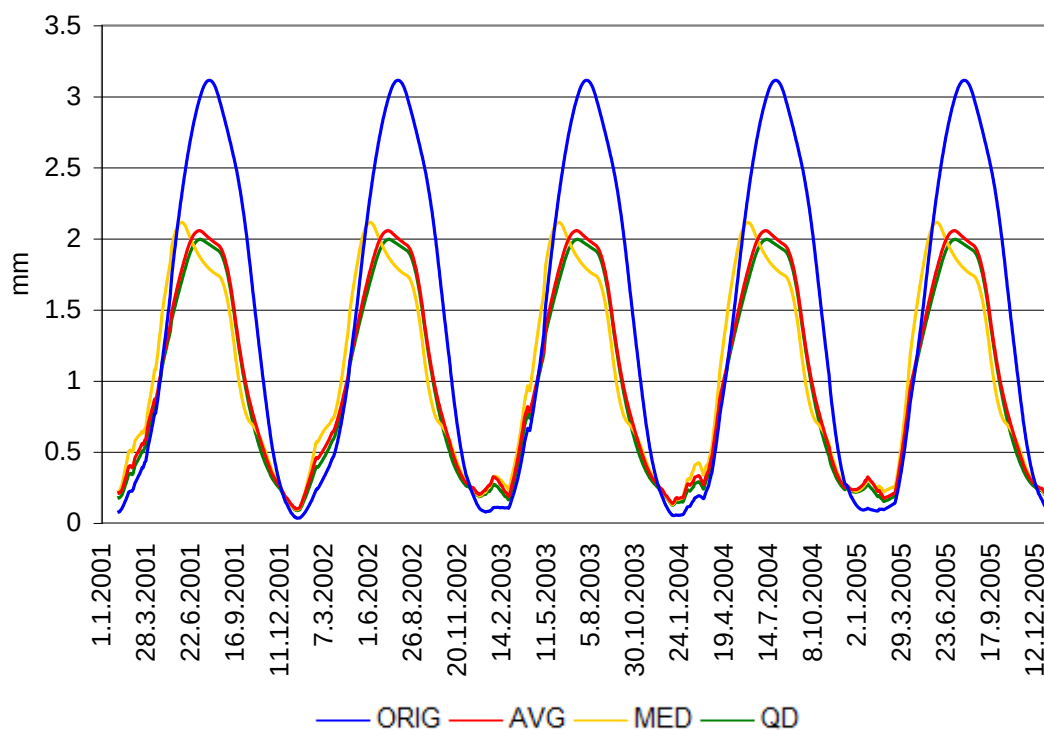
Model simuluje výsledky aktuální evapotranspirace, která je zde nazvaná jako celková, a představuje celkové množství vody, které je z modelovaného systému odebíráno evapotranspirací.

Potenciální evapotranspirace představuje maximální možné množství vody, které je možné evapotranspirací z modelu odebrat na základě klimatických podmínek nelimitovaných dostatkem dostupné vody pro evapotranspiraci. Množství je uváděno v mm za den a je popsáno parametrem ET demand jako křivka v průběhu roku (12 měsíčních hodnot). ET demand ORIG byla pro model odvozena na základě kalibrace odtoku, nikoli na základě výpočtu evapotranspirace. Průběh potenciální evapotranspirace byl vypočten na základě

rovnice Penman-Monteith (ET demand AVG, MED a QD). Výsledky jsou na následujících obrázcích (obr. 4.7 až obr. 4.14) spolu s průběhem hodnot ET demand odvozených kalibrací.



Obr. 4.7 – Měsíční a roční průměry denních hodnot ET demand pro povodí Čenkov, 2001 až 2005



Obr. 4.8 – Roční chod průměrných denních hodnot ET demand (klouzávěý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

Při srovnávání jednotlivých hodnot evapotranspirace bylo zjištěno, že roční průběh křivek a jejich vztah za celé období 2001 až 2005 byl velmi podobný.

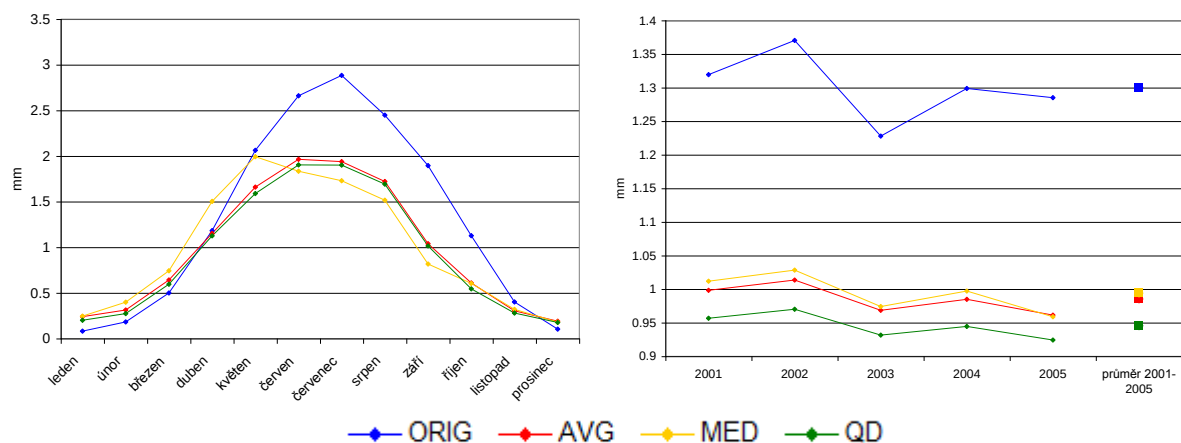
Pro povodí Čenkov (obr. 4.7 a obr. 4.8) dosahovaly roční průměrné hodnoty ET demand ORIG 1,4 mm, ostatní hodnoty se pohybovaly kolem 1 mm, a to v průběhu celého období 2001 až 2005 (AVG 1,02 mm, MED 1,03 mm a QD 1 mm). Průběh měsíčních průměrů ET demand ORIG ukazuje od prosince do března hodnoty nižší než hodnoty ET demand AVG, ET demand MED a ET demand QD. V dubnu hodnoty ET demand ORIG převýšily hodnoty ET demand QD a ET demand AVG a v květnu ET demand MED. Až do března byly všechny čtyři hodnoty v podstatě vyrovnané. Pak se hodnoty ET demand ORIG a MED začaly zvyšovat a hodnota ORIG v červnu výrazně přerostla všechny ostatní hodnoty. V letním období vznikly rozdíly relativně velké, až o 1 mm (což představuje cca 30 %). Maximum u hodnot MED nastalo už v květnu (2,1 mm), u hodnot AVG a QD v červnu (2 mm) a u hodnot ORIG v červenci (3,1 mm). Minimum nastalo v prosinci a lednu (ORIG 0,08 mm, AVG, MED i QD 0,2 mm). Maxima hodnot ET demand AVG, MED a QD v denním průběhu se pohybovaly kolem 2 mm, zatímco hodnoty ET demand ORIG převyšovaly 3 mm. Právě v letním období je faktor vegetačního pokryvu nejvýznamnější. Díky němu, vysokým srážkám a vysoké teplotě vzduchu je evapotranspirace nejvyšší v létě.

Je tedy zřejmé, že hodnoty odvozené kalibrací dosahovaly odlišných hodnot od vypočtených hodnot ET demand. Rozdíly jsou patrné především v letním období, kdy hodnoty odvozené kalibrací jsou výrazně vyšší než vypočtené hodnoty. To znamená, že v průběhu kalibrace byly hodnoty evapotranspirace navýšeny pro dodržení bilance srážek a odtoku z povodí – důvody mohou být různé. Model pravděpodobně simuloval větší odtoky než byly měřené, což může být dáno:

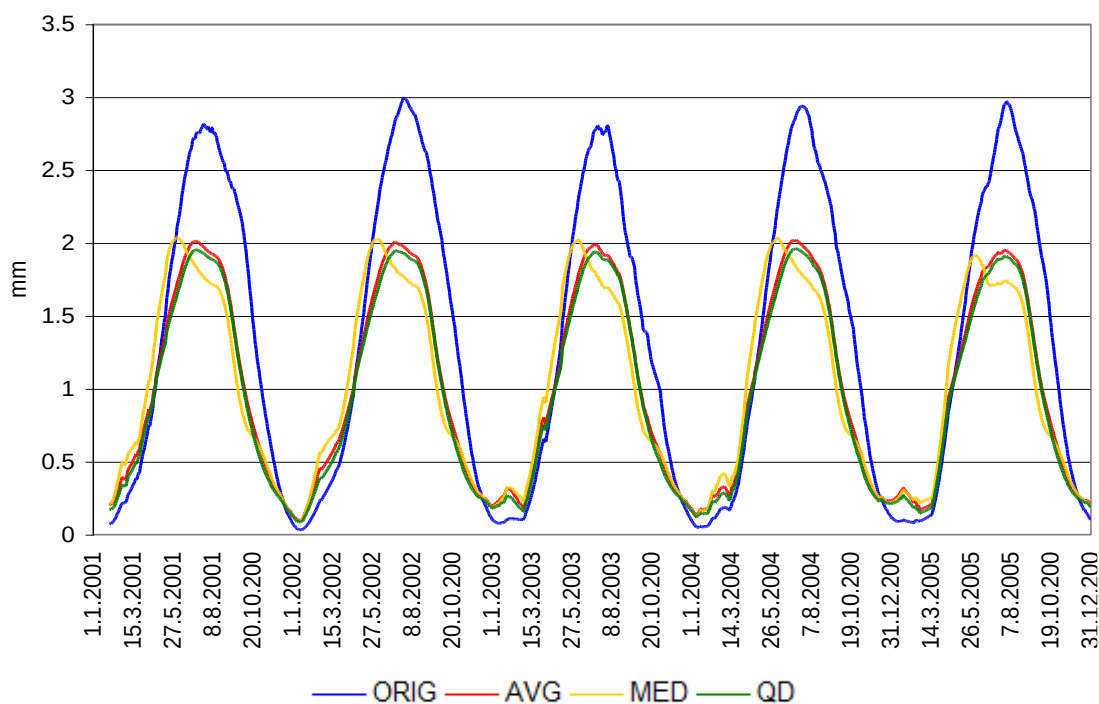
- nepřesnými měrnými křivkami a vyhodnocenými průtoky použitými pro kalibraci,
- nepřesnými hodnotami vstupních srážek, které nadhodnocují realitu, a přebytečná voda v povodí tak musí být odvedena evapotranspirací,
- nepřesnými vstupními hodnotami a tudíž i nepřesným výpočtem ET demand pomocí rovnice Penman-Monteith (avšak vzhledem k tomu, že byly použity váhy z modelu, lze tento bod vyloučit),
- nepodchycením ztrát v povodí (odběry, zavlažování, provoz nádrží, ztráty v geologických strukturách),
- nedostatečným zohledněním (nepřesně přiřazenými vahami) růstového a rostlinného koeficientu v rovnici Penman-Monteith (uvažovány byly zjednodušené podíly dle zastoupení lesa a dalších vegetačních typů v povodí). Přitom právě v dolní zemědělské části povodí bude hodnota koeficientu proměnná v závislosti na růstových fázích a druhové

skladbě zemědělských plodin (Allen et al., 1998). Postižení této proměnlivosti však není bez dalších podkladů možné.

Celkový rozdíl je pak nejspíše výsledkem kombinace všech výše uvedených faktorů a možností.



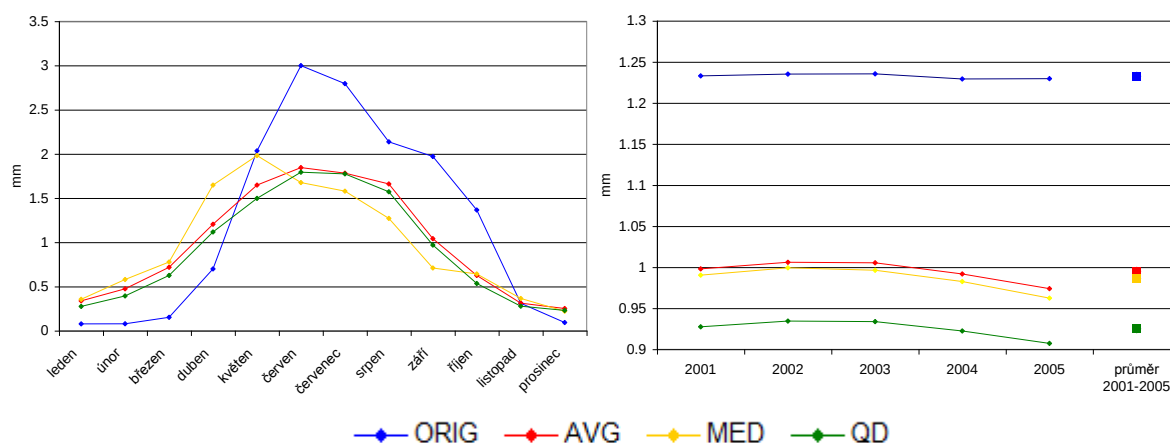
Obr 4.9 – Měsíční a roční průměry denních hodnot aktuální evapotranspirace pro povodí Čenkov, 2001 až 2005



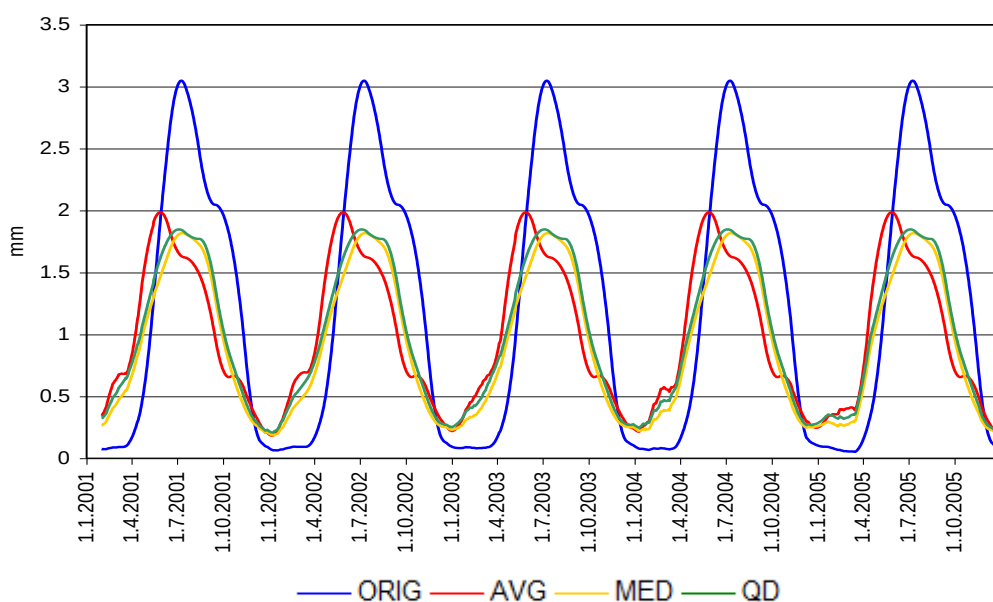
Obr. 4.10 – Roční chod průměrných denních hodnot aktuální evapotranspirace (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

Aktuální evapotranspirace (obr. 4.9 a obr. 4.10), která představuje celkovou evapotranspiraci uvažovanou modelem, má velmi podobný průběh jako ET demand, jen se liší maximálními hodnotami. Hodnoty ORIG působily v ročních průměrech více nevyrovnaně, od 1,2 mm (2003) do 1,4 mm (2002) a červencové maximum dosahovalo jen 2,8 mm.

Největší relativní rozdíly zaznamenaly aktuální evapotranspirace a ET demand během letního období a také v teplotně výrazných letech 2002 a 2003, kdy se nejvíce projevovala kombinace teploty vzduchu a především zmenšených zásob vody v půdních zónách modelu.

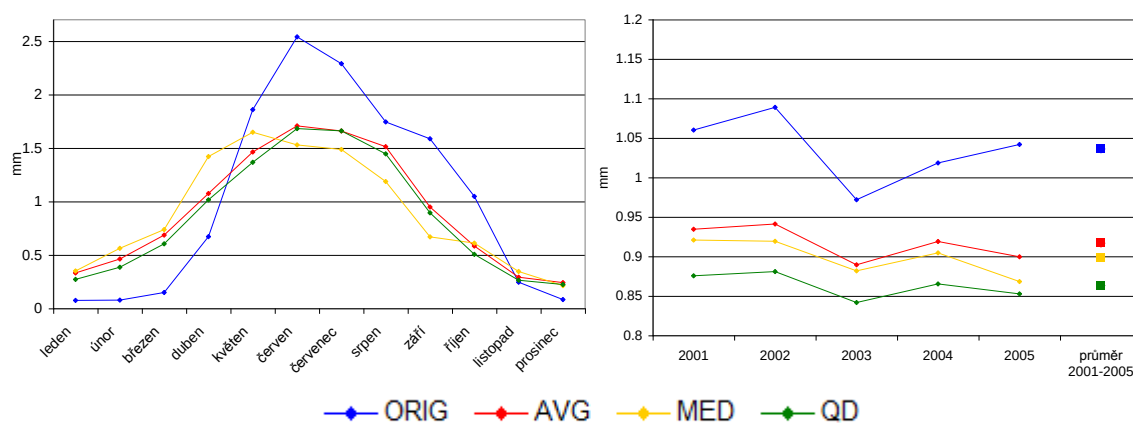


Obr. 4.11 – Měsíční a roční průměry denních hodnot ET demand pro povodí Beroun, 2001 až 2005

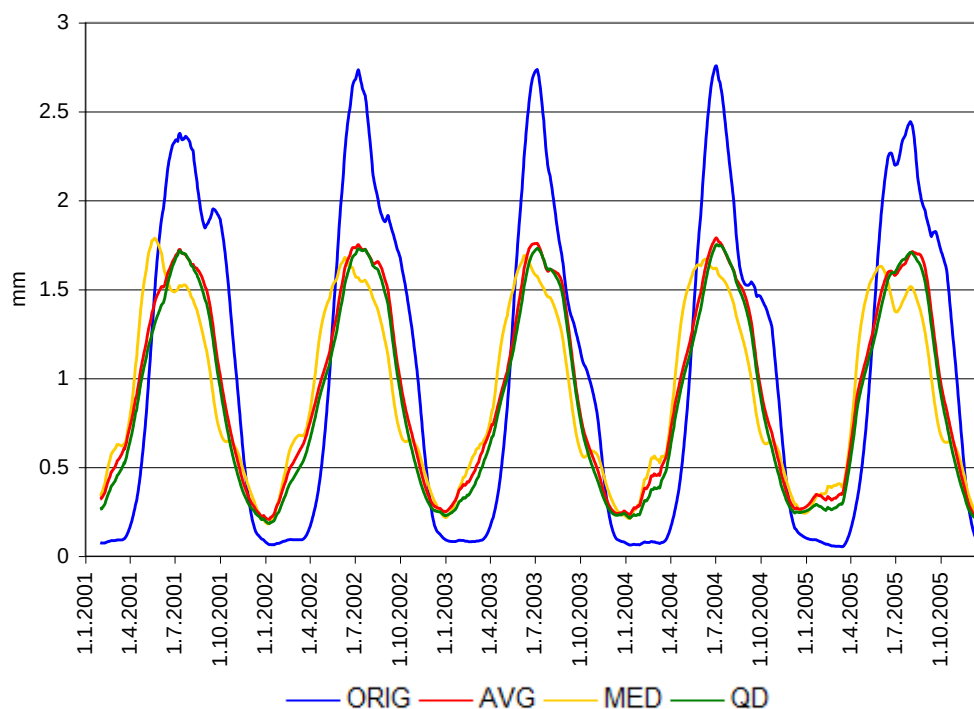


Obr. 4.12 – Roční chod průměrných denních hodnot ET demand (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Povodí Beroun zaznamenalo oproti Čenkovu několik rozdílů. V průběhu ET demand si můžeme všimnout (obr. 4.11 a obr. 4.12), že křivka hodnot ORIG ostatní překračuje až v květnu a její průběh není tak plynulý jako u Čenkova. Po červnovém maximu se začala hodnota ET demand ORIG rychle snižovat. Výrazný je také pokles na srpnovou hodnotu. Příčinou jsou rozdílné fyzickogeografické podmínky obou povodí a také rozdílný chod srážek, v Berouně nastal v červenci pokles oproti červnové hodnotě.



Obr. 4.13 – Měsíční a roční průměry denních hodnot aktuální evapotranspirace (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005.



Obr. 4.14 – Roční chod průměrných denních hodnot aktuální evapotranspirace (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Další rozdíl je mezi originálními a vypočítanými hodnotami v ročních průměrech aktuální evapotranspirace (obr. 4.14 a obr. 4.15), hodnoty ORIG byly nižší, maximum 1,08 mm v roce 2002 a minimum 0,97 mm v roce 2003. Naopak hodnoty AVG, MED a QD se podobaly, ukázaly se jen o málo nižší než na povodí Čenkov. Příčinou mohou být nižší srážky pro povodí Beroun, a tím i menší množství vody dostupné pro evapotranspiraci v letním období.

Měsíční průměry ukazují (obr. 4.13 a obr. 4.14), že hodnota aktuální evapotranspirace ORIG byla až do května výrazně nižší než hodnoty AVG, MED a QD, a to přibližně o 0,5 mm (což je 20 %), v květnu je však o ten samý rozdíl převýšila a vyšší zůstala až do listopadu. Maxima zde na rozdíl od Čenkova dosáhla v červnu, 2,5 mm. Maximum u hodnot AVG (1,7 mm) nastalo v červenci, u MED (1,6 mm) v květnu a QD (1,7 mm) v červnu, rozdíl od hodnot ORIG je cca 30 %. Dřívější maximum a jiný průběh hodnot než u Čenkova způsobil odlišný průběh srážek, pro Beroun byly v zájmovém období naměřeny menší srážkové úhrny než pro Čenkov.

Rozdílné fyzickogeografické charakteristiky částí povodí Litavky mají vliv jak na srážkové úhrny, horní část povodí je položena ve vyšších nadmořských výškách s vyššími srážkovými úhrny, tak na hydrologickou bilanci povodí. Dolní část povodí Beroun se totiž nachází v nižších polohách, je zde více zemědělských a zastavěných ploch než v lesnatém prostředí horní části povodí nad stanicí Čenkov. V lesním prostředí se díky většímu vegetačnímu pokryvu více uplatňuje transpirace a v případě jehličnatých lesů jde i o celoročně trvající proces. Lesní půda má také několikanásobně vyšší infiltrační kapacitu a intenzitu průsaku srážkové vody půdou. To je způsobeno vyšším obsahem gravitačních pórů v lesní půdě. Důsledkem je snazší retence srážkové vody v lesní půdě a tvorba mělkého podpovrchového odtoku, který zde tvoří významnou složku celkového odtoku z lesního povodí (Kantor a kol., 2003).

Uvedené rozdíly se pochopitelně odráží i v rozdílném nastavení parametrů modelu SAC-SMA pro obě části povodí.

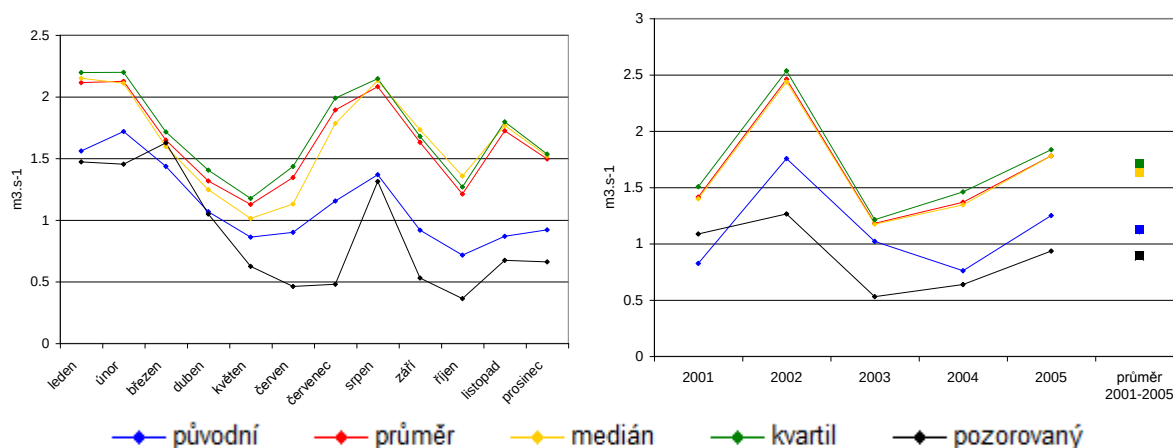
Chod evapotranspirace je závislý na chodu srážek a teploty, se kterou výrazně koresponduje. Originální hodnoty měly větší extrémy (v létě vyšší, v zimě nižší) než hodnoty vypočítané.

4.1.2. Zpracování výsledků simulace

4.1.2.1. Průtok

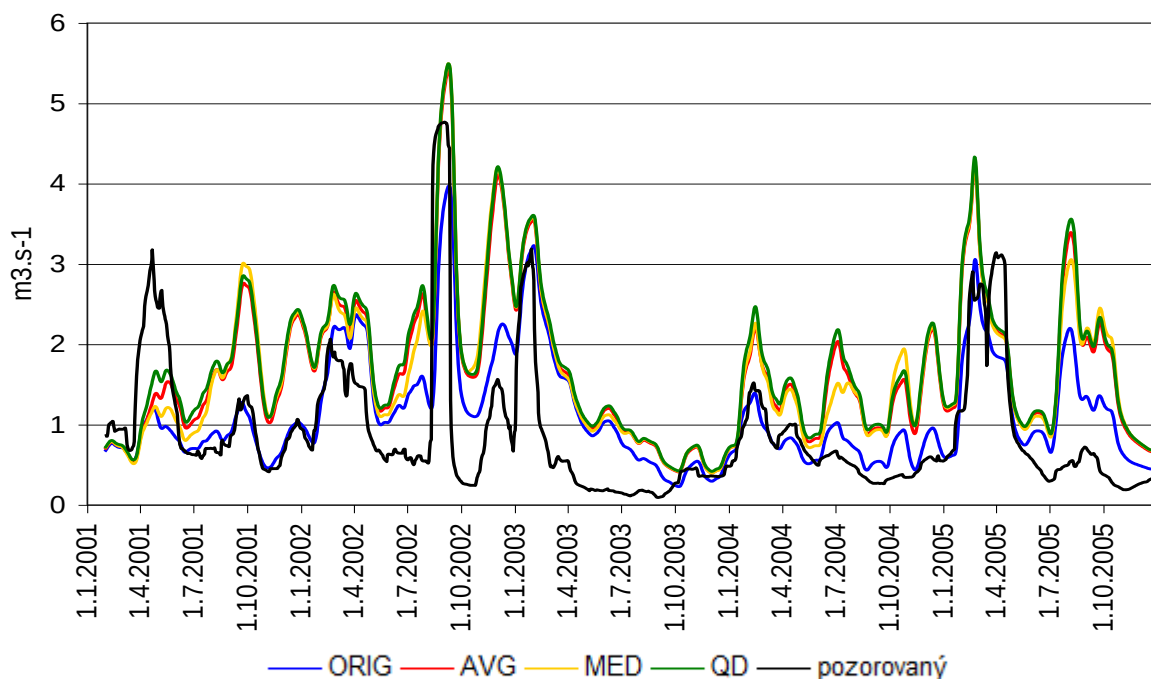
Hodnota průtoku je určena množstvím vody, které proteče závěrovým profilem z daného povodí za jednotku času. Hodnota průtoku je modelem stanovena jako výsledný odtok, který je transformován do koryta toku použitím speciální varianty jednotkového hydrogramu.

Výsledky provedených simulací jsou uvedeny na obrázcích 4.15 až 4.18, přitom uvedené hodnoty na ose y odpovídají průměrnému dennímu průtoku.



Obr. 4.15 – Měsíční a roční průměry denních hodnot průtoku pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

Z předešlých grafů (obr. 4.15) je patrný výrazný vliv povodňové události ze srpna 2002, která deformuje průběh průtoku v rámci roku, kdy srpen vystupuje v pozorované řadě a letní období pak v simulovaných řadách tvoří sekundární maximum. Významné je, že u simulovaných řad je zvýšení průtoku pozorováno od června do září. Přitom logicky je tento vzestup významnější u řad vypočtených metodou Penman-Monteith než u hodnoty ET demand ORIG. To ukazuje na velmi významný vliv parametru zejména v tomto období. Připomeňme, že rozdíl mezi hodnotou ET demand ORIG a ostatními dosahuje cca 30 % v letním období, pokud jde o průtok, je rozdíl mezi hodnotami ORIG a vypočítanými cca 40 %, tedy vyšší.

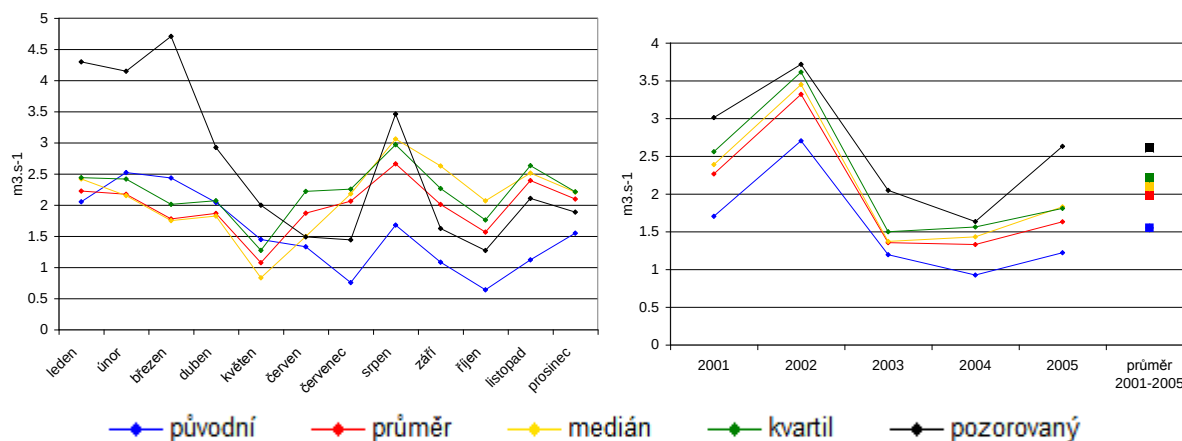


Obr. 4.16 – Denní hodnoty průtoku (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

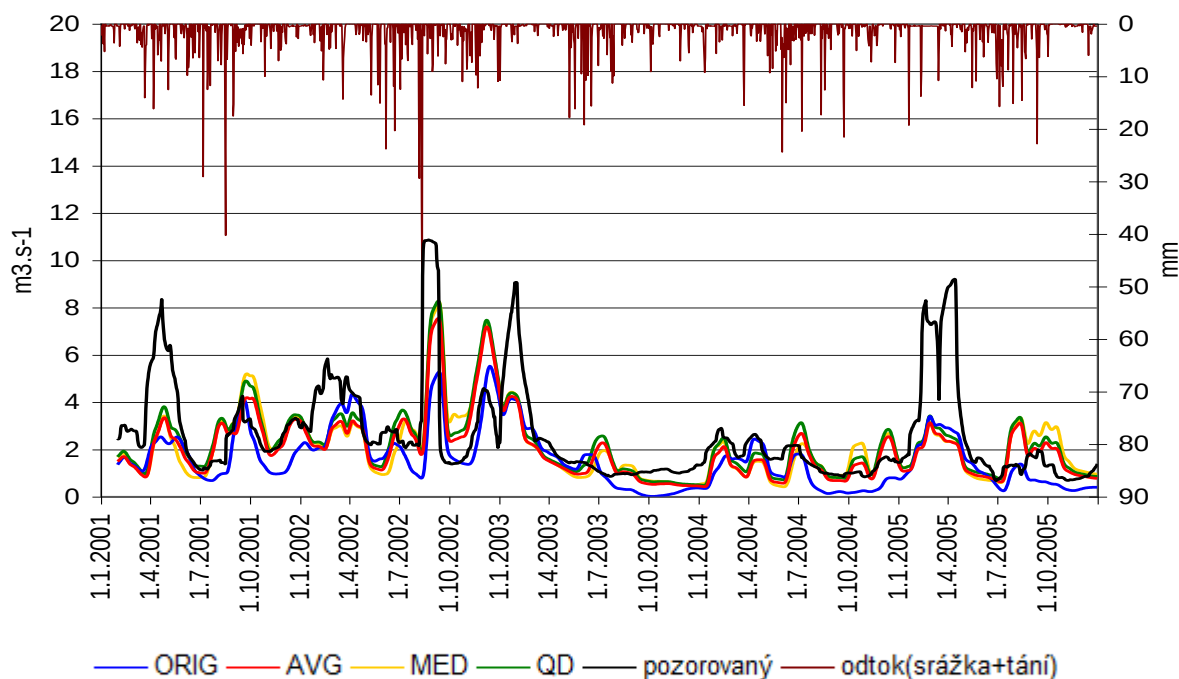
Pokud srovnáme originální a vypočítané hodnoty (AVG, MED a QD) z povodí Čenkov (obr. 4.15), zjistíme, že hodnoty ORIG byly nižší po celé zkoumané období, což je způsobeno vyššími hodnotami ET demand ORIG. Největší rozdíly se projevily v letních měsících červenci a srpnu, kdy se hodnota ORIG od hodnot AVG, MED a QD liší až o $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (což představuje 36 %), podobně velké rozdíly zůstaly ale až do prosince. Nejmenší rozdíly se projevily na jaře, začátkem roku nejsou v ET demand takové rozdíly. Průběh křivek koresponduje s průběhem měsíčních průměrů srážek. I z předchozího grafu (obr. 4.16) je zřejmý vliv povodně v roce 2002. Můžeme si všimnout také toho, že pozorované průtoky mají tendenci k výrazně rychlejšímu poklesu po povodňové situaci než je tomu u simulovaných řad. Pokud srovnáme hodnoty ORIG se vstupními pozorovanými hodnotami průtoků, zjistíme, že ty pozorované hodnoty byly po celé období kromě března nižší. V březnu převyšovaly jak hodnoty ORIG, tak hodnoty QD, což mohlo být způsobeno nárůstem průměrné březnové teploty na $2,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ze záporných hodnot průměrné únorové teploty, a tím způsobené zvyšování průtoku díky tání sněhu, což není simulací správně vystiženo. Největší rozdíly se ukázaly v letních měsících – červnu a červenci, a pak v říjnu. To byly průtoky silně nadhodnocovány. V srpnu hodnotu silně ovlivňovala povodeň roku

2002, hodnota pozorovaného průtoku byla stejná jako hodnota ORIG, ale bez vlivu povodně by byl průtok nižší podobně jako v červenci a září.

V údajích o ročních průměrných hodnotách průtoku se hodnoty ORIG z povodí Čenkov nejvíce blížily hodnotám AVG, MED a QD v roce 2003, což byl velmi suchý rok, naopak největší rozdíl nastal v roce 2002, až o $0,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (asi 17 %), který byl velmi vlhký s velkými povodněmi. Právě povodně v srpnu 2002 měly velký vliv na simulaci průtoků v tomto roce. Rozdílný průběh hodnot se projevil v roce 2004, hodnoty ORIG klesly ještě níže než v roce 2003, zatímco hodnoty AVG, MED a QD se zvyšovaly, to způsobila opět rozdílná hodnota ET demand. Při porovnání pozorovaných hodnot průtoku s hodnotami ORIG zjistíme, že pozorované hodnoty vystoupily výše jen v roce 2001, po zbytek období byly nižší, nejvíce se přiblížily v roce 2004. Vyšší hodnoty v roce 2001 způsobilo zřejmě podhodnocené nastavení počátečních podmínek doplňování zón. Hodnoty AVG, MED a QD byly po celé období vyšší, ale celkový průběh křivky byl v daném období velmi podobný jako u křivky pozorovaného průtoku.



Obr. 4.17– Měsíční a roční průměry denních hodnot průtoku pro povodí Beroun, 2001 až 2005



Obr. 4.18 – Denní hodnoty průtoku (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Měsíční průměry za povodí Beroun (obr. 4.17 a obr. 4.18) měly jiný průběh. Zde hodnoty ORIG převyšovaly hodnoty AVG, MED a QD od února do května, jinak byly po zbytek roku nižší. Od července do listopadu se projevily největší rozdíly, hodnotám ORIG se nejvíce vzdalovaly hodnoty MED. Tento průběh je ovlivněn opět průběhem křivek ET demand. Maximum hodnot ORIG nastalo v únoru ($2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), minimum v říjnu ($0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). V srpnu bylo maximum hodnot AVG ($2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), MED a QD ($3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), v květnu minimum (AVG $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, MED $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a QD $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Hodnoty pozorovaného průtoku se od ostatních lišily, hlavně na začátcích jednotlivých let, což pravděpodobně způsobila nepřesná simulace tání sněhu.

Břežnové maximum pozorovaného průtoku dosahovalo hodnoty $4,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, další velký rozdíl byl v srpnu, což ovlivnila srpnová povodeň v roce 2002. Podle měsíčních průměrů byly pozorované průtoky celé období větší než ORIG. Od června se více přibližovaly k hodnotám AVG, MED a QD – hlavně od září do konce roku.

Roční průměrné hodnoty měly velmi podobný průběh, největší rozdíl se projevil opět v roce 2002 a 2004, nejmenší v roce 2003 (sucho). Pozorované hodnoty průtoku po celé období překračovaly hodnoty ORIG, více se podobaly hodnotám AVG, MED a QD (nejvíce QD).

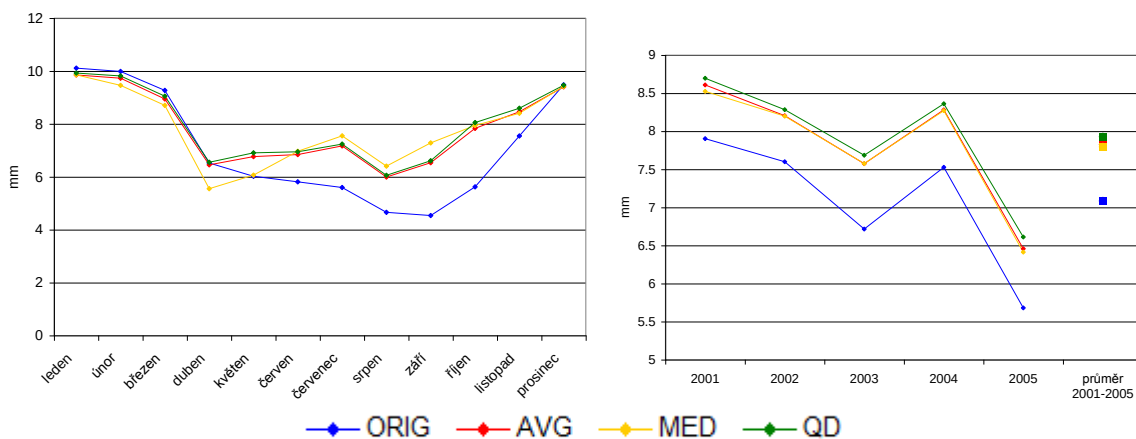
Pro Čenkov se simulace více vzdaluje pozorovaným hodnotám, což je způsobeno hodnotou ET demand, která je díky lesnatější ploše této části povodí asi podhodnocena, a to i pro hodnoty ORIG. Dalším faktorem ovlivňující simulaci jsou nádrže vyskytující se v horní části povodí, ze kterých je odebírána voda pro vodohospodářské účely.

Pominout nelze ani fakt, že Litavka v Čenkově je relativně malý tok, kde lze předpokládat větší nejistotu správného odvození průtoku na základě měrné křivky, než je tomu v Berouně, kde je navíc zpevněné koryto lichoběžníkového tvaru. Roli také hraje to, že povodí Čenkov se z velké části nachází ve VVP Brdy-Jince, kde se nalézá omezené množství srážkoměrů, které by umožňovaly spolehlivé určení srážkových vstupů v povodí. Z uvedených důvodů se pravděpodobnost simulace průtoku pro povodí Beroun více blíží průtoku pozorovanému, navíc lepší shodu s pozorovaným průtokem vykázaly simulace pomocí vypočítaných hodnot ET demand než hodnot ORIG. Větší rozdíly nastaly pouze v jarním období, kdy je pravděpodobnou příčinou nepřesné modelování sněhové pokrývky, které však nebylo smyslem této práce.

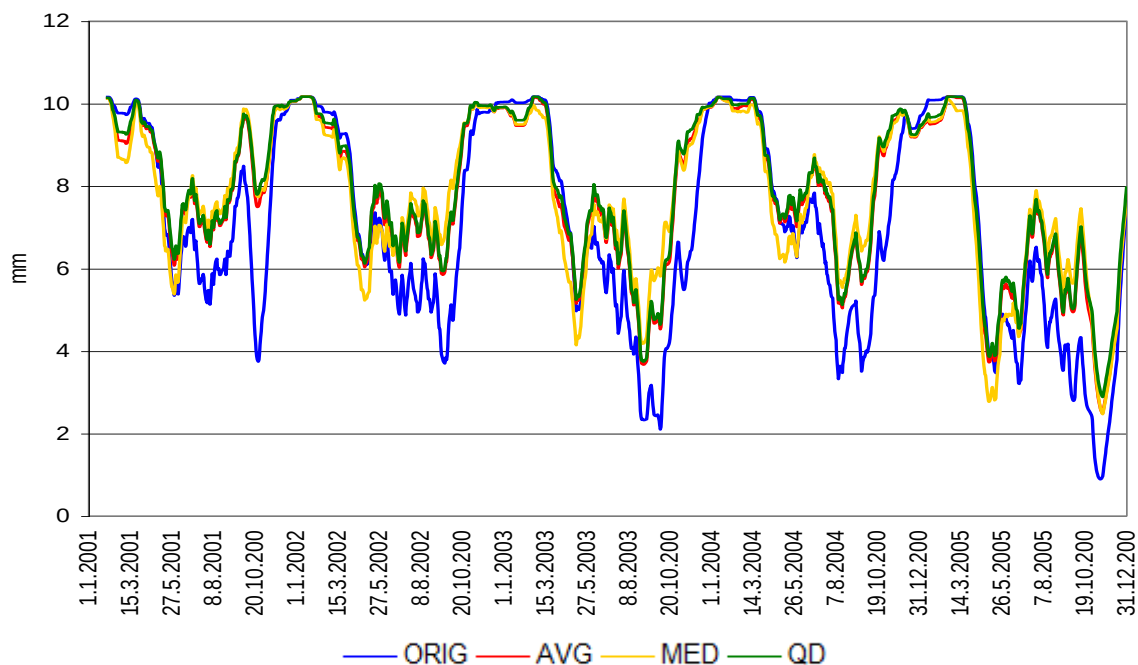
4.1.2.2. Obsah horní zóny vázané vody (UZTW)

Obsah horní zóny vázané vody je přímo ovlivněn srážkami a evapotranspirací. Při srážkách, pokud voda spadne na propustnou plochu, je nejdříve plněna tato horní zóna vázané vody. Zóna je nejvíce zaplněná v zimních měsících, naopak v létě, při vyšších srážkách, vyšší teplotě a vyšší evapotranspiraci jsou hodnoty jejího zaplnění nejnižší, a to v důsledku ztrát vody právě evapotranspirací. Zároveň je v letním období v důsledku větší intenzity zmiňovaných jevů vyšší i dynamika změn zaplnění.

Maximální obsah zóny pro Čenkov je 10,168 mm a pro Beroun 82,895 mm.



Obr. 4.19 – Měsíční a roční průměry denního obsahu UZTW pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

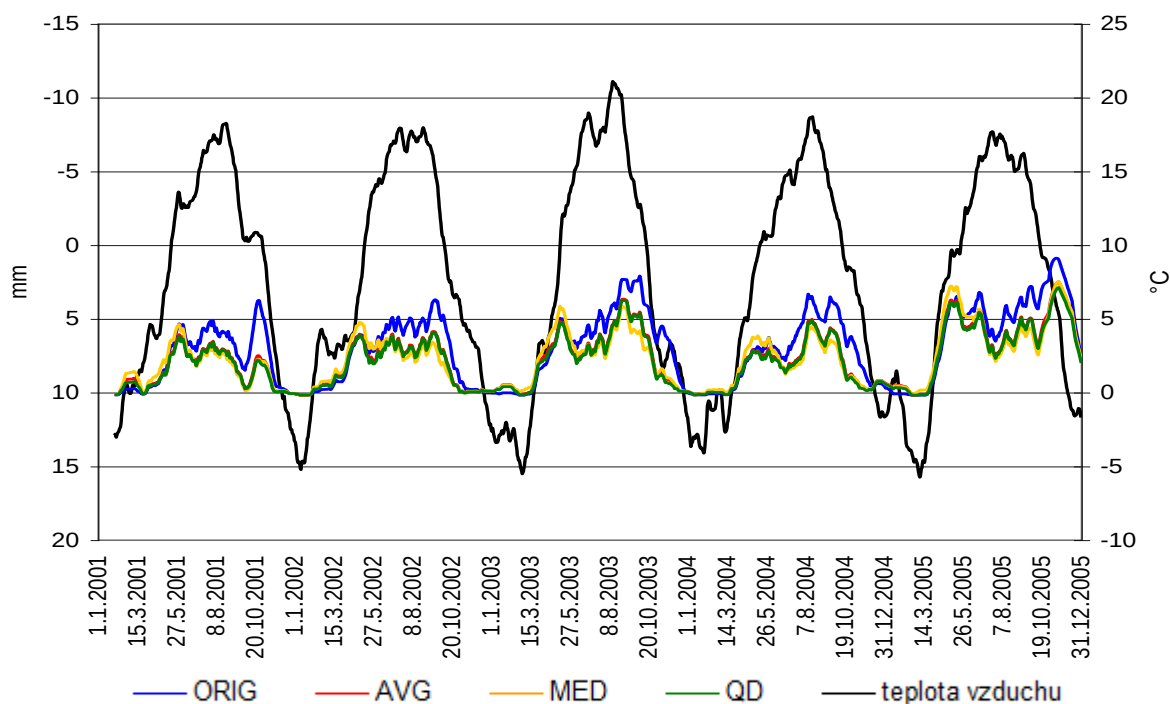


Obr. 4.20 –Denní obsah UZTW (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

Model SAC-SMA počítá pro povodí Čenkov s maximálním obsahem 10,168 mm. Srovnáním hodnot zjistíme, že hodnoty průměrného zaplnění zóny ORIG převyšovaly ostatní pouze v zimních měsících, a to v lednu, únoru, březnu a prosinci, kdy dosahovaly maximálních hodnot (až 10 mm). Tento rozdíl způsobovala nižší hodnota ET demand ORIG pro tyto měsíce. V ostatních měsících je převyšovaly hodnoty AVG, MED a QD (obr. 4.19 a obr. 4.20).

V letním období nebyla zóna plně nasycená díky vysoké hodnotě ET demand. Minimální hodnota ORIG ale nastávala v září (4,5 mm), AVG a QD v srpnu (6 mm) a MED v dubnu (5,6 mm). Právě v dubnu a září byly nejnižší úhrny srážek, na kterých je naplnění této zóny závislé především. Největší rozdíly mezi hodnotami ORIG a ostatními byly v září a říjnu, kdy je hodnota ET demand ORIG stále ještě relativně vysoká a díky nízkým srážkám se zde její vliv intenzivněji projevuje vyprazdňováním zóny.

Podle ročních průměrů byl průměrný obsah horní zóny vázané vody největší za rok 2001 (ORIG 7,9 mm, AVG 8,6 mm, MED 8,5 mm a QD 8,7 mm) a 2004 (ORIG 7,5 mm, AVG 8,3 mm, MED a QD 8,4 mm), nejnižší naopak v roce 2005 (ORIG 5,7 mm, AVG, MED 6,4 mm a QD 6,6 mm). Hodnoty ORIG byly menší než ty ostatní, asi o 0,5 mm (což tvoří jen 6 %). To opět souvisí s ročními průměrnými hodnotami ET demand a srážek za zkoumané období.



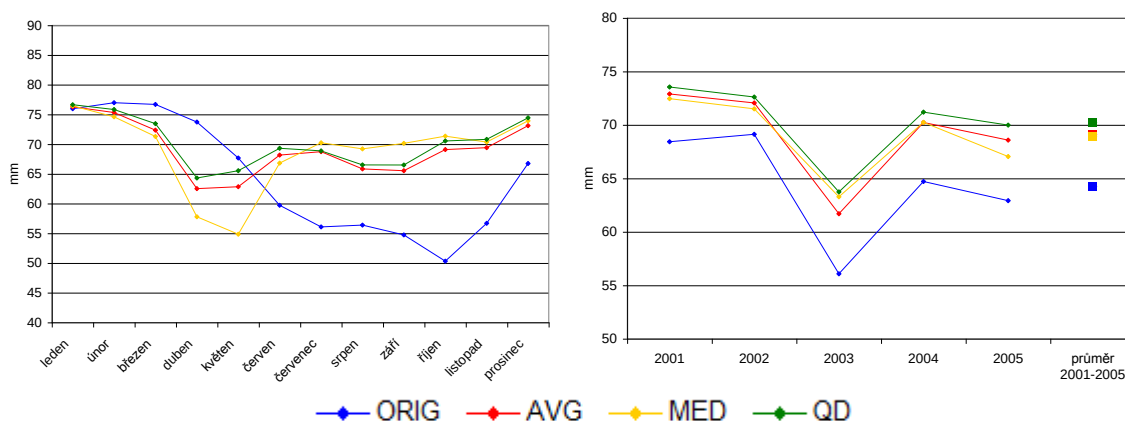
Obr. 4.21 – Denní obsahu UZTW (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov v závislosti na teplotě vzduchu, 2001 až 2005

I když byl rok 2002 velice deštivý, zóna UZTW se průměrně méně naplňovala, než v roce 2001. Je to dáno hlavně vyšší teplotou během roku 2002, docházelo tak tedy i k vyšší evapotranspiraci a zóna se více vyprazdňovala. V roce 2002 se totiž teplota v této oblasti začala pohybovat nad bodem mrazu již kolem 20. 1. a teplota dál byla poměrně vysoká, zatímco v roce 2001 teplota vystoupila nad bod mrazu až 5. 2. a dál stoupala jen pozvolně. Také na podzim přišla teplota pod bodem mrazu v roce 2001 téměř o měsíc dříve než v roce 2002 (obr. 4.21).

Vysoké hodnoty naplnění v roce 2004 způsobily především relativně vysoké srážky při nízké průměrné teplotě během roku. Podle průměrné roční teploty byl rok 2004 nejchladnější za sledované období. Projevuje se zde především dlouhá zima – teplota nad bod mrazu vystoupila až v první dekádě března.

Naopak nejnižší hodnoty naplnění zóny vykázal rok 2005, dokonce klesly níže než v roce 2003, který byl velmi suchý, a to díky nízkým srážkám i teplotě vzduchu. V roce 2005 byly srážky sice poměrně vysoké, ale teplota, ač podprůměrná, byla vyšší než v roce 2004 (podobné úhrny srážek). Hlavně však byl patrný velmi suchý a teplý podzim, kdy ještě byla vysoká teplota a zóna se intenzivně vyprazdňovala. Dalším důvodem je také nevyrovnaná

srážková činnost během roku 2005, zatímco v roce 2003 bylo celkově srážek méně, byly ale rovnoměrněji rozložené a zóna se pravidelněji doplňovala než v roce 2005.



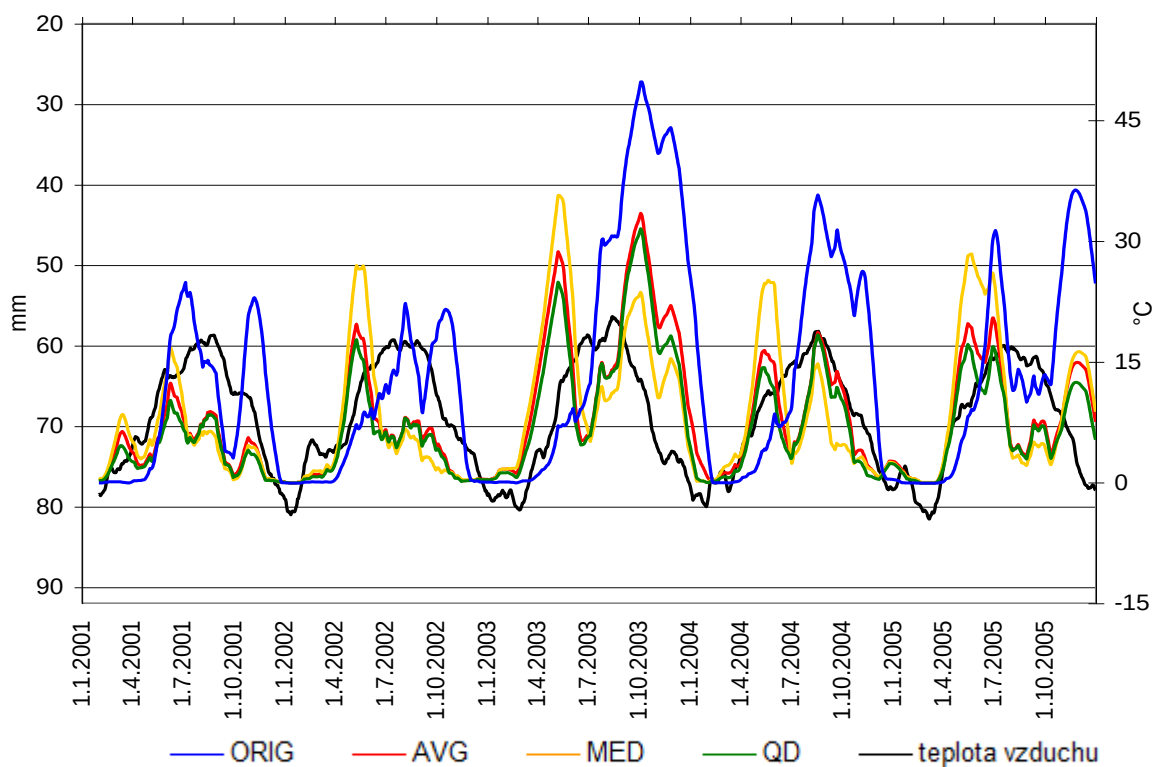
Obr. 4.22 – Měsíční a roční průměry denního obsahu UZTW pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Hodnoty z povodí Beroun (obr. 4.22) se lišily částečně průběhem, ale hlavně velikostí. Model počítá s maximem zaplnění zóny 82,895 mm. Měsíční průměry dosáhly maxima v lednu (AVG 76,3 mm, MED 76,5 mm a QD 76,6 mm) a v únoru (ORIG 77 mm), nad 70 mm dosahovaly až do dubna. Minimum hodnoty ORIG je v říjnu, a to 50 mm. Minimum vypočítaných hodnot dosáhlo naopak v dubnu (AVG 62,5 a QD 64,3 mm) a v květnu (MED 54,9 mm). Rozdíly hodnot opět odpovídaly rozdílnému chodu ET demand ORIG a ET demand AVG, MED a QD. Poměrově byly rozdíly minima a maxima v obou stanicích podobné, optický rozdíl hodnot u grafu pro Beroun je dán pouze použitým měřítkem osy a výrazně větší velikostí zóny v tomto povodí.

Roční průměrné hodnoty byly nejvyšší pro hodnoty AVG (72,9 mm), MED (72,5 mm) a QD (73,6 mm) v roce 2001 a pro hodnoty ORIG (69,1 mm) v roce 2002. Jako v předchozím případě zde byla důvodem velmi vysoká teplota vzduchu během roku 2002, což zmírnilo dopad naopak nadprůměrných srážek, a díky vysoké evapotranspiraci se zóna tolik nenaplňovala. Dalším důvodem bylo také to, že nejvýznamnější srážky se v roce 2002 vyskytly během srpnových povodňových epizod, kdy jejich intenzita překročila infiltrační rychlost a retenční kapacitu povodí, tudíž jejich značná část otekla v podobě rychlého odtoku, aniž by se výrazněji projevila na bilanci nasycení této zóny.

Nejméně se zóna naplnila v roce 2003 (ORIG 56 mm, AVG 61,7 mm a MED 63,3 mm, QD 63,7 mm), což byl velmi suchý rok. Hodnoty ORIG se od hodnot AVG, MED

a QD lišily průměrně o 5 mm (asi 7 %). Rok 2005 vykazoal za stejných srážkových podmínek o něco nižší hodnoty než rok předchozí. Zde to způsobila mnohem větší průměrná teplota během roku 2005 (obr. 4.23).



Obr. 4.23 – Denní obsahu UZTW (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun v závislosti na teplotě vzduchu, 2001 až 2005

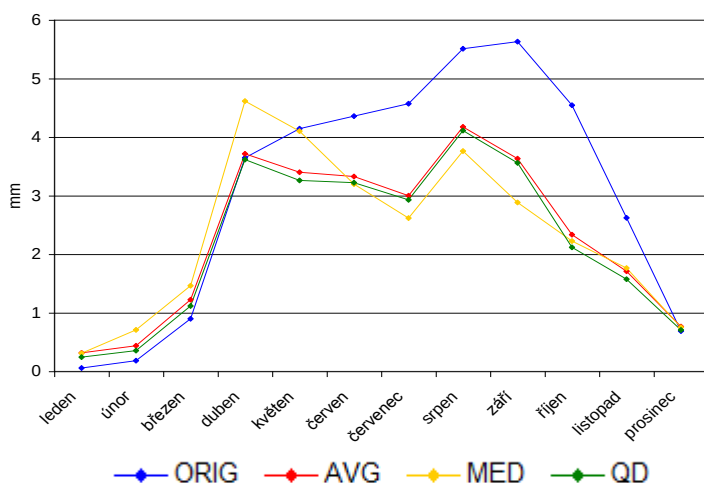
Významnou zjištěnou situací je, že kromě hodnot ORIG určujících naplnění této zóny v Berouně, hodnoty nevykazují očekávatelný roční chod, s výjimkou jarního maxima. Tento fakt je třeba připsat pravděpodobně kalibraci, kdy velikost zóny je úzce spjata právě s ET demand a při změně tohoto parametru může dojít k zastření kalibrací optimalizovanému režimu zóny.

Současně však to, že jsou v obou povodích zóny jinak velké (model počítá v Berouně s mnohem větším prostorem pro zónu UZTW), lze zdůvodňovat odlišnými fyzickogeografickými podmínkami. Horní část povodí Čenkov se nachází v oblasti převážně zalesněné a reliéf je zde členitý. Naopak v povodí Beroun jsou zemědělské půdy a reliéf je nížinný, zde je vyšší půdní horizont a model tak počítá s větší zónou UZTW (max 83 mm).

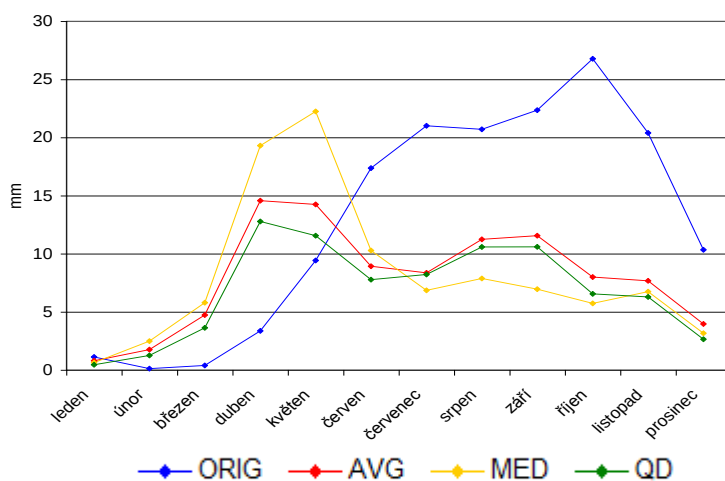
Opačně je tomu u spodních zón, kde (jak bude později prezentováno) je maximální obsah větší pro povodí Čenkov, kde díky lesům dochází k vyšší transpiraci a intercepci a lesní půdy mají také vyšší retenční a infiltrační schopnost než půdy zemědělské.

Deficit horní zóny vázané vody (UZTW deficit)

UZTW deficit představuje obrácenou hodnotu UZTW, tzn. kolik množství vody chybí k nasycení zóny UZTW (u povodí Čenkov to je zbytek do 10,168 mm a u Berouna zbytek do 82,895 mm). Chod těchto hodnot probíhal tedy opačně než chod hodnot UZTW. Je zde lépe vidět nasycenost zóny v zimním období narozdíl od většího deficitu na podzim, kdy je ještě vysoká evapotranspirace, ale nízké srážky.



Obr. 4.24 – Měsíční průměry denního obsahu UZTW deficit pro povodí Čenkov, 2001 až 2005



Obr. 4.25 – Měsíční průměry denního obsahu UZTW deficit pro povodí Beroun, 2001 až 2005

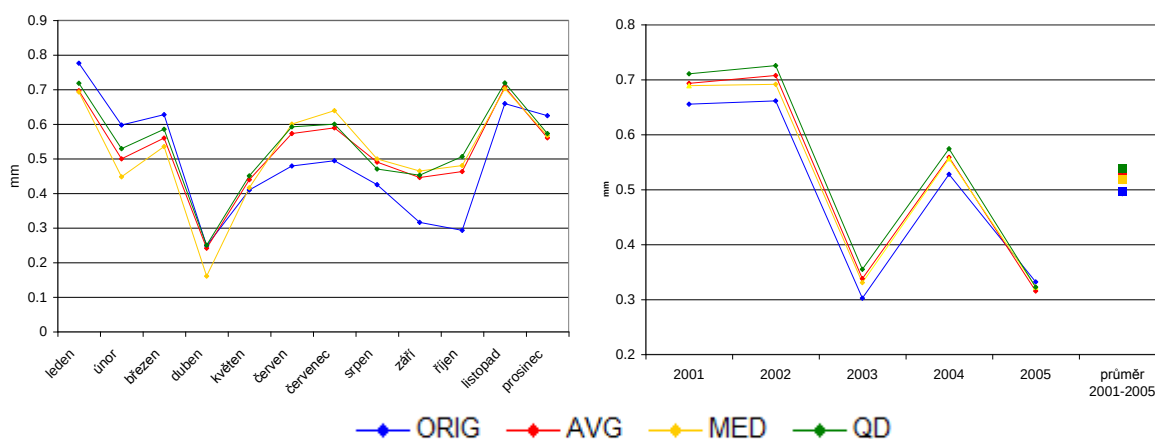
4.1.2.3. Obsah horní zóny volné vody (UZFW)

Obsah horní zóny volné vody se zvyšuje při prostupu vody z horní zóny vázané vody, když je tato vrstva zaplněná. Voda ze zóny UZFW perkoluje do spodních zón modelu a tvoří

podpovrchový odtok v modelu nazývaný interflow (IF), není odtud přímo odebírána voda pro evapotranspiraci.

Maximální obsah zóny pro Čenkov je 26,247 mm a pro Beroun 13,731 mm.

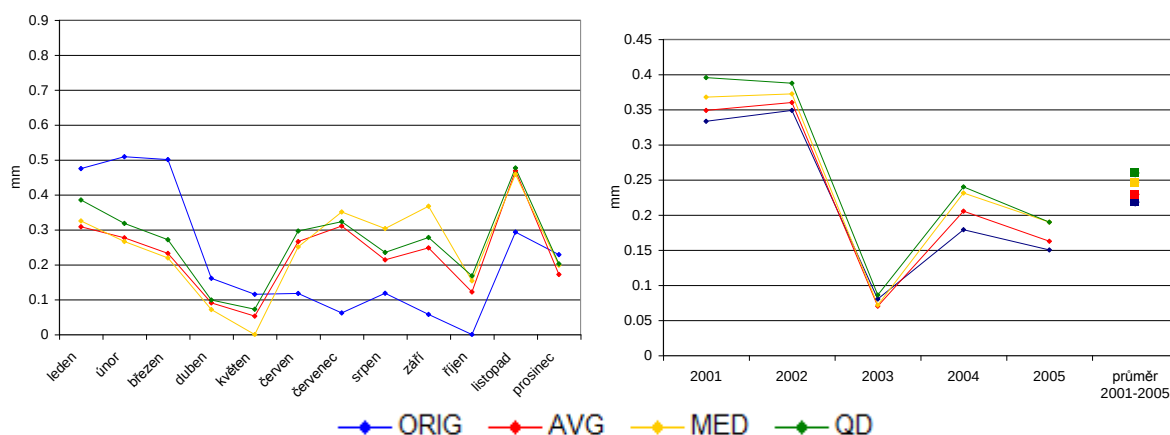
Srovnání hodnot ukazuje, že se výrazně lišily po celé období 2001 až 2005. Nejnížší hodnoty byly v roce 2003 a 2005, což byly velmi suché roky. Zóna UZFW bývá po většinu roku prázdná a voda se zde vyskytuje pouze dočasně po intenzivních srážkách. Proto je dynamika změn zaplnění velmi vysoká, ale průměrné zaplnění zóny dosahuje jen velmi nízkých hodnot.



Obr. 4.26 – Měsíční a roční průměry denního obsahu UZFW pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

Pro Čenkov (obr. 4.26) byly podle měsíčních průměrů nejnižší hodnoty v dubnu (ORIG 0,25 mm, AVG 0,25 mm, MED 0,16 mm a QD 0,25 mm), a pak v září a v říjnu, kdy už se hodnoty zvyšovaly (ORIG 0,3 mm a AVG, MED a QD přes 0,45 mm). To velmi dobře koresponduje s chodem srážek, na které je tato zóna nejvíce vázána, duben a říjen byly srážkově nejchudší měsíce, a tedy dotování UZFW bylo v těchto měsících nejnižší. Maxima dosáhla hodnota ORIG v lednu (0,78 mm), vypočítané hodnoty AVG, MED a QD měly dvě maxima v lednu a listopadu (0,7 mm), kdy byly srážky vysoké a zóna byla téměř zaplněna stejně jako UZTW. Vysoké hodnoty v letních měsících způsobil častější výskyt srážek. Od května do listopadu byly hodnoty ORIG obsahu UZFW nižší než hodnoty AVG, MED a QD. Rozdíly dosáhly asi 0,1 mm (což představuje asi 13 %), kromě listopadu, kdy se jevily všechny hodnoty téměř vyrovnané, což může být dáno nárůstem srážek a nárůstem průměrného zaplnění UZTW díky poklesu evapotranspiračních ztrát. Díky tomu může být více srážek převáděno do zóny UZFW.

Roční průměrné hodnoty měly velmi podobný chod, maximum nastalo v letech 2001 a 2002 (ORIG 0,66 mm, AVG 0,7 mm, MED 0,69 mm a QD 0,71 mm), dvě minima byla v roce 2003 a 2005 (kolem 0,3 mm). Hodnoty ORIG převyšovaly ostatní pouze v roce 2005, avšak jen nevýrazně. I zde je patrná úzká souvislost s množstvím srážek, nižší obsah naplnění v roce 2005 zapříčinil blízký vztah k UZTW, která byla v tomto roce také málo zaplněná díky suchým obdobím a nevyrovnaným srážkám během roku, jak je zmíněno výše. Srážky, které se v tomto roce vyskytly, primárně zaplňovaly UZTW a jen menší část byla k dispozici pro zaplnění UZFW.



Obr. 4.27 – Měsíční a roční průměry denního obsahu UZFW pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Pro Beroun (obr. 4. 27) měly hodnoty trochu jiný průběh, hlavně se zde projevovaly mnohem větší rozdíly mezi jednotlivými měsíci i hodnotami ORIG a ostatními simulovanými řadami. Hodnoty ORIG dosáhly maxima měsíčního průměru v únoru (0,51 mm), vysoké hodnoty byly i v lednu a březnu, a to díky relativně vysokým srážkám. Druhé, méně výrazné maximum, nastalo v listopadu, kdy srážky po sušším říjnu narůstaly. Minimum hodnot ORIG nastalo v říjnu, kdy hodnota klesla na nulu, tedy veškeré srážky, které se v povodí vyskytly, byly spotřebovány pouze na vyrovnání deficitu UZTW. Vzhledem k relativně vysoké hodnotě maxima UZTW a současně vzhledem k výskytu minima zaplnění této zóny právě na konci léta a na podzim je tento fakt možný. Znamená to však, že ve sledovaném období v říjnu nikdy nedošlo k tvorbě podpovrchového odtoku v této části povodí a současně nedocházelo k doplňování spodních zón modelu. Průběh hodnot ORIG odpovídal průběhu srážkových úhrnů, pouze v letním období byly hodnoty nižší vůči ostatním. Je zde patrný vliv UZTW, kde se v létě projevuje závislost na narůstající ET demand (vysoká až do září), a zóna

se vyprazdňovala. Ani UZFW tak neměla dostatečný přísun srážkové vody na zaplnění. Hodnoty ORIG převyšovaly ostatní od prosince do května.

Maximum hodnot AVG, MED a QD bylo v listopadu (asi 0,5 mm). Minimum nastalo naopak v květnu (AVG 0,05 mm, MED 0 a QD 0,07). Roční chod zaplnění UZFW je úzce svázán nejen s hodnotami srážek, ale i se zaplněním UZTW. U hodnot AVG, MED a QD, narozdíl od hodnot ORIG, je průběh zaplnění UZTW méně výrazný z hlediska minima na podzim. I proto je v tomto období možnost dotace UZFW při zaplnění UZTW srážkami, což vysvětluje listopadové maximum. Naopak v jarním období jsou průměrné hodnoty zaplnění horní zóny vázané vody menší než u hodnot ORIG – proto je také méně intenzivní doplňování UZFW a vzniká květnové minimum, které je u hodnot AVG, MED a QD mnohem výraznější než u hodnot ORIG. Druhé méně výrazné minimum bylo v říjnu (AVG a MED 0,15 mm QD 0,17 mm), způsobené patrně snížením srážek.

Roční průměrné hodnoty měly maximum v letech 2001 a 2002 (0,33 mm až 0,4 mm) a minimum v roce 2003 (0,07 mm). Všechny hodnoty byly velmi podobné v celém období. Odráží se zde průběh průměrných ročních srážek za sledované období. Výrazný pokles obsahu vody v zóně byl zřejmý ve velmi suchém roce 2003.

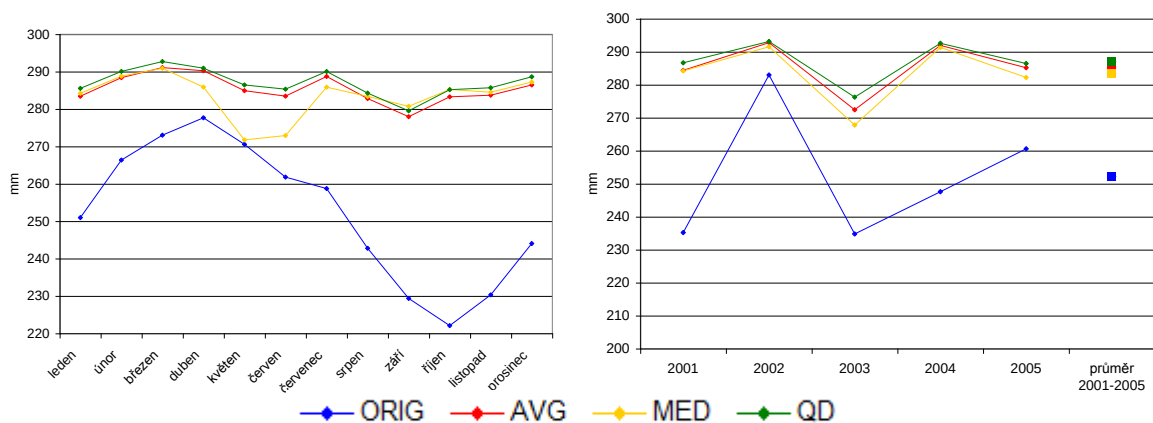
Hodnoty obsahu UZFW měly podobný průběh jako hodnoty srážek. Rozdílný průběh zaznamenaly pouze hodnoty ORIG v povodí Beroun, které měly v létě velmi nízké hodnoty, narozdíl od vypočítaných hodnot, což zapříčinil rozdílný chod ET demand a patrný vliv UZTW, hodnoty srážek se v letních měsících také zvyšovaly.

4.1.2.4. Obsah spodní zóny vázané vody (LZTW)

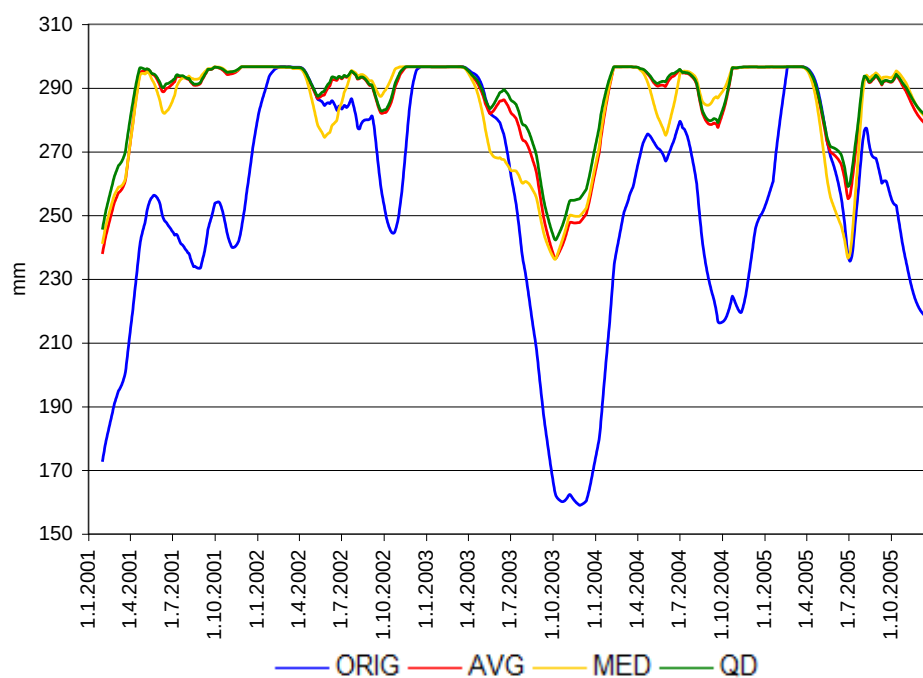
Obsah spodní zóny vázané vody se zvyšuje po zaplnění horní zóny volné vody. Voda v této zóně je dostupná pro evapotranspiraci díky kořenovému systému vegetace.

Maximální obsah zóny pro Čenkov je 296,602 mm a pro Beroun 299,936 mm.

Spodní zóny modelu vykazují mnohem větší rozdíly mezi hodnotami ORIG a ostatními simulovanými hodnotami, než to bylo u zón horních. Je to dáno větší citlivostí na hodnotu parametru ET demand, evapotranspirace se zde totiž projevuje kontinuálně. Naopak dotace ze srážkové vody do této zóny pronikají pouze po intenzivních epizodách, nižší srážky jsou zachyceny horními zónami a sem neproniknou. Proto je rozkolísanost a reakční doba ve spodních zónách výrazně větší.



Obr. 4.28 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZTW pro povodí Čenkov, 2001 až 2005



Obr. 4.29 – Denní průměry obsahu LZTW (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

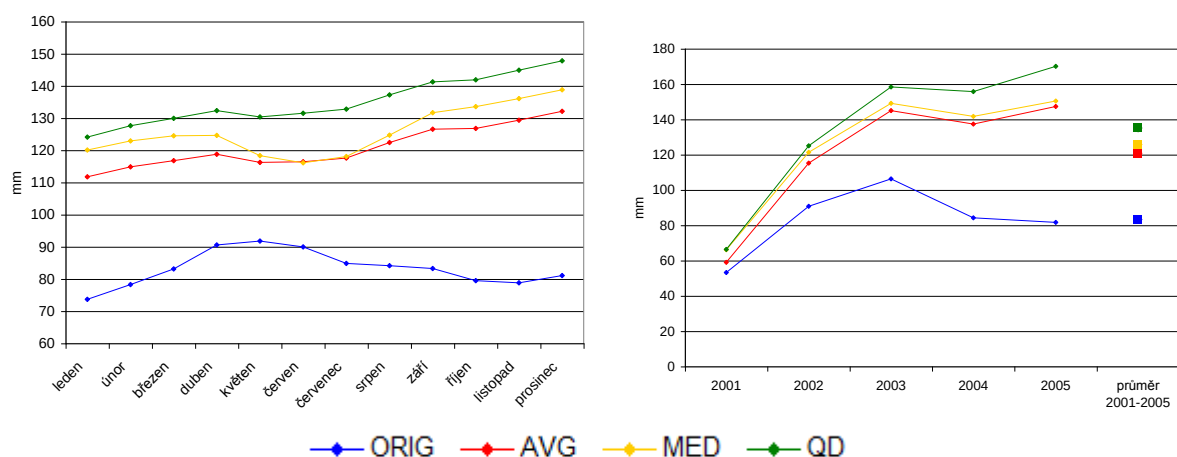
Model počítá s maximálním zaplněním zóny v povodí Čenkov na 296 mm (obr. 4.28 a obr. 4.29). Obsah spodní zóny vázané vody byl podle hodnot ORIG nižší než podle vypočítaných. Obsah se nejvíce lišil v říjnu a přes celou zimu, nejméně na jaře. Opět to má souvislost s vyšší hodnotou ET demand ORIG a tím způsobeným větším odběrem vody ze zóny LZTW dostupné pro evapotranspiraci i při nedostatku vody v horních zónách modelu.

Lze konstatovat, že právě v této zóně byly projevy rozdílných hodnot parametru ET demand nejvýraznější.

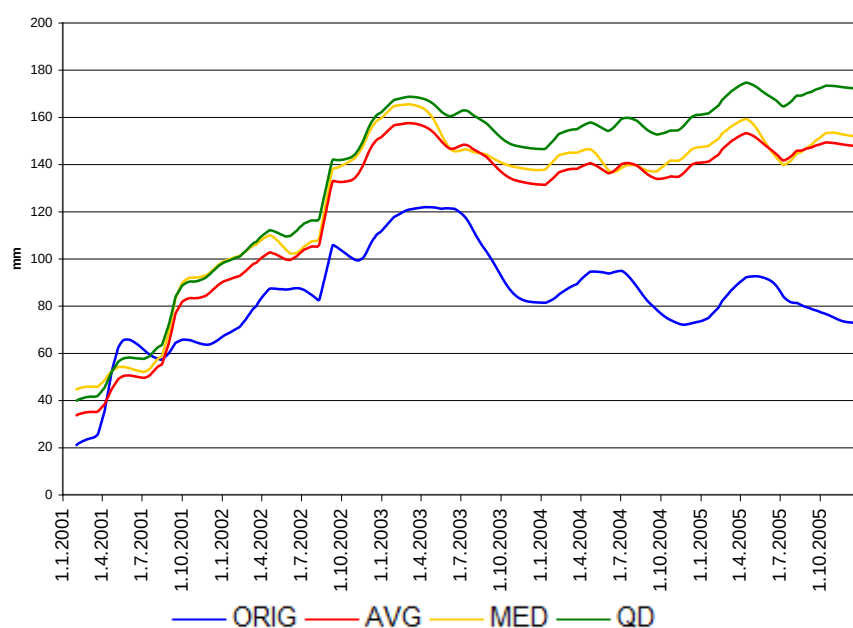
Hodnoty AVG, MED a QD se v průběhu měsíců výrazně neliší, pohybovaly se mezi 280 a 290 mm. Můžeme zaznamenat mírný pokles v květnu a červnu (navýšení ET demand), výrazný je hlavně u hodnot MED, které se blíží ORIG, což vyplývá z podobných hodnot ET demand, a potom v srpnu a září (vysoká hodnota ET demand, snižující se srážky a vrcholná vegetační fáze). Naopak velmi výrazně kolísala hodnota ORIG, která měla maximum měsíčního průměru v dubnu (277,7 mm), a minimum v říjnu (222,1 mm), což odpovídá předpokládanému ročnímu chodu stavu podzemních vod s maximem po období tání, kdy dochází k intenzivní dotaci podzemních vod, a naopak minimem na konci léta nebo na podzim.

Chod měsíčních hodnot odpovídal chodu hodnot zaplnění UZTW, kterou také ovlivnila evapotranspirace. Projevovaly se zde pouze rozdíly v zimním období, kdy LZTW nebyla maximálně zaplněna. To souvisí s omezeným přísunem vody z méně intenzivních srážek, které sice doplňují horní zóny, ale nejsou dost intenzivní na doplnění spodních zón modelu. Ty jsou doplněny až táním sněhové pokrývky (březen, duben). Podzimní minima pak odpovídají doznívání intenzivního odběru vody pro evapotranspiraci během letního období a současně nedostatečným doplňováním srážkami, které se v září a říjnu poměrně snížily. Důvodem bylo také sucho v roce 2003, které výrazně ovlivnilo chod průměrných měsíčních hodnot. I když hodnoty AVG, MED a QD působily velmi vyrovnaně, jejich průběh se také podobal průběhu hodnot UZTW, jen zde byl díky větší velikosti zóny rozdíl méně patrný.

Roční průměry vykazovaly velké rozdíly, hodnoty se přibližují pouze v roce 2002 – velmi deštivý rok. Minimum hodnot ORIG (234,8 mm) nastalo v roce 2003 díky velice nízkým srážkám během roku a naopak vysoké evapotranspiraci, maximum v roce 2002 (283 mm), naproti tomu způsobily velice nadprůměrné srážky během roku. Další výrazné minimum u hodnot ORIG nastalo v roce 2001, což ale ovlivnilo nedostatečné doplnění zóny ze zvolených počátečních podmínek, které byly odhadnuty nižší, než je průměrné naplnění zóny. Projevilo se to vzestupným trendem až do roku 2002 a tím jsou zkresleny roční průměry. Vypočítané hodnoty AVG, MED a QD se pohybovaly v rozmezí 267 až 292 mm. Celkově ale byly rozdíly mezi ročními průměry u vypočítaných hodnot relativně malé.



Obr. 4.30 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZTW pro povodí Beroun, 2001 až 2005



Obr. 4.31 – denní průměry obsahu LZTW (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005

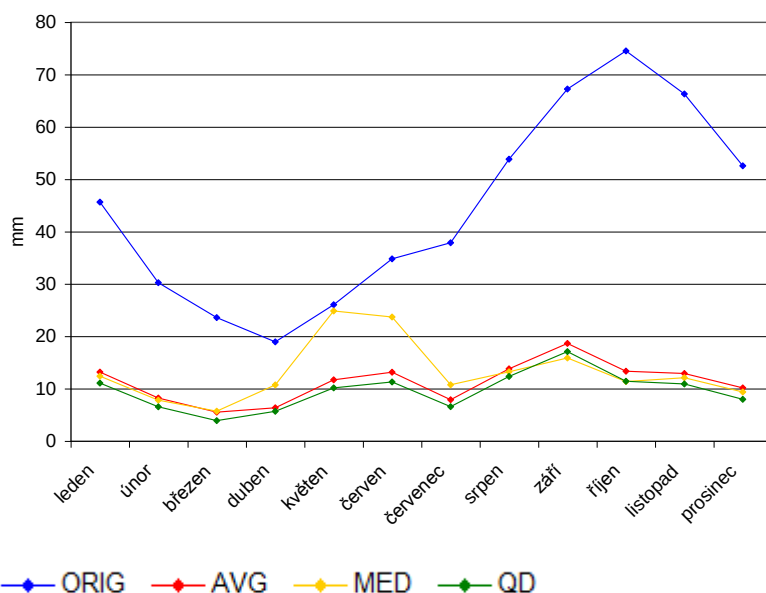
Model počítá s maximálním obsahem zóny v povodí Beroun je 299,9 mm (obr. 4.30). Zaznamenané rozdíly v měsíčních průměrech hodnot byly poměrně výrazné. Nejvýše vypočítané hodnoty vzrostly v prosinci (AVG 132 mm, MED 138 mm a QD 148 mm), nejnižší v lednu (AVG 112 mm, MED 120 mm a QD 124 mm). Byl zde patrný rostoucí průběh během roku, což způsobil velký nárůst obsahu zóny od začátku období až do prvního čtvrtletí roku 2003, po zbytek období byl stav vyrovnaný. Tato situace tedy ovlivňuje všechny průměrné hodnoty celého období. Hodnoty ORIG klesly mnohem níže, minimum v lednu (73,7 mm), druhé pak v listopadu (78,8 mm), maximum v květnu (91,8 mm). Měly tedy jiný

průběh, do května se mírně zvyšovaly, pak naopak docházelo k mírnému poklesu. Pokud se podíváme na celé zájmové období (obr. 4.31), byl zde také patrný nárůst do března 2003, pak ale následoval mírný pokles způsobený nižší teplotou vzduchu a nižšími srážkami na konci sledovaného období.

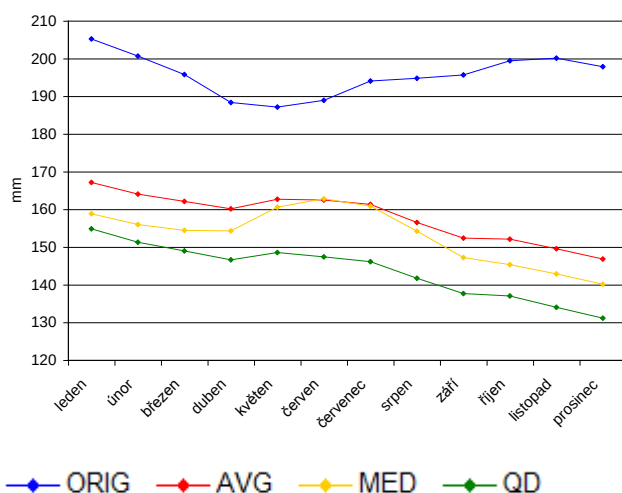
Roční průměrné hodnoty byly vyrovnané pouze v roce 2001 (ORIG 53 mm, AVG 59 mm, MED a QD 66 mm) byly hodnoty nízké opět spíše v důsledku zvolených počátečních podmínek nasycení a jejich rehabilitace. V dalších letech už jsou znát velké odchylky mezi jednotlivými hodnotami. Největší rozdíl nastal v roce 2005, ORIG 82 mm a AVG 147 mm, MED 150 mm a QD 170 mm.

Deficit spodní zóny vázané vody (LZTW deficit)

Deficit spodní zóny vázané vody je opět doplňkem maximálního obsahu této zóny, tedy obrácenou hodnotou LZTW. U povodí Čenkov do 296,6 mm (obr. 4.32) a u povodí Beroun do 299,9 mm (obr. 4.33). Proto byl průběh hodnot opačný než u obsahu LZTW. V Čenkově se zóna naplňovala mnohem více, deficit byl průměrně jen 5 %, zatímco v Berouně chybělo průměrně kolem 50 % k naplnění zóny.



Obr. 4.32 – Měsíční průměry denního obsahu LZTW deficit pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

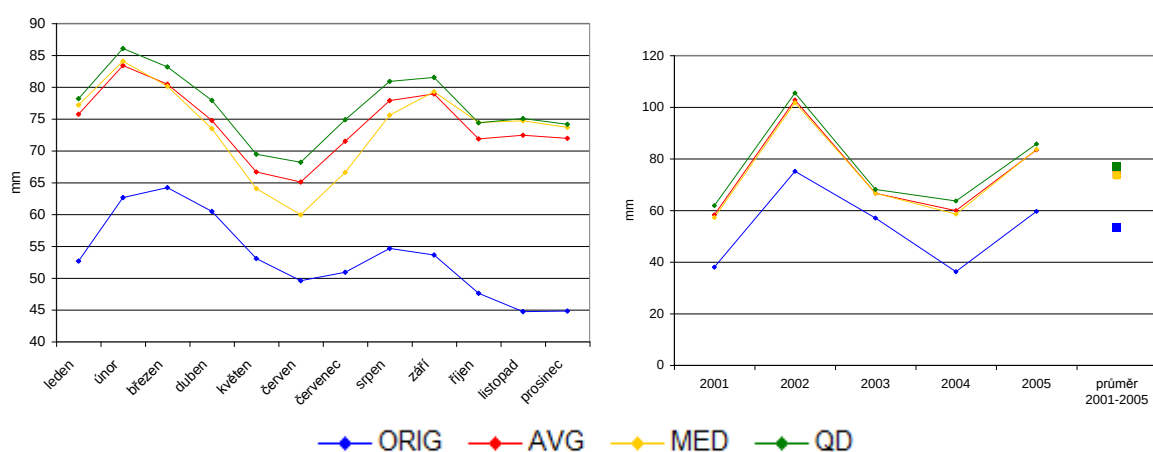


Obr. 4.33 – Měsíční průměry denního obsahu LZTW deficit pro povodí Beroun, 2001 až 2005

4.1.2.5. Obsah spodní zóny volné vody primární (LZFP)

Spodní zóna volné vody primární je plněna simultánně společně s ostatními spodními zónami. Voda z této zóny umožňuje primární základní odtok, který se kontinuálně uplatňuje i v suchém období. Tato zóna již není přímo ovlivněna evapotranspirací.

Maximální obsah zóny pro Čenkov je 342,995 mm a pro Beroun 130,444 mm.



Obr. 4.34 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZFP pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

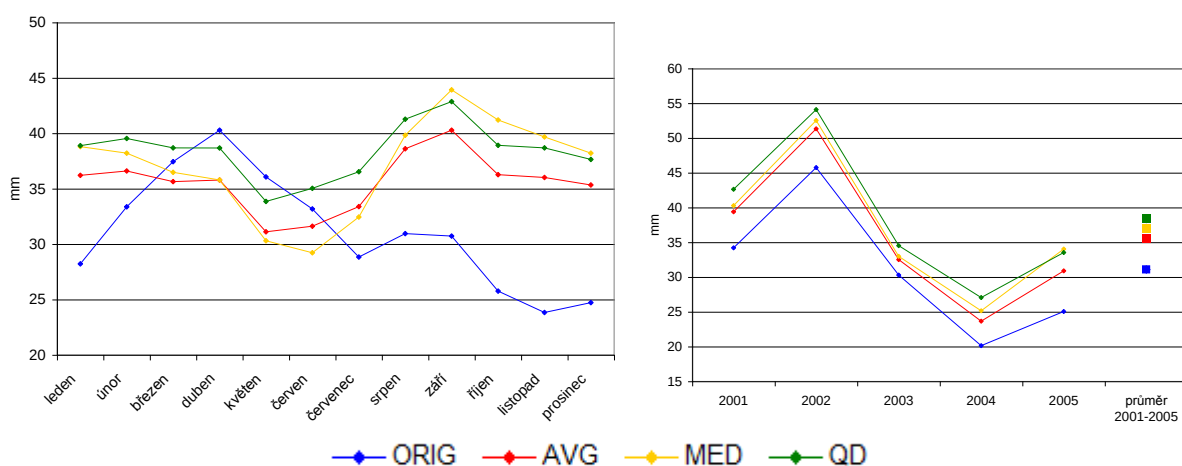
Obsah spodní zóny volné primární vody měl v Čenkově u všech simulovaných variant podobný chod měsíčních průměrů (obr. 4.34). Hodnoty ORIG však byly oproti hodnotám

AVG, MED a QD velmi rozdílné, lišily se až o 25 mm (40 %), největší rozdíly se projeví v listopadu, prosinci a lednu, dále pak srpnu a září. Maximální hodnota měsíčních průměrů nastala v březnu (ORIG 64,2 mm) a v únoru (AVG 83 mm a MED 84 mm, QD 86 mm), druhé nevýrazné maximum bylo v srpnu (ORIG 54,6 mm) a v září (AVG 79 mm, MED 79 mm a QD 81 mm), což mohlo být ovlivněno povodní v srpnu 2002. Naopak minimum nastalo v listopadu (ORIG 44,7 mm) a v červnu (ORIG 49,6 mm, AVG 65 mm, MED 60 mm a QD 68 mm). Celkově je zřejmá zpožděná reakce na srážky a průběh zaplnění zóny koresponduje s průběhem průtoku.

Při srovnání ročních průměrů vidíme výrazné rozdíly, nejvyšší hodnoty byly v roce 2002 (ORIG 75 mm, AVG, MED 101 mm a QD 105 mm), což je opět ovlivněno povodní v srpnu 2002, a nejnižší v roce 2001 a 2004 (ORIG 37 mm, AVG, MED a QD kolem 60 mm), což lze v roce 2004 přičíst dozvuku suchého roku 2003 v kombinaci s relativně méně deštivým rokem 2004, kdy se zóna nedoplnila, naopak se ještě více vyprázdnila. V roce 2001 nízké hodnoty opět zapříčinilo nevhodné nastavení počátečních podmínek.

Rozdíly mezi jednotlivými hodnotami vznikly relativně velké, dosáhly 20 mm (20 %), kromě roku 2003, kdy byl rozdíl jen 11 mm (šlo o suchý rok).

Naplnění LZFP je determinováno srážkami a naplněním horních zón modelu, a tedy perkolací vody. V roce 2004 se projevilo ještě sucho z předchozího roku a také malé množství srážek během začátku roku 2004. Naopak v roce 2003, který byl sám o sobě suchý, se projevuje vliv na srážky bohatého roku 2002.



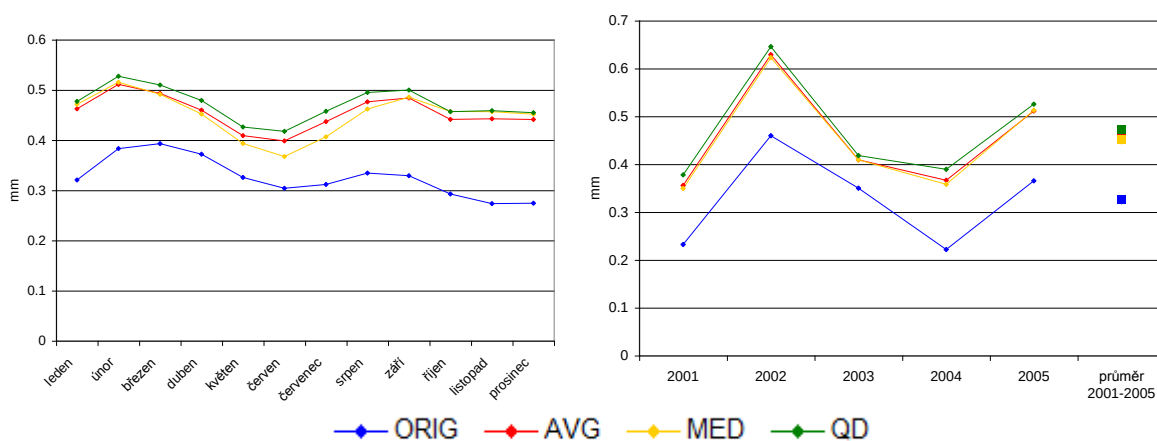
Obr. 4.35 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZFP pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Maximum měsíčních průměrů vypočítaných hodnot z povodí Beroun (obr. 4.35) nastalo v září (AVG 40 mm, MED 44 mm a QD 43 mm), minimum pak v květnu (AVG 31 mm a QD 34 mm) a červnu (MED 29 mm). Je zde patrná souvislost se srážkami, zóna se po srážkově chudých měsících pomaleji vyprazdňuje než horní zóny, také na srážkové situace reaguje pomaleji. Hodnoty ORIG měly poněkud jiný průběh, hlavní maximum bylo v dubnu (40 mm), druhé v září (33 mm). První minimum nastalo v červenci (29 mm), a druhé hlavní v listopadu (24 mm). Hodnoty ale klesaly už od dubna až do konce roku. To mělo souvislost s vyprazdňováním ostatních zón modelu, které více ovlivnila hodnota ET demand ORIG.

Při porovnání ročních průměrů z povodí Beroun je zřejmé maximum v roce 2002 (ORIG 46 mm, AVG 51 mm, MED 53 mm a QD 54 mm) způsobeno povodněmi v srpnu a vysokými srážkovými úhrny během roku. Minimum nastalo v roce 2004 (ORIG 20 mm, AVG 24 mm, MED 25 mm a QD 27 mm), zde je opět patrný vliv roku 2003, kdy bylo velké sucho a zóna se pomalu znovu zaplňovala. Rozdíly mezi jednotlivými hodnotami nebyly tak velké jako u Čenkova, maximálně dosáhly 8 mm (cca 15 %). To může mít souvislost s velikostí těchto zón, jelikož maximální obsah zóny pro Čenkov je skoro třikrát větší než pro Beroun. Průběh zaplnění zón v jednotlivých letech je podobný jako v povodí Čenkov.

4.1.2.6. Základní odtok primární (BFP)

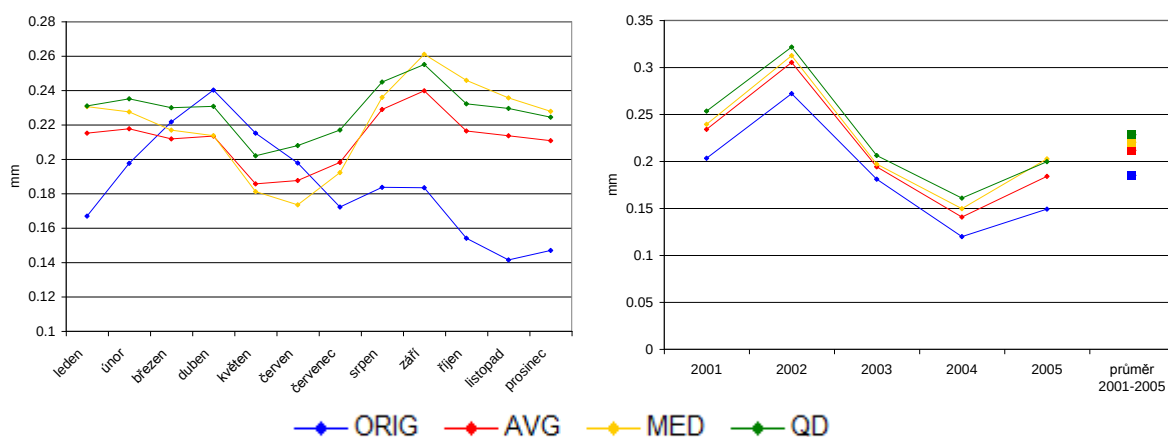
Základní odtok primární (base flow primary) představuje množství vody, které odečte z LZFP a je součástí celkového odtoku. Tento odtok se uplatňuje kontinuálně. Průběh BFP koresponduje s průběhem zaplnění LZFP.



Obr. 4.36 – Měsíční a roční průměry denní hodnoty BFP pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

Základní odtok primární měl podobný průběh hodnot jako LZFP. Hodnoty dosahovaly ve povodí Čenkov maximálně 0,5 mm (obr. 4.36). Rozdíl mezi jednotlivými hodnotami byl velký hlavně v podzimních a zimních měsících - 0,17 mm (34 %). Nejmenší rozdíly byly na jaře – 0,09 mm (18 %). Minimum hodnoty ORIG nastalo v listopadu (0,27 mm), vypočítaných v červnu (AVG 0,4 mm, MED 0,37 mm a QD 0,42 mm). Maxima hodnoty ORIG dosáhly v březnu (0,39 mm), vypočítaných v únoru (AVG 0,51 mm, MED 0,52 mm a QD 0,53 mm) a v září (AVG a MED 0,49 mm a QD 0,5 mm).

Roční průměrné hodnoty byly opět nejvyšší v roce 2002 (ORIG 0,46 mm, AVG a MED 0,62 mm a QD 0,64 mm), nejnižší pak v roce 2004 (ORIG 0,22 mm, AVG a MED 0,36 mm a QD 0,38 mm). Nejvíce se průměrné hodnoty blížily v roce 2003, kdy se lišily jen o 0,05 mm, nejvíce naopak v roce 2002 o 0,18 mm.



Obr. 4.37 – Měsíční a roční průměry denní hodnoty BFP pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Hodnoty z povodí Beroun (obr. 4.37) dosahovaly maximálně 0,26 mm. Rozdíl mezi hodnotami nebyl tak velký, největší se projevil opět v podzimních a zimních měsících - 0,08 mm (což je asi 30 %). Nejmenší rozdíly byly na jaře – 0,02 mm (asi 8 %). Minima hodnoty ORIG dosáhly v listopadu (0,14 mm), vypočítaných hodnot v květnu (AVG 0,19 mm a QD 0,2 mm) a červnu (MED 0,17 mm). Maximum měsíční průměrné hodnoty ORIG nastalo v dubnu (0,24 mm), druhé nevýrazné v září (0,2 mm). Maximum měsíčních průměrů vypočítaných hodnot bylo v září (AVG 0,24 mm, MED a QD 0,26 mm).

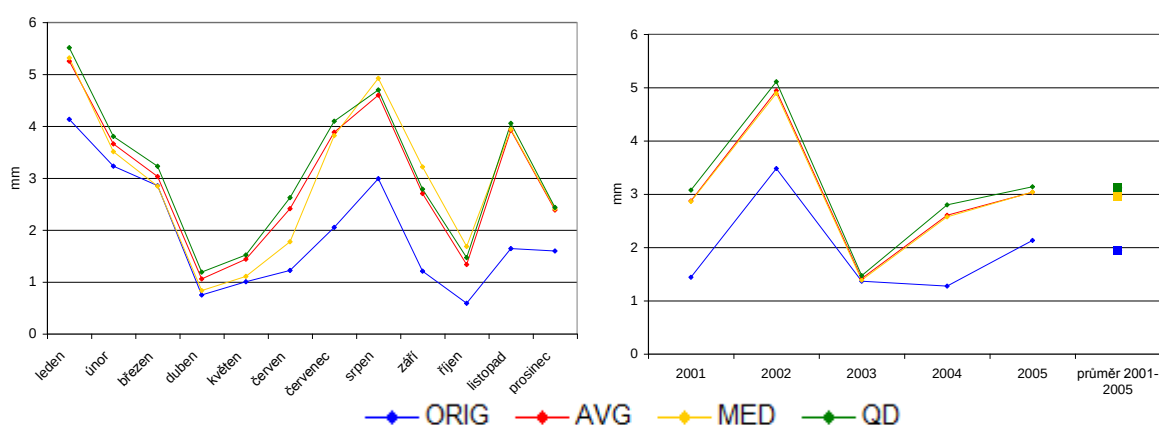
Roční průměrné hodnoty byly opět nejvyšší v roce 2002 (ORIG 0,27 mm, AVG 0,30 mm a MED 0,31 mm a QD 0,32 mm), nejnižší pak v roce 2004 (ORIG 0,12 mm, AVG 0,14 mm, MED 0,15 mm a QD 0,16 mm). V prvních dvou letech hodnoty stoupaly díky vysokým srážkám, bylo tedy dostatečné množství vody k odtoku. V roce 2003 zásoby díky

suchu poklesly, poklesl tedy i základní odtok a dále se udržoval nízký, protože v následujících letech byly srážky mírně podprůměrné. Nejvíce se průměrné hodnoty blížily v roce 2003, v ostatních letech se lišily maximálně o 0,04 mm.

4.1.2.7. Obsah spodní zóny volné vody suplementární (LZFS)

Spodní zóna volné suplementární vody je plněna simultánně společně s ostatními spodními zónami. Voda z této zóny umožňuje základní odtok suplementární. Tato zóna slouží v modelu především k dosažení lepší shody simulovaného a pozorovaného odtoku po srážkové události, a protože je relativně velmi malá (maximální zaplnění 5 mm oproti 85 mm u LZFP), během suchých období není odtok z této zóny generován a zóna je prázdná.

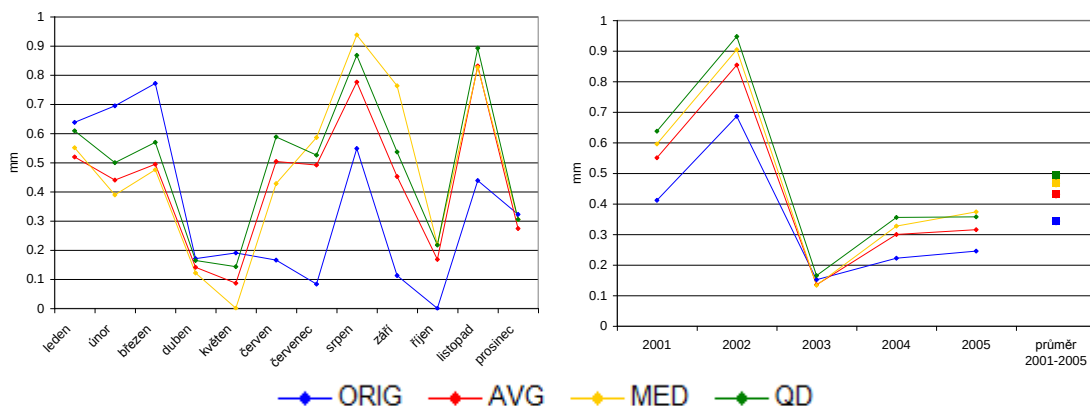
Maximální obsah zóny pro Čenkov je 221,276 mm a pro Beroun 60,02 mm.



Obr. 4.38 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZFS pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

Obsah spodní zóny volné vody suplementární měl v obou zájmových stanicích podobný průběh měsíčních průměrů. U hodnot ze povodí Čenkov (obr. 4.38) byly zřejmé dvě měsíční minima v dubnu (ORIG 0,75 mm, AVG 1,06 mm, MED 0,83 mm a QD 1,19 mm) a říjnu (ORIG 0,59 mm, AVG 1,34 mm, MED 1,68 mm a QD 1,47 mm) a dvě maxima v lednu (ORIG 4,13 mm, AVG a MED 5,3 mm a QD 5,5 mm) a srpnu (ORIG 2,99 mm, AVG 4,6 mm, MED 4,9 mm a QD 4,7 mm). To velmi věrně korespondovalo s měsíčním průběhem srážek. Hodnoty ORIG byly výrazně nižší než hodnoty AVG, MED a QD, stejně jako u všech ostatních spodních zón, což způsobil větší odběr vody pro evapotranspiraci již v horních zónách, která je vyšší pro hodnoty ET demand ORIG. Rozdíl se zvyšoval hlavně v letních měsících, ale velký byl i na podzim. Rozdíl dosahoval až 2 mm (40 %). Zvyšoval se tedy ve srážkovém období, zatímco v suchém období se snižoval. V suchém období je zóna často zcela prázdná bez ohledu na míru evapotranspirace.

Roční průměry vykazovaly nejvyšší hodnoty v roce 2002 (ORIG 3,5 mm, AVG, a MED 4,9 mm a QD 5,1 mm), nejnižší naopak v roce 2003, zde byly ale všechny hodnoty vyrovnané (1,4 mm) – opět shoda suchého období, kdy se zóna nezaplňuje kvůli malému množství srážek. Roky 2001 i 2005 se shodovaly s průměrem za celé období. Průběh se opět shodoval s ročním chodem srážek a v závislosti na ostatních zónách.



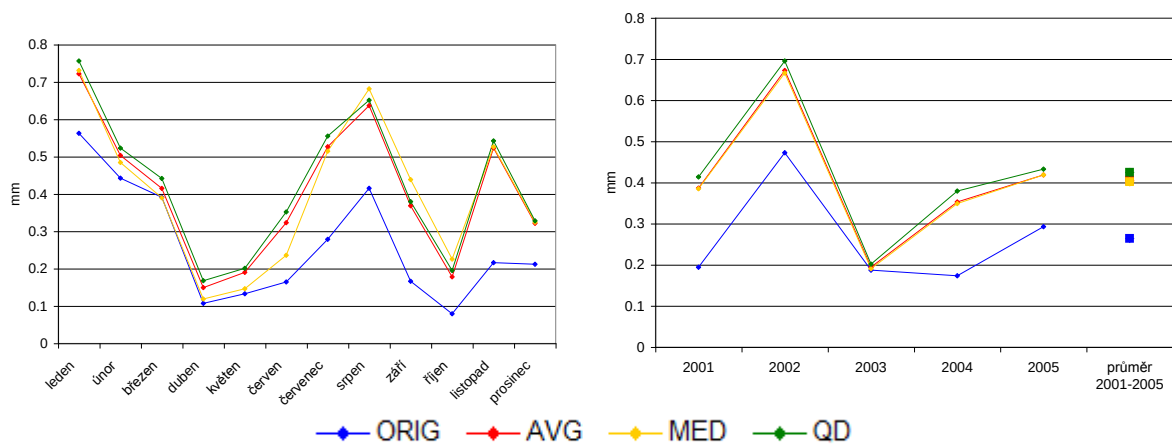
Obr. 4.39 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZFS pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Hodnoty z povodí Beroun (obr. 4.39) měly podobný, velmi rozkolísaný průběh, maximum měsíčních průměrů se lišilo u hodnot ORIG – březen (0,77 mm) a srpen (0,55 mm), a vypočítaných – srpen (AVG 0,78 mm, MED 0,94 mm, QD 0,87 mm) a listopad (AVG a MED 0,83 mm a QD 0,89 mm). Minimum hodnot ORIG bylo v červenci (0,08 mm) a v říjnu, kdy hodnota klesla na nulu. U vypočítaných hodnot bylo minimum v květnu (AVG 0,1 mm, MED 0 mm a QD 0,14 mm) a v říjnu (AVG 0,17 mm, MED a QD 0,22 mm).

U ročních průměrných hodnot nastalo velmi výrazné maximum v roce 2002 (ORIG 0,69 mm, AVG 0,85 mm, MED 0,9 mm a QD 0,95 mm). Minimum pak bylo v roce 2003, kdy se všechny hodnoty pohybovaly kolem 0,15 mm. Rok 2005 se shodoval s ročním průměrem za celé období.

4.1.2.8. Základní odtok suplementární (BFS)

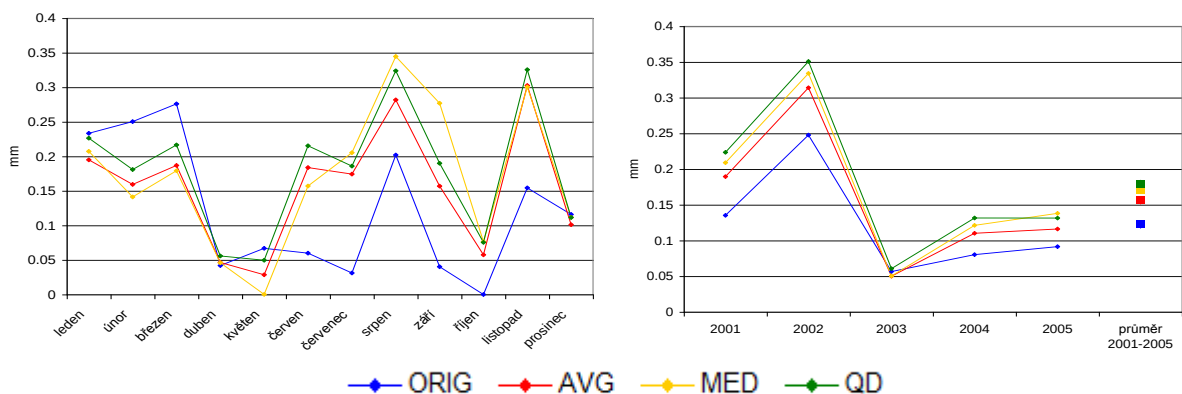
Základní odtok suplementární (base flow supplementary) představuje množství vody, které odečte z LZFS a je součástí celkového odtoku. Tento odtok není většinou za suchého období generován a slouží především k vyrovnání simulovaného a pozorovaného odtoku po srážkové události. Průběh BFS koresponduje s průběhem LZFS.



Obr. 4.40 – Měsíční a roční průměry denní hodnoty BFS pro povodí Čenkov, 2001 až 2005

Hodnoty z povodí Čenkov (obr. 4.40) měly stejně minimum průměrných měsíčních hodnot v dubnu (ORIG, AVG 0,15 mm MED 0,12 mm, a QD 0,17 mm) a říjnu (ORIG 0,07 mm, AVG 0,18 mm a MED 0,23 mm a QD 0,2 mm) a maximum v lednu (ORIG 0,56 mm, AVG 0,73 mm, MED a QD 0,76 mm) a srpnu (ORIG 0,42 mm, AVG 0,64 mm, MED 0,68 mm a QD 0,65 mm). Hodnoty ORIG byly opět nižší než vypočítané a nejvíce se lišily v letních a podzimních měsících, naopak nejmenší na jaře. Hodnoty dosahovaly maximálně 0,7 mm. Měsíční chod odpovídal chodu srážek, jelikož BFS je generován právě kvůli vyrovnávání odtoku po srážkových úhrnech.

Roční průměry ukazovaly taktéž stejný průběh jako LZFS a jako srážky, minimum v roce 2003 (0,2 mm), maximum v roce 2002 (ORIG 0,47 mm, AVG a MED 0,67 mm a QD 0,7 mm). Hodnoty byly shodné v roce 2003, největší rozdíl nastal v roce 2002 (0,19 mm), ale relativně velké rozdíly se projeví i v ostatních letech.



Obr. 4.41– Měsíční a roční průměry denní hodnoty BFS pro povodí Beroun, 2001 až 2005

Hodnoty z povodí Beroun byly velice rozkolísané (obr. 4.41). Maxima měsíčních průměrů hodnoty dosáhly v březnu (ORIG 0,28 mm, AVG 0,19 mm, MED 0,18 mm, QD 0,22 mm), druhé v srpnu (ORIG 0,2 mm, AVG 0,28 mm, MED 0,34 mm a QD 0,32 mm) a ještě třetí v listopadu (ORIG 0,15 mm, AVG a MED 0,3 mm a QD 0,33 mm), minimum hodnot ORIG v dubnu a červenci (0,04 mm) a v říjnu – nulová hodnota, vypočítaných v květnu (AVG 0,03 mm, MED 0 mm a QD 0,05 mm) a v říjnu (AVG 0,06 mm, MED a QD 0,08 mm). Hodnoty ORIG klesly opět níže než vypočítané AVG, MED a QD a rozdíly byly velké ve všech měsících kromě dubna a května, průběh byl ovšem podobný.

Také roční průměry ukazovaly stejný průběh jako zaplnění LZFS, minimum v roce 2003 (0,05 mm), maximum v roce 2002 (ORIG 0,25 mm, AVG 0,31 mm, MED 0,33 mm a QD 0,35 mm). Téměř shodné byly hodnoty v roce 2003, největší rozdíl nastal v roce 2002 (0,1 mm), ale stejně jako v ostatních letech nebyl rozdíl tak velký jako u Čenkova.

4.1.2.9. Denní variabilita potenciální evapotranspirace

Jako doplňkový výstup byla vypočtena průměrná odchylka denní hodnoty evapotranspirace určené prostřednictvím výpočtu rovnicí Penman-Monteith od měsíčních průměrných hodnot použitých jako parametr ET demand (varianta AVG). Cílem bylo dokumentovat míru shlázení variability potenciální evapotranspirace v modelu AquaLog právě v důsledku aplikace měsíčních průměrů parametru ET demand. Průměrné absolutní odchylky denních vypočtených hodnot potenciální evapotranspirace od průměru parametru ET demand (tab. 4.2) za jednotlivé kalendářní měsíce ukazuje, že čím je nižší hodnota ET demand, tím je nižší absolutní hodnota této odchylky. Zároveň však odchylky dosahují relativně vyšších hodnot v procentuálním vyjádření – tedy naopak v létě jsou hodnoty nejnižší a v zimním období je odchylka relativně velká.

Absolutní hodnoty odchylek přitom dosahují až 0,84 mm za den v případě povodí Beroun a 0,73 mm za den v povodí Čenkov. Z toho vyplývá, že model nereprezentuje dostatečně přesně variabilitu potenciální evapotranspirace mezi jednotlivými dny, což může ovlivňovat i celkové výsledky simulací odtoku a jednotlivých stavových proměnných hydrologického modelu. Přesné denní hodnoty evapotranspirace však v operativním provozu není možné získat v důsledku absence vstupních dat potřebných pro jejich výpočet.

	Čenkov			Beroun		
	odchylka		AVG	odchylka		AVG
leden	0.285634	77.5%	0.368555	0.356168	83.5%	0.42641
únor	0.335739	66.5%	0.505164	0.466044	77.7%	0.600114
březen	0.379852	53.6%	0.708601	0.449898	58.8%	0.765332
duben	0.528581	43.9%	1.204376	0.618684	47.6%	1.299985
květen	0.638144	37.0%	1.722825	0.768926	42.9%	1.794142
červen	0.717094	34.2%	2.096774	0.721416	35.6%	2.027421
červenec	0.659424	33.1%	1.991331	0.697311	36.6%	1.903533
srpen	0.725102	37.9%	1.913562	0.836322	44.0%	1.902715
září	0.408207	38.8%	1.052829	0.503919	46.6%	1.080586
říjen	0.333084	53.2%	0.625626	0.416322	61.2%	0.68002
listopad	0.169819	57.4%	0.295649	0.211181	67.8%	0.311288
prosinec	0.140262	59.8%	0.234376	0.186407	66.5%	0.280377

Tabulka 4.2 - Odchylky denní potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Penman-Monteith a průměrných měsíčních hodnot použitých jako parametr ETdemand

4.1.3. Shrnutí výsledků simulací

Hodnota parametru ET demand podstatně ovlivňuje všechny dosažené výsledky, ať již jde o celkový odtok, jeho jednotlivé složky nebo naplnění zón modelu (stavové proměnné). Z porovnání jednotlivých hodnot (originálních získaných kalibrací a vypočítaných metodou Penman-Monteith) zjišťujeme, že vypočítané hodnoty mají plynulejší průběh. Originální hodnoty vykazují výraznější chod v průběhu roku s vyššími hodnotami v létě a naopak nižšími v zimě. Od průběhu ET demand se odvíjí rozdílné chování půdních zón během zkoumaného období. To prokazuje, že právě hodnota parametru ET demand může v dlouhodobém měřítku velmi výrazně ovlivňovat stav modelu, a tím vést k nepřesné simulaci vodní bilance.

Při použití originálních hodnot parametru ET demand dochází během letního období k vyšším ztrátám vody, tzn. že půdní zóny jsou méně nasycené než při použití hodnot vypočítaných ET demand AVG, MED a QD. Opačně tomu může být v zimním období, kdy je naopak hodnota ET demand ORIG menší, ale v zimě není vliv evapotranspirace tak velký jako v létě. Celkově byl pozorován výrazně větší roční chod zaplnění jednotlivých půdních zón právě při použití hodnot ORIG než u ostatních zkoumaných variant.

Přitom nejvíce se rozdíly projeví v zónách a procesech přímo ovlivňovaných evapotranspirací, tedy v zónách vázané vody a zejména pak spodní zóně vázané vody, kde díky menší dynamice změn a její větší velikosti dochází k dlouhodobějšímu kumulování efektu rozdílné hodnoty parametru ET demand.

Dalším společným rysem jsou vysoké srážky a vysoká teplota během roku 2002, a pak suché období v roce 2003. Ukazuje se, že v období bohatém na srážky (zejména rok 2002) se jednotlivé hodnoty více rozcházejí než v období suchém (rok 2003). Původně v srpnu 2002 výrazně ovlivnily chod měsíčních i ročních průměrů a model nesprávně simuluje průtok nebo obsah vody v půdních zónách. Stejně tomu je i v zimních měsících, kdy je kvůli tání sněhu také těžší odtok nasimulovat. Naopak v suchém období, v roce 2003 nebo v podzimních a jarních měsících, kdy jsou srážky nejnižší, jsou průběhy jednotlivých hodnot nejbližší. Simulace je jednodušší, jelikož nedochází k takovým změnám jako ve srážkově bohatém období.

Současné byly zaznamenány některé rozdíly mezi horní a dolní částí povodí vyplývající z jejich rozdílných fyzickogeografických podmínek a rozdílných hodnot parametrů modelu pro tato povodí. Pokud jde o celkový simulovaný odtok, je třeba konstatovat, že pro Čenkov lépe odpovídala pozorování varianta ORIG, a to zejména v obdobích s průměrnými či podprůměrnými průtoky. Naopak maxima byla lépe postižena

ostatními variantami ET demand. Bohužel však výsledky ani jedné z variant nelze považovat za dostatečně uspokojivé. Naopak v povodí Beroun se simulace s vypočtenými hodnotami dle metody Penman-Monteith více blížily pozorovaným hodnotám než originální parametr.

Z výsledků je patrné, jak velký vliv má evapotranspirace, resp. průběh křivky ET demand dosazované do modelu, na simulaci průtoku nebo obsahu jednotlivých půdních zón. Rozdíly mezi vstupními hodnotami parametru ET demand ORIG a AVG, MED a QD se promítají do všech ostatních výsledků. Model SAC-SMA je tedy na hodnotu parametru ET demand velice citlivý a pro správnou simulaci vodní bilance je velmi důležitý.

5. Diskuze

Cílem práce bylo dokázat vliv evapotranspirace na hydrologické modely, konkrétně citlivosti modelu SAC-SMA na použité hodnoty evapotranspirace a jaký vliv mají na následující simulaci vodní bilance v povodí. Problematicke citlivosti hydrologických modelů na vstupní data se věnují např. práce autorů Kim, J., Hogue, T. (2005) nebo Gan, T. Y. et al. (2006).

Hodnocení problematiky muselo být přizpůsobeno vstupním datům, která byla k dispozici. Relativně krátká použitá časová řada může mít na výsledky vliv zejména ve smyslu nedostatečného pokrytí možné variability evapotranspirace v jednotlivých letech. Tento fakt je však částečně eliminován tím, že v hodnoceném období se nalézají dva meteorologicky a hydrologicky výjimečné roky 2002 a 2003. Rok 2002 reprezentuje rok s velmi vlhkým létem a častým výskytem povodní v druhé polovině roku. Naopak rok 2003 byl charakteristický velmi suchým jarem a létem, kdy byly pozorovány na řadě toků v ČR historická minima (Řiřicová a kol., 2004).

Při výpočtu evapotranspirace metodou Penman-Monteith je zapotřebí mnoho vstupních dat, mezi něž patří i koeficient půdního pokryvu (Allen et al., 1998). Jeho správná aplikace je velice problematická, jelikož je těžko stanovitelný a také proměnný v čase (růstové fáze plodin a rostlin atd.). V tomto případě byly uvažovány zjednodušené podíly zastoupení lesa a dalších vegetačních typů v povodí. Právě proměnnost v čase je významná především v dolní zemědělské části povodí, kde se koeficient výrazně mění díky různé růstové fázi zemědělských plodin. Právě odhad koeficientu půdního pokryvu může tedy vést k ne zcela přesnému výpočtu hodnoty potenciální evapotranspirace v povodí. Přesností simulace hydrologických modelů v závislosti na vegetačním pokryvu a vegetační fázi se také věnují např. autoři Buchtele, J. (1993), Buchtele, J., Tesař, M. (2009) nebo Finch, J. W. (1998).

Problematická je také kvalita vstupních dat rovnice, jelikož ty jsou dostupné pouze v omezené síti stanic a jejich použití pro výpočet plošné hodnoty vstupních veličin (srážka, teplota vzduchu, rychlost větru atd.) může vnést do výsledku nejistotu v důsledku výběru interpolační metody a reprezentativnosti stanic z hlediska proměnlivosti veličin v území povodí (více viz. např. Daňhelka, 2007). Výsledné vypočítané hodnoty tedy nelze, stejně jako ty parametrizované získané kalibrací, považovat za úplně přesné.

Pro určení střední hodnoty vypočítaných hodnot (AVG, MED a QD) byly použity tři metody, a to aritmetický průměr, medián a průměr hodnoty 1. a 4. kvartilu. Rozdíly mezi

takto získanými hodnotami byly sice relativně malé, ale v dlouhodobém měřítku se projevíly a to zejména u stavových proměnných s pomalejší reakcí na vstupní hodnoty (spodní zóny modelu). To svědčí o nezanedbatelném významu evapotranspirace a citlivosti modelu i na malé odchylky její hodnoty vyjádřené parametrem ET demand.

Použití parametrů modelu z operativního nastavení (získané kalibrací za použití 6 hodinových nebo 1 hodinových vstupních dat) rovněž není bez problémů. Citlivostí modelu SAC-SMA na použití rozdílného časového kroku při použití shodných parametrů se podrobně zabývají např. Finnerty et al. (1997), kteří upozorňují na rozdílnou reakci modelu při rozdílném výpočtovém kroku, a to zejména na měnící se skladbu celkového odtoku z jeho jednotlivých komponent. Autoři uvádí s rostoucím časovým krokem pokles simulovaných rychlých složek odtoku a naopak mírný nárůst pomalého bazálního odtoku. Celkový odtok pak má tendenci jen velmi mírně klesající.

V této práci byl použit denní krok výpočtu (zejména s ohledem na dostupnost dat o evapotranspiraci), proto musela být provedena určitá úprava parametrů z hodinového kroku používaného operativní verzí na 24 hodinový krok, když došlo ke zkrácení délky jednotkového hydrogramu a zmenšení objemu v poměru 1:24. Ostatní parametry zůstaly beze změny. Lze tedy předpokládat, že ve výsledcích došlo k určité změně bilance jednotlivých složek odtoku. Vliv změny časového kroku výpočtu je podstatný, avšak zejména na rychlé složky odtoku, ne na bazální odtok a pomalé procesy v povodí, které byly v této práci zejména zkoumány a které lépe reprezentují vliv evapotranspirace v modelu. Proto lze předpokládat, že dosažené výsledky zůstávají v těchto ukazatelích relevantní a vypovídající.

V případě, že bylo použito 24 hodinového kroku výpočtu, nemůže potom být pochopitelně zohledněn denní chod potenciální evapotranspirace (tedy fakt, že nejvyšší hodnoty jsou po poledni a nejnižší v noci a ráno). Tento denní chod evapotranspiračního cyklu může v souvislosti s časovým výskytem srážek vést k odlišným výsledným hodnotám simulace (např. při výskytu srážek odpoledne, bude skutečná evapotranspirace velice nízká v důsledku absence přímého slunečního záření a v důsledku vysoké vlhkosti vzduchu v době srážek). V dlouhodobém měřítku však dojde ke shlazení pravděpodobnosti výskytu srážek v průběhu dne a tedy i celkových výsledků.

Z uvedených výsledků práce bylo zjištěno, že vliv vstupních hodnot parametru ET demand je velice důležitý a model SAC-SMA je na ně citlivý. Přitom rozdíly způsobené nepřesným postižením evapotranspirace se projevují až v dlouhodobějším měřítku a v dolních zónách modelu, kde je obecně možnost identifikace nesprávných stavových hodnot v modelu hydrology obtížnější. Z hlediska operativního provozu modelu lze nicméně doporučit alespoň

jednoduchou bilanční kontrolu evapotranspirace v měsíčním či ročním kroku tak, aby byla zabezpečena správná bilance modelu z hlediska celkového odtoku, srážkového vstupu a realizované evapotranspirace.

6. Závěr

Cílem práce bylo zjistit citlivost modelu SAC-SMA, resp. operativně používaného hydrologického předpovědního systému AquaLog na hodnoty použité evapotranspirace.

Bylo popsáno povodí Litavky se zaměřením na fyzickogeografické charakteristiky, které ovlivňují míru evapotranspirace – klima, vegetační pokryv a půdní typy. Modelové povodí Litavky bylo rozděleno na dvě části, Čenkov – reprezentující horní část povodí po stanici Čenkov, a Beroun – dolní část povodí od stanice Čenkov po ústí řeky v Berouně.

Poté byly provedeny simulace hydrologickým modelem SAC-SMA pro jednotlivé variabilní vstupní hodnoty evapotranspirace (parametr ET demand), které byly vypočteny na základě meteorologických dat metodou Penman-Monteith.

Výsledky prokázaly, že evapotranspirace velmi výrazně ovlivňuje simulace odtoku i stavových proměnných hydrologického modelu. Přitom zásadní porovnání bylo provedeno mezi originálními hodnotami parametru ET demand, které byly získány kalibrací, a mezi hodnotami vypočtenými metodou Penman-Monteith.

Simulaci celkového odtoku v povodí Čenkov lépe vystihovaly hodnoty ORIG, hlavně v průměrných a podprůměrných stavech, pouze maxima byla lépe vystižena ostatními variantami ET demand založenými na výpočtu metodou Penman-Monteith. Pro povodí Beroun se pozorovaným hodnotám průtoku více blížily hodnoty vypočtené metodou Penman-Monteith. Vliv hodnot parametru ET demand na simulovaný průtok se dobře projevil při simulaci povodňové situace v srpnu 2002, kdy hodnoty získané z výpočtu Penman-Monteith zvýšený průtok simulovaly mnohem lépe než hodnoty originální.

Největší vliv měla rozdílná hodnota evapotranspirace zejména na pomalejší procesy v modelu, tedy na zaplnění spodních zón půdy a na simulovaný odtok z těchto zón, což je dáno menší dynamikou změn těchto procesů a dlouhodobou kumulací malých odchylek vzniklých rozdílnými evapotranspiračními vstupy.

Pozorovány byly také rozdíly v závislosti na odlišných fyzickogeografických podmínkách obou částí povodí, které jsou v modelu vyjádřeny rozdílnými hodnotami parametrů, a rozdíly mezi jednotlivými roky ve sledovaném období i v ročním chodu jednotlivých stavových proměnných a výstupů modelu.

Bylo zjištěno, že zatímco celkový odtok v jednotlivých letech je determinován zejména množstvím srážek (pro Čenkov v roce 2002 průměrný denní úhrn srážek dosáhl 2,5 mm za den, v roce 2003 pak 1,3 mm za den; průměrný denní simulovaný odtok pak

dosahoval $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v roce 2002 a $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v roce 2003), naplnění zón modelu z nichž dochází k evapotranspiraci a základnímu odtoku bylo více závislé právě na evapotranspiraci.

Z výsledků je patrné, jak velký vliv má evapotranspirace, resp. průběh křivky ET demand dosazované do modelu, na simulaci průtoku nebo obsahu jednotlivých půdních zón (stavové proměnné). Model SAC-SMA je na hodnotu parametru ET demand velice citlivý a pro správnou simulaci vodní bilance je velmi důležitý, proto je podstatné se při kalibraci počátečních podmínek modelu více zabývat tímto parametrem a pokud možno jeho hodnotu přiblížit reálné míře evapotranspirace v povodí.

7. Použitá literatura

AQUALOGIC (2009): *Aqualogic* [online]. 1998 [cit. 2009-05-03]. Dostupný z WWW <<http://www.aqualogic.cz/>>

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. FAO. Rome, <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>>

BUCHTELE, J. (1993): *Runoff changes simulated using a rainfall-runoff model*, Water Resources Management, Vol. 7, No. 4, PublisherSpringer Netherlands, p. 273-287.

BUCHTELE, J., TESAŘ, M. (2009): *The time variability of evapotranspiration and soil water storage in long series of rainfall-runoff process*, Biologia, Vol. 64, No. 3, Versita, co-published with Springer-Verlag GmbH, p. 575-579.

ČHMÚ (2009): *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2000 [cit. 2009-07-27]. Dostupný z WWW <<http://www.chmi.cz/>>

ČHMÚ (2004): *Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002 – 2. etapa (aktualizace podle výsledků 3. etapy) – Hydrologické vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002*, ČHMÚ, Praha, 146 s.

DAŇHELKA, J. (2007): *Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí*, ČHMÚ, Praha, 127 s.

DAŇHELKA, J. (2005): *Nejistota operativních hydrologických předpovědí: Nejistota daná vstupující předpovědí srážek a možnosti využití pravděpodobnostního přístupu ve srážko-odtokovém modelování v české části povodí Labe*, disertační práce, PřF UK, Praha, 217 s.

FINCH, J. W. (1998): *Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model – sensitivity to land surface parameters*, Journal of Hydrology, Vol. 211, Issues 1-4, Elsevier, p. 112-125.

FINNERTY, B. , SMITH, M. B., SEO, D.-J., KOREN, V., Moglen, G. (1997): ***Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs***, Journal of Hydrology, Vol. 203 (1997), Elsevier, Amsterdam, the Netherland.

GAN, T. Y., GUSEV, Y., BURGESS, S. J., NASONOVA, O. (2006): ***Performance comparison of a complex physics-based land surface model and a conceptual, lumped-parameter hydrological model at the basin-scale***, Large sample basin experiments for hydrological model parametrization: Results of the Model Parameter Experiment – MOPEX, IAHS Publ. 307.

GUPTA, R. S. (2001): ***Hydrology and hydraulic system***. Long Grove. Waveland, 867 s.

HAVLÍČEK, V. a kol. (1986): ***Agrometeorologie***, Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 264 s.

JENÍČEK, M. (2005): ***Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích***. In Langhammer, J. (ed.): *Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko*. PŘF UK, Praha, s. 112-116.

KANTOR, P., ČERNOHOUS, V., KREČMER, V., ŠACH, F., ŠVIHLA, V. (2003): ***Lesy a povodně***, Národní lesnický komitét a Ministerstvo životního prostředí, Praha, s. 9-18.

KIM, J., HOGUE, T. (2005): ***MODIS-derived Potential Evapotranspiration Estimates for Operational Hydrologic Modeling***, EOS Trans, AGU, 86 (52), Fall Meeting.

KOŠULIČ, M. (2005): ***K revitalizaci českých lesů***, Lesnická práce, roč. 84, č. 11, Nakladatelství a vydavatelství Lesnická práce, s.r.o., Kostelec nad Černými Lesy.

LETT, P., SOUKALOVÁ, E., ŠERCL, P. (2002): ***Odtoková situace v srpnu 2002 v České republice***, Meteorologické zprávy, roč. 55, č. 6, ČHMÚ, Praha.

MACOUNOVÁ, A. (2007): ***Evapotranspirace***, bakalářská práce, PŘF UK, Praha, 53 s.

NĚMEC, L., PAVLÍK, J., TOLASZ, R., VALTER, J. (2003): *Mimořádné léto roku 2003 v České republice*, Meteorologické zprávy, roč. 56, č. 6, ČHMÚ, Praha.

NĚMEČEK, J., TOMÁŠEK, M. (1983): *Geografie půd ČSR*, Academia, Praha, 98 s.

ŘIČICOVÁ, P., DAŇHELKA, J., NÁVOJOVÁ, H., KOURKOVÁ, H. (2004): *Sucho v českých povodích v roce 2003*, Vodní hospodářství, roč. 54, č. 2, Vodní hospodářství spol. s r.o., Čkyně.

SHOCART (2004): *Turistický atlas Česko*, ShoCart, Vizovice, 664 s.

ŠTEFÁČEK, S. (2008): *Encyklopedie vodních toků Čech, Moravy a Slezska*, Nakladatelství Miloš Uhlíř – Baset, Praha, s. 302-305.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN, FACHGEBIET WASSERWIRTSCHAFT UND HYDROINFORMATIK (2007): *Hydrologický cyklus*. [online]. 2009 [cit. 2009-2-27]. Dostupný z WWW <http://www.wahyd.tu-berlin.de/content/mitarbeiter/tbusse/eigener_bereich/projects/hsm/img/hydrologic-cycle.png>

TOLASZ, R., (2007): *Atlas podnebí Česka*, ČHMÚ, UP, Praha – Olomouc, 255 s.

TOMÁŠEK, M. (2003): *Půdy České republiky*, Český geologický ústav, Praha, 67 s.

Další zdroje

Zdroj geografických dat pro GIS – archiv PřF UK, 2007

Zdroj meteorologických a hydrologických dat – ČHMÚ, 2009

8. Seznam obrázků a tabulek

8.1. Obrázky

Obr. 2.1 - Mapa povodí Litavky.....	9
Obr. 2.2 - Průměrná roční teplota vzduchu.....	10
Obr. 2.3 - Průměrná červencová teplota vzduchu.....	10
Obr. 2.4 - Průměrný roční úhrn srážek.....	11
Obr. 2.5 – Land use povodí Litavky (%).....	12
Obr. 2.6 - Mapa půdních typů.....	14
Obr. 2.7 - Hydrologický cyklus.....	15
Obr. 2.8 - Schéma hydrologického předpovědního systému AquaLog pro povodí Berounky	21
Obr. 2.9 – Separace hydrogramu na jednotlivé složky odtoku modelu SAC-SMA.....	22
Obr. 3.1 - Ukázka editačního prostředí EDAT systému AquaLog.....	27
Obr. 3.2 - Ukázka editačního prostředí parametrů modelu SAC-SMA v systému AquaLog...	28
Obr. 3.3 - Ukázka simulace průtoku systémem AquaLog pro povodí Čenkov.....	28
Obr. 4.1 – Měsíční a roční průměry denních úhrnů srážek pro povodí Čenkov a Beroun, 2001 až 2005.....	31
Obr. 4.2 – Měsíční a roční úhrny srážek pro povodí Čenkov a Beroun, 2001 až 2005.....	31
Obr. 4.3 – Měsíční a roční průměrná teplota vzduchu pro povodí Čenkov a Beroun, 2001 až 2005.....	32
Obr. 4.4 - Denní hodnoty úhrnu srážek a teploty vzduchu (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	33
Obr. 4.5 - Denní hodnoty úhrnu srážek a teploty vzduchu (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	33
Obr. 4.7 – Měsíční a roční průměry denních hodnot ET demand pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	36
Obr. 4.8 – Roční chod průměrných denních hodnot ET demand (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	36
Obr. 4.9 – Měsíční a roční průměry denních hodnot aktuální evapotranspirace pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	38
Obr. 4.10 – Roční chod průměrných denních hodnot aktuální evapotranspirace (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	38
Obr. 4.11 – Měsíční a roční průměry denních hodnot ET demand pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	39

Obr. 4.12 – Roční chod průměrných denních hodnot ET demand (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	39
Obr. 4.13 – Měsíční a roční průměry denních hodnot aktuální evapotranspirace (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	40
Obr. 4.14 – Roční chod průměrných denních hodnot aktuální evapotranspirace (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	40
Obr. 4.15 – Měsíční a roční průměry denních hodnot průtoku pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	42
Obr. 4.16 – Denní hodnoty průtoku (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	43
Obr. 4.17– Měsíční a roční průměry denních hodnot průtoku pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	44
Obr. 4.18 – Denní hodnoty průtoku (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	45
Obr. 4.19 – Měsíční a roční průměry denního obsahu UZTW pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	46
Obr. 4.20 –Denní obsah UZTW (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	47
Obr. 4.21 – Denní obsahu UZTW (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov v závislosti na teplotě vzduchu, 2001 až 2005.....	48
Obr. 4.22 – Měsíční a roční průměry denního obsahu UZTW pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	49
Obr. 4.23 – Denní obsahu UZTW (klouzavý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun v závislosti na teplotě vzduchu, 2001 až 2005.....	50
Obr. 4.24 – Měsíční průměry denního obsahu UZTW deficit pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	51
Obr. 4.25 – Měsíční průměry denního obsahu UZTW deficit pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	51
Obr. 4.26 – Měsíční a roční průměry denního obsahu UZFW pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	52
Obr. 4.27 – Měsíční a roční průměry denního obsahu UZFW pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	53
Obr. 4.28 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZTW pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	55

Obr. 4.29 – Denní průměry obsahu LZTW (klouzávý průměr s periodou 31) pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	55
Obr. 4.30 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZTW pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	57
Obr. 4.31 – denní průměry obsahu LZTW (klouzávý průměr s periodou 31) pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	57
Obr. 4.32 – Měsíční průměry denního obsahu LZTW deficit pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	58
Obr. 4.33 – Měsíční průměry denního obsahu LZTW deficit pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	59
Obr. 4.34 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZFP pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	59
Obr. 4.35 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZFP pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	60
Obr. 4.36 - Měsíční a roční průměry denní hodnoty BFP pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	61
Obr. 4.37 - Měsíční a roční průměry denní hodnoty BFP pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	62
Obr. 4.38 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZFS pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	63
Obr. 4.39 – Měsíční a roční průměry denního obsahu LZFS pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	64
Obr. 4.40 – Měsíční a roční průměry denní hodnoty BFS pro povodí Čenkov, 2001 až 2005.....	65
Obr. 4.41– Měsíční a roční průměry denní hodnoty BFS pro povodí Beroun, 2001 až 2005.....	65

8.2. Tabulky

Tabulak 2.1 – Tabulka měsíčních průměrů denních hodnot parametru ET demand (mm) pro Čenkov a Beroun, 2001 až 2005.....	19
Tab 4.1 - Průměrné měsíční hodnoty teploty a srážek – průměr 2001 až 2005 a rok 2003.....	35
Tabulka 4.2 - Odchytky denní potenciální evapotranspirace vypočtené metodou Penman-Monteith a průměrných měsíčních hodnot použitých jako parametr ETdemand.....	67