

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ



MODELOVÁNÍ HYDROLOGICKÉ BILANCE NA
POVODÍ METUJE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Diplomant: **Bc. Karel Píša**

Vedoucí práce: **Ing. Adam Vizina, Ph.D.**

Konzultant: **Ing. Petr Pavlík**

2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Karel Píša

Voda v krajině

Název práce

Modelování hydrologické bilance na povodí Metuje

Název anglicky

Hydrology balance of Metuje catchment

Cíle práce

Modelování hydrologické bilance na povodí Metuje:

- 1) Příprava vstupních dat.
- 2) Sestavení konceptuálních hydrologických modelů BILAN a TUW HBV.
- 3) Simulace hydrologické bilance pro období 2001 – 2020.

Metodika

- 1) Příprava vstupních dat: agregace klimatologických veličin pro výpočetní jednotky zvolených hydrologických modelů v prostředí R.
- 2) Sestavení workflow konceptuálních modelů, tvorba datových toků v modelech.
- 3) Optimalizace modelů a simulace složek hydrologické bilance.
- 4) Vyhodnocení a vzájemné porovnání výstupů obou hydrologických modelů.

Doporučený rozsah práce

50

Klíčová slova

hydrologie, modelování, bilance, testování

Doporučené zdroje informací

Adam Vizina, Stanislav Horáček, Martin Hanel, et al. Recent developments of the bilan model.

Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 57(4–5):7–10, 2015b

Jasper A Vrugt, Hoshin V Gupta, Willem Bouten, and Soroosh Sorooshian. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water resources research, 39(8), 2003.

J E Nash and J V Sutcliffe. Not to be reproduced by photoprint or microfilm without written permission from the publisher river flow forecasting through conceptual models part i-a discussion of principles*, 1970

Thorsten Wagener, Howard Wheater, and Hoshin Vijai Gupta. Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. World Scientific, 2004.

VIZINA, A. – PECH, P. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Analýza propagace sucha v České republice [rukopis]*. Disertační práce. Praha: 2014.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Adam Vizina, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 23. 3. 2023

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2023

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Adamu Vizinovi, Ph.D. a především konzultantovi Ing. Petru Pavlíkovi za cenné rady, věcné připomínky a hlavně za trpělivost při vypracovávání diplomové práce. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině za podporu během celého studia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Modelování hydrologické bilance na povodí Metuje vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze 30. března 2023

.....

Podpis studenta

ABSTRAKT

Hydrologické modelování je proces sloužící k vyhodnocení a predikci hydrologických veličin v povodí. Výstupy hydrologických modelů jsou využitelné v oblastech plánování a využívání vodních zdrojů, slouží pro předpovídání extrémních událostí a ve spojení s modely z jiných oblastí (např. meteorologie) jsou součástí komplexních předpovědních systémů.

Tato práce porovnává dva konceptuální hydrologické modely v různém stupni prostorové diskretizace. Celistvé modely reprezentuje model BILAN a semi-distribované modely HBV TUW. Výstup práce bude sloužit jako podklad pro vyhodnocení a testování nově vyvinutého modelu v rámci centra PERUN projektu Technologické agentury České republiky.

Zájmovou oblastí pro vyhodnocení zmíněných hydrologických modelů je povodí Metuje, které je specifické svými hydrogeologickými vlastnostmi vhodnými pro tento druh práce.

Cílem práce je porovnání výstupů jednotlivých hydrologických modelů a posouzení kvality výsledků s ohledem na složitost modelů a počet parametrů.

Klíčová slova: Hydrologie, modelování, hydrologická bilance, povodí, kalibrace.

ABSTRACT

Hydrological modeling is the process of evaluating and predicting hydrological variables within a watershed. The outputs of hydrological models are applicable in the areas of water resource planning and utilization, used for predicting extreme events, and when combined with models from other fields (such as meteorology), they are part of comprehensive forecasting systems.

This study compares two conceptual hydrological models with different levels of spatial discretization. Lumped models are represented by the BILAN model and the semi-distributed models are represented by the HBV TUW model. The results of this study will serve as a basis for evaluating and testing a newly developed model within the PERUN project of the Czech Republic's Technology Agency.

The Metuje watershed, which is specific in its hydrogeological properties suitable for this type of work, is the area of interest for evaluating these hydrological models.

The objective of this study is to compare the outputs of each hydrological model and assess the quality of the results with regard to model complexity and the number of parameters.

Keywords: Hydrology, modelling, hydrological balance, catchment, calibration.

Obsah

1	Úvod	13
2	Cíle práce	14
3	Hydrologické modelování	15
3.1	Rozdělení hydrologických modelů	15
3.1.1	Black box modely	15
3.1.2	White box modely	16
3.1.3	Grey box modely	16
3.2	Prostorová diskretizace modelů	16
3.2.1	Celistvé modely	17
3.2.2	Distribuované modely	17
3.3	Nejistoty v hydrologickém modelování	17
3.4	Kalibrace modelů	18
3.5	Optimalizace parametrů	20
3.5.1	Diferenciální evoluce	20
3.6	Validace modelů	21
3.6.1	Split - sample test	22
3.6.2	Differential split - sample test	22
3.6.3	Proxy - basin test	23
3.6.4	Proxy - basin differential split - sample test	23
3.7	Modely použité v této práci	25
3.7.1	BILAN	25
3.7.2	HBV	28
4	Metodika	33
4.1	Příprava datových vstupů	33
4.2	Vytvoření workflow modelů, kalibrace	35
4.3	Validace	37
5	Charakteristika území - povodí Metuje	39
5.1	Geomorfologie	39
5.2	Klima	41

5.3	Hydrologie	43
5.4	Geologie	45
6	Výsledky	47
6.1	BILAN	47
6.1.1	Maršov	48
6.1.2	Hronov	49
6.1.3	Krčín	52
6.1.4	Jaroměř	54
6.2	TUW	57
6.2.1	Maršov	58
6.2.2	Hronov	60
6.2.3	Krčín	62
6.2.4	Jaroměř	64
7	Diskuse	67
8	Závěr	74
9	Seznam použitých zdrojů a literatury	75

Seznam obrázků

1	Schéma rozdělení hydrologických modelů podle Becker a Serban (1990).	15
2	Schéma hydrologického modelu BILAN podle Máca (2015).	26
3	Schéma modelu HBV podle Seibert (1997).	29
4	Mapa povodí Metuje.	39
5	Povodí Metuje rozděleno na subpovodí měrných stanic.	40
6	Klimatické oblasti povodí Metuje podle Quitt (1971).	41
7	Vývoj teplot (ČHMÚ, 2023a).	42
8	Vývoj srážek (ČHMÚ, 2023b).	42
9	Průtoky v jednotlivých měsících za období 198–2021 (ČHMÚ, 2023b).	43
10	Průměrné denní průtoky během roku (ČHMÚ, 2023b).	44
11	Čáry překročení průtoků se zvýrazněním M-denních vod v jednotlivých měrných stanicích.	45
12	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Maršově.	48
13	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Maršově mezi lety 2006 a 2011.	49
14	Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem BILAN na povodí měrné stanice v Maršově.	50
15	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově.	50
16	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově mezi lety 2006 a 2011.	51
17	Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově.	51
18	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Krčíně.	52
19	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově mezi lety 2006 a 2011.	53
20	Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově.	53

21	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Jaroměři.	54
22	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Jaroměři mezi lety 2006 a 2011.	55
23	Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem BILAN na povodí měrné stanice v Maršově. . .	56
24	Krabicový graf zobrazující simulovaný průměrný denní průtok v jednotlivých měsících.	56
25	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Maršově.	58
26	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Maršově mezi lety 2006 a 2011.	59
27	Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem TUW na povodí měrné stanice v Maršově. . .	59
28	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Hronově.	60
29	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Hronově mezi lety 2006 a 2011.	61
30	Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem TUW na povodí měrné stanice v Hronově. . .	61
31	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Krčíně	62
32	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Krčíně mezi lety 2006 a 2011.	63
33	Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem TUW na povodí měrné stanice v Krčíně. . . .	63
34	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Jaroměři.	64
35	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Jaroměři mezi lety 2006 a 2011.	65
36	Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem TUW na povodí měrné stanice v Jaroměři. . .	65

37	Krabicový graf modelovaného průtoku modelem TUW v měsíčních průměrných průtocích.	66
38	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku na povodí měrné stanice v Maršově mezi lety 2006 a 2011.	68
39	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku na povodí měrné stanice v Hronově mezi lety 2006 a 2011.	68
40	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku na povodí měrné stanice v Krčíně mezi lety 2006 a 2011.	69
41	Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku na povodí měrné stanice v Jaroměři mezi lety 2006 a 2011.	70
42	Čáry překročení simulovaných a pozorovaných průtoků se zvýrazněním M-denních vod v jednotlivých měrných stanicích.	71
43	Krabicový graf zobrazující simulované a pozorované odtoky ve stanicích Maršov, Hronov a Krčín.	72

Seznam tabulek

1	Přehled parametrů modelu BILAN (Kašpárek et al., 2020).	28
2	tabulka zobrazující parametry modelu HBV (Seibert, 1997; Bergström, 1976).	31
3	tabulka zobrazující parametry modelu TUW (Seibert, 1997; Bergström, 1976; Viglione a Parajka, 2020).	32
4	Struktura vstupních dat do modelu BILAN.	33
5	Struktura vstupních dat do modelu HBV TUW.	35
6	Přehled měrných stanic na Metuji.	42
7	Optimalizované parametry modelu BILAN.	47
8	Hodnota KGE při kalibraci.	47
9	Hodnoty vybraných objektivních funkcí při validaci.	47
10	Optimalizované parametry modelu TUW.	57
11	Hodnota KGE při kalibraci modelu TUW.	57
12	Hodnoty vybraných objektivních funkcí při validaci modelu TUW	57

1 Úvod

Hydrologická bilance je jedním ze základních ukazatelů vlastností povodí vodního toku (Máca, 2014). Její predikování pomocí hydrologických modelů spočívá v rozšíření časových řad (zejména odtoku) v časovém měřítku (Wagener et al., 2004). Současný pokrok výpočetní techniky dovoluje provádět simulace složitých fyzikálních procesů při velmi podrobném prostorovém měřítku. Za tímto účelem byly vyvinuty tzv. distribuované modely, které jsou schopny modelování veličin proměnných nejen v čase ale i v prostoru (Jajarmizadeh et al., 2012). Distribuované modely jsou velmi náročné na sběr dat v terénu vzhledem k vysokému množství jejich parametrů popř. vstupních časových řad. Naopak modely celistvé, popř. semi-distribuované jsou schopny simulovat veličiny, které reprezentují celé povodí, popř. jsou prostorově agregovány (Tran et al., 2018). Vstupní data pro celistvé, popř. semi-distribuované modely jsou ve většině případů běžně dostupná klimatologická, popř. hydrologická data a jejich parametry se odvozují pomocí tzv. inverzní úlohy, která se jinak nazývá kalibrace hydrologického modelu (Máca, 2015). Model BILAN (Kašpárek et al., 2020) reprezentuje celistvé modely, které jsou strukturně jednoduché, nenáročné na výpočetní výkon a díky nízkému počtu parametrů jsou vhodné zejména k pochopení principu fungování konceptuálních hydrologických modelů. Model HBV TUW (Viglione a Parajka, 2020) reprezentuje modely semi-distribuované. Tento model již obsahuje více parametrů a jeho výpočet zahrnuje vlastnosti více částí povodí najednou včetně započítání poměrné plochy daného povodí.

ScDHRUM je distribuovaný model simulující hydrologickou bilanci se započítáním množstvím informací souvisejících zejména s využitím půdy, evaporací a transpirací v závislosti na pěstované plodině a struktuře půdního profilu (Pavlík, III. 2023, in verb). Výsledky předkládané diplomové práce poslouží jako „benchmark“ simulace pro testování ScDHRUM modelu.

Studovaným povodím této diplomové práce je povodí řeky Metuje, které je díky jeho hydrogeologickým vlastnostem - zejména výraznou shodou mezi hydrogeologickou a hydrologickou rozvodnicí (Vizina et al., 2009) pro takovou to práci vhodné. Tyto vlastnosti umožňují přesnější měření pozorovaných veličin a odvozování vztahů mezi nimi.

Vyhodnocení bylo prováděno na porovnání simulovaných časových řad odtoků ve srovnání s časovými řadami pozorovanými. Dalšími ukazateli byly hodnoty objektivních funkcí *Nash-Sutcliffe efficiency*, *Kling-Gupta efficiency* a *Mean absolute error*.

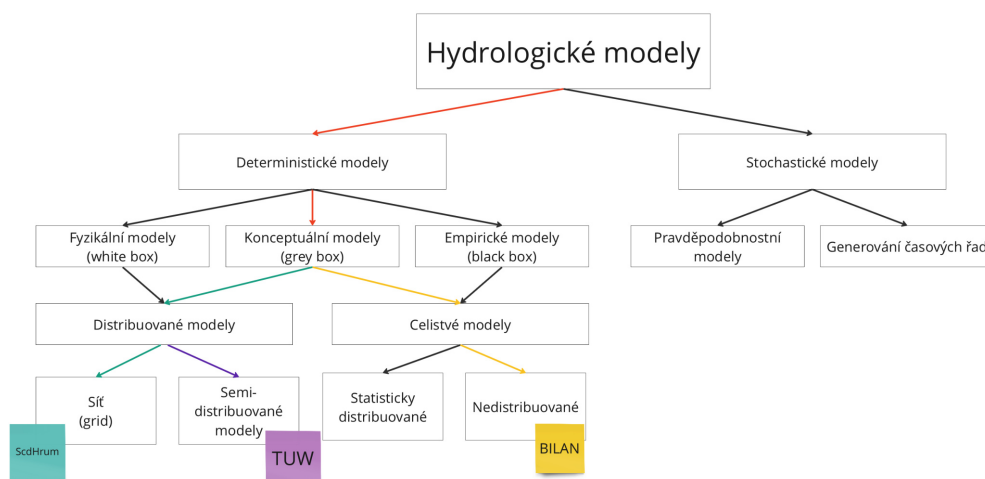
2 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je porovnání dvou hydrologických modelů na základě jejich členění podle prostorové diskretizace. Dílčím cílem práce je shrnutí současných postupů a pokroků v oblasti hydrologického modelování, prohloubení znalostí této problematiky a osvojení praktického využití studovaných modelů.

3 Hydrologické modelování

Hydrologické modelování je proces sloužící k předpovídání odtoku z povodí, reakce povodí po srážkových událostech, popř. pro modelování jiných hydrologických veličin povodí. Výstupy hydrologických modelů slouží také pro výpočty okrajových podmínek pro tvorbu atmosférických modelů (Wagener et al., 2004).

Hydrologické modely popisuje Vrugt et al. (2003) jako úlohy zkoumající vztah mezi reálnými a modelovanými vstupy a výstupy z povodí. Reálné vstupy jsou transformovány hydrologickým systémem povodí na reálné (měřené) výstupy. Model pak pracuje s měřenými vstupy a transformuje je na výstupy modelované (simulované). Schematické rozdělení hydrologických modelů je zobrazeno na obrázku 1 ¹.



Obrázek 1: Schéma rozdělení hydrologických modelů podle Becker a Serban (1990).

3.1 Rozdělení hydrologických modelů

3.1.1 Black box modely

Black box modely, jinak zvané empirické modely pracují s existujícími časovými řadami určitých veličin a z nich odvozují hodnoty nové, včetně parametrů. Black box modely nemají informaci o chování povodí a jeho fyzikálních vlastnostech. Příkladem black box modelů jsou např. neuronové sítě (Máca, 2015).

¹Zařazení konkrétních modelů je zobrazeno pouze pro použití v této práci.

3.1.2 White box modely

White box modely = fyzikální modely jsou založeny na přesném popisu fyzikálních dějů uvnitř povodí. Zásadní je zde zejména vztah zachování hmoty a energie. Tento typ modelů je velmi náročný na sběr dat v terénu, z čehož vyplývá, že je obtížnější aplikovat je na povodí, která nejsou důkladně zmapovaná a nemají dostatečně přesně změřené všechny potřebné veličiny vstupující do modelu (Wagener et al., 2004).

3.1.3 Grey box modely

Grey box modely nebo také konceptuální modely obsahují složku empirickou i fyzikální. Jsou tvořeny nádržemi, které reprezentují simulované veličiny a propojení mezi nimi je reprezentováno na základě reálných hydrologických vlastností povodí (Devia et al., 2015). Zpravidla to jsou srážky, odtok, evapotranspirace, půdní vlhkost, popř. sněhová zásoba (Wagener et al., 2004). Tato práce se zabývá výhradně konceptuálními modely.

Oproti black box modelům se v grey box modelech využívá znalosti fyzikálních vztahů mezi jednotlivými veličinami. Propojení mezi nádržemi je reprezentováno parametry. Parametry jsou buďto získané měřením v terénu, nebo jsou odvozeny při tzv. inverzní úloze (Devia et al., 2015). Tento proces se nazývá *kalibrace modelu* (Wagener et al., 2004). Kalibrace modelu tedy spočívá v nalezení optimální sady parametrů pro daný model. Odvození parametrů charakterizuje empirickou složku konceptuálních modelů (Wagener et al., 2004). Je třeba ale brát v úvahu, že odvození parametrů je matematický proces, který nehledí na skutečné vlastnosti povodí a můžeme tak dosáhnout optimálních výsledků při použití více sad parametrů. V tomto případě hovoříme o tzv. ekvifinalitě (Beven, 2006) a je třeba porovnat hodnoty parametrů, které odpovídají skutečnosti (Tran et al., 2018). Kalibrace modelů, potažmo optimalizace parametrů je popsána v následujících kapitolách.

3.2 Prostorová diskretizace modelů

Konceptuální modely se na základě prostorové diskretizace rozdělují do dvou základních skupin, a to na modely celistvé a distribuované, popř. semi - distribu-

vané (Jajarmizadeh et al., 2012). Modely celistvé podrobují simulaci celé povodí se vstupními hodnotami z uzávěrového profilu, popř. hodnotami reprezentující celé povodí. Naopak modely distribuované rozdělují povodí na jednotlivé oblasti např. s podobnými hydrologickými vlastnostmi (Jajarmizadeh et al., 2012).

3.2.1 Celistvé modely

Celistvé modely jsou široce používány pro svoji jednoduchost a rychlost výpočtu. Jsou vhodné zejména pro výpočty základních hydrologických veličin, které definují povodí jako celek. Při výpočtech těchto veličin jsou často stejně, nebo dokonce více výkonné než složité distribuované modely (Tran et al., 2018).

3.2.2 Distribuované modely

Distribuované modely jsou komplikovanější a obsahují více parametrů. Jejich vznik mimo jiné iniciovaly nové problémy související např. s klimatickou změnou a dosavadní celistvé modely byly navrhovány pouze k predikci odtoku, popř. povodňových událostí a nebyly tak schopny predikovat komplexnější problémy (Abbott a Refsgaard, 1996). Jsou proto vhodné pro výpočty veličin, které jsou prostorově proměnné v rámci jednoho povodí (Tran et al., 2018). Prostorové rozlišení modelu tak záleží právě na modelované veličině. V současné době je často potřeba pro každou simulovanou veličinu stavět samostatný model včetně následné kalibrace, což vede k nekonzistentním sadám parametrů, které nemusejí odpovídat skutečnosti (Tran et al., 2018).

Semi-distribuované modely reprezentují mezistupeň mezi modely celistvými a plně distribuovanými. Pracují s jednotlivými subpovodími na podobném principu, jako modely celistvé, ale celé povodí je na základě určitých podmínek rozděleno na menší části (např. rozdílný land-use, popř. povodí jednotlivých měrných stanic na sledovaném toku) (Ruelland et al., 2008).

3.3 Nejistoty v hydrologickém modelování

V hydrologických modelech rozlišujeme několik základních druhů nejistot. Nejistoty je možné chápat jako nepřesnosti určitých složek procesu modelování, které způsobují nesprávnost výsledků (Máca, 2015). Se stále se rozvíjejícími

možnostmi hydrologického modelování od snadnějšího měření veličin v terénu až po vysoký výpočetní výkon počítačů roste i počet a robustnost nejistot způsobených zejména složitostí pokročilých modelů (Liu a Gupta, 2007).

Datová nejistota je způsobena rozdílem mezi skutečnými daty a daty pozorovanými. Příčinou tohoto typu nejistoty jsou zejména nepřesnosti měření veličin v terénu (Máca, 2015).

Nejistota struktury modelu spočívá v nesprávné reprezentaci hydrologických procesů v modelu. Např. nesprávné zapojení jednotlivých nádrží (reprezentace zásob vody v povodí), popř. špatně popsání rovnic jednotlivých dějů v hydrologickém systému (Máca, 2015).

Parametrická nejistota se projeví při kalibraci modelu, kdy některé modely mají více sad parametrů, nebo naopak nemají řešení žádné (Máca, 2015).

Pro efektivní snížení vlivu nejistot na výsledky modelování zmiňuje Liu a Gupta (2007) tři aspekty: porozumění, kvantifikaci a následnou redukci nejistoty.

3.4 Kalibrace modelů

Aby model transformoval vstupy na výstupy co nejpřesněji, tak jako reálný hydrologický systém zkoumaného povodí, je zapotřebí řešení tzv. inverzní úlohy - *kalibrace*. Úlohou kalibrace je tedy nalezení takové sady parametrů, aby matematický model povodí byl schopen transformovat vstupy stejně jako reálný hydrologický systém povodí (Máca, 2015). Nalezení optimální sady parametrů se provádí pomocí optimalizace objektivní funkce. Objektivní funkce jsou matematické vztahy mezi daty modelovanými a měřenými a jejich hodnota udává, jak velké shodě tyto sady dat jsou (Beven, 2001). Následující rovnice popisují vybrané nejčastěji používané objektivní funkce:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{\text{poz}} - R_{\text{mod}}), \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_{\text{poz}} - R_{\text{mod}}|, \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|R_{\text{poz}} - R_{\text{mod}}|}{R_{\text{poz}}}, \quad (3)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{\text{poz}} - R_{\text{mod}})^2, \quad (4)$$

kde R_{poz} jsou hodnoty pozorovaných časových řad a R_{mod} jsou hodnoty modelovaných časových řad.

Mean error (1) je definován jako průměrná hodnota rozdílů všech hodnot měřených a pozorovaných dat. *Mean absolute error* (2) se vypočítá stejně jako ME (1), ovšem rozdíl měřených a modelovaných dat je v absolutní hodnotě. Dále *Mean absolute percentage error* (3) vyjadřuje procentuální hodnotu MAE (2) a *Mean square error* (4), který vyjadřuje druhou mocninu rozdílů hodnot (Pavlík, 2017; Gupta et al., 2009).

V této diplomové práci je používán index KGE (Kling-Gupta Efficiency) (Gupta et al., 2009). KGE vychází z NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) (5) (Nash a Sutcliffe, 1970) a usnadňuje analýzu důležitosti jednotlivých statistických složek a je určen pro hydrologické modelování (Gupta et al., 2009). Optimální hodnota KGE i NSE je 1 (Gupta et al., 2009) a jsou definovány rovnicemi:

$$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\delta_{\text{sim}}}{\delta_{\text{obs}}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{\text{sim}}}{\mu_{\text{obs}}} - 1\right)^2}, \quad (5)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_{\text{sim}} - R_{\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{\text{obs}} - \mu_{\text{obs}})^2}, \quad (6)$$

kde r je koeficient korelace mezi měřenými a simulovanými daty, δ_{sim} směrodatná odchylka simulovaných dat, δ_{obs} směrodatná odchylka měřených dat, μ_{sim} průměr simulovaných dat a μ_{obs} průměr měřených dat (Knoben et al., 2019). KGE je oproti NSE složitější metrika a je tím robustnější proti chybám měření, popř. proti podhodnocování výsledků (Knoben et al., 2019; Mizukami et al., 2019). Při použití NSE jako objektivní funkce při kalibraci modelů byly oproti KGE silné srážkové události systematicky podhodnocovány (Mizukami et al., 2019). Tato skutečnost je dána započtením více složek charakterizující simulovaná data - míra korelace, odchylky a variability dat. Tyto složky jsou v rovnici rovnocenné (Gupta et al., 2009). Oba indexy (KGE i NSE) dosahují hodnot v intervalu $[-\infty, 1]$, kde hodnota rovna jedné znamená přesnou shodu mezi daty měřenými a modelovanými.

Hodnota rovna nule znamená, že model generuje stejně kvalitní data jako model ve formě aritmetického průměru měřených dat. Hodnoty menší než nula znamenají horší korelaci mezi daty měřenými a simulovanými než v případě naivního modelu v podobě aritmetického průměru (Knoben et al., 2019).

3.5 Optimalizace parametrů

Optimalizační algoritmy jsou procesy využívané v množství inženýrských úloh napříč všemi odvětvími. Optimalizací se rozumí nalezení takového řešení, které je dostatečně vhodné pro použití za daným účelem. V hydrologii optimalizací rozumíme nalezení sady parametrů, která při následné validaci modelu zajistí simulaci dat s optimální hodnotou objektivní funkce. Hledání optimální sady parametrů představuje prohledání tzv. parametrického prostoru, v němž se dané optimum nachází. V hydrologii je zapotřebí použít takovou optimalizační metodu, která najde optimum globální, nikoliv lokální (Duan et al., 1992).

Hydrologické modely budou v této práci optimalizovány pomocí tzv. evolučních algoritmů. Evoluční algoritmy jsou inspirovány přírodním výběrem a jsou v optimalizačních úlohách používány již od 50. let minulého století (Mitchell, 1998). Evoluční algoritmy používají pro nalezení optima logické operace křížící jednotlivé sady parametrů (populace) pro dosažení optimální (zpravidla minimální) hodnoty objektivní funkce (Mullen et al., 2011).

3.5.1 Diferenciální evoluce

Jedním z druhů genetické optimalizace je tzv. diferenciální evoluce (DE). DE je vhodná především pro řešení funkcí s reálnými hodnotami a s reálnými parametry, kdy jejich objektivní funkce není lineární (Mullen et al., 2011). Diferenciální evoluce obsahuje podle Fleetwood (2004) základní čtyři fáze:

Iniciace

Iniciace spočívá ve vytvoření první generace sady parametrů náhodným výběrem parametrů ve zvolených intervalech. Intervaly jsou dány vlastnostmi parametrů (Al-Sudani et al., 2019).

Mutace

V další fázi DE - mutaci jsou ke každému jedinci náhodně vybrány tři (popř. i

více) další jedinci (parametry) ze kterých se nový jedinec vypočítá jako vážený rozdíl všech čtyř existujících jedinců podle rovnice (7) (Opara a Arabas, 2019):

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}), \quad (7)$$

kde $v_{i,G+1}$ je dárcovský vektor nové generace $G + 1$. Dále $x_{r1,G}$, $x_{r2,G}$, $x_{r3,G}$ jsou náhodně přiřazení jedinci z předešlé generace G a F je konstantní faktor mutace z intervalu $[0, 2]$ (Fleetwood, 2004).

Rekombinace

Při rekombinaci se vybírají jedinci do další generace. Je vytvořen tzv. zkušební vektor $u_{i,G1}$ z elementů dárcovského vektoru $v_{i,G+1}$ a cílového vektoru $x_{i,G}$.

Selekce

Ve fázi selekce je pak porovnávána objektivní funkce vektoru zkušebnímu $u_{i,G1}$ a cílového $x_{i,G}$. Vektor s nižší hodnotou objektivní funkce pokračuje do další generace.

Fáze mutace, rekombinace a selekce se opakují dokud není splněna podmínka zastavení procesu optimalizace (např. dosažení nejlepší hodnoty objektivní funkce) nebo dosažení konečného počtu iterací (Fleetwood, 2004).

3.6 Validace modelů

Validace je proces, který zjišťuje, zda je daný model specifikovaný pro určité povodí schopen předpovídat odpovídající a dostatečně přesné hodnoty (Henriksen et al., 2003). Jedná se o proces, který následuje po kalibraci modelu, používá parametry, které byly při kalibraci odvozeny a jako vstupní dataset musí být data odlišná od dat kalibračních. Pokud se simulovaná data liší od dat měřených v určitých mezích, hovoříme o zvalidovaném modelu (Refsgaard, 1997). Pokud simulovaná data nedosahují dostatečné úrovně korelace je třeba provést kalibraci znovu za použití jiné optimalizační metody (Refsgaard, 1997).

Klemeš (1986) rozděluje validaci na validaci se stabilními a nestabilními podmínkami. Validací se stabilními podmínkami se rozumí použití takového validačního setu, který se svými vlastnostmi podobá datasetu kalibračnímu (např. nedochází k dlouhodobému trendu v pozorované veličině). Naopak u podmínek nestejných se kalibrační data liší v dlouhodobém měřítku od dat validačních. Tyto

dvě skupiny se dají dále diferencovat na validaci na stejném povodí, popřípadě na odlišném, např. nepozorovaném povodí (Klemeš, 1986).

Na základě toho rozděluje Klemeš (1986) čtyři druhy testování modelů:

3.6.1 Split - sample test

Split - sample test předpokládá testování modelu na pozorovaném povodí, na kterém se dlouhodobě nemění vlastnosti veličin, popř. využití půdy atd. Pokud jsou dostupná data pro model dostatečně dlouhá, je vhodné rozdělit tato data na dvě poloviny - jednu pro kalibraci a druhou pro validaci a následně opačně. Pokud není dataset dostatečně dlouhý, použije se prvních 70% pro kalibraci a zbylých 30% pro validaci. Druhý test se provede opačně - prvních 30% pro validaci a zbylých 70% pro kalibraci. Model se považuje za dobrý, pokud u obou případů generuje data v dostatečné shodě s daty měřenými (Klemeš, 1986). Pro zlepšení výsledků, při použití jednoduchého SST (Split - sample test) testu se používá ještě jedno testovací období po validaci, které simuluje stav, kdy model byl sestaven např. před pěti lety a doba do současnosti je třetí fáze testování modelu (Shen et al., 2022).

3.6.2 Differential split - sample test

Tento druh testování se používá v případě, kdy v dostupných historických datech došlo k změně, popř. dochází k dlouhodobému trendu. Např. vyšší srážky, nebo změna využití území. Princip spočívá v rozdělení datasetu na dvě specifikovaná období dané změny (např. období s vyššími srážkami a období s nižšími). Pokud bude test simulovat data v období s vyššími srážkami, je třeba ho kalibrovat na datech v suchém období a validovat ve vlhkém. V případě potřeby simulovat data v suchém období, provede se opačný postup (Klemeš, 1986). Při použití tohoto druhu testu by se mělo brát v potaz podhodnocení výskytu extrémních událostí (např. povodní ve vlhkém období) (Seibert, 2003). Kvůli nejistotám při použití DSST (Differential split-sample test), přistoupilo se k tzv. generalizovanému DSST. Tento test spočívá v rozdělení datasetu na více kalibračních sad během celého pozorovaného období. Tím se získá několik sad parametrů. Validace se poté provádí na datech, která nebyla součástí dané kalibrace s použitím jednoho

datasetu z konkrétní kalibrace jako kontrolní dataset (Coron et al., 2012).

Klemeš (1986) ve své práci uvádí, že zásadní pro dobrou kalibraci a validaci hydrologického modelu je délka dostupných dat. Studie Motavita et al. (2019) pracuje s myšlenkou, že zejména v případě DSST je vhodnější dataset s kombinací hydrologických podmínek (suché/vlhké období), který nemusí být tak dlouhý. Yapo et al. (1996) zjistil, že pro dostatečně kvalitní kalibraci modelu je ideální dataset dlouhý osm let a že snížení parametrické nejistoty docílíme vybráním nejvlhčích období. Podobný závěr vyplývá ze studie Li et al. (2010), která tvrdí, že osm let je dostatečných pro kalibraci modelu a že delší dataset nemusí nutně znamenat lepší výkonnost modelu. Dokonce i 350 dní může podle Perrin et al. (2007) poskytovat kvalitní odhady parametrů modelu.

3.6.3 Proxy - basin test

Tento test je určen pro testování modelů pro nepozorovaná povodí, která disponují podobnými geografickými vlastnostmi. Pro testování modelu jsou zapotřebí dvě pozorovaná povodí, kde se na jednom provede kalibrace a na druhém validace - a opačně. Pokud jsou oba testy úspěšné, může být model použit pro třetí, nepozorované povodí. Další možností využití tohoto druhu testu je v případě, že zkoumané povodí nemá dostatečně dlouhá data pro provedení Split - sample testu (Klemeš, 1986). Kromě PBS (Proxy - basin test) testu se pro modelování nepozorovaného povodí používá metoda průměrných parametrů, která je podobně výkonná, ale měla by však být podrobně přezkoumána před vlastním použitím (Jin et al., 2009).

3.6.4 Proxy - basin differential split - sample test

Nejrobustnější modely schopné predikovat kvalitní data i přes změny klimatu, popř. využití území i na nepozorovaných povodích testuje právě tento druh testu. Je kombinací zmíněných testů výše. Pokud by bylo třeba navrhnout model pro nepozorované povodí, kde došlo ke změně klimatu (opět např. období vyšších a nižších srážek) je třeba mít dvě pozorovaná povodí se stejnou pozorovanou změnou. Poté by se (pro potřebu simulování ve vlhkém období) postupovalo tak,

že na prvním povodí by se kalibrovalo za suchých podmínek a validovalo na jiném za vlhkých podmínek. Případně opět opačný postup pro suché období (Klemeš, 1986).

3.7 Modely použité v této práci

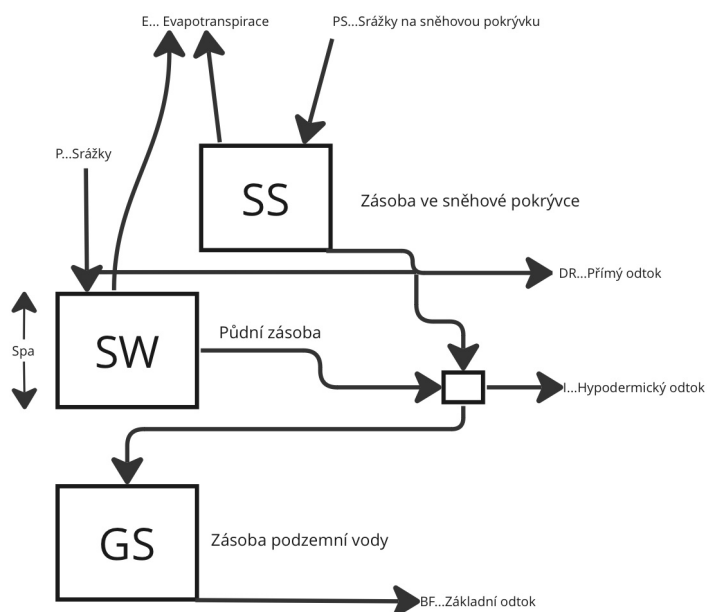
3.7.1 BILAN

BILAN je celistvý konceptuální hydrologický model, který byl vyvinut v 90. letech minulého století na Výzkumném ústavu vodohospodářském v Praze a jeho vývoj stále pokračuje, je používán jak na českých tak i na ostatních evropských povodích, v množství projektů zabývajících se studiem hydrologie, popř. v aplikovaném výzkumu (Vizina et al., 2015). Model BILAN je například součástí systému HAMR (Vizina et al., 2018), který slouží k predikování stavu vodních zdrojů během suchých epizod a pomáhá tak k jejich řízení během sucha (Vizina et al., 2018).

Model je popsán vztahy mezi povrchem, půdní zónou, na kterou má vliv také vegetační pokryv povrchu, zónou podzemní vody a sněhovými zásobami (Van Loon et al., 2011). Energetická bilance je v modelu zastoupena teplotou vzduchu, která slouží také jako podmínka pro zavedení sněhové zásoby do modelu. BILAN počítá buďto v denním, nebo měsíčním časovém kroku. Model je používán v rámci celé České republiky nejen k modelování hydrologické bilance v povodích, ale také k modelování vlivu klimatické změny na hydrologické režimy povodí (Machlica et al., 2012).

Vstupní data modelu jsou časové řady srážek, teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu (volitelná hodnota). Časová řada měřených hodnot odtoku z povodí slouží pak ke kalibraci parametrů modelu.

Výstupem z modelu jsou pak simulované časové řady potenciální evapotranspirace, územního výparu (evapotranspirace), infiltrace do půdy, dotace podzemní vody z půdy, množství vody ve sněhu, v půdě, v zóně podzemní vody a odtok. Odtok je rozdělen na odtok přímý, hypodermický (pouze v měsíční variantě modelu) a základní. Schéma modelu BILAN je zobrazeno na obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma hydrologického modelu BILAN podle Máca (2015).

Postup výpočetního algoritmu

Algoritmy obsažené v modelu BILAN se řídí typem režimu, který je dán teplotou. Letní režim (bez zavedení sněhové zásoby) je definován teplotou

$$T(i) \geq 0. \quad (8)$$

Pokud se v povodí nachází sněhová pokrývka v době letních podmínek modelu, je použit výpočet pro tání sněhu (Kašpárek et al., 2020).

Celkový odtok je rozdělen na dvě složky podle rovnice:

$$RM(i) = DR(i) + BF(i), \quad (9)$$

kde $RM(i)$ je celkový odtok z povodí a $DR(i)$ a $BF(i)$ zastupují přímý a základní odtok (Kašpárek et al., 2020). Rychlou odezvu povodí reprezentuje odtok přímý $DR(i)$ a je dotován ze zásoby pro přímý odtok. Naopak odtok základní $BF(i)$ zastupuje pomalou odezvu povodí a tvoří ho zásoba pro základní odtok. Dalšími složkami rovnice pro výpočet celkového odtoku (9) můžou být odběry povrchových vod, popř. vypouštění (Kašpárek et al., 2020).

Srážková voda dopadající na povrch infiltruje do půdy a pokud je tato infiltrace $INF(i)$ větší nebo rovna potenciální evapotranspiraci $PET(i)$, je územní výpar

roven potenciální evapotranspiraci. Přebytek vody poté dotuje půdní vlhkost $SW(i)$ a pokud vlhkost půdy překročí hodnotu parametru Spa (kapacita zásoby půdní vody), voda perkoluje do oblasti podzemní vody. Pokud potenciální evapotranspirace překročí infiltraci, územní výpar je doplňován ze zásoby půdní vlhkosti. Půdní vlhkost se pak vyprazdňuje podle rovnice:

$$SW(i) = SW(i - 1)e^{\frac{INF(i) - PET(i)}{Spa}}, \quad (10)$$

kde e je Eulerovo číslo. Územní výpar se poté vypočte jako součet srážek (infiltrace) a prázdnění půdní vlhkosti (Kašpárek et al., 2020).

Při zimních podmínkách se potenciální evapotranspirace rovná územnímu výparu v případě že se součet srážky a zásoby vody ve sněhu rovná potenciální evapotranspiraci. Pokud je součet srážky a zásoby vody ve sněhu nižší než PET, vypočte se územní výpar součtem srážky a územního výparu. Infiltrace za zimních podmínek je rovna nule (Kašpárek et al., 2020).

Při podmínkách tání sněhu se množství vody vypočte podle rovnice:

$$MELT(i) = T(i) \cdot Dgm, \quad (11)$$

kde $R(i)$ je průměrná denní teplota vzduchu a Dgm je parametr tání sněhu. Pokud platí $P(i) \leq PET(i)$ voda z tání sněhu se připočítá k srážce a územní výpar se počítá jako při letních podmínkách. Pokud platí $P(i) > PET(i)$, infiltrace je rovna množství roztáté vody ve sněhu $MELT$ (Kašpárek et al., 2020).

Množství podzemní vody je vypočteno jako součet zásoby vody z předchozího dne a perkolace z vyšších vrstev. Základní odtok je definován jako odtok z podzemní vody a je řízen parametrem Grd (Kašpárek et al., 2020).

Podrobný popis modelu BILAN je dostupný ve výše citovaném dokumentu „Model hydrologické bilance BILAN - Příručka“ (Kašpárek et al., 2020).

BILAN má v denní verzi 6 a v měsíční 8 volných parametrů, které jsou kalibrovány pomocí optimalizačního algoritmu k docílení shody mezi měřeními a simulovanými daty (Kašpárek et al., 2020).

Tabulka 1 zobrazuje přehled parametrů modelu BILAN v denní i měsíční variantě.

Tabulka 1: Přehled parametrů modelu BILAN (Kašpárek et al., 2020).

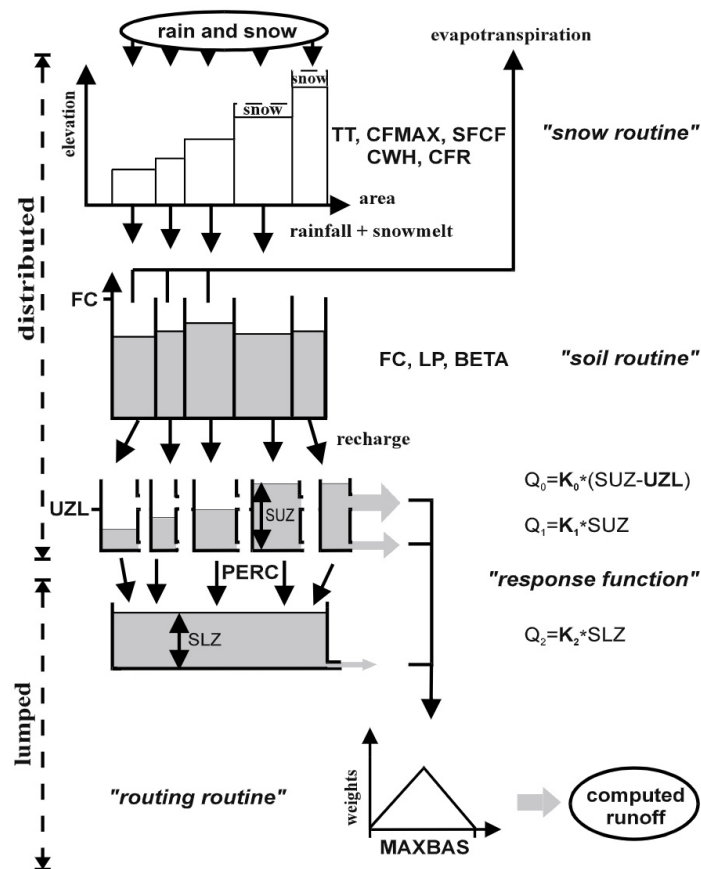
Parametr	Denní typ modelu	Měsíční typ modelu
Spa[mm]	Maximální hodnota půdní vlhkosti	Maximální hodnota půdní vlhkosti
Dgm	Parametr tání sněhu	Parametr tání sněhu
Dwg	-	Koeficient pro výpočet množství kapalné vody na zemi v zimním období
Alf	Parametr pro výpočet přímého odtoku	Parametr vztahu mezi srážkou a odtokem
Soc	Parametr rozdělení perkolace na přímý odtok a dotaci podzemní vody (letní období)	Parametr rozdělení perkolace na hypodermický odtok a dotaci podzemní vody (zimní období)
Grd	Parametr určující základní odtok	Parametr určující základní odtok
Mec	Parametr rozdělení perkolace na přímý odtok a dotaci podzemní vody (období tání sněhu)	Parametr rozdělení perkolace na hypodermický odtok a dotaci podzemní vody (období tání sněhu)
Wic	-	Parametr rozdělení perkolace na hypodermický odtok a dotaci podzemní vody (zimní období)

Původní verze napsaná v jazyce Object Pascal byla v roce 2011 přepsána do jazyka C++. Model je dnes dostupný pro uživatele ve třech rozhráních: desktopové aplikaci, webové aplikaci shiny a balík funkcí pro statistický systém R (Vizina et al., 2015).

3.7.2 HBV

Hydrologický model HBV byl vyvíjen již v 70 letech 20. století. Původně se jedná o model vytvořený Švédským meteorologickým a hydrologickým institutem.

Jeho hlavní funkcí je simulování odtoku a předpověď dalších hydrologických veličin. Model HBV prošel za svoji více než padesátiletou existenci několika modifikacemi a modernizacemi. Velkou modernizací struktury modelu provedli opět švédští hydrologové z Švédské asociace regulací vodních toků v roce 1993, kdy provedli několik změn vedoucích k efektivnějšímu využití modelu v souvislosti např. s využíváním vodní energie, přičemž jednoduchost modelu byla zachována (Lindström et al., 1997). Jedná se o celistvý, popř. semi-distribuovaný konceptuální hydrologický model. Autor modelu Bergström (1976) popisuje tři základní složky modelu - sněhový zásobník a transformace sněhu v půdní zásobu, dále samotnou půdní zásobu, která je strukturou modelu dále rozdělena a toky v povodí, které jednotlivé zásobníky vyprazdňují. Vstupní hodnoty modelu jsou časové řady srážek, teplot a potenciální evapotranspirace (Lindström et al., 1997). Schéma modelu HBV je zobrazeno na obrázku 3.



Obrázek 3: Schéma modelu HBV podle Seibert (1997).

Modelování tání sněhu je zastoupeno jednoduchým modelem „degree-day“ za použití DDF faktoru (Lindström et al., 1997) Rozdělení srážek mezi sněhové a

dešťové je definováno teplotou $TT[^\circ\text{C}]^2$ a následně přenásobeno opravným faktorem SFCF [-], který opravuje systematické chyby při měření sněhové pokrývky (Seibert, 1997). Původní verze modelu obsahuje dále parametr P_{lapse} , což je parametr rozdělující srážky podle nadmořské výšky a dále parametr T_{lapse} , který opravuje hodnoty teplot v závislosti na nadmořské výšce (Bergström, 1976).

Voda vzniklá z tání sněhu, popř. srážková voda, která dopadla na sněhovou pokrývku se drží ve sněhu a sněhovou pokrývku opouští při překročení parametru CWH[-], který je definován jako zlomek vodního hodnoty sněhu. Voda vyskytující se ve sněhové pokrývce v kapalném skupenství může znovu zamrznout na základě parametru CFR[-] (Seibert, 1997).

Půdní vlhkost v modelu generuje odtok z povodí a změny vlhkosti půdy. Tento zásobník je definován třemi parametry: maximální hodnota půdní vlhkosti FC[mm], parametr hodnoty vlhkosti nad kterou dosahuje evapotranspirace hodnoty potenciální evapotranspirace LP[mm] a nelineární parametr *beta* vztahující tvorbu odtoku k půdní vlhkosti (Merz a Blöschl, 2004).

Odtok z povodí je popisován toky mezi vyšší a nižší vrstvou půdního zásobníku. Půdní zásobník je tedy jen jeden, ale toky mezi tímto zásobníkem jsou popsány různými parametry (Normand et al., 2011). Srážky infiltrují do vyššího zásobníku a z něj se dostává třemi způsoby: rychlým odtokem ze zásobníku, který popisuje koeficient prázdnění $k_1[\text{d}^{-1}]$, perkolací do nižšího zásobníku s konstantní hodnotou parametru perkolace PERC [$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$] a při překročení maximální zásoby LS_{uz} je popisován odtok ze zásobníku parametrem $k_0[\text{d}^{-1}]$ (Merz a Blöschl, 2004).

Odtok z nižšího zásobníku je popisován pomalým koeficientem prázdnění $k_2[\text{d}^{-1}]$. Oba zásobníky jsou směřovány pomocí triangulační transferové funkce představující odtok ve vodních tocích, kde c_{route} je volným parametrem modelu (Merz a Blöschl, 2004). Parametr P_w pak v modelu reprezentuje jezera, řeky a ostatní zamokřená území. Posledním parametrem je B_{max} , což je volný parametr transferové funkce generující odtok. (Bergström, 1976).

Celkově model HBV v původní verzi obsahuje 19 parametrů, které jsou vyobrazeny v tabulce 2.

²Zkratky názvů parametrů se můžou v odlišných pramenech lišit

Tabulka 2: tabulka zobrazující parametry modelu HBV (Seibert, 1997; Bergström, 1976).

Parametr	Jednotky	Popis
P_{corr}	-	Opravný srážkový faktor
TT	°C	Hraniční teplota mezi sněhem a deštěm
P_{lapse}	-	Opravný faktor srážka - nadm. výška
T_{lapse}	-	Opravný faktor teplota - nadm. výška
DDF	-	Faktor tání sněhu
SCF	-	Opravný faktor sněhu
FC	mm	Maximální hodnota půdní vlhkosti
LP	mm	Hodnota vlhkosti půdy, kdy ET dosahuje hodnoty PET
Beta	-	Empirický koeficient vztahující tvorbu odtoku k půdní vlhkosti
CWH	-	Parametr určující, kdy kapalná voda opouští sněh. pokrývku
CFR	-	Parametr určující zpětné zamrznutí kapalné vody ve sněhu
PERC	$mm \cdot d^{-1}$	Maximální rychlost perkolace mezi vrchním a spodním zásobníkem
k_1	d^{-1}	Koeficient prázdnění vrchního zásobníku
k_0	d^{-1}	Koeficient prázdnění vrchního zásobníku při překročení prahové hodnoty UZL
k_2	d^{-1}	Koeficient prázdnění spodního zásobníku
lsuz	mm	Hodnota určující plnění svrchního zásobníku podle koeficientu
c_{route}	d^2/mm	Parametr spojující transformační funkci s generovaným odtokem
P_w	-	Parametr reprezentující povrchové vody
B_{max}	d^{-1}	Volný parametr transferové funkce generující odtok

V této diplomové práci bude použit model HBV TUV, který je zjednodušením struktury modelu HBV. Model TUV obsahuje pouze 15 parametrů, které zobrazuje tabulka 3 (Viglione a Parajka, 2020).

Tabulka 3: tabulka zobrazující parametry modelu TUW (Seibert, 1997; Bergström, 1976; Viglione a Parajka, 2020).

Parametr	Jednotky	Popis
SCF	-	Opravný faktor sněhu
DDF	mm/°C/den	Day-degree faktor
Tr	°C	Hraniční teplota, nad kterou jsou srážky dešťové
Ts	°C	Hraniční teplota, pod kterou jsou srážky sněhové
Tm	°C	Hraniční teplota tání sněhu
Lprat	-	Hodnota vlhkosti půdy, kdy ET dosahuje hodnoty PET
FC	mm	Maximální hodnota vlhkosti půdy
Beta	-	Empirický koeficient vztahující tvorbu odtoku k půdní vlhkosti
k ₁	d ⁻¹	Koeficient prázdnění vrchního zásobníku
k ₀	d ⁻¹	Koeficient prázdnění vrchního zásobníku při překročení prahové hodnoty <i>UZL</i>
k ₂	d ⁻¹	Koeficient prázdnění spodního zásobníku
lsuz	mm	Hodnota určující plnění svrchního zásobníku podle koeficientu k ₁ nebo k ₀
c _{perc}	mm/den	Maximální rychlost perkolace
B _{max}	d ⁻¹	Volný parametr transferové funkce generující odtok
c _{route}	d ² /mm	Parametr spojující transformační funkci s generovaným odtokem

4 Metodika

Veškerá práce s daty jako je příprava dat do vhodného formátu pro vstup do modelů, práce s modely (kalibrace, validace) a vizualizace dat byla prováděna ve statistickém programovacím prostředí R. Vizualizace mapových dat byla vytvořena v programu ArcGIS Pro za použití základních funkcí tvorby map (symbologie DMR, clip, intersect a tvorba mapového layoutu).

Vstupní data pro vizualizaci klimatických a hydrologických charakteristik a pro samotné modely byla získána ze dvou zdrojů. Denní průtoky v měrných stanicích (Maršov, Hronov, Krčín a Jaroměř) byly získány z webu ČHMÚ a meteorologická data teplot a srážkových úhrnů byla poskytnuta Výzkumným ústavem vodohospodářským TGM v Praze. Pro úpravu a vizualizaci dat byly v R využity tyto balíky funkcí: `tidyverse` (Wickham et al., 2019) (konkrétně knihovny `dplyr`, `lubridate` a `ggplot2`), `data.table` (Dowle a Srinivasan, 2022) a `padr` (Thoen, 2022).

4.1 Příprava datových vstupů

Vstupní data pro jednotlivé modely bylo třeba upravit do jednotného formátu. Byly vytvořeny datové soubory s časovými řadami srážek, teplot a odtoků. Základní struktura vstupních dat je vyobrazena v tabulce 4. Sloupec DTM obsahuje informaci o datu, sloupec P obsahuje hodnotu srážky v milimetrech, T je teplota ve stupních Celsia a R je odtok v mm/den.

Tabulka 4: Struktura vstupních dat do modelu BILAN.

DTM	P	T	R
⋮	⋮	⋮	⋮
2020-10-26	0.90	10.01	1.55
2020-10-27	0.98	6.91	1.39
2020-10-28	0.00	7.41	1.46
2020-10-29	6.54	6.25	1.44
2020-10-30	6.77	8.12	1.45
⋮	⋮	⋮	⋮

Vstupní data byla rozšířena o tzv. dvouletou „warm-up periodu“. Vytvoření spočívalo ve vykopírování dva roky dlouhých dat před již existující kalibrační dataset pro ustálení modelu a zajištění optimálního běhu kalibrace hned od začátku dostupných dat.

Tento postup byl do této fáze společný pro modely BILAN a TUW. Výsledné vstupní časové řady tedy obsahovaly datum, srážku, teplotu, průtok a odtok. Poslední část přípravy dat pro model BILAN spočívala už jen v rozdělení dat na části kalibrační a validační. Kalibrace byla provedena na datech od roku 1979 do roku 2000 a validace na datech od roku 2000 do roku 2021.

Jelikož byl model TUW použit jako semi - distribuovaný, byla data upravena podle následujícího postupu:

- Rozdělení datových souborů na kalibrační a validační podle stejného kritéria jako u modelu BILAN.
- Vytvoření matic jednotlivých vstupních hodnot, kde v řádcích byly hodnoty dané veličiny a ve sloupcích sledované měrné stanice.
- Vytvoření matice potenciální evapotranspirace zahrnovalo její odhad pomocí modelu BILAN (PET nebyla získána se vstupními daty). Byla tedy použita funkce `bil.pet` pro jednotlivá povodí měrných stanic a z výsledného datasetu byly vytvořeny opět stejné matice, jako u ostatních vstupních veličin.
- Poslední vstupní veličinou pro TUW je plocha jednotlivých povodí. Plocha byla vypočtena v programu ArcGIS Pro funkcí `calculate geometry` a následně přidána do vektoru v pořadí, jako jsou měrné stanice v jednotlivých maticích.

Tabulka 5 zobrazuje strukturu vstupních matic do modelu TUW.

Tabulka 5: Struktura vstupních dat do modelu HBV TUW.

	[, 1]	[, 2]	[, 3]	[, 4]
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
[7300,]	0.60	0.59	0.69	1.55
[7301,]	0.57	0.59	0.67	1.39
[7302,]	0.55	0.51	0.61	1.46
[7303,]	0.56	0.57	0.60	1.44
[7304,]	0.59	0.61	0.64	1.45
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4.2 Vytvoření workflow modelů, kalibrace

Model BILAN

Model BILAN je dostupný v prostředí R jako balík funkcí. Tento balík bylo třeba nainstalovat pomocí příkazu `remotes::Install_git`, jelikož není dostupný z veřejně přístupné databáze CRAN ³. Po nainstalování byl použit následující postup:

- Vytvoření denní verze modelu pomocí funkce `bil.new` a přiřazení této funkce k pointeru `b`.
- Konstrukce funkce `fnoptbil` která slouží jako funkce pro optimalizaci parametrů modelu. Jako vstupní hodnota do funkce je vektor `x` o délce počtu parametrů modelu BILAN.
- Samotná funkce obsahovala tyto příkazy:
 - `bil.set.values`, kam se přiřadila vstupní data z kalibračního datasetu.
 - `bil.pet` - odhad potenciální evapotranspirace.
 - `bil.set.params.cur`, kde se nastavily parametry jako pozice členů vstupního vektoru `x`.
 - `bil.run` - spuštění modelu.

³<https://cran.r-project.org>

- Výpočet hodnoty KGE^4 z balíku `hydroGOF` (Mauricio Zambrano-Bigiarini, 2020), kde simulovaná data reprezentuje celkový simulovaný odtok modelem `BILAN (RM)` a měřená data jsou časová řada odtoku z povodí ze vstupního kalibračního setu (`R`).
- Vytvoření proměnné `ctrl` s kontrolními parametry optimalizačního procesu.
- Spuštění optimalizace funkcí `DEoptim`. Do funkce `DEoptim` vstupuje informace o optimalizované funkci, kontrolní parametry `ctrl` a okrajové hodnoty hledaných parametrů.

Po spuštění funkce `DEoptim` byl zahájen proces optimalizace. Tento proces byl proveden zvlášť pro každé povodí jednotlivých měrných stanic.

Model TUV

Model TUV byl do `R` nainstalován příkazem `install.packages("TUWmodel")` (Viglione a Parajka, 2020) a následně vyvolána knihovna jeho funkcí `library(TUWmodel)`. Postup kalibrace byl následující :

- Vytvoření funkce `fnopt_TUV_Mar` pro první měrnou stanicí (Maršov).
- Do funkce vstupují časové řady pouze pro subpovodí měrné stanice v Maršově a vektor `x` o délce počtu parametrů modelu.
- Výpočet hodnoty KGE z balíku `hydroGOF`, kde simulovaná data reprezentuje celkový simulovaný odtok modelem TUV (`q`) a měřená data jsou časová řada odtoku z povodí ze vstupní kalibrační matice (`R`).
- Vytvoření proměnné `ctrl` s kontrolními parametry optimalizačního procesu.
- Spuštění optimalizace funkcí `DEoptim`. Do funkce `DEoptim` vstupuje informace o optimalizované funkci, kontrolní parametry `ctrl` a okrajové hodnoty hledaných parametrů.
- Výsledné parametry byly přiřazeny do vektoru `par_Mar`.

⁴Tato hodnota byla přenásobena `-1` kvůli optimalizačnímu algoritmu `DEoptim`, který je schopen hodnotu objektivní funkce pouze minimalizovat.

Tento proces zajistil první optimální sadu parametrů pro subpovodí měrné stanice v Maršově. Následujícím krokem bylo vytvoření stejné funkce `fnopt_tuw_Hro` pro měrnou stanici v Hronově. Vstupní hodnoty do modelu TUW byly rozšířeny o data pro další povodí. Jako parametry funkce `fnopt_tuw_Hro` byla vytvořena matice, která měla na pozicích prvního sloupce hodnoty parametrů z kalibrace povodí stanice v Maršově a na pozicích druhého sloupce byl opět vektor \mathbf{x} s pozicemi daných optimalizovaných parametrů.

Stejný postup byl proveden u následujících povodí měrných stanic, kdy se při každé další kalibraci přidala data pro následující povodí a zkalibrované parametry z předchozího kroku.

Výsledkem bylo celkem 60 parametrů, ze kterých se vytvořila matice o čtyřech sloupcích a 15 řádcích. Matice byla přiřazena k proměnné `parametry_tuw`.

4.3 Validace

Validace byla provedena na bázi split - sample testu (Klemeš, 1986). Data byla rozdělena na stejně dlouhé periody pro kalibraci a validaci. Validace tedy probíhala na nových časových řadách za použití sady parametrů z kalibrace. Postup validace byl následující:

Model BILAN

Validace byla provedena na datech z období mezi lety 2000–2021. A byl dodržen následující postup:

- Vytvoření denní verze modelu pomocí funkce `bil.new` a přiřazení této funkce k pointeru `v`.
- Konstrukce modelu BILAN byla shodná jako u kalibrace. Vstupní hodnoty byly použity z validačního datasetu a parametry byly zvoleny z výstupního datasetu optimalizační funkce.
- Provedení validace modelu pro všechna povodí měrných stanic.
- Vykreslení modelovaných a měřených časových řad odtoku.

Model TUW

Validace modelu TUW byla provedena opět na období mezi lety 2000 - 2021.

Model byl sestaven následujícím způsobem:

- Vytvoření proměnné `val` do které se přiřadila funkce `TUWmodel`.
- Vstupní hodnoty do modelu byly již zmíněné matice vstupních hodnot pro jednotlivé měrné stanice.
- Plochu reprezentoval vektor s procentuálními hodnotami velikosti jednotlivých povodí ku celkové rozloze povodí Metuje.
- Parametry byly zadány jako matice `parametry_tuw`

Následně byly vykresleny grafy simulovaných a měřených časových řad s hodnotou KGE pro validaci.

Veškeré simulované odtokové řady byly dále vyhodnocovány pomocí krabíkových grafů, rankitových grafů a čar překročení se zvýrazněním M-denních vod.

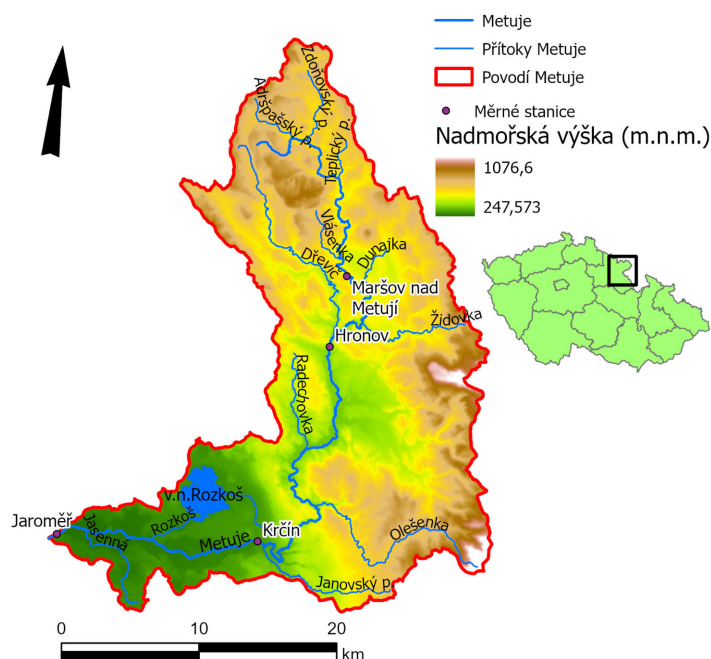
5 Charakteristika území - povodí Metuje

5.1 Geomorfologie

Řeka Metuje pramení západně od oblasti Adršpašsko - teplických skal u obce Hodkovice v oblasti, která se nazývá Kalousy. Pramen se nachází v nadmořské výšce 630 m. n. m. Tento pramen je oficiální, avšak jiné zdroje (Řezáč, 1955) uvádějí jako pramen nepojmenovanou vodoteč, která je pravostranným přítokem výše zmíněné varianty horního úseku Metuje. Dále bývá jako pramen Metuje uveden Zdoňovský potok (Řezáč, 1955). V nejvyšší části toku přijímá Metuje

několik pravostranných přítoků a dále zásobuje Adršpašské jezero, které má především rekreační funkci a bývá od října do března vypuštěno (Kavalír, 2020). Dále po proudu se nachází Malý a Velký adršpašský vodopád a za nimi přijímá Metuje první větší přítok - Adršpašský potok zleva. Dále řeka pokračuje asi 1 km údolím tvaru *V* a následně nesymetrickým údolím, kde se na levém břehu rozprostírá niva široká asi 200 m a na pravém břehu se nachází skalní město (Demek et al., 2006). U osady Bučnice se opět údolí formuje do tvaru písmene *V* a vodní tok zpomaluje a podélný sklon se zmenšuje (Kavalír, 2020).

Metuje se po opuštění oblasti Adršpašsko - teplických skal dostává do města Teplice nad Metují, kde se asi na 1 km rozděluje na dvě části. Jedna část protéká intravilánem a je tvořena uměle vytvořeným korytem s nízkou kvalitou hydro-morfologického stavu. Druhá část je z velké části zatrubněna a během své trasy zásobuje tři boční rybníky (Kavalír, 2020).



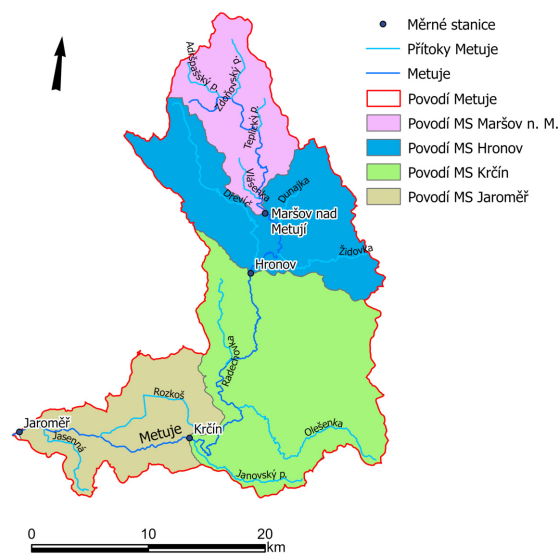
Obrázek 4: Mapa povodí Metuje.

Následují obce Javor, Dědov a Česká Metuje, kde šířka disponibilní nivy dosahuje 400 metrů, hydromorfologický stav řeky vykazuje znaky plně vyvinutého meandrování (Šindlar, 2012) a nachází se zde velké množství přirozeně se vyskytujícího se dřeva.

Koryto se dále udržuje v poměrně úzkém údolí až do města Velké Poříčí. Pod Velkým Poříčím přijímá levostranný přítok - potok Brlenku. Dále nad obcí Žabokrky ústí do Metuje levostranný přítok Židovka (Mapy.cz, 2023).

Střední část toku pokračuje mezi městy Hronov a Nové Město nad Metují, kde se podélný sklon ještě více zmenšuje. Nad městem Hronov přijímá Metuje významný přítok - Dřevíč s plochou povodí $66,5 \text{ km}^2$. V těchto místech řeka lemuje severozápadní okraj Orlické tabule (Kavalír, 2020). Dalším významným přítokem je vodní tok Radechovka, kterou přijímá Metuje v Náchodě zprava. Pod Náchodem pak přijímá další významný přítok, a to Olešenku zleva s plochou povodí 47 km^2 (Mapy.cz, 2023).

Za dolní úsek řeky Metuje se dá považovat úsek od Nového Města nad Metují až do Jaroměře, kde Metuje ústí do Labe. Tato oblast byla historicky intenzivně zemědělsky využívána a přirozený rozliv řeky Metuje byl využíván k závlahám (Kavalír, 2020). Dnešní hustá zástavba již toto neumožňuje v takové míře, jako tomu bylo v minulosti (Mapy.cz, 2023). Významným přítokem řeky Metuje na dolní části toku je vodní tok Rozkoš, na kterém se nachází významná vodní nádrž Rozkoš s rozlohou zatopené plochy 702 ha a objemem téměř 46 mil. m^3 (Povodí Labe, 2009).



Obrázek 5: Povodí Metuje rozděleno na subpovodí měrných stanic.

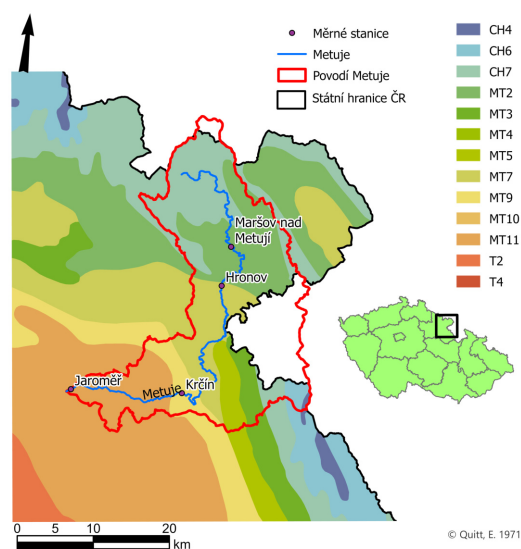
Povodí Metuje se rozkládá z velké části na Polické pánvi o níž bude pojednáno v následujících kapitolách. Nadmořská výška povodí se pohybuje nejčastěji v rozmezích 450–550 m. n. m., avšak nadmořské výšky místy dosahují hodnot až 800

m. n. m. (oblast Adršpašsko - Teplických skal). Celková rozloha povodí činí 610,7 km² (Vizina et al., 2009). Obrázek 4 zobrazuje mapu povodí Metuje na podkladě digitálního modelu terénu. Obrázek 5 pak zobrazuje povodí Metuje rozdělené na subpovodí podle měrných stanic na Metuji.

5.2 Klima

Oblast povodí Metuje se nachází v několika klimatických zónách. Nejvýznamnější jsou oblasti MT3, MT7, MT 9 a MT 11 (Quitt, 1971). Tyto oblasti jsou definovány jako mírně teplé oblasti, které se dále diferencují podle několika kritérií, přičemž MT3 je nejchladnější a MT11 nejteplejší (Quitt, 1971). Mapu klimatických oblastí povodí Metuje a okolí zobrazuje obrázek 6.

Oblast povodí Metuje se nachází v Královéhradeckém kraji, kde průměrná roční teplota v roce 2021 byla 7,8 °C a vzhledem k normálu, se kterým se hodnota srovnává (roky 1991–2020) zaznamenáváme pokles průměrné teploty o 0,4 °C. V roce 2020 byla průměrná teplota v Královéhradeckém kraji 9,1 °C a vzhledem k průměrné teplotě mezi lety 1981–2010 je to nárůst o 1,3 °C. V poslední řadě srovnání s referenčním obdobím 1961–1990. Zde rozdíl průměrných teplot dosahuje hodnoty 2,2 °C (ČHMÚ, 2023a).

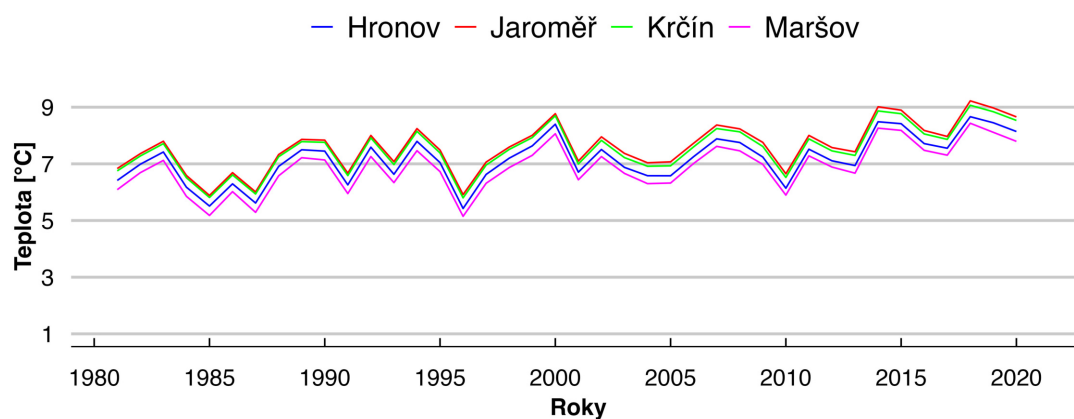


Obrázek 6: Klimatické oblasti povodí Metuje podle Quitt (1971).

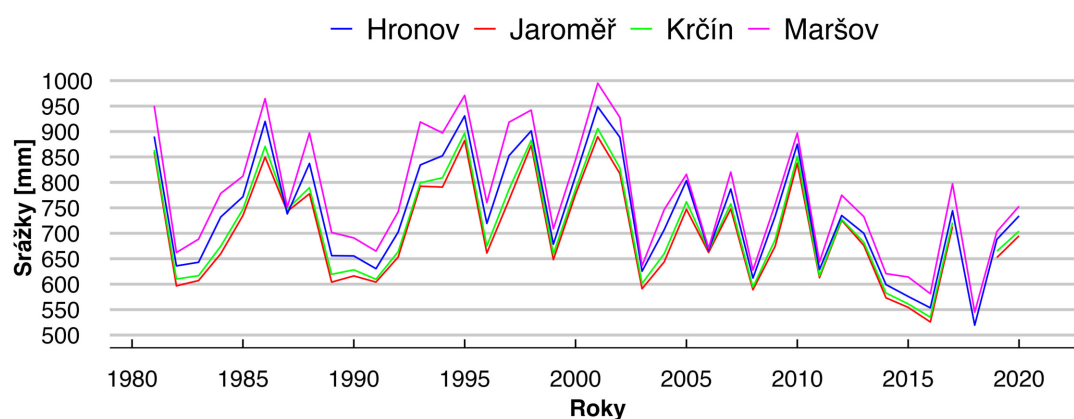
Podle měření ve stanici Bučnice vzrostla průměrná teplota v povodí mezi lety 1980-2007 o 1,25 °C. Rozpětí denních průměrných teplot dosahuje až 50°C. Tato skutečnost vede zejména ke zvýšení potenciální evapotranspirace (Vizina et al., 2009). Langův dešťový faktor dosahuje v celém povodí hodnot přes 100 (Tolasz, 2007).

Obrázek 7 zobrazuje vývoj teplot v jednotlivých měrných stanicích na Metuji mezi lety 1981 a 2020. Obrázek 8 pak zobrazuje vývoj sumy ročních srážek za

stejné období. Tabulka 6 zobrazuje přehled informací o měrných stanicích na Metuji.



Obrázek 7: Vývoj teplot (ČHMÚ, 2023a).



Obrázek 8: Vývoj srážek (ČHMÚ, 2023b).

Tabulka 6: Přehled měrných stanic na Metuji.

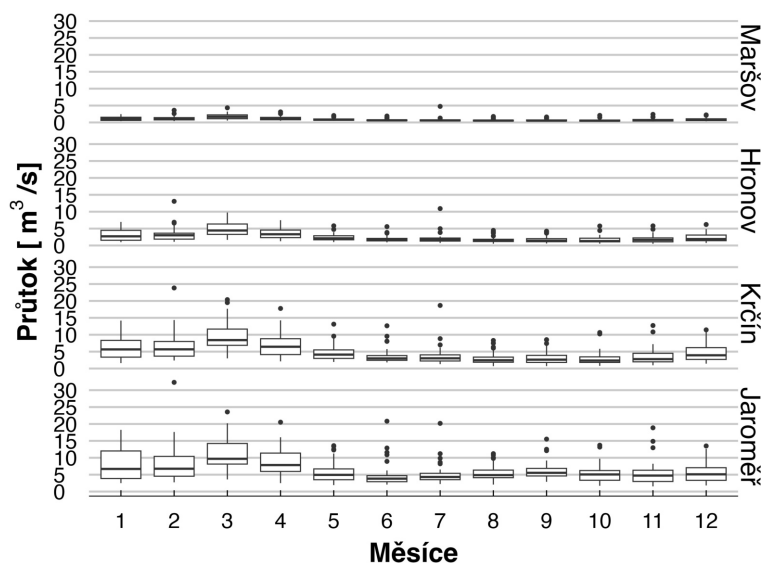
DBCN	Název stanice	Plocha povodí	Období dostupných dat	Veličina
017000	Maršov nad Metují	94,68	1980–2021	Q
018000	Hronov	248,59	1980–2021	Q, T
020000	Krčín	498,80	1980–2021	Q
021000	Jaroměř	610,70	11/1980–04/2007 02/2008–12/2021	Q

5.3 Hydrologie

Morfologie toku a základní charakteristika oblasti povodí Metuje byla popsána v kapitole 5 - Charakteristika území - povodí Metuje.

Průměrný průtok v uzávěrovém profilu povodí Metuje je měřen na měrné stanici v Jaroměři a dlouhodobě se pohybuje okolo hodnoty $6,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Průtok se v povodí Metuje měří na celkem čtyřech měrných stanicích. Jsou to stanice Jaroměř, Krčín, Hronov a Maršov nad Metují. Průtoky jsou v povodí Metuje zaznamenávány nepřetržitě od roku 1967 a měrné stanice jsou v současné době spravovány VÚV TGM, ČHMÚ a Hydrogeologickou společností Praha (Vizina et al., 2009).

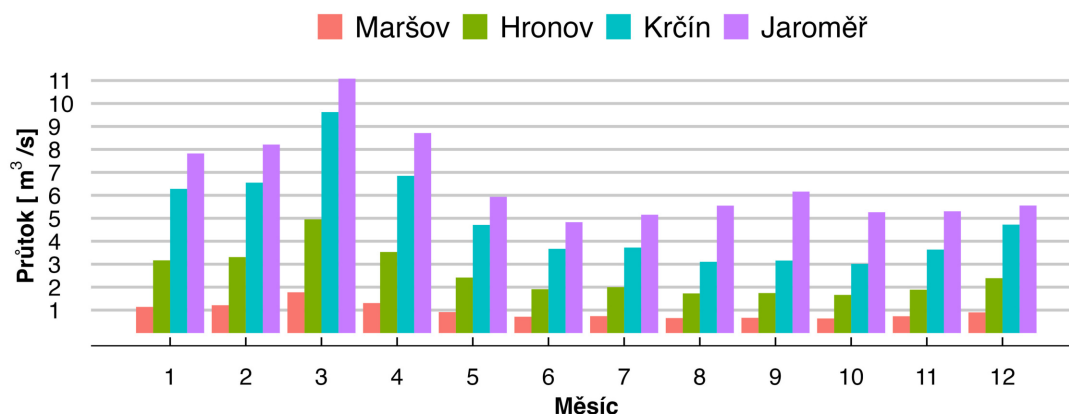
Na obrázku 9 jsou zobrazeny průtoky v jednotlivých měsících za období 1981 a 2021 pomocí krabicových grafů⁵. Z grafu je vidět, že vyšší průtoky jsou měřeny v zimních a jarních měsících. Tyto měsíce vykazují také větší rozptýl hodnot. Naopak letní měsíce mají navzdory celkově nižším průtokům více extrémních hodnot (ČHMÚ, 2023b).



Obrázek 9: Průtoky v jednotlivých měsících za období 198–2021 (ČHMÚ, 2023b).

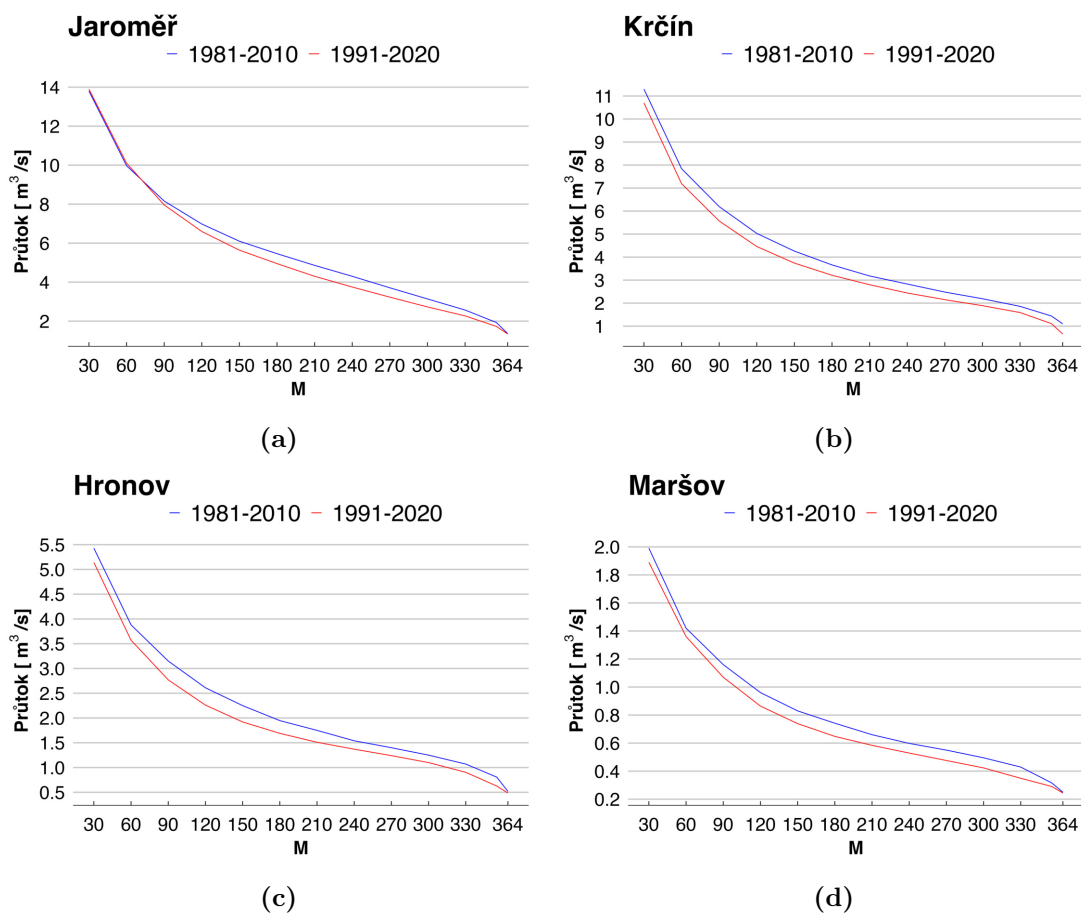
⁵Horní hranice krabice = 75. percentil, spodní hranice = 25. percentil, prostřední část = 50. percentil. Hranice vousů = 1,5 násobek mezikvartilového rozpětí nad 75. percentilem, resp. pod 25. percentilem.

Podobnou vizualizaci odtokových poměrů během roku zobrazuje obrázek 10, kde jsou vykresleny průměrné denní průtoky během roku v jednotlivých stanicích za období 1980–2021.



Obrázek 10: Průměrné denní průtoky během roku (ČHMÚ, 2023b).

Obrázek 11 zobrazuje čáry překročení M-denních průtoků ve dvou referenčních obdobích: 1981-2010 a 1991-2020 v měrných stanicích Jaroměř (11a), Krčín (11b), Hronov (11c) a Maršov nad Metují (11d). Z těchto grafů je vidět, že hodnoty průtoků M-denních vod klesly zejména v oblasti mezi 90 denní a 355 denní vodou. V měrné stanici v Jaroměři průtoky 30 denní až cca 70 denní vody byly v současném referenčním období (1991-2020) mírně vyšší. V ostatních měrných stanicích klesly M-denní průtoky téměř systematicky (ČHMÚ, 2023b).



Obrázek 11: Čáry překročení průtoků se zvýrazněním M-denních vod v jednotlivých měrných stanicích.

5.4 Geologie

Povodí Metuje se z geologického hlediska nachází v území Polické pánve a je díky svým geologickým vlastnostem povodí hydrogeologicky uzavřené (hydrologická a hydrogeologická rozvodnice jsou shodné) (Vizina et al., 2009).

Polická pánev se nachází v severovýchodních Čechách v oblasti nazývané také jako Broumovský výběžek, blízko u hranic s Polskem. Rozkládá se na centrální části Vnitrosudetské pánve. Vnitrosudetská pánev, resp. její podloží je na území ČR zastoupeno hlavně slabě metamorfovanými sedimenty a vulkanity (Vizina et al., 2009).

Křídové sedimenty, vyskytující se v Polické pánvi nalezneme zejména při severovýchodním okraji České křídové pánve a jsou od hlavního území křídových sedimentů odděleny výchozy starších paleozoických sedimentů, nebo permskými,

popř. karbonskými uloženinami (na západě) a výběžky kristalinika Orlických hor (na jihu). Na jihozápadě nalezneme křídové sedimenty v oblastech českého Hronovsko-svatoňovického příkopu a dále v polské Kudowské pánvi (Kašpárek, 2006). Na území Polska se dále křídové sedimenty Polické pánve nacházejí v Krzeszówské pánvi (severně od Polické pánve) a dále směrem k jihovýchodu přecházejí do Kladské křídý. Celkově se křídové sedimenty Polické pánve nacházejí na území ČR na ploše o rozloze asi 230 km² (Vizina et al., 2009).

Svrchokřídové uloženiny jsou reprezentovány mořským, popř. brakickým cenomanem a spodním a středním turonem. Mořský cenoman je rozšířen po celé ploše svrchní křídý (Kašpárek, 2006). Sladkovodní uloženiny nebyly nalezeny. Vrstvy vyššího turonu přecházejí do pískovců, které jsou typické zejména pro Adršpašsko-teplické skály. Spodní turon je rozdělen na dvě souvrství a jeho sedimenty jsou litologicky pestré (Vizina et al., 2009).

Z hydrogeologického hlediska je povodí Metuje významné již zmíněnou hydrogeologickou uzavřeností. Dále se zde nachází významné podzemní zdroje vody, na jejichž vytvoření má vliv strukturní stavba podloží, tektonika, popř. litologický vývoj. Tyto vlivy způsobily, že kromě typického vertikálního členění zvodní, nacházíme i primární členění horizontální (Vizina et al., 2009).

6 Výsledky

Vyhodnocení výsledků kalibrace a validace hydrologických modelů bylo provedeno na základě grafického vyhodnocení pozorovaných a simulovaných odtokových řad, dále pak hodnotou KGE při kalibraci, zobrazením hodnot NSE, KGE a MAE pro validaci modelu a srovnáním kvantilů pozorovaných a simulovaných odtokových řad.

6.1 BILAN

Kalibrace i validace modelu BILAN byla provedena pro všechna čtyři povodí jednotlivých měrných stanic na Metuji. BILAN pracoval se všemi povodími, jako se samostatnými celistvými jednotkami. Výsledné hodnoty optimalizovaných parametrů pro jednotlivá povodí měrných stanic jsou zobrazeny v tabulce 7.

Hodnota KGE při kalibraci je zobrazena v tabulce 8. Hodnota KGE se při kalibraci jednotlivých subpovodí pohybovala kolem hodnoty 0,8. Tabulka 9 zobrazuje hodnoty některých dalších vybraných objektivních funkcí hodnotících kvalitu shody mezi daty pozorovanými a simulovanými.

Tabulka 8: Hodnota KGE při kalibraci.

	KGE
Maršov	0.797
Hronov	0.813
Krčín	0.809
Jaroměř	0.767

Tabulka 7: Optimalizované parametry modelu BILAN.

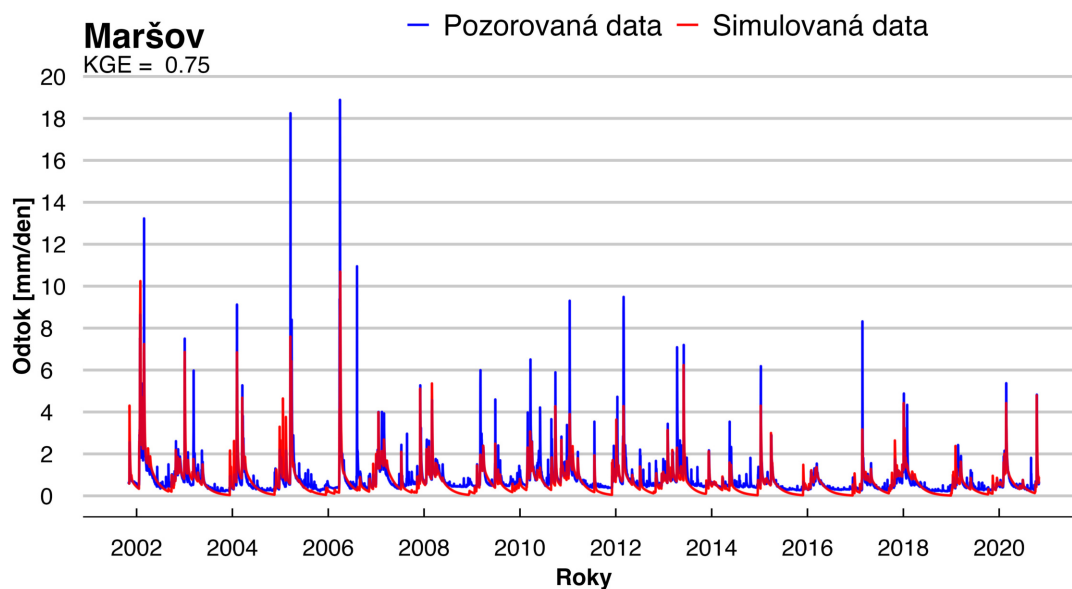
	Maršov	Hronov	Krčín	Jaroměř
Spa	193.904	64.491	48.041	11.756
Alf	0.216	0.175	0.165	0.058
Dgm	3.422	2.505	1.681	1.771
Soc	0.025	0.025	0.029	0.171
Mec	0.023	0.034	0.050	0.314
Grd	0.014	0.015	0.018	0.021

Tabulka 9: Hodnoty vybraných objektivních funkcí při validaci.

Měrná stanice	NSE	KGE	MAE
Maršov	0.561	0.746	0.287
Hronov	0.601	0.731	0.285
Krčín	0.617	0.768	0.278
Jaroměř	0.384	0.651	0.467

6.1.1 Maršov

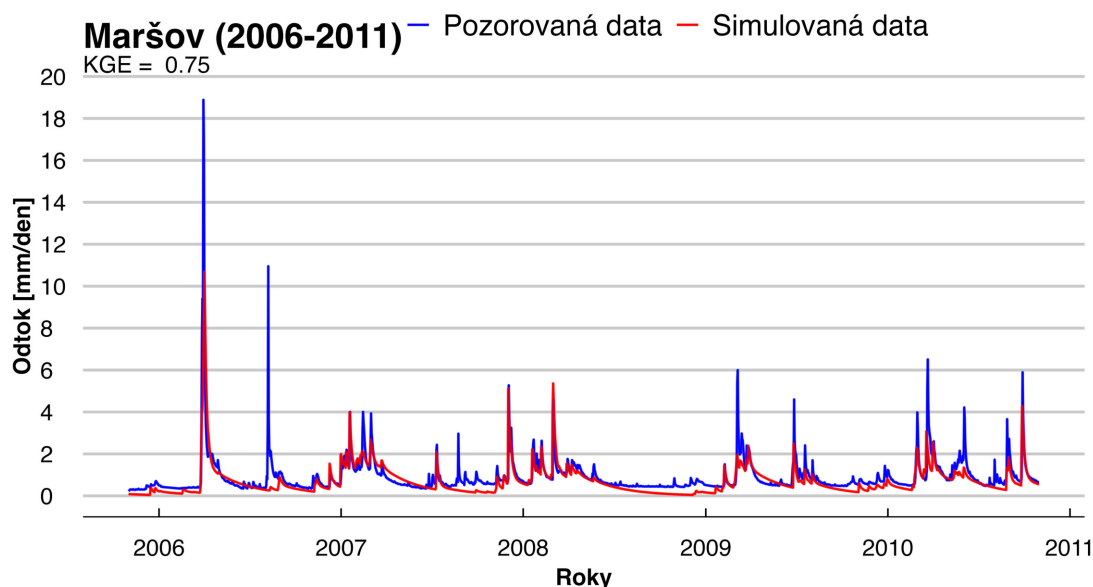
Prvním povodím, které bylo podrobena simulaci modelem BILAN bylo povodí měrné stanice v Maršově. Simulované časové řady simulovaných a pozorovaných odtoků jsou zobrazeny na obrázku 12. Z tohoto obrázku je patrná shoda zejména v průměrných a mírně nadprůměrných hodnotách. Většinu vysokých hodnot model simuloval podhodnoceně, ale náběhy na vyšší hodnoty jsou zaznamenány téměř ve všech případech. Nízké průtoky model často simuluje až k úplnému vyprázdnění, což snižuje hodnotu kritéria KGE.



Obrázek 12: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Maršově.

Na obrázku 13 je zobrazena validace pouze pro období mezi lety 2006–2011. Zde je vidět kvalitní zachycení vysokého průtoku na začátku roku 2006. Naopak v druhé polovině roku 2007 byl vysoký průtok modelem téměř nezachycen. Pokud hodnoty měřeného odtoku delší dobu setrvávají na průměrných až podprůměrných hodnotách, je vidět, že má model tendenci povodí vyprazdňovat až téměř k nule. Tato skutečnost je zaznamenaná zejména v druhé polovině roku 2008, kdy se pozorované hodnoty pohybují konstantně kolem 1 mm/den, přičemž model má tendenci hodnotu odtoku snižovat až k nule, nebo dokud se pozorovaný odtok opět nezvýší. Tato skutečnost může být dána také podhodnocenými srážkovými

úhrny v horní části povodí, které jsou vstupem do modelu.



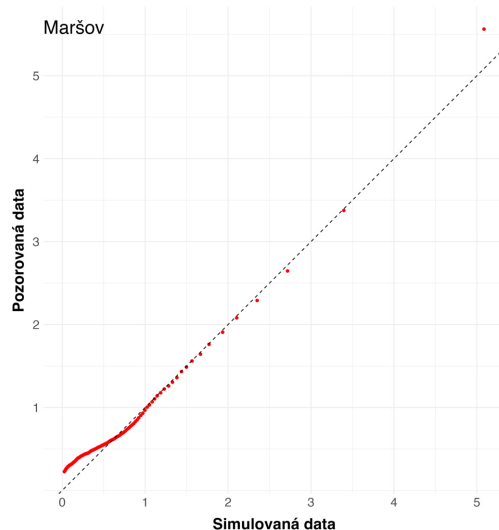
Obrázek 13: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Maršově mezi lety 2006 a 2011.

Hodnota KGE dosáhla při validaci modelu BILAN na povodí měrné stanice v Maršově hodnoty 0,75, což je oproti hodnotě při kalibraci 0,80 jen mírný pokles.

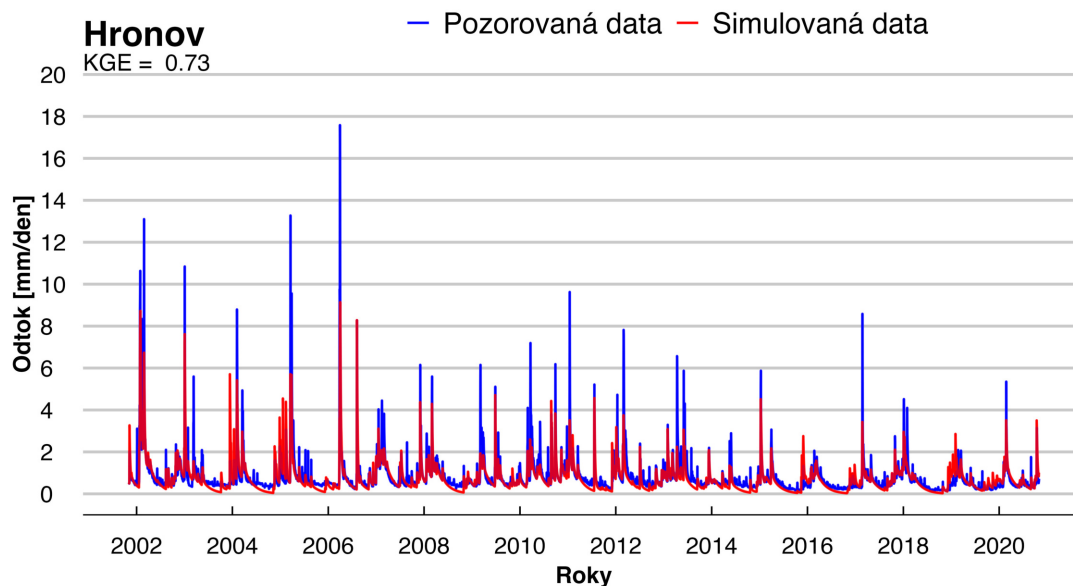
Na obrázku 14 je zobrazeno srovnání kvantilů pozorovaných a simulovaných dat, ze kterého je vidět podhodnocení nízkých hodnot. Ve středních hodnotách se kvantily téměř shodují a vysoké hodnoty jsou opět modelem podhodnoceny.

6.1.2 Hronov

Následující simulaci bylo podrobena povodí měrné stanice v Hronově. Celkový pohled na odtokové řady pro validační období je zobrazen na obrázku 15. Opět je zde patrné zachycení průměrných hodnot včetně náběhů na hodnoty vyšší které nejsou, stejně jako u předchozího povodí zachycený přesně. Podobně, jako simulované řady předchozího povodí, vykazuje odtok v suchých obdobích klesající trend a v mnohých případech klesne až k nule.

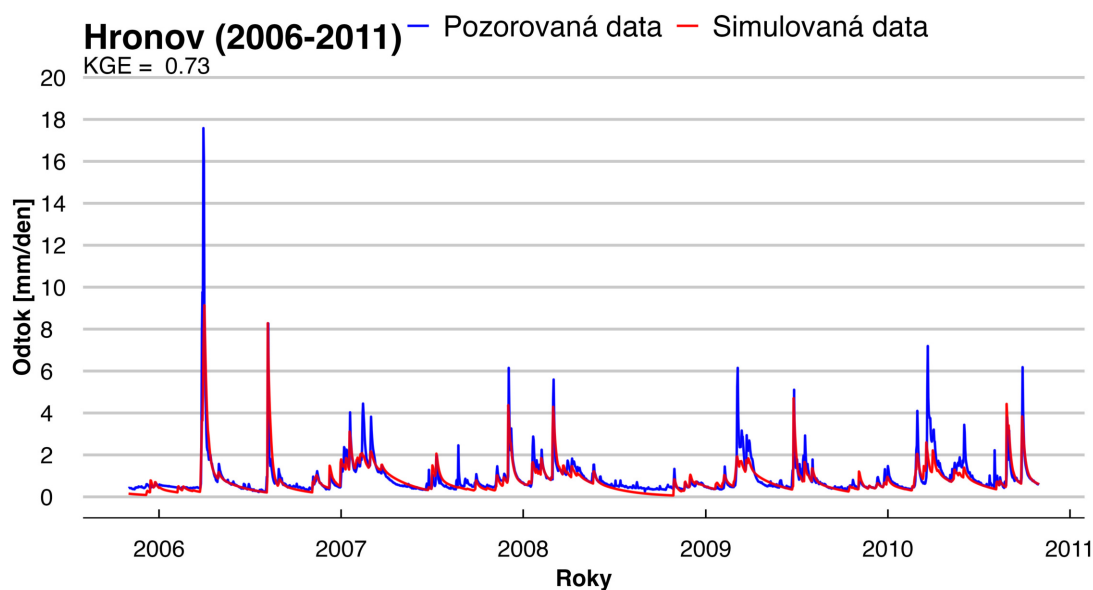


Obrázek 14: Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem BILAN na povodí měrné stanice v Maršově.



Obrázek 15: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově.

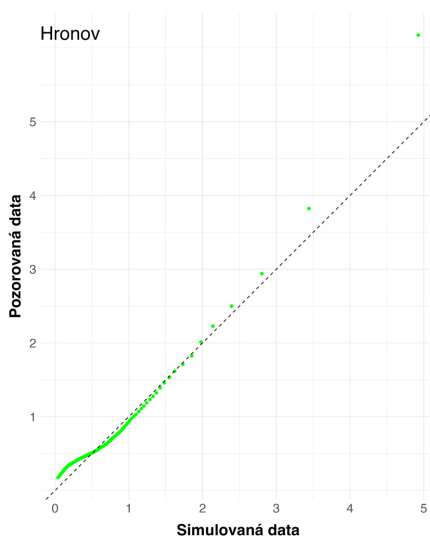
Obrázek 16 opět zobrazuje období mezi lety 2006–2011, kde je oproti předchozímu povodí zachycena vyšší hodnota odtoku přibližně v polovině roku 2006. Tento stav model v minulém povodí vůbec nezaznamenal. Obrázek 16 také lépe zobrazuje systematické podhodnocení nižších průtoků v druhé polovině roku 2008. Tento pokles ale není tak markantní, jako u předchozího povodí.



Obrázek 16: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově mezi lety 2006 a 2011.

KGE při validaci modelu BILAN na povodí měrné stanice v Hronově dosáhlo hodnoty 0,73. Hodnota KGE při kalibraci činila 0,81, což je horší výsledek oproti validaci modelu na povodí stanice v Maršově.

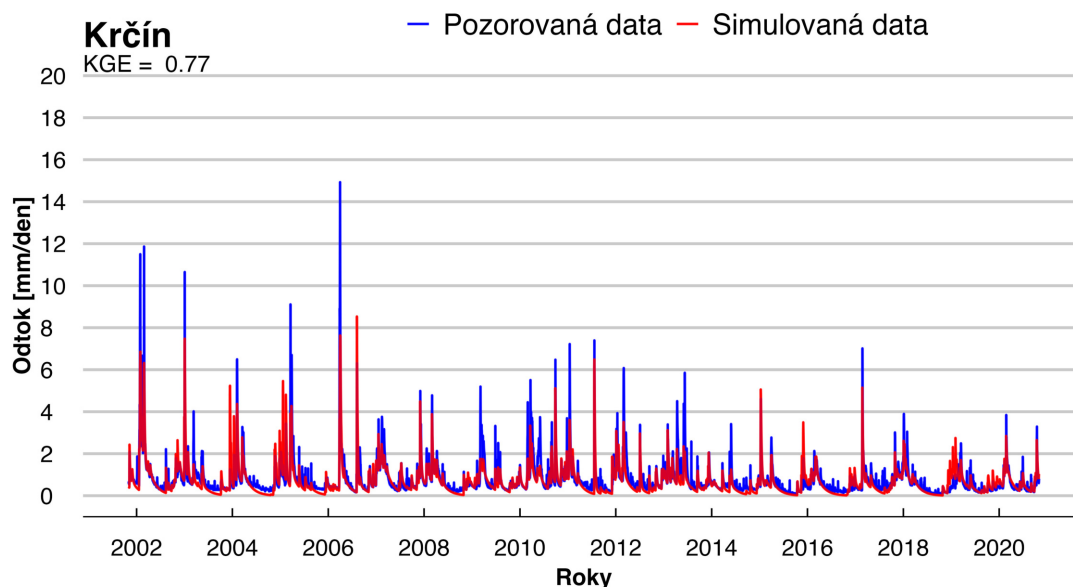
Obrázek 17 zobrazuje srovnání kvantilů pozorovaných a simulovaných dat. Opět je vidět podhodnocení nízkých a velmi vysokých průtoků.



Obrázek 17: Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově.

6.1.3 Krčín

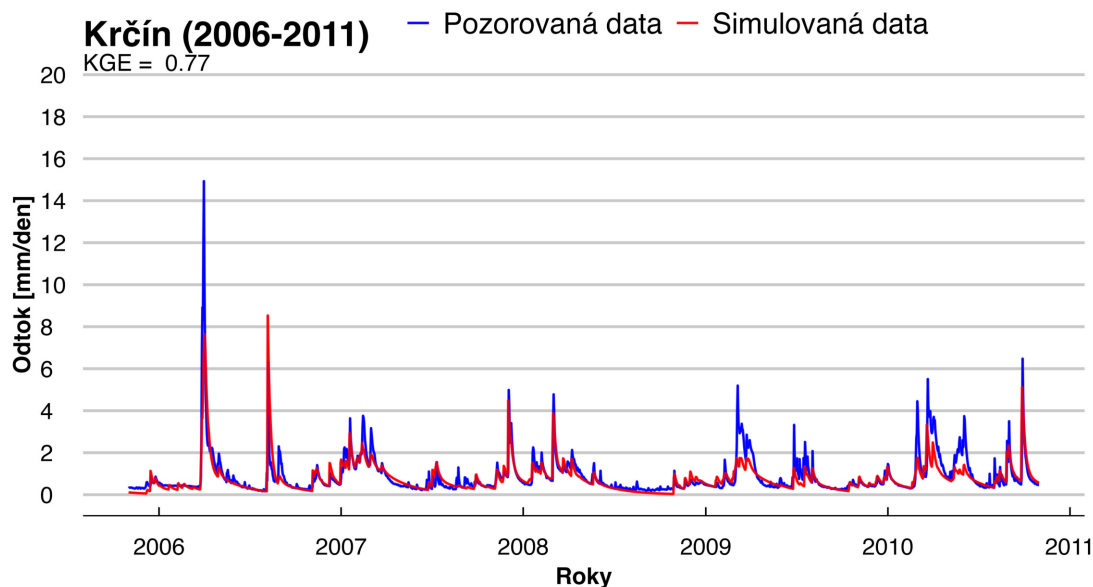
Následující validaci bylo podrobena povodí měrné stanice v Krčíně. Na obrázku 18 je zobrazena kompletní validační perioda. Odtokové řady vykazují výrazně větší shodu, než tomu bylo u simulací na výše položených povodích. Zejména průměrné a nižší hodnoty jsou modelem zachyceny výrazně lépe. Vyšší hodnoty jsou stále systematicky podhodnocovány, ale rozdíl je menší. Tato skutečnost je vidět zejména na první polovině dat, kdy vysoké hodnoty v na začátku roku 2002, v polovině roku 2002, v druhé polovině roku 2004 a na začátku roku 2006 jsou zachyceny modelem cca do jedné poloviny. U předchozích povodí to bylo výrazně méně.



Obrázek 18: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Krčíně.

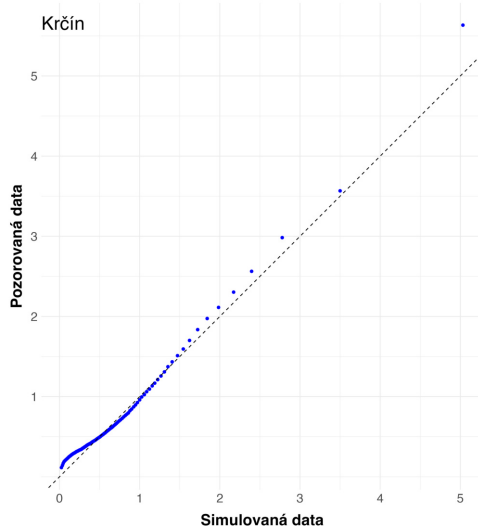
Podrobnější pohled na validaci mezi lety 2006–2011 zobrazuje obrázek 19, kde jsou podobně, jako u výše položeného povodí zachyceny vyšší i průměrné průtoky. Podrobněji je zde také zachycen výše zmíněný vysoký odtok na začátku roku 2006, kdy pozorovaný odtok dosáhl hodnoty kolem 15 mm/den. Model tento průtok nasimuloval na hodnotu mírně pod 8 mm/den. Lepší shody dosáhl vyšší odtok přibližně v polovině roku 2006, kdy model průtok cca o 2 mm/den nadhodnotil. Prázdňení povodí během suchých období (zejména druhá polovina roku 2008) je

zde vystiženo lépe, než např. u povodí stanice v Maršově. Nejlepší shodu vykazují odtoky na konci roku 2007 a začátek roku 2008 kdy jsou nízké i vyšší hodnoty simulovány téměř shodně.



Obrázek 19: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově mezi lety 2006 a 2011.

Hodnota KGE dosáhla na 0,77, což je nejlepší hodnota KGE pro validaci modelu BILAN. Oproti Kalibraci se hodnota téměř nezměnila.

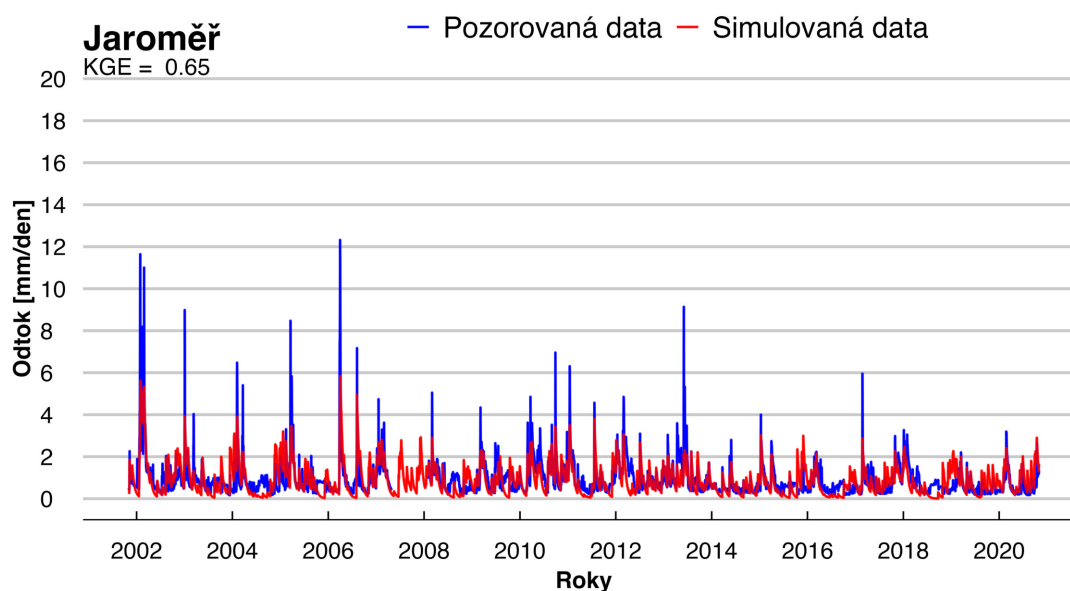


Obrázek 20: Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem BILAN na povodí měrné stanice v Hronově.

Obrázek 20 zobrazuje porovnání kvantilů pozorovaných a simulovaných dat na povodí měrné stanice v Krčíně. Tento graf dokazuje shodu mezi dvěma odtokovými řadami zejména v průměrných hodnotách. Nízké a vysoké hodnoty jsou opět mírně podhodnoceny, ale tato skutečnost není tak markantní, jako u ostatních simulací.

6.1.4 Jaroměř

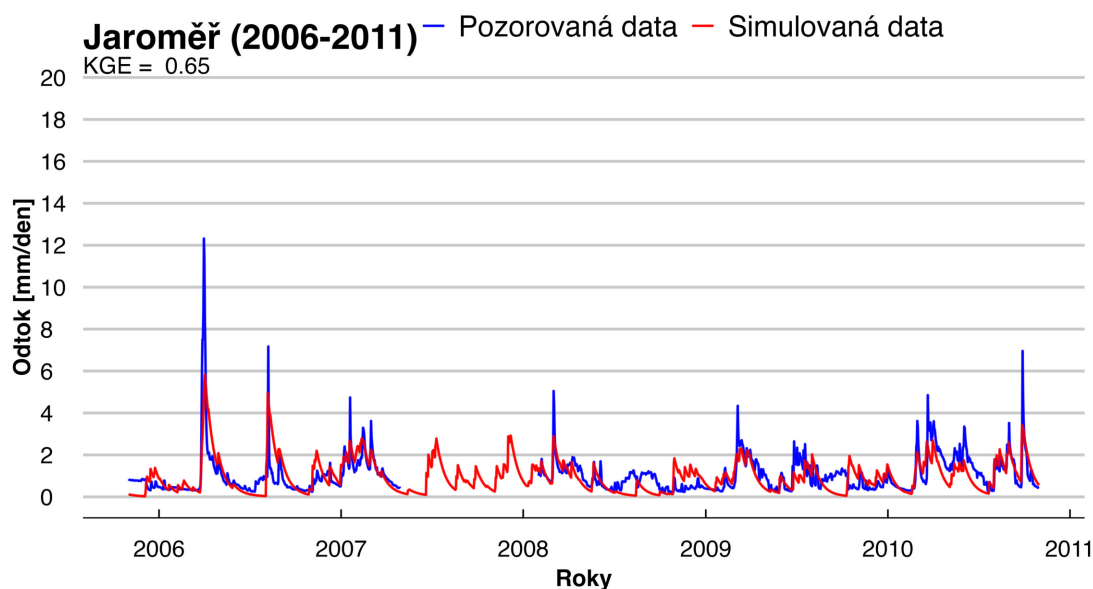
Poslední měrnou stanicí na povodí řeky Metuje je Jaroměř, jejíž celková validace je zobrazena na obrázku 21. Zde data vykazují nejmenší shodu ve srovnání s předchozími simulacemi na výše položených povodích. Horší výsledek simulace odtoku je způsoben pravděpodobně vodní nádrží Rozkoš, která se v tomto povodí nachází. Její režim (odběry, popř. vpouštění) není ve struktuře modelu zohledněn, což by mohlo způsobit nedostatky v simulování odtoku. V období mezi první polovinou roku 2007 až po začátek roku 2008 nebyla dostupná pozorovaná data. V tomto období se hodnota pohybuje od minimálních průtoků k přibližně 2 mm/den což ve srovnání se zbytkem pozorovaného období jsou reálné hodnoty avšak s ohledem na předchozí povodí jsou pravděpodobně nadhodnoceny.



Obrázek 21: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Jaroměři.

Obrázek 22 zobrazuje opět odtokové řady simulovaných a pozorovaných dat

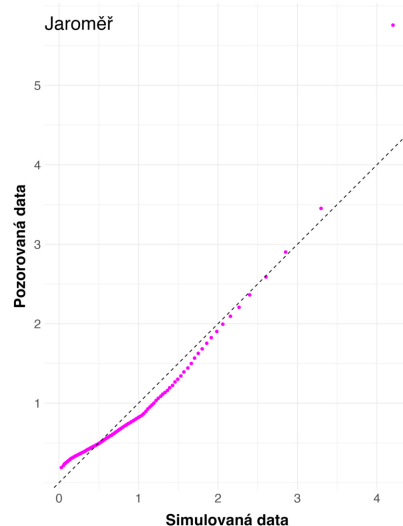
mezi lety 2006–2011. Zde je opět patrný horší výsledek oproti ostatním měrným stanicím. Vyšší hodnoty (zejména během roku 2006) nejsou sice zachyceny přesně, ale simulovaná data vyšší hodnotu odtoku zaznamenávají. Podrobněji je zde také vidět simulace odtoku v období, kdy nebyla dostupná pozorovaná data. Druhá polovina zobrazeného období (2009–2011) vykazuje nejmenší shodu.



Obrázek 22: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem BILAN na povodí měrné stanice v Jaroměři mezi lety 2006 a 2011.

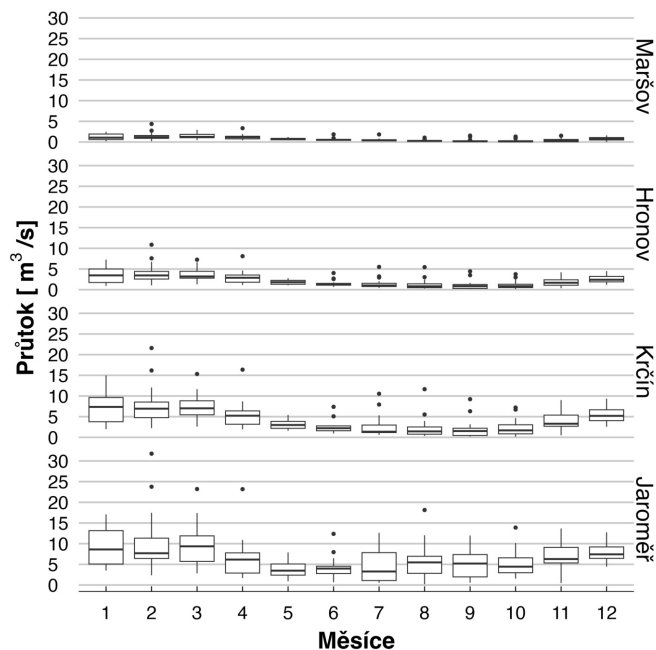
KGE dosáhlo při validaci modelu na povodí měrné stanice v Jaroměři hodnoty 0,65, což je nejnižší hodnota validace modelu BILAN. Oproti kalibraci je tato hodnota přibližně o 0.1 nižší.

Obrázek 23 zobrazuje srovnání kvantilů pozorovaných a simulovaných dat na povodí měrné stanice v Jaroměři. Vidíme zde opět větší podhodnocení nízkých hodnot odtoku. Průměrné hodnoty jsou značně nadhodnoceny a vysoké hodnoty opět model simuloval velmi podhodnoceně.



Obrázek 23: Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem BILAN na povodí měrné stanice v Maršově.

Obrázek 24 zobrazuje simulovaný průměrný denní průtok v jednotlivých měsících formou krabicového grafu. Zde je vidět, že modelované průtoky jsou nejvyšší v jarních měsících a celkově vykazují větší variabilitu. Naopak hodnoty v letních měsících se pohybují ve velmi malém rozmezí s výskytem několika velmi vysokých průtoků.



Obrázek 24: Krabicový graf zobrazující simulovaný průměrný denní průtok v jednotlivých měsících.

6.2 TUW

Model TUW byl v této práci použit jako semi-distribovaný. Povodí Metuje bylo rozděleno podle měrných stanic na Metuji, které představovaly uzávěrové profily jednotlivých subpovodí. Kalibrace modelu proběhla na základě optimalizačního algoritmu diferenciální evoluce a byly získány parametry pro jednotlivá subpovodí (obrázek 10). Jako optimalizační kritérium bylo opět použito kritérium KGE, jejíž hodnoty po kalibraci pro jednotlivá povodí zobrazuje tabulka 11. Z tabulky je vidět, že kalibrace modelu TUW byla úspěšnější, než kalibrace modelu BILAN. Hodnota KGE se u všech subpovodí při kalibraci dostala přes hodnotu 0.8. Hodnoty KGE a dalších kritérií pro validaci jsou zobrazeny v tabulce 12.

Tabulka 11: Hodnota KGE při kalibraci modelu TUW.

	KGE
Maršov	0.848
Hronov	0.870
Krčín	0.879
Jaroměř	0.843

Tabulka 10: Optimalizované parametry modelu TUW.

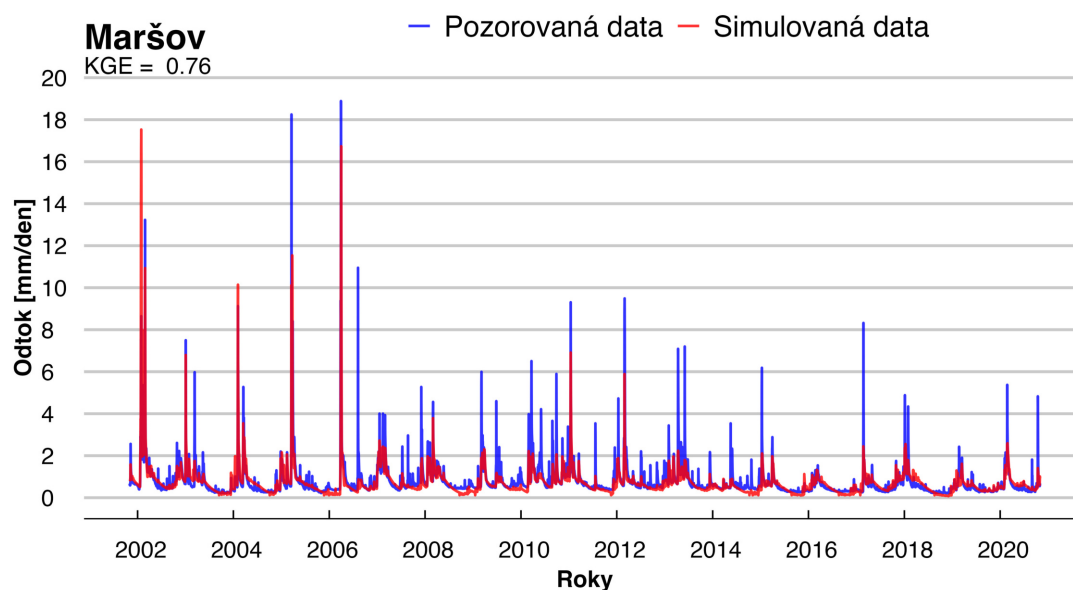
	Maršov	Hronov	Krčín	Jaroměř
SCF	0.905	0.953	0.982	0.988
DDF	3.129	4.670	1.976	4.193
Tr	2.456	2.995	2.938	2.788
Ts	-2.039	-1.768	-2.870	-2.666
Tm	-0.183	0.862	0.837	0.538
Lprat	0.855	0.842	0.992	0.936
FC	200.673	204.388	204.465	203.355
BETA	6.175	2.477	4.160	0.737
k0	1.876	0.506	0.504	1.190
k1	14.984	9.019	9.149	19.208
k2	83.972	242.483	75.083	141.404
lsuz	35.344	55.065	29.400	57.977
cprec	1.507	0.479	0.718	1.995
bmax	12.746	2.340	2.926	27.128
crout	44.587	30.093	42.315	10.006

Tabulka 12: Hodnoty vybraných objektivních funkcí při validaci modelu TUW

	NSE	KGE	MAE
Maršov	0.579	0.763	0.231
Hronov	0.706	0.778	0.256
Krčín	0.758	0.806	0.205
Jaroměř	0.694	0.716	0.311

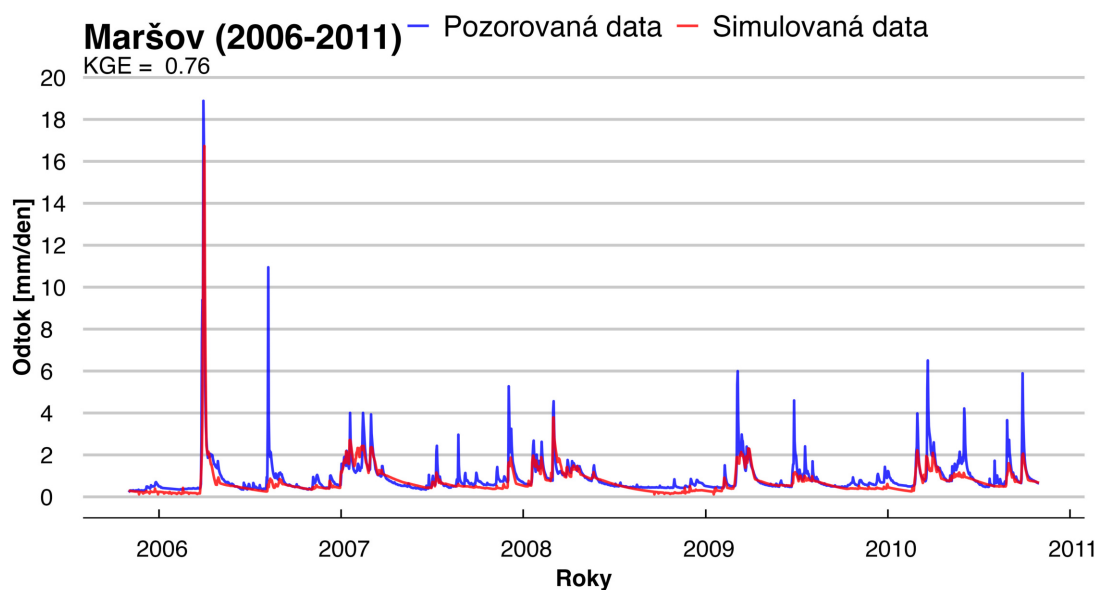
6.2.1 Maršov

Prvním povodím, které bylo podrobena simulaci modelem TWU, bylo povodí měrné stanice v Maršově. Celá validační perioda je zobrazena na obrázku 25. Na první pohled je vidět výraznější shoda mezi pozorovanými a simulovanými daty než u modelu BILAN. Zejména nízké hodnoty korelují s pozorovanými daty a nedochází tak k úplnému prázdnění povodí. Velmi vysoké průtoky model simuluje model TUW také s větší přesností než model BILAN.



Obrázek 25: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Maršově.

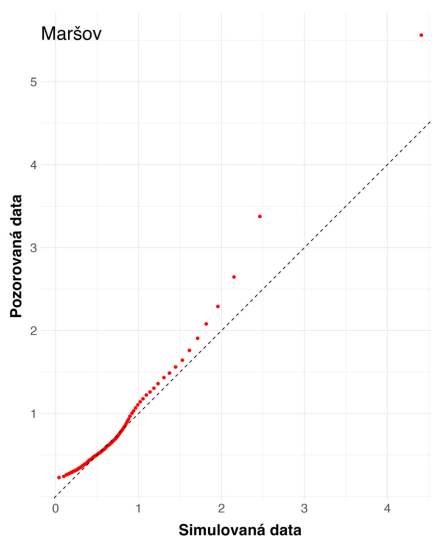
Při zobrazení konkrétnějšího měřítka na obrázku 26 je vidět, že hodnoty zejména na průměrných hodnot jsou simulovány velmi přesně. Vysoká hodnota odtoku na začátku roku 2006 je modelem vystižena téměř přesně, ale ostatní silnější hodnoty nejsou zachyceny s takovou přesností, což pravděpodobně snižuje výslednou hodnotu KGE. Náběhy na vyšší průtoky jsou ale zaznamenány ve většině případů. Vysoký průtok v polovině roku 2006 model nezaznamenal vůbec. Tato skutečnost byla zaznamenána i u modelu BILAN.



Obrázek 26: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Maršově mezi lety 2006 a 2011.

Obrázek 27 zobrazuje srovnání kvantilů pozorovaných a simulovaných hodnot. Z grafu je patrná zejména shoda v nižších až středních hodnotách. Nejnižší hodnoty byly modelem podhodnoceny. Stejně tak hodnoty vysoké.

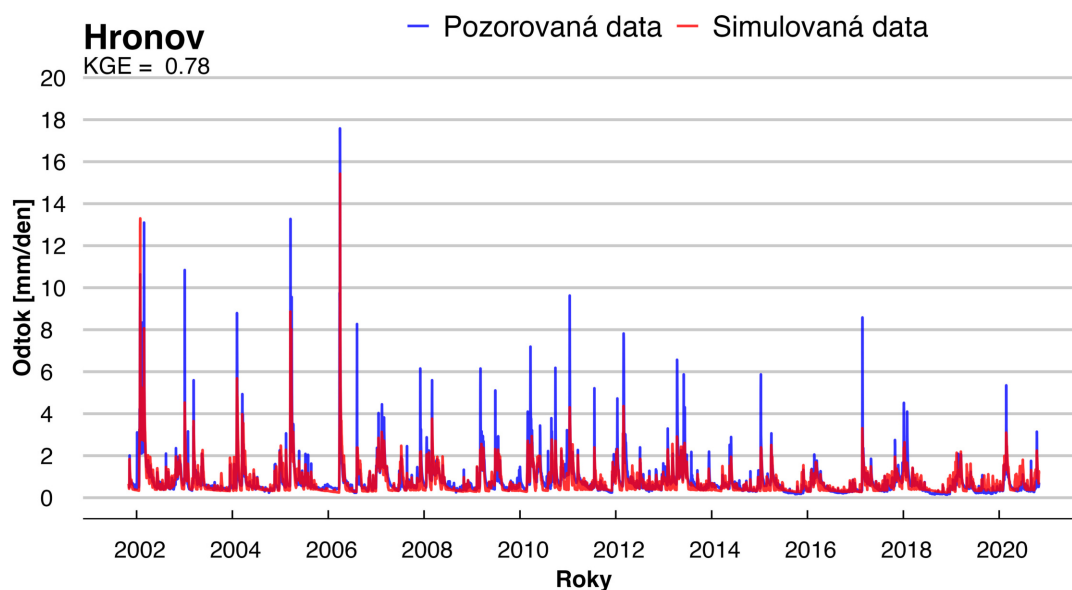
Hodnota KGE při validaci byla 0,76, což je oproti hodnotě při kalibraci podle očekávání pokles.



Obrázek 27: Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem TUW na povodí měrné stanice v Maršově.

6.2.2 Hronov

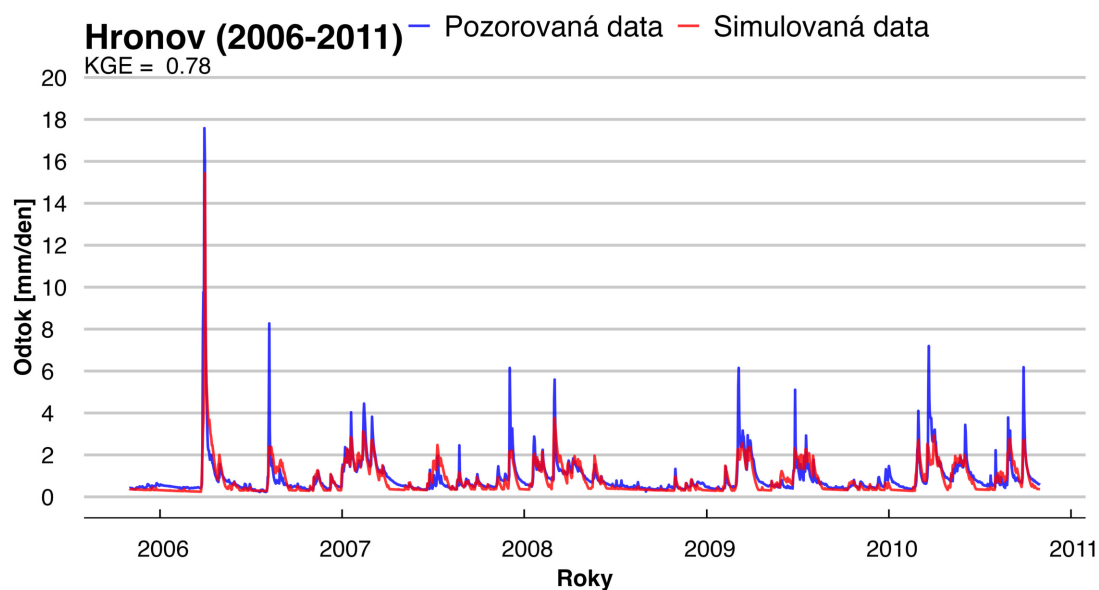
Měrnou stanicí, která byla uzávěrovým profilem druhého subpovodí byla měrná stanice v Hronově. Obrázek 28 zobrazuje odtokové řady při validaci modelu. Na povodí měrné stanice v Hronově opět data vykazují shodu zejména v průměrných hodnotách, dokonce některé náběhy na vyšší průtoky jsou zachyceny lépe než u předchozího povodí.



Obrázek 28: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Hronově.

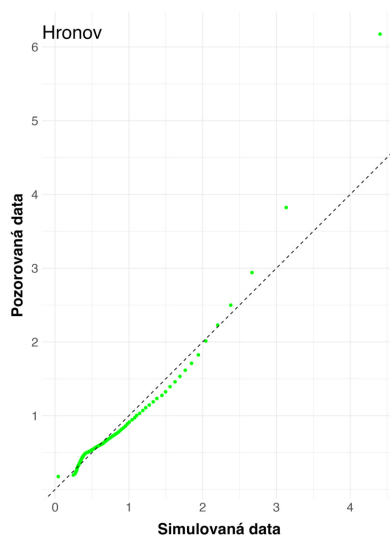
Obrázek 29 zobrazuje pohled na odtokové řady validace modelu mezi lety 2006–2011. Zde je opět patrná shoda ve vysoké hodnotě odtoku na začátku roku 2006. Vysoký průtok v polovině roku 2006 je modelem zaznamenán, avšak velmi silně podhodnocen. Ostatní vyšší hodnoty jsou také systematicky podhodnocené. Průměrné hodnoty model simuloval velmi přesně.

Hodnota KGE je v tomto případě 0,78. Oproti kalibraci je to pokles přibližně o 0,1.



Obrázek 29: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Hronově mezi lety 2006 a 2011.

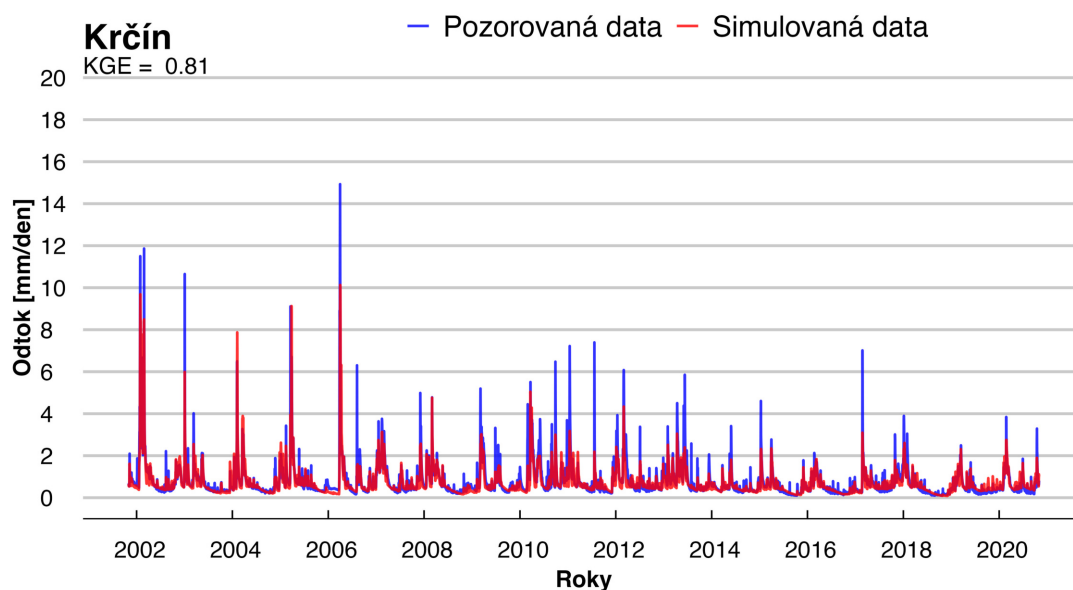
Rankitový graf na obrázku 30 opět zobrazuje porovnání kvantilů pozorovaných a simulovaných dat. V tomto případě jsou zejména průměrné a nižší hodnoty modelem mírně nadhodnoceny.



Obrázek 30: Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem TUW na povodí měrné stanice v Hronově.

6.2.3 Krčín

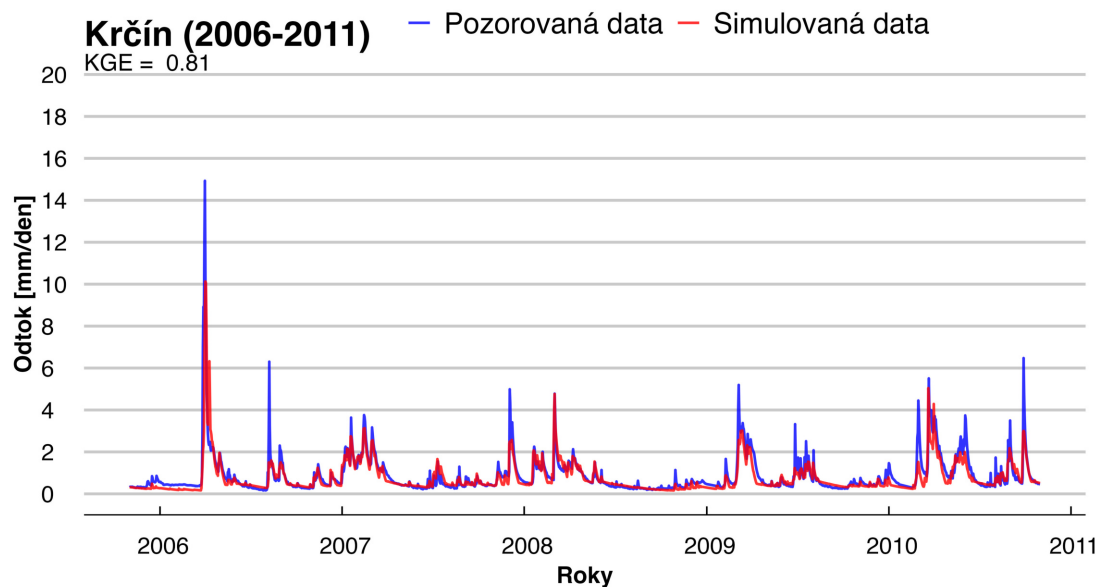
Třetím subpovodím na řece Metuji bylo povodí s uzavěrovým profilem v měrné stanici v Krčíně. Celá validace tohoto subpovodí je zobrazena na obrázku 31, kde je opět patrná velká shoda kromě vyšších hodnot, které jsou opět podobně podhodnoceny. Ostatní data ale vykazují velkou míru shody napříč suchými i vlhkými obdobími.



Obrázek 31: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Krčíně

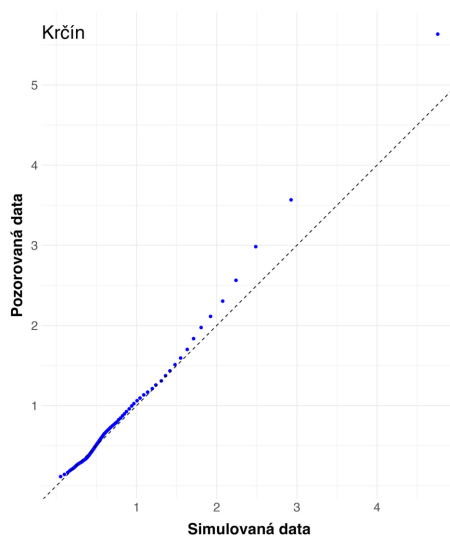
Obrázek 32 zobrazuje opět validaci pouze v období mezi lety 2006 a 2011, kde je mírně podhodnoceně zachycena vysoká hodnota odtoku na začátku roku 2006. Vysoký odtok v druhé polovině roku 2006 je opět téměř nezachycen. Průměrné a mírně vyšší hodnoty jsou v ostatních případech simulovány velmi přesně.

Validace na povodí měrné stanice v Krčíně vykazuje nejlepší výsledky včetně hodnoty KGE, která dosáhla na 0,81.



Obrázek 32: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Krčíně mezi lety 2006 a 2011.

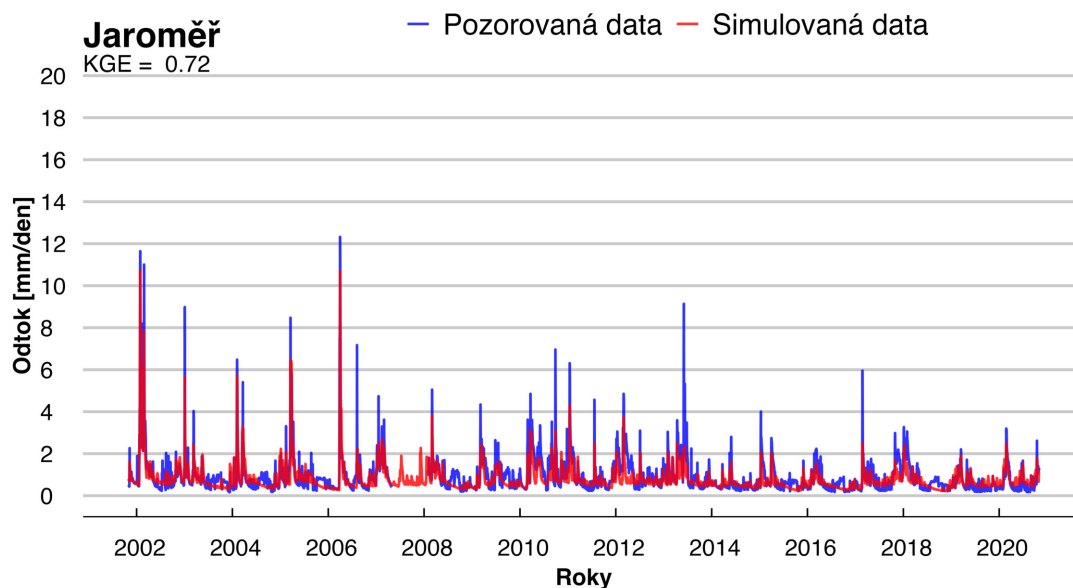
Obrázek 33 zobrazuje srovnání kvantilů pozorovaných a simulovaných dat. I zde je zaznamenána velmi vysoká shoda ve velké části dat. Vyšší hodnoty jsou opět podhodnoceny.



Obrázek 33: Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem TUW na povodí měrné stanice v Krčíně.

6.2.4 Jaroměř

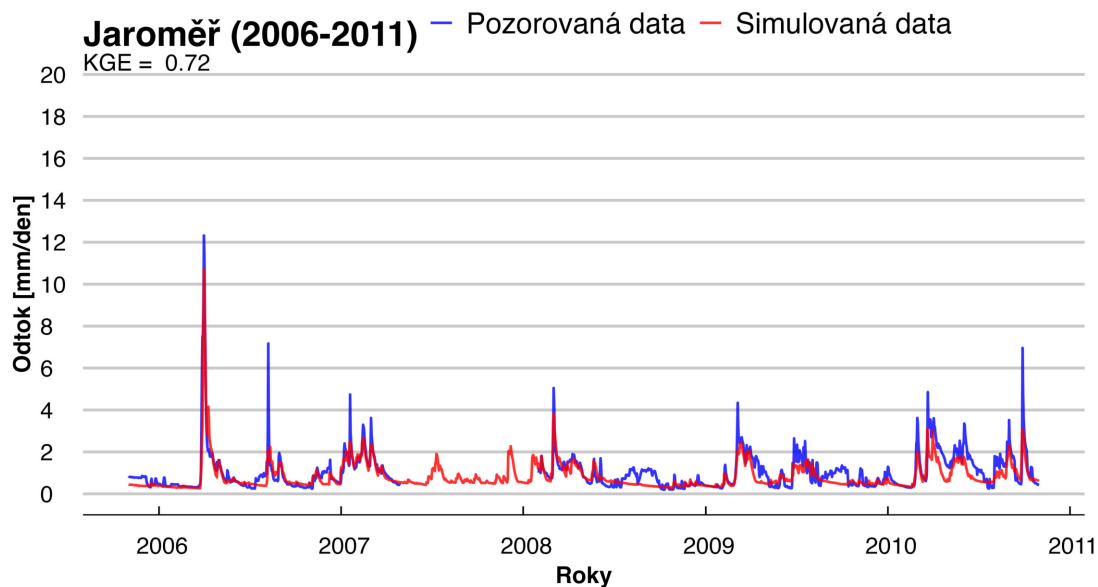
Poslední měrnou stanicí a zároveň uzávěrovým profilem v celém povodí je měrná stanice v Jaroměři. Na výsledek má opět pravděpodobně vliv vodní nádrž Rozkoš. Celkovou validační periodu zobrazuje obrázek 34, kde je patrné lepší simulování vysokých průtoků, ale průměrné a nízké průtoky jsou zachyceny ve srovnání s ostatními povodími hůře.



Obrázek 34: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Jaroměři.

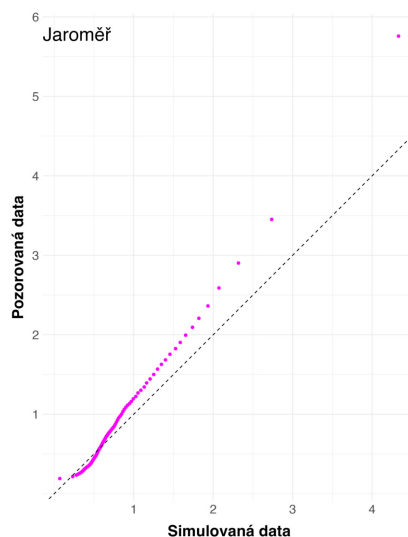
Obrázek 22 opět zobrazuje podrobnější měřítko validace a to mezi lety 2006 a 2011. Zde je vidět dobře zachycený odtok na začátku roku 2006, ale ostatní hodnoty jsou simulovány velmi nepřesně. Období chybějících pozorovaných dat (první polovina roku 2007 až začátek roku 2008) vykazuje dvě mírná zvýšení průtoků, které jsou částečně pozorovaná i na vyšších povodích. Zejména prázdnění povodí probíhá téměř lineárně a model nesimuluje oscilace během sušších období.

Hodnota KGE byla pro validaci pro povodí měrné stanice v Jaroměři nejnižší, a to 0,72.



Obrázek 35: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modelem TUW na povodí měrné stanice v Jaroměři mezi lety 2006 a 2011.

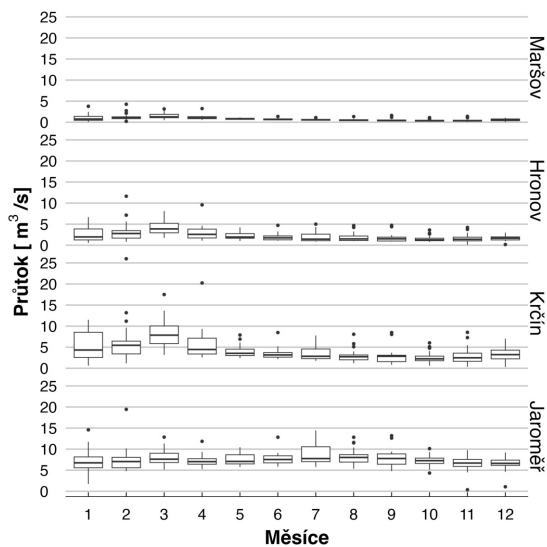
Obrázek 36 zobrazuje srovnání kvantilů pozorovaných a simulovaných dat. Zde je vidět podhodnocení většiny dat, zejména vysokých hodnot.



Obrázek 36: Rankitový graf zobrazující srovnání kvantilů měřených a simulovaných dat modelem TUW na povodí měrné stanice v Jaroměři.

Obrázek 37 zobrazuje simulované průměrné denní průtoky pro jednotlivé měsíce. Z těchto dat je patrný velký rozptyl průtoků na začátku roku. Letní měsíce

se opět pohybují kolem průměrné hodnoty a neobjevují se zde velké letní srážkové události.



Obrázek 37: Krabicový graf modelovaného průtoku modelem TUV v měsíčních průměrných průtocích.

7 Diskuse

Hydrologické modely BILAN a HBV TUW představují funkční a snadno využitelné nástroje pro modelování hydrologické bilance. Jejich výhoda tkví především v jednoduchosti a rychlosti výpočtu, nízkém počtu parametrů a strukturou vstupních dat, která jsou snadno získatelná. Model BILAN se ukázal jako užitečný především při modelování menších jednotek - v tomto případě povodí měrné stanice v Maršově. Podobné vlastnosti vykazoval i model HBV TUW, který prováděl simulace na všech povodích najednou.

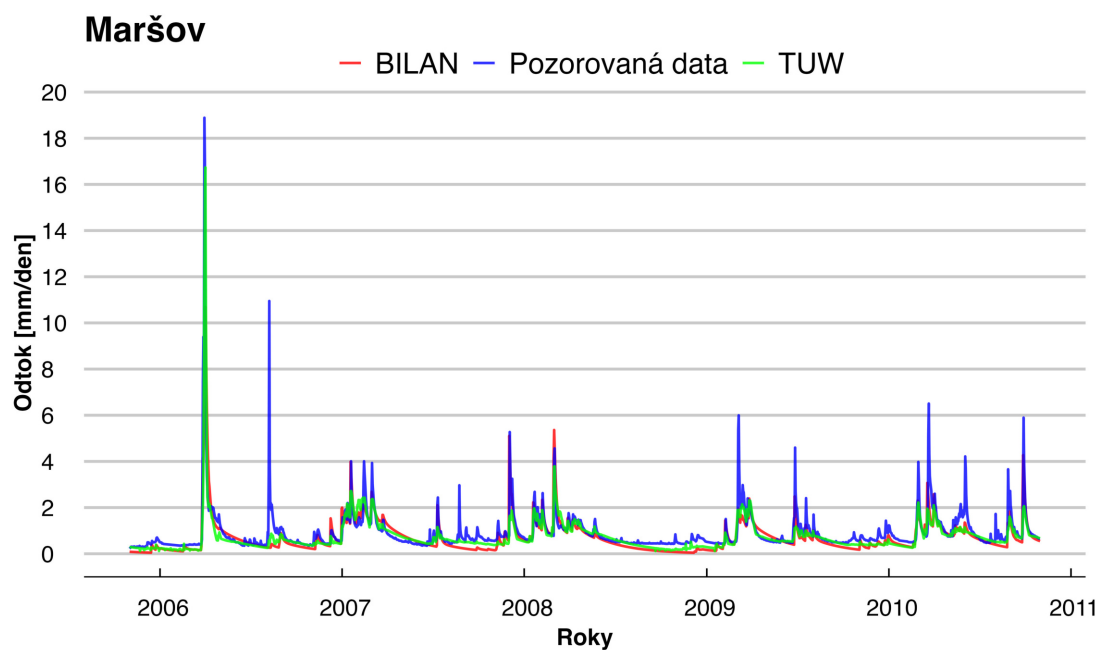
Nepřesné výsledky byly zejména při vyhodnocení povodí měrné stanice v Jaroměři, což v případě modelu BILAN byla simulace pro celé povodí během jednoho běhu modelu. Důvodem těchto nepřesností je pravděpodobně změna vodního režimu způsobená vodní nádrží Rozkoš a tak kvalitní data poskytuje především simulace na výše položených subpovodích Metuje.

Pro dosažení lepších výsledků i přes změny v režimu v důsledku vodních staveb by bylo zapotřebí zanést tyto změny do struktury modelu, a zaznamenávat data o režimu vodních děl ve stejném časovém kroku, jako jsou ostatní vstupní veličiny do modelu.

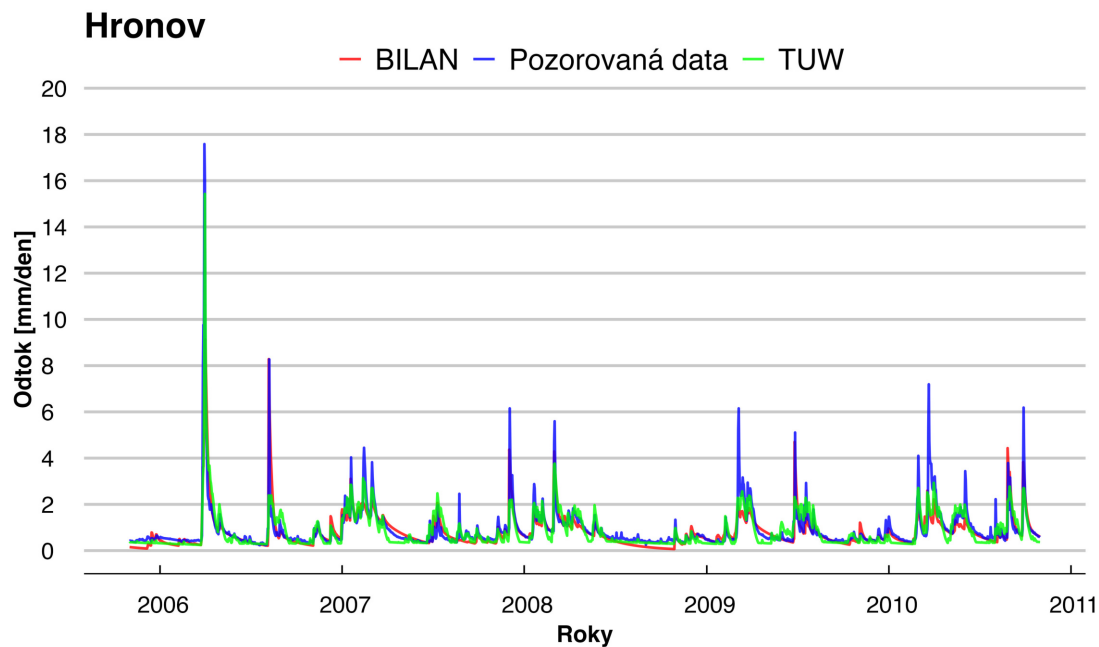
Obrázek 38 zobrazuje validaci modelů na povodí měrné stanice v Maršově v období mezi lety 2006–2011. Zásadní je zde zejména vysoká hodnota na začátku roku 2006 (BILAN tuto událost simuloval na hodnotu 10,7 mm), která byla modelem TUW velmi přesně simulována. Oba modely však tuto událost podhodnotily. V druhé polovině roku 2006 pozorovaná data vykazují opět velmi vysoký průtok kolem 11 mm/den, ale modely tuto skutečnost nezaznamenávají. Obecně je tento trend zaznamenatelný napříč celou validační periodou - vysoké odtoky během jarních měsíců způsobené táním sněhu modely zaznamenávají velmi úspěšně, naopak vysoké hodnoty způsobené letními srážkami mají modely problém zachytit.

Obrázek 39 zobrazuje validaci modelů na povodí v Hronově. Opět zde byly zaznamenány charakteristiky zmíněné u předchozího povodí. BILAN simuloval vysoký odtok na začátku roku 2006 na 9,1 mm/den. v tomto případě se model BILAN ukázal jako schopnější predikovat vysoké letní odtoky. Zejména v létě roku 2006 simuloval odtok s pozorovanou hodnotou kolem 8 mm/den na cca 6

mm/den. TUV tuto událost simuloval mírně přes 3 mm/den.



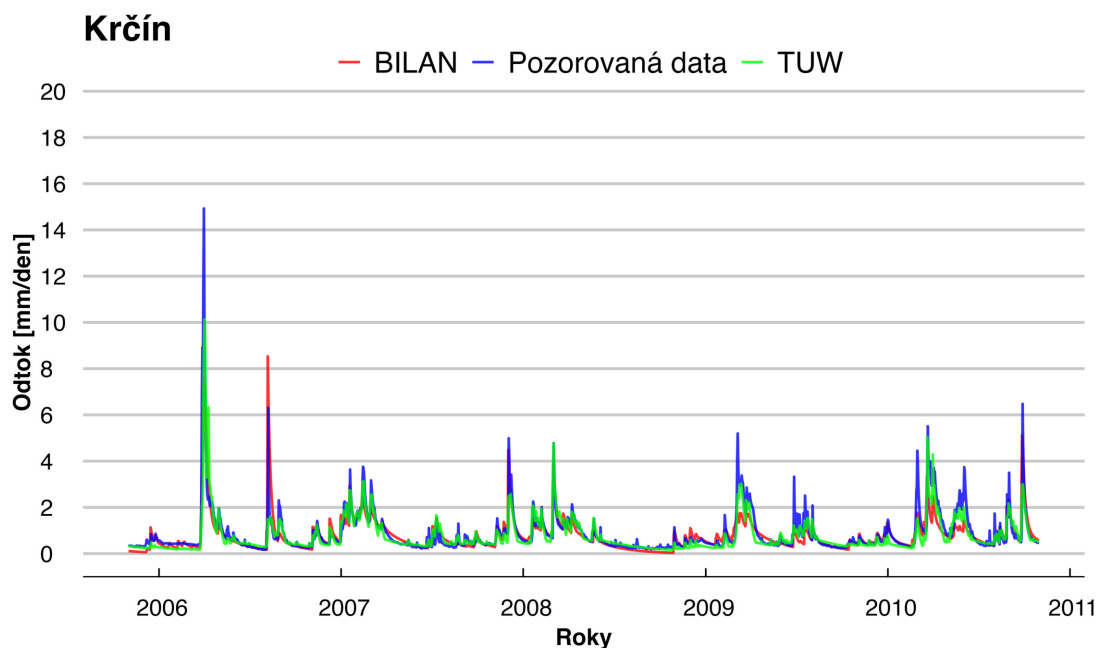
Obrázek 38: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku na povodí měrné stanice v Maršově mezi lety 2006 a 2011.



Obrázek 39: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku na povodí měrné stanice v Hronově mezi lety 2006 a 2011.

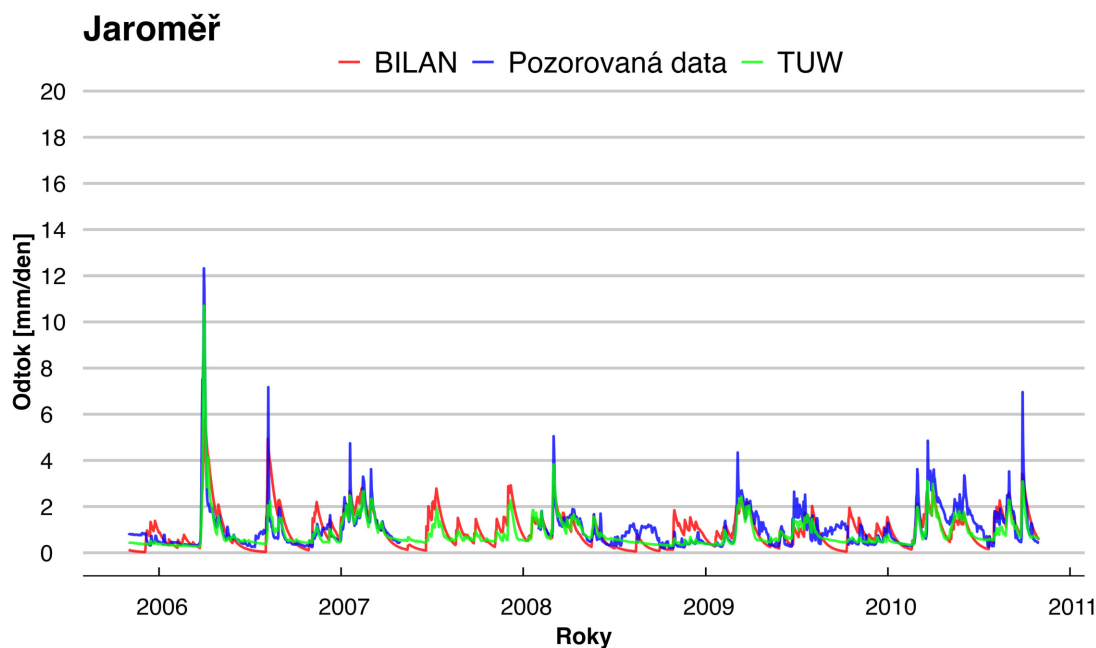
Simulované odtokové řady modely BILAN a TUV vůči řadám pozorovaným na povodí měrné stanice v Krčíně zobrazuje obrázek 40. Zde model BILAN simuloval

vysoký odtok na začátku roku 2006 na hodnotu 7,6 mm/den. Vysokou hodnotu odtoku v létě roku 2006 již model BILAN zachytává úspěšněji, než model TUW.



Obrázek 40: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku na povodí měrné stanice v Krčíně mezi lety 2006 a 2011.

Obrázek 41 zobrazuje časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku modely v uzávěrovém profilu povodí Metuje v Jaroměři. Zde je opět vidět horší výsledek u obou modelů. Vysokou hodnotu na začátku roku 2006 simuloval v tomto případě model BILAN na hodnotu 5,8 mm/den. Naopak druhý vysoký (letní) odtok v roce 2006 model BILAN zaznamenal nejlépe ze všech proběhlých simulací a model TUW opět tuto hodnotu nezaznamenává. Období chybějících dat je oběma modely simulováno velmi podobně a je to jedno ze dvou období, kdy jsou modely v tomto případě ve shodě. V tomto případě simuloval model TUW nižší hodnoty odtoku než model BILAN. Druhé takovéto období zaznamenáváme na začátku roku 2010, kde naopak model TUW simuluje mírně vyšší hodnoty než BILAN. V celkovém měřítku oba modely spíše podhodnocují.



Obrázek 41: Časové řady pozorovaného a simulovaného odtoku na povodí měrné stanice v Jaroměři mezi lety 2006 a 2011.

Obrázek 42 zobrazuje čáry překročení simulovaných a pozorovaných odtoků se zvýrazněním M-denních vod.

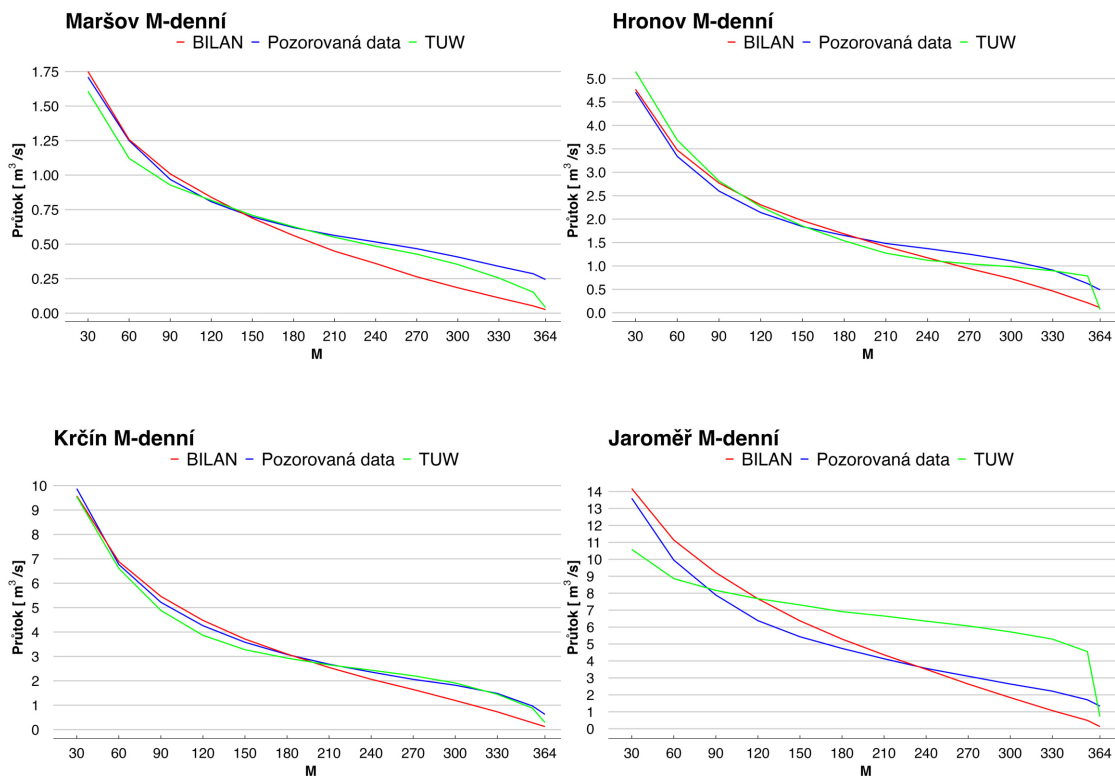
Data z povodí s uzávěrovým profilem v Maršově vykazují velkou shodu zejména v oblasti 90 až 180denní vody. Vyšší průtoky jsou modelem TUW podhodnoceny. Naopak nízké hodnoty mezi 200 až 365denním průtokem podhodnocuje model BILAN. Hodnota Q_{365d} se u modelu BILAN blíží k nule, což způsobuje výše zmíněné prázdnění povodí během suchých období.

Povodí měrné stanice v Hronově je na tom o poznání lépe zejména v oblasti Q_{30d} – Q_{220d} . Nízké hodnoty opět zejména model BILAN podhodnocuje.

Data ze simulací povodí měrné stanice v Krčíně i zde vykazují nejlepší výsledky téměř ve všech hodnotách. Pouze model BILAN opět podhodnocuje nejnižší hodnoty a hodnota průtoků Q_{365d} se opět blíží k nule.

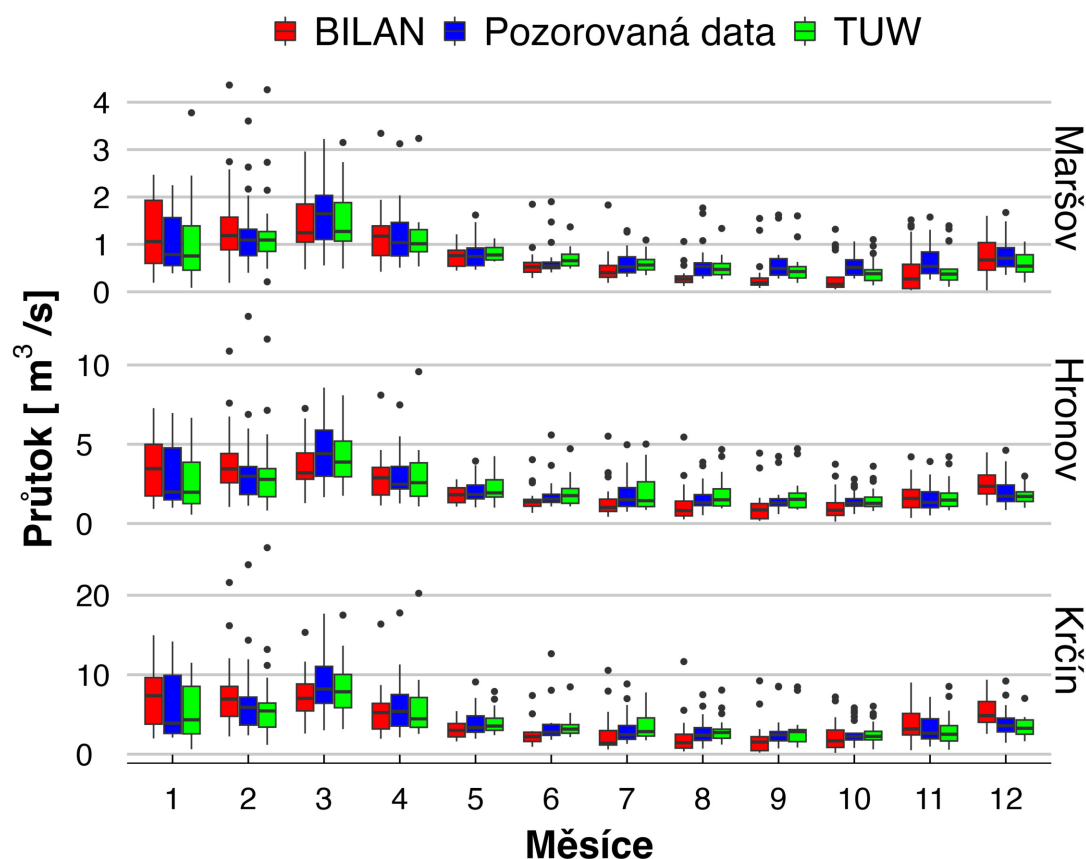
Poslední graf reprezentuje výsledky simulací z uzávěrového profilu celého povodí - Jaroměř. Na tomto grafu jsou velmi dobře vidět nepřesnosti simulací u obou modelů. Oproti ostatním simulacím zde vychází jako lepší model BILAN, který vyšší hodnoty spíše nadhodnocoval a naopak nižší podhodnocoval. Je třeba si ale uvědomit, že je to pouze jedno z možných reprezentování simulovaných dat a při pohledu na obrázek 41 nemusí zdánlivá shoda z obrázku 42 odpovídat. Model

TUW v tomto případě velmi podhodnocuje vysoké průtoky a naopak ty nízké nadhodnocuje až k hodnotě okolo M360.



Obrázek 42: Čáry překročení simulovaných a pozorovaných průtoků se zvýrazněním M-denních vod v jednotlivých měrných stanicích.

Obrázek 43 zobrazuje krabicový graf simulovaných a pozorovaných průtoků. Z grafu je vidět vyšší variabilita dat v zimních a jarních měsících včetně vyššího výskytu vysokých hodnot průtoků. Letní měsíce vykazují i v modelovaných průtocích nižší rozptyl dat s větším výskytem přívalových průtoků.



Obrázek 43: Krabicový graf zobrazující simulované a pozorované odtoky ve stanicích Maršov, Hronov a Krčín.

Hydrologickou bilancí na povodí Metuje se zabývala práce Vizina et al. (2009), která zkoumala vodní bilanci na horní části povodí Metuje. Tato práce se zabývala zejména bilancí podzemních vod v podmínkách klimatické změny. Výzkum také využíval jedinečných hydrogeologických vlastností povodí Metuje, které uplatňuje pro odvozování vztahu mezi povrchovou a podzemní vodou. Předkládaná diplomová práce se věnovala simulacím celkového odtoku z povodí.

Konceptuální modely BILAN a HBV TUW jsou modely s více než dvacetiletou historií a je tak přirozené, že současný vývoj výpočetních technologií bude mít pozitivní vliv na podporu dalšího vývoje hydrologických modelů a jednoduché konceptuální modely se začnou dostávat do pozadí. Právě v rámci centra PE-RUN Technologické agentury České republiky se v současné době vyvíjí nový hydrologický model ScDHRUM. Tento model klade velké nároky na vstupní data a parametry a jejich sběr, popř. výpočet vyžaduje využití současných pokroků např. v oblasti dálkového průzkumu Země (Petr Pavlík, III. 2023, in verb). Tyto

komplikované distribuované modely, jako je ScDHRUM mají ve své struktuře popsáno velké množství dějů, které souvisí s toky vody v půdě, evapotranspirací, pěstovanou plodinou a ovlivňují tak hydrologickou bilanci povodí. Tyto modely tak upouští od konceptuálního vzorce a řadí se spíše už do oblasti modelů fyzikálních.

Právě předkládaná práce poslouží jako zdroj srovnávacích dat výkonnosti jednoduchých konceptuálních hydrologických modelů při testování nového distribuovaného modelu ScDHRUM.

8 Závěr

Diplomová práce na téma „Modelování hydrologické bilance na povodí Metuje“ se zabývala využitím dvou konceptuálních hydrologických modelů za použití stejných vstupních dat, stejných metod optimalizace parametrů a stejných vyhodnocovacích procesů a metrik. Práce prokázala, že strukturně jednoduché modely, jako je BILAN dokáží simulovat odtokové řady s přesností, která je dostatečná pro predikování - obecně - vysokých vodních stavů. Naopak nízké hodnoty odtoku a dlouhodobější suchá období měl model tendenci podhodnocovat. Model TUW se ukázal jako model schopný predikovat drobné změny v hodnotách odtoku i napříč suchým obdobím s malými výkyvy. Lépe také simuloval jarní vysoké průtoky, ale letní přívalové průtoky simuloval obecně hůře než model BILAN.

Ojedinelé vlastnosti povodí Metuje poskytly využití modelů napříč různými podmínkami. Zejména horní část povodí je hydrogeologicky uzavřená, a tak modely poměrně úspěšně simulují odtok v suchých i vlhkých obdobích. Naopak směrem k uzávěrovému profilu povodí se pravděpodobně hydrogeologická uzavřenost částečně rozrušuje, což mimo jiné vede k horšímu výkonu simulací u obou použitých modelů. Práce také ukázala na důležitost zahrnutí režimu vodních staveb do struktury modelu, jelikož další nejistotu do modelování v povodí měrné stanice v Jaroměři pravděpodobně zanesl režim vodní nádrže Rozkoš.

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, výstupy diplomové práce poslouží ke stanovení „benchmark“ simulace (celkového simulovaného odtoku) pro nový model vyvíjený v rámci TAČR Centra PERUN.

Studium hydrologického modelování a praktické využití dvou konkrétních modelů poskytly pochopení této problematiky a její důležitosti v celkovém měřítku vědního oboru hydrologie a environmentálního modelování.

9 Seznam použitých zdrojů a literatury

- Abbott M. B. a Refsgaard J. C.**, 1996. *Distributed hydrological modelling*. Sv. 22. Springer Science & Business Media.
- Al-Sudani Z. A., Salih S. Q., sharafati A. a Yaseen Z. M.**, čvn. 2019. „Development of multivariate adaptive regression spline integrated with differential evolution model for streamflow simulation“. In: *Journal of Hydrology* 573, s. 1–12. ISSN: 00221694.
- Becker A a Serban P**, 1990. „Hydrological models for water-resources system design and operation“. In: *Operational Hydrology Report (WMO)*.
- Bergström S.**, 1976. *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. RHO, Hydrologi och Oceanografi. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:smhi:diva-5738>.
- Beven K.**, 2001. „How far can we go in distributed hydrological modelling?“ In: *Hydrology and Earth System Sciences* 5.1, s. 1–12.
- Beven K.**, 2006. „A manifesto for the equifinality thesis“. In: *Journal of Hydrology* 320.1. The model parameter estimation experiment, s. 18–36. ISSN: 0022-1694.
- ČHMÚ**, 2023a. *Český hydrometeorologický ústav. Územní teploty*. URL: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty/#>.
- 2023b. *Evidence množství povrchových vod*. URL: <https://isvs.chmi.cz/>.
- Coron L., Andréassian V., Perrin C., Lerat J., Vaze J., Bourqui M. a Hendrickx F.**, 2012. „Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments“. In: *Water Resources Research* 48 5. ISSN: 00431397.
- Demek J. et al.**, pros. 2006. *Hory a nížiny. Zeměpisný lexikon ČR*. ISBN: 80-86064-99-9.
- Devia G. K., Ganasri B. a Dwarakish G.**, 2015. „A Review on Hydrological Models“. In: *Aquatic Procedia* 4. INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING (ICWR-COE'15), s. 1001–1007. ISSN: 2214-241X.
- Dowle M. a Srinivasan A.**, 2022. *data.table: Extension of 'data.frame'*. R package version 1.14.6. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=data.table>.

- Duan Q., Sorooshian S. a Gupta V.**, 1992. „Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models“. In: *Water Resources Research* 28 4, s. 1015–1031. ISSN: 19447973.
- Fleetwood K.**, 2004. „An introduction to differential evolution“. In: *Proceedings of Mathematics and Statistics of Complex Systems (MASCOS) One Day Symposium, 26th November, Brisbane, Australia*, s. 785–791.
- Gupta H. V., Kling H., Yilmaz K. K. a Martinez G. F.**, 2009. „Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling“. In: *Journal of Hydrology* 377.1, s. 80–91. ISSN: 0022-1694.
- Henriksen H. J., Troldborg L., Nyegaard P., Sonnenborg T. O., Refsgaard J. C. a Madsen B.**, 2003. „Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark“. In: *Journal of Hydrology* 280.1, s. 52–71. ISSN: 0022-1694.
- Jajarmizadeh M., Harun S. a Salarpour M.**, 2012. „A review on theoretical consideration and types of models in hydrology“. In: *Journal of Environmental Science and Technology* 5.5, s. 249–261.
- Jin X., Xu C. yu, Zhang Q. a Chen Y. D.**, řij. 2009. „Regionalization study of a conceptual hydrological model in Dongjiang basin, south China“. In: *Quaternary International* 208 1-2, s. 129–137. ISSN: 10406182.
- Kavalír V.**, 2020. *HODNOCENÍ ANTROPOGENNÍ MODIFIKACE ŘÍČNÍ SÍŤE POMOCÍ HYDROMORFOLOGICKÉHO PRŮZKUMU NA PŘÍKLADU HORNÍHO TOKU METUJE*. Bakalářská práce. Černčice.
- Kašpárek L.**, 2006. *Vodní zdroje vnitrosudetské pánve. výsledky česko-polské spolupráce při monitoringu a modelování (1975-2004)*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka. ISBN: 80-859-0058-0.
- Kašpárek L., Hanel M., Horáček S., Máca P., Vizina A. a Pavlík P.**, 2020. *bilan: Bilan water balance model*. R package version 2020-06-20.
- Klemeš V.**, 1986. „Operational testing of hydrological simulation models“. In: *Hydrological Sciences Journal* 31.1, s. 13–24. eprint: <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>.

- Knoben W. J. M., Freer J. E. a Woods R. A.**, 2019. „Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 23.10, s. 4323–4331.
- Li C. Z., Wang H., Liu J., Yan D. H., Yu F. L. a Zhang L.**, 2010. „Effect of calibration data series length on performance and optimal parameters of hydrological model“. In: *Water Science and Engineering* 3 4, s. 378–393. ISSN: 16742370.
- Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M. a Bergström S.**, 1997. „Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model“. In: *Journal of Hydrology* 201.1, s. 272–288. ISSN: 0022-1694.
- Liu Y. a Gupta H. V.**, 2007. „Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework“. In: *Water Resources Research* 43.7. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2006WR005756>.
- Machlica A., Horvát O., Horáček S., Oosterwijk J., Van Loon A., Fendekova M. a Van Lanen H.**, lis. 2012. „Influence of model structure on base flow estimation using BILAN FRIER and HBV-light models“. In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 60, 242–251.
- Mapy.cz**, 2023. *Mapy.cz*. URL: <https://mapy.cz/zakladni?q=adrÅapaÅqskÅj\%20vodopÅqd\&x=16.1143102\&y=50.6108315\&z=16>.
- Mauricio Zambrano-Bigiarini**, 2020. *hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series*. R package version 0.4-0. DOI: 10.5281/zenodo.839854. URL: <https://github.com/hzambran/hydroGOF>.
- Merz R. a Blöschl G.**, 2004. „Regionalisation of catchment model parameters“. In: *Journal of hydrology* 287.1-4, s. 95–123.
- Mitchell M.**, 1998. *An introduction to genetic algorithms*. MIT press.
- Mizukami N., Rakovec O., Newman A. J., Clark M. P., Wood A. W., Gupta H. V. a Kumar R.**, čvn. 2019. „On the choice of calibration metrics for "high-flow" estimation using hydrologic models“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 23 6, s. 2601–2614. ISSN: 16077938.

- Motavita D., Chow R., Guthke A. a Nowak W.**, 2019. „The comprehensive differential split-sample test: A stress-test for hydrological model robustness under climate variability“. In: *Journal of Hydrology* 573, s. 501–515. ISSN: 0022-1694.
- Mullen K., Ardia D., Gil D. L., Windover D. a Cline J.**, 2011. „DEoptim: An R package for global optimization by differential evolution“. In: *Journal of Statistical Software* 40.6, s. 1–26.
- Máca P.**, 2014. *Hydrologie pro bakaláře*. Praha.
- 2015. *Hydrologické modely a automatická optimalizace parametrů*. Habilitační práce. Praha.
- Nash J. E. a Sutcliffe J. V.**, 1970. *Not to be reproduced by photoprint or microfilm without written permission from the publisher RIVER FLOW FORECASTING THROUGH CONCEPTUAL MODELS PART I-A DISCUSSION OF PRINCIPLES**, s. 282–290.
- Normand S, Konz M a Merz J**, 2011. „An application of the HBV model to the Tamor Basin in Eastern Nepal“. In: *Journal of Hydrology and Meteorology* 7.1, 49–58.
- Opara K. R. a Arabas J.**, ún. 2019. „Differential Evolution: A survey of theoretical analyses“. In: *Swarm and Evolutionary Computation* 44, s. 546–558. ISSN: 22106502.
- Pavlík P.**, 2017. *Využití optimalizačního algoritmu BBO při modelování hydrologické bilance modelem Bilan*. Diplomová práce. ČZU v Praze.
- Perrin C., OUDIN L., ANDREASSIAN V., ROJAS-SERNA C., MICHEL C. a MATHEVET T.**, 2007. „Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall—runoff models“. In: *Hydrological Sciences Journal* 52.1, s. 131–151. eprint: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.131>.
- Povodí Labe**, 2009. *Vodní dílo Rozkoš*. URL: https://www.pla.cz/planet/public/vodnidila/prehrada_rozkos.pdf.
- Quitt E.**, 1971. *Klimatické oblasti Československa. Climatic regions of Czechoslovakia*. Brno: Geografický ústav ČSAV.

- Refsgaard J. C.**, 1997. „Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models“. In: *Journal of Hydrology* 198.1, s. 69–97. ISSN: 0022-1694.
- Řezáč B.**, 1955. *Terasy řeky Metuje a tabulová plošina adršpašsko-teplická*. Praha: Československá akademie věd.
- Ruelland D., Ardoin-Bardin S., Billen G. a Servat E.**, 2008. „Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa“. In: *Journal of Hydrology* 361.1, s. 96–117. ISSN: 0022-1694.
- Seibert J.**, srp. 1997. „Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model: Paper presented at the Nordic Hydrological Conference (Akureyri, Iceland - August 1996)“. In: *Hydrology Research* 28.4-5, s. 247–262. ISSN: 0029-1277. eprint: <https://iwaponline.com/hr/article-pdf/28/4-5/247/140906/247.pdf>.
- 2003. *Reliability of Model Predictions Outside Calibration Conditions*, s. 477–492. URL: <http://iwaponline.com/hr/article-pdf/34/5/477/5814/477.pdf>.
- Shen H., Tolson B. A. a Mai J.**, břez. 2022. „Time to Update the Split-Sample Approach in Hydrological Model Calibration“. In: *Water Resources Research* 58 3. ISSN: 19447973.
- Šindlar M.**, 2012. *Geomorfologické procesy vývoje vodních toků*. Vyd. 2. Hradec Králové: Šindlar Group. ISBN: 978-802-5424-452.
- Thoen E.**, 2022. *padr: Quickly Get Datetime Data Ready for Analysis*. R package version 0.6.2. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=padr>.
- Tolasz R.**, 2007. *Atlas podnebí Česka. Climate atlas of Czechia*. Praha: Český hydrometeorologický ústav. ISBN: 978-80-244-1626-7.
- Tran Q. Q., De Niel J. a Willems P.**, 2018. „Spatially Distributed Conceptual Hydrological Model Building: A Generic Top-Down Approach Starting From Lumped Models“. In: *Water Resources Research* 54.10, s. 8064–8085. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018WR023566>.

- Van Loon A. et al.**, čvc. 2011. *Propagation of drought through the hydrological cycle*.
- Viglione A. a Parajka J.**, 2020. *TUWmodel: Lumped/Semi-Distributed Hydrological Model for Education Purposes*. R package version 1.1-1. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=TUWmodel>.
- Vizina A., Hanel M., Trnka M. a Daňhelka J.**, 2018. *HAMR: online systém pro zvládání sucha-operativní řízení během suché epizody*. URL: <http://lapv.vuv.cz..>
- Vizina A., Horáček S., Hanel M. et al.**, 2015. „Nové možnosti modelu Bilan“. In: *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* 57.4–5, s. 7–10.
- Vizina A., Kašpárek L., Kněžek M., Kašpárek J., Uhlík J., Fridrichová R., Rakovec O. a Horáček S.**, 2009. *Vodní bilance v podmínkách klimatické změny v povodí horní Metuje*. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka. ISBN: 9788085900941.
- Vrugt J. A., Gupta H. V., Bouten W. a Sorooshian S.**, 2003. „A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters“. In: *Water resources research* 39.8.
- Wagener T., Wheater H. a Gupta H. V.**, 2004. *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. World Scientific.
- Wickham H. et al.**, 2019. „Welcome to the tidyverse“. In: *Journal of Open Source Software* 4.43, s. 1686.
- Yapo P. O., Gupta H. V. a Sorooshian S.**, 1996. „Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data“. In: *Journal of Hydrology* 181.1, s. 23–48. ISSN: 0022-1694.