

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**



**Stanovení parametrických sad pro hydrologický model
GR4J**

Parameter estimation of hydrological model GR4J

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Havlíček, Ph.D
Bakalant: Jiří Štěch

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Štěch

Územní technická a správní služba

Název práce

Stanovení parametrických sad pro hydrologický model GR4J

Název anglicky

Parameter estimation of hydrological model GR4J

Cíle práce

Cílem práce je stanovit parametrické sady pro model GR4J na vybraných pozorovaných povodích v ČR.

Metodika

Literární rešerše věnovaná konceptuálním hydrologickým modelům, a konkrétně modelu GR4J.

Zajištění vstupních dat.

Kalibrace modelu na vybraných povodí.

Ověření simulační účinnosti modelu.

Doporučený rozsah práce

30 s.

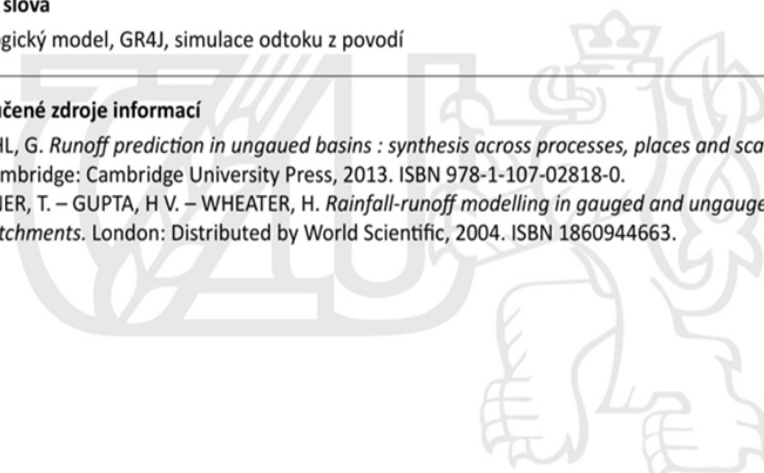
Klíčová slova

hydrologický model, GR4J, simulace odtoku z povodí

Doporučené zdroje informací

BLÖSCHL, G. *Runoff prediction in ungauged basins : synthesis across processes, places and scales.* Cambridge: Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-1-107-02818-0.

WAGENER, T. – GUPTA, H V. – WHEATER, H. *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments.* London: Distributed by World Scientific, 2004. ISBN 1860944663.



Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vojtěch Havlíček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2019

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 25. 04. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Havlíčka, Ph.D. a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Ústí nad Labem 25.4.2019

.....

Poděkování

Děkuji touto cestou vedoucímu bakalářské práce Ing. Vojtěchovi Havlíčkovi Ph.D. za ochotu a věcné a jasné připomínky a rady, kterými přispěl k vypracování předkládané bakalářské práce. Děkuji také své rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

V Ústí nad Labem 25.4.2019

ABSTRAKT

Bakalářská práce je věnována stanovení parametrů modelu GR4J na vybraných povodích v ČR. V rámci zpracování byla provedena literární rešerše zaměřená na vývoj hydrologického modelování, klasifikaci hydrologických modelů podle jednotlivých hledisek a konkrétně se v detailu věnuje modelu GR4J. Vlastním výstupem práce je pak seznam povodí s odvozenými parametry modelu GR4J pro každé konkrétní povodí. V praktické části byla provedena i jednoduchá analýza výsledků.

Klíčová slova: hydrologický model, GR4J, simulace odtoku z povodí.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the determination of the GR4J model parameters on selected river basins in the Czech Republic. Within the framework of the work, a literature review was carried out focused on the development of hydrological modeling, classification of hydrological models according to individual aspects, and specifically the GR4J model in detail. The actual output of the work is then a list of river basins with derived GR4J model parameters for each specific river basin. In the practical part, a simple analysis of the results was carried out.

Keywords: hydrological model, GR4J, simulation of drainage from basin.

OBSAH

1. ÚVOD.....	8
2. CÍLE PRÁCE	9
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	10
3.1 Vývoj hydrologického modelování	10
3.2 Hydrologické modelování	12
3.3 Hydrologický model	13
3.4 Klasifikace hydrologických modelů	14
3.5 Použití hydrologických modelů:	19
3.6 Konceptuální modely.....	20
3.6.1. Kalibrace modelu.....	21
3.6.2. Validace modelu	22
3.6.3. Kriteriaální funkce.....	22
3.6.4. Přehled nejznámějších konceptuálních hydrologických modelů	23
3.7. Hydrologický model GR4J.....	25
4. VÝSLEDKY A DISKUZE.....	32
5. ZÁVĚR.....	38
6. SEZNAM ZKRATEK	39
7. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
8. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	44
9. PŘÍLOHY	44

1. ÚVOD

Hydrologie je vědní obor, který se systematicky zabývá zkoumáním procesu oběhu, výskytu, časoprostorového rozložení zásob vody na Zemi, jejího vzájemného působení s živými a neživými faktory se zřetelem na její fyzikální, chemické a biologické vlastnosti (Slavík, Neruda, 2007).

Hydrologický cyklus je základním pilířem fungování všech biogeochemických cyklů. Je to neustálý oběh povrchové a podzemní vody na zemi, který prochází změnami skupenství, účinkem slunečního záření, zemské gravitace a rotace. Hydrologický cyklus neprobíhá jen na globální úrovni, ale probíhá také v prostorově menších jednotkách. Základní hydrologickou prostorovou jednotkou je povodí. Transformace srážek na odtok z povodí je jednou ze základních otázek, na které hydrologie hledá odpovědi.

V souvislosti hydrologickým cyklem vyvstává řada otázek (ryze praktického charakteru) což mohou být otázky jak postupovat při návrhu vodních staveb, provozování vodních děl, k prognózám o budoucím vývoji povodí, nebo třeba kde stavět, nebo nestavět dům. Ale můžeme se ptát například, jaký vliv na hydrologický cyklus může mít odlesnění území, můžeme se ptát, jaký vliv budou mít klimatické změny na hydrologický cyklus. Obecně tedy platí, pokud je vody hodně, nebo málo tak tyto situace můžou drastický vliv na naše životy a je tedy v našem zájmu je umět předpovídat.

Hydrologické procesy jsou ovlivňované řadou vzájemně spolupůsobících příčinných (deterministických) a nahodilých (stochastických) faktorů, každé jejich popisování či modelování předpokládá jistou míru zjednodušení celého procesu (Hrádek, Kuřík, 2002).

Hydrologický model je zjednodušená reprezentace hydrologického cyklu, nebo jeho části. Vždy platí, že je to reprezentace zjednodušená, protože hydrologický cyklus je velmi složitý a komplexní popis všech procesů, které se v tomto cyklu odehrávají, není možný. Nicméně je ale podstatné to, aby hydrologický model uměl vystihnout důležité parametry, na které se ptáme.

Obecně lze říci, že matematický hydrologický model znázorňuje kvantifikovaný vztah mezi stavovými veličinami vstupu a výstupu systému (Daňhelka et al., 2003).

Hydrologické modely jsou v současnosti téměř vždy implementovány v podobě počítačového programu.

Tato bakalářská práce se věnuje oblasti hydrologického modelování a to v podobě teoretické i praktické.

Literární rešerše této práce obecně popisuje dosavadní poznatky, problematiku hydrologického modelování, detailněji se zabývá konceptuálními modely a to konkrétně modelem GR4J ([https:// hydrogr.github.io/airGR/](https://hydrogr.github.io/airGR/)) a jejich jednoduchou analýzu.

Praktická část je zaměřena na stanovení parametrických sad pro hydrologický model GR4J v programovacím prostředí R (<http://www.r-project.org/>).

2. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce bylo stanovit parametrické sady pro hydrologický model GR4J na vybraných pozorovaných povodích ČR z projektu HAMR: online systém pro zvládání sucha – operativní řízení během suché epizody | VTEI. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace [online]. Copyright © 2019 [cit. 08. 04. 2019]. Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2018/10/hamr-online-system-pro-zvladani-sucha-operativni-rizeni-behem-suche-epizody/>.

V rámci bakalářské práce byla také zpracována literární rešerše věnovaná konceptuálním hydrologickým modelům, a konkrétně modelu GR4J.

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 Vývoj hydrologického modelování

Počátek hydrologického modelování se datuje od druhé poloviny 19. století, jako touha tehdejších inženýrů vyřešit technické problémy, zejména při projektování nádrží, městské kanalizace a odvodnění půdy. Jako hlavní cíl těchto experimentů bylo posoudit dostatečnou kapacitu zařízení (Todini, 1988).

Mnoho z těchto počátečních modelů bylo, založeno na velmi jednoduchých principech a předpokladech co se týče stanovení odtoku z povodí, ale některé modely již používaly Mulvaneyho racionální metodu, která se znalostí srážkového úhrnu, rozlohy povodí a empirického odtokového koeficientu dokáže odhadnout kulminační průtok (Beven, 2001).

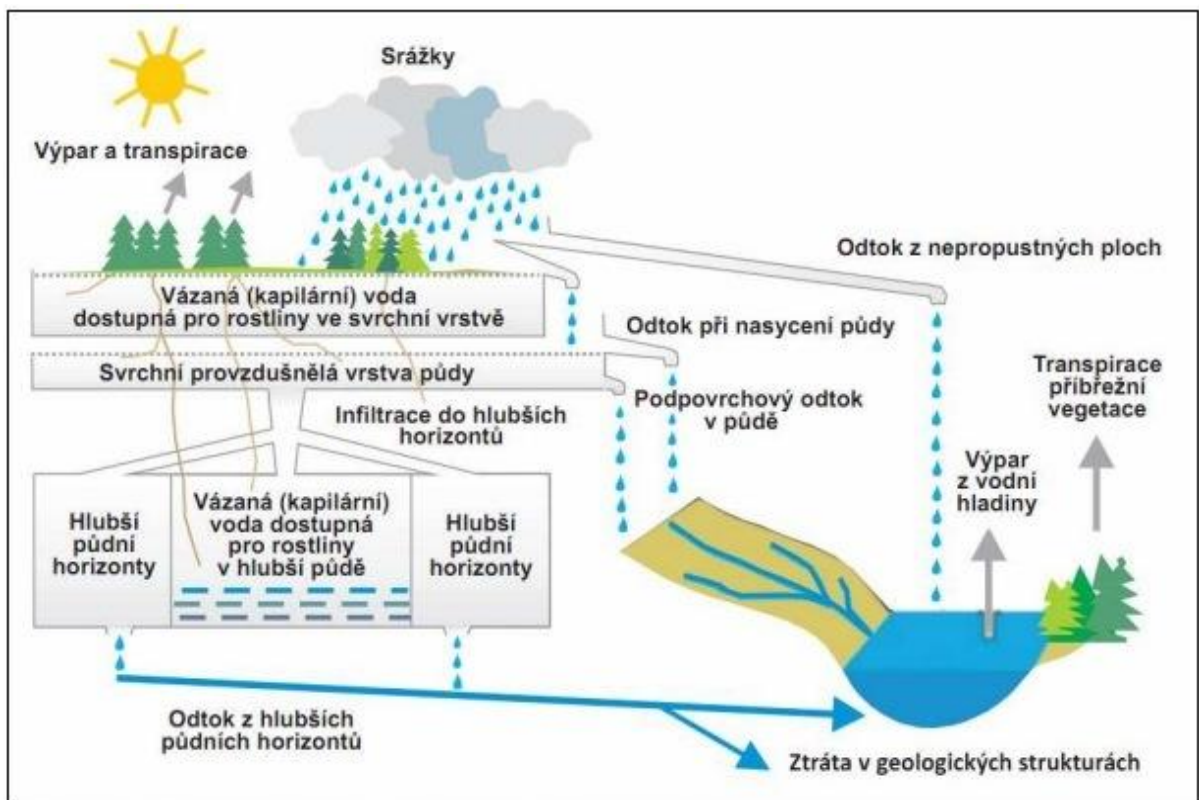
Významným přínosem v oblasti hydrologického modelování bylo uvedení konceptu takzvaného jednotkového hydrogramu, který v roce 1932 představil Leroy Sherman, který pracuje na principu superpozice a časově invariance. Tento jednotkový hydrogram je hypotetická reakce povodí na jednotkový efektivní déšť, která je vždy stejná pro déšť dané doby trvání. Jednotkový hydrogram se stal na dlouhou dobu jedním ze základních nástrojů hydrologického modelování, byl rozvíjen a používán v mnoha variantách. (Singh, Frevert, 2002).

Dalším důležitým mezníkem v roce 1933 v oblasti hydrologického modelování byla práce Roberta E. Hortona (často nazývaný otcem americké hydrologie), kde představil myšlenku konceptu nadměrné infiltrace. V momentě překročení infiltrační kapacity půdy působením intenzivních srážek dochází k exponenciálnímu snížení infiltrační rychlosti. Vyčerpání infiltrační kapacity a snížení infiltrační rychlosti pod kritickou úroveň pak v konečném důsledku vede k vytvoření povrchového odtoku. Některé jednoduché pojmy konceptu nadměrné infiltrace byly časem nahrazeny, ale studiem Hortonových osobních archivů bylo prokázáno, že jeho perceptuální model infiltračních procesů a hodnocení problémů v modelování bylo mnohem sofistikovanější a dokonalejší než zjednodušené verze, které publikoval ve své době ve vědeckých časopisech. Jeho porozumění povrchového vlivu infiltrace zůstává i v dnešní době významná (Beven, 2004).

Převrat v hydrologickém modelování přinesl rozvoj výpočetní techniky v padesátých letech minulého století, což poskytlo modelovat složité problémy jako jeden kompletní systém. Prvním hydrologickým modelem, který použil výhod výpočetní techniky, byl model Stanford Watershed Model (SWM) vyvinutý Stanfordskou universitou v 60. letech. SWM představuje významný mezník v historii hydrologického modelování. SWM byl první pokus modelování hydrologického cyklu v povodí. V roce 1952 začalo Hydrological Engineering Center patřící pod U. S. Army Corps of Engineers realizovat rozsáhlý výzkum povodí Missouri a konci 60. let představila model HEC-1 (Todini, 1988).

V roce 1976, se tři evropské organizace, jmenovitě Britský Institut Hydrologie, Dánský Hydraulický Institut a Francouzská Poradenská Společnost SOGREAH s finanční podporou Komise Evropského Parlamentu spojili k vývoji plně distribuovaného fyzikálně založeného hydrologického modelu SHE (European Hydrologic System) který začal fungovat v roce 1983 (Abbott et al., 1986b).

Dalšími význačnými modely jsou MIKE SHE a SHETRAN, které vznikly z hydrologického modelu SHE a model SACRAMENTO (SAC-SMA), který náleží mezi nejznámější a nejrozšířenější modely ve světě. Původně byl vyvinut pro národní meteorologickou službu Spojených států a stát Kalifornie a je též používán Českým hydrometeorologickým ústavem (schéma srážkoodtokového procesu v modelu Sacramento je na obr. 1). Jde o koncepčně fyzikální model založený na zákonitostech pohybu vody v povodí. Model používá soustavu vertikálně a horizontálně posloupných zón. Voda vstupující do soustavy v podobě srážek je v jednotlivých zónách buď zadržována, odčerpávána vegetací při evapotranspiraci, infiltruje se v soustavě do níže položených zón, nebo odtéká do říční sítě.



Obrázek 1: Schéma srážkoodtokového procesu v modelu SACRAMENTO (CHMÚ, 2012)

Úspěch modelu je závislý na přesnosti vstupních dat a na dobré kalibraci hodnot parametrů, které je možné v případě nutnosti dále upravovat. Tento model je v nepřetržitém provozu ČHMÚ řízen v hodinovém výpočetním cyklu. Vstupní data jednotlivých zón jsou přenášena mezi jednotlivými výpočty modelu, kde je prováděna jejich interaktivní optimalizace na základě přizpůsobení sledovaných průtoků (Daňhelka, 2007).

V průběhu let vývoj směřoval od empiricky založených hydrologických modelů k hydrologickým modelům s fyzikálním základem, od celistvých modelů k modelům distribuovaným. Současně s vývojem v oblasti výpočetní techniky se zlepšují i nástroje pro modelování geoinformačních systémů a zvyšuje se kvalita digitálních prostorových dat (Daňhelka et al., 2003). Problémem však zůstává, do jaké míry jsou hydrologické modely schopné lepších předpovědí. Čím složitější hydrologický model tím více má variabilních parametrů, které se musí nastavit, což sebou přináší komplikovanější systém kalibrace a větší míru nejistoty modelu. Obecně tedy platí, že model může být jen tak dobrý, jak kvalitní jsou data, se kterými pracuje (Beven, 2001).

Vývoj neprovází jen hydrologické modely, ale též přístupy k objektu modelování. Jak zmiňuje Wagener et al. (2010) by se měla budoucnost zaměřit na chápání z pevného hydrologického systému na proměnný. Důraz na problematiku hydrologických dat, která jsou v časové ose proměnná, popisuje také Hladný a Miklánek (2010).

V současnosti se hydrologické modely používají na mnoha specializovaných pracovištích České republiky (Akademie věd České Republiky, Český hydrometeorologický ústav, Výzkumný ústav vodohospodářský) a univerzitních pracovištích (Česká zemědělská univerzita). Problematikou hydrologických modelů zabývá řada českých autorů například Buchtele (2002A, 2002B), Daňhelka et al (2003), Kulhavý a Kovář (2000), ale největší těžiště výzkumu a vývoje spočívá v zahraničí především v pracích Bevena (1996, 2001), Bergströma (1995), Blöschla a Graysona (2002), Resfgaarda a Storma (1996), Smithe et al. (2004), kteří uplatnili nejrůznější hydrologické modely a osobitě tím přispěli k rozvoji vědeckého postupu popisující srážko-odtokový proces. Toto úsilí dokazuje, že hlavní těžiště spočívá v přesnějším zpracování vstupních dat srážek a důležitý prostor je věnován postupu kalibrace modelu. Podstatné je také vyvíjení metod popisující model půdní vlhkosti. Mnoho z těchto i minulých přístupů je obsaženo v metodikách a doporučeních WMO (World Meteorological Organisation), kupříkladu Becker, Serban (1990), nebo WMO (1993), (Jeníček 2005).

3.2 Hydrologické modelování

V současné době se hydrologické modelování prezentuje jako jedna z nejpoužívanějších metod hodnocení potenciálních srážko-odtokových událostí. Hlavní výzvou hydrologického modelování je umět vyjádřit odezvu povodí z hlediska svého proměnlivého stavu a charakteristiky. To však vyžaduje vymezení podmínek, za kterých je možné začlenit neurčitý hydrologický systém do určité rovnovážné rovnice (Reggiani et al., 2000). Hlavní překážkou hydrologického modelování je však nedostatek vhodné měřicí techniky, která brání identifikaci mechanismů, které jsou základem srážko-odtokového procesu (Beven, 2006).

Při použití libovolného hydrologického modelu by měl být jeho uživatel seznámen s jeho předpoklady a omezeními. Taktéž s výstupními údaji je třeba zacházet s opatrností, neboť nejistoty v určení vstupních parametrů se mohou dramaticky

podepsat na výstupech modelu. Proto je vhodné vždy, když je to možné, nejistoty v modelování snížit jednou z následujících metod (Kavka et al., 2018).

- kalibrací modelu na pozorovaných událostech.
- analýzou nejistot, tj. modelování více srážko-odtokových scénářů s různými kombinacemi vstupních parametrů z rozumně definovaného intervalu.
- kalibrací modelu na jinak získané syntetické hydrogramy, např. zakoupené u ČHMÚ.

Modelovaný systém je popisován:

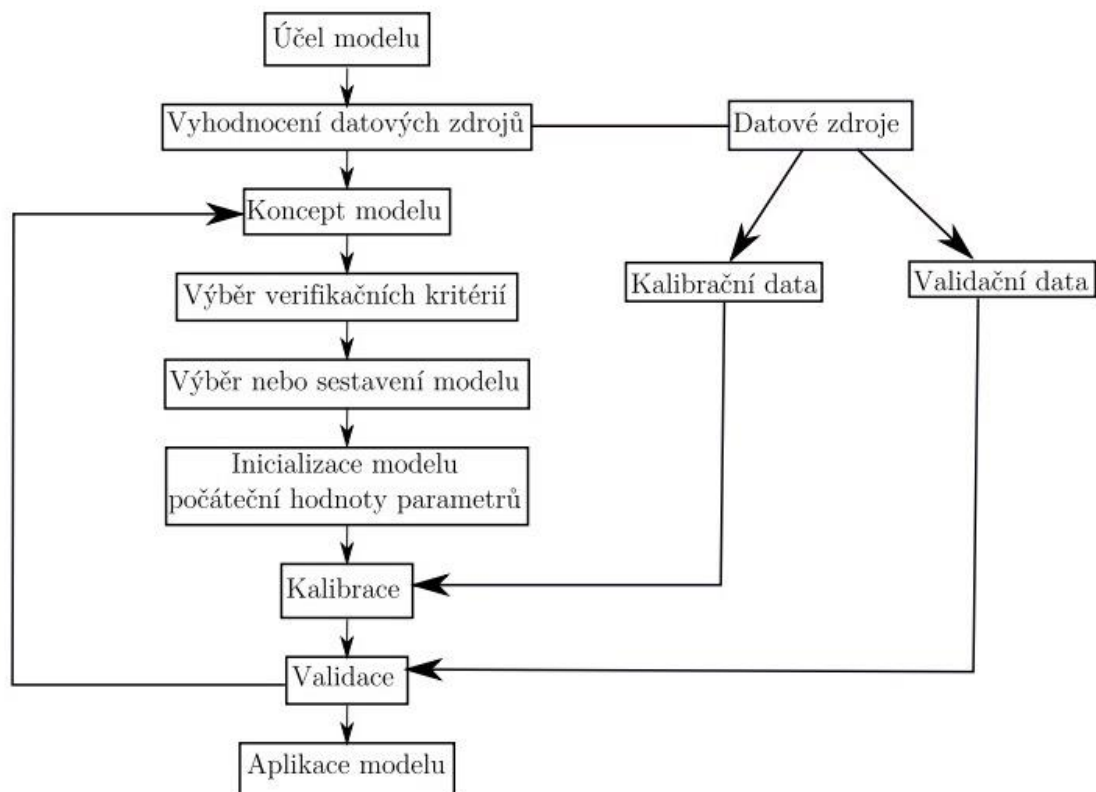
- vstupními daty – vstup vody do povodí – zejména srážky (P)
- výstupními daty – výstup vody z povodí zejména evaporace (E) a transpirace (T), souhrnně nazývané evapotranspirace (ET) a celkový odtok vody (Q).

Tyto charakteristiky pak definují tzv. hydrologickou bilanci systému.

3.3 Hydrologický model

Sorooshian et al. (2008) definují hydrologický model jako zjednodušenou reprezentaci hydrologických procesů v reálném světě. Modely se používají hlavně pro předpovídání chování povodí v různých extrémních situacích a také k pochopení různých hydrologických procesů. Model se skládá z různých parametrů, které definují charakteristiky modelu. Nejlepší model je ten, který znázorňuje výsledky co nejbližší k realitě s použitím co nejmenších parametrů a složitosti modelu. Model odtoku může být formulován jako soubor rovnic, které pomáhají při odhadu odtoku jako funkce různých parametrů používaných pro určitou velikost a tvar povodí. Nejdůležitějšími vstupními údaji požadovanými u většiny modelů jsou informace o srážkách, potenciální evapotranspiraci a celkovém odtoku vody. Dalšími vstupy mohou být vlastnosti půdy, vegetační pokryv, topografie povodí, obsah půdní vlhkosti atd. Hydrologické modely našly své využití při řešení nejrůznějších hydrologických úkolů od vodohospodářského plánování, přes povodňové předpovědi po modelování kvality vod a slouží jako nástroj pro plánování hospodaření s vodními zdroji.

Při každém výběru modelu hraje nezanedbatelnou roli také osobní zaujatost (Singh, Frevert, 2002) a předchozí znalosti a zkušenosti uživatele. Platí totiž jednoznačně, že fyzikálně výstižný komplexní model může poskytnout spolehlivější výsledky, je-li v rukou zasvěceného odborníka (Buchtele, 2002A).



Obrázek 2: Obecné schéma hydrologického modelu (Dingman, 2002)

3.4 Klasifikace hydrologických modelů

Obecně a jednoduše by se dali klasifikovat hydrologické modely jako black-box, konceptuální nebo deterministické modely, ale široká klasifikace hydrologických modelů pramení z minulosti a z postupného časového vývoje (Gosain et al., 2009).

V dnešní době existuje široká klasifikace hydrologických modelů, které se navzájem od sebe odlišují různými přístupy jednotlivých složek srážko-odtokového procesu v důsledku toho pro jaký účel a pro jakou oblast povodí byl model vyvíjen. Časem se však ukázali společné charakteristiky, nebo rozdílnosti a na jejich základě se začali hydrologické modely dělit do různých kategorií (Becker, Serban, 1990).

Správná klasifikace může být užitečná pro inženýry, odborníky a výzkumné pracovníky, aby porozuměli charakteristikám hydrologických modelů předtím, než se rozhodnou s nimi pracovat a mohli přesně určit schopnosti a možnosti každého modelu. Klasifikace hydrologických modelů však může být značně ztížena vzájemně překrývajícími se vlastnostmi mezi různými typy modelů. V tomto důsledku se může i klasifikace hydrologických modelů lišit v závislosti na využití (Gosain et al., 2009).

Z pohledu Dingmana (2002) by se obecná klasifikace hydrologických modelů dala rozdělit do čtyř základních kategorií, kde každou kategorií můžeme dělit do dalších podkategorií.

Fyzikální reprezentace:

- Fyzikálně orientované: založeny na řešení rovnic zachování hmoty (kontinuita), energie, hybnosti, difúze - simulace toků a změny zásoby vody
- Konceptuální: používá smysluplných konceptů pro popis toků a změny zásoby vody, parametrizace pomocí vztah odtok - zásoba vody
- Empirické – regresní: používá aproximace empirických vztahů ze sledování
- Stochastické (časové řady): aplikace aparátu analýzy časových řad

Prostorová reprezentace:

- Celistvá: území nebo povodí reprezentováno jako jeden bod, prostorová variabilita vstupů reprezentována parametricky, 1 parametr - jedna veličina
- Dělená: obsahuje prostorovou variabilitu zájmového území, rozděleného na rastr nebo reprezentativní území
- Souřadnicový systém: kartézský součin, polární souřadnice

Časová reprezentace:

- Ustálený stav: výstupem je jedna nebo několik hodnot reprezentující dlouhodobé průměrné hodnoty
- Ustálený sezónní: simulace dlouhodobých průměrných měsíčních hodnot
- Událostní: omezená událost
- Kontinuální: časová řada modelovaného procesu (ů)

Metody řešení:

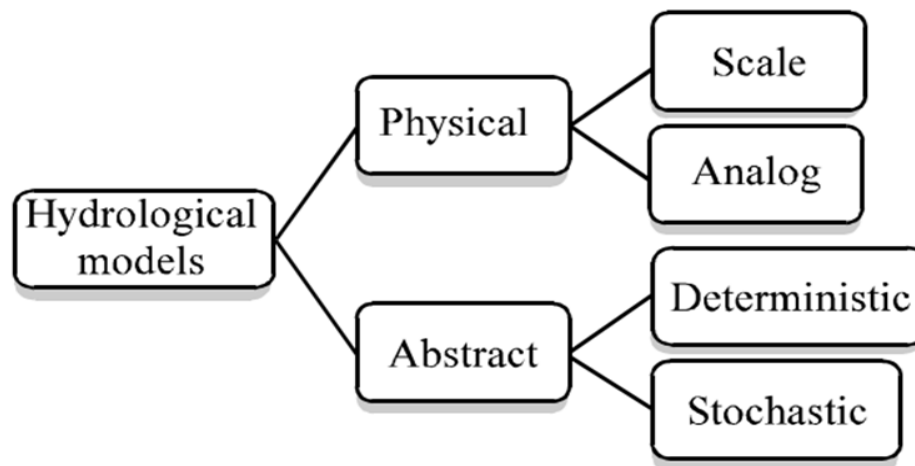
- 0-D: výpočet mimo souřadnicový systém
- Formálně analytické: základní řešení diferenciálních rovnic v analytickém tvaru (Philipova infiltrace)
- Formálně numerické: řešení diferenciální rovnic
- Konečné prvky
- Konečné difference
- Hybridní

Mezi převládající klasifikaci hydrologických modelů můžeme však označit klasifikaci dle Chow et al. (1988), kteří dělí hydrologické modely do dvou hlavních kategorií, a to fyzikálních modelů a abstraktních (matematických) modelů.

Fyzikální modely dělíme do podkategorií:

- Fyzikální měřítkové: Zmenšený model má stejné vlastnosti jako model reálný. Dingman (2002) popisuje tyto modely jako zmenšený model reálného systému. Používají se například v říční hydraulice při simulaci zatížení vodních staveb, nebo při simulaci srážko-odtokového vztahu.
- Analogový model: Aplikuje fyzikální systém, který má shodnou podobnost jako první vzorek. Dingman (2002) popisuje tyto modely jako fyzikální simulaci studovaného systému. Používají se například při simulaci toku kapaliny, který je nahrazený elektrickou, nebo tepelnou energií.

Abstraktní (matematické) modely se používají ke znázornění systému v matematické podobě. Realizace matematického modelu je prováděna sadami rovnic, které přetvářejí numerická vstupní data do numerických výstupních dat. Klasifikaci hydrologického modelu dále dělíme do dvou podkategorií, a to deterministických a stochastických. Deterministické modely, jsou popsány vztahem závislých proměnných (vstupní veličiny) a nezávislých proměnných (vstupní stavové veličiny). Na druhé straně stochastické modely vycházejí z pravděpodobnostního chování hodnocených proměnných.



Obrázek 3: Klasifikace hydrologických modelů Chow et al. (1988)

Deterministické modely:

Tyto modely aplikují nelineární parciální diferenciální rovnice, které popisují hydrologické procesy. Jednou z důležitých výhod deterministických modelů je, že představují vnitřní pohled na proces, který umožňuje lepší pochopení hydrologického systému. Vždy jsou spojovány s časovými proměnnými, pro něž neplatí žádné rozdělení pravděpodobností a jejich vzájemné vztahy jsou ryze příčinné, čili deterministické (Kulhavý, Kovář, 2000).

Kulhavý a Kovář (2000) rozdělují deterministické modely na tři kategorie:

- Deterministické modely. Tato kategorie modelů je založena na fyzikálním popisu srážko-odtokového procesu a snaha o respektování zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie (Kulhavý, Kovář, 2000). Zákroky uživatele do těchto modelů jsou teoreticky zbytečné a vzhledem ke složitosti i prakticky nemožné (Daňhelka, 2007). Velké požadavky na vstupní data a s tím spojená jejich častá nedostupnost je zásadním limitujícím elementem použití těchto typů modelů (Kulhavý, Kovář, 2000). Označují se také jako „white box“ modely

- Konceptuální modely. Tato kategorie modelů je založena na fyzikálních zákonech ve zjednodušené formě, ale obsahují i některé empiricky odvozené vztahy. (Becker, Serban, 1990). Zárok uživatele je v těchto modelech možný. Uživatel dle svých zkušeností upravuje nastavení modelu tak, aby nedocházelo ke zkresleným výsledkům (Daňhelka, 2007). Modely předpokládají změny nastavení určitých parametrů, čímž je potlačena prostorová složka (Kulhavý, Kovář, 2000). Díky spojení fyzikálního a empirického přístupu se označují jako „grey box“ modely
- Empirické black-box modely. Tato kategorie modelů nebere v úvahu řídicí zákony, ale používá pouze empiricky odvozený vztah mezi vstupními a výstupními veličinami. Reakce probíhající v nitru systému zůstávají ukryty, klasickým příkladem těchto modelů jsou neuronové sítě. Označují se také jako „black-box“ modely

Stochastické modely

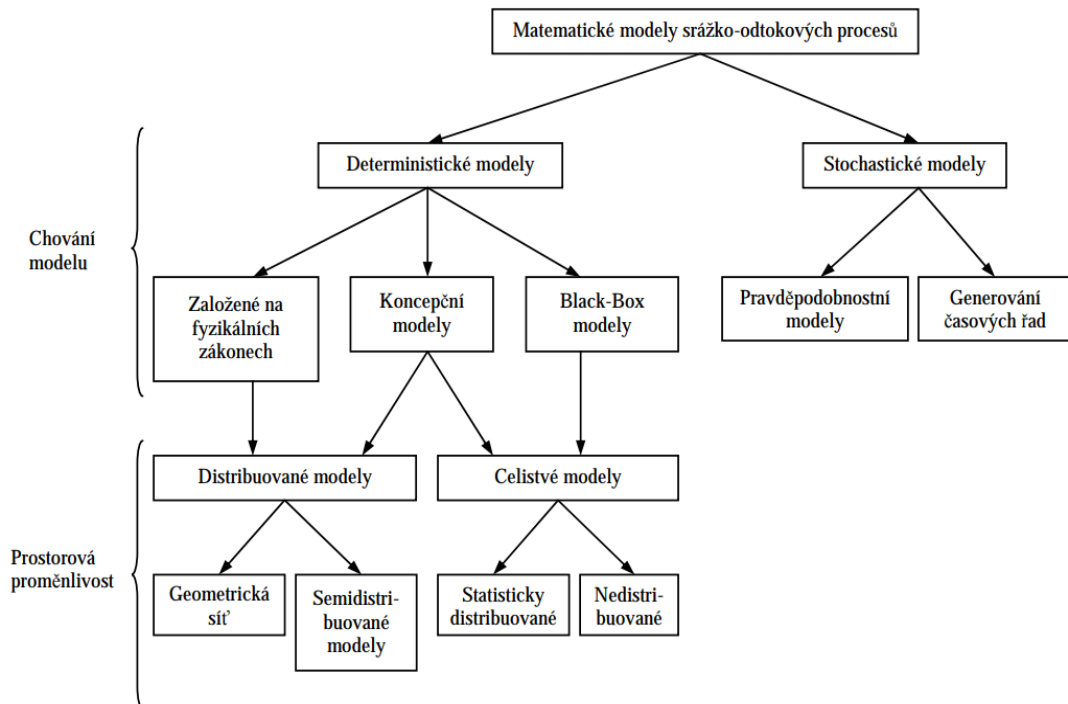
Stochastické modely primárně neobsahují vazbu mezi příčinou a důsledkem. Lze je rozdělit do dvou kategorií:

- (Stochastic Probabilistic) – pravděpodobnostní modely. U těchto modelů jsou jednotlivé hydrologické parametry jako například maximální či minimální průtok, vodní stavy nebo podzemní odtok charakterizovány určitým pravděpodobnostním rozdělením (Becker, Serban, 1990).
- (Stochastic Time series generation) – modely generování časových řad. Použití těchto modelů je možné při extrapolaci časových řad pozorovaných parametrů, přičemž se zachovávají jejich statistické charakteristiky (Becker, Serban, 1990).

V praxi se dost často využívá jak přístup deterministického, tak stochastického.

Stochastická složka je přítomna nejen ve většině modelů z oblasti plánování a projekční činnosti vodohospodářských staveb, ale někdy se využívá i v operativní hydrologii, zejména pro dlouhodobé předpovědi (Daňhelka et al., 2003). Obecně lze ale říci, že deterministický přístup v současnosti převažuje.

V komplexním, deterministickém přístupu lze jen stěží postihnout všechny vstupní parametry a proměnné, které ovlivňují výstupní veličiny. Každý takový model je zatížen určitou chybou, která je složena ze dvou dílčích chyb – vlastní chyba modelu a chyba měřených veličin. Obě je možné popsat určitým pravděpodobnostním rozdělením (Becker, Serban, 1990).



Obrázek 4:Klasifikace hydrologických modelů (Kulhavý, Kovář, 2000)

Jeníček (2009) dělí hydrologické modely dle prostorového členění na modely:

- Celistvé (lumped): charakteristika povodí je aplikována na celé, nebo dílčí povodí. Poněvadž se převážně jedná o bodově měřené hodnoty (srážky na meteorologické stanici nebo průtoky v závěrovém profilu), využívají se geostatické metody k převedení na hodnoty plošné, př. model HEC – Hydrologic Engineering Centre.
- Distribučované modely: celé povodí je pomocí sítě (gridu) rozděleno na elementární odtokové plochy o velikosti max. 1 km. Každé pole má svou vlastní hodnotu parametru. Patří sem např. model AGNPS.
- Semi-distribučované modely: povodí je rozděleno na elementární odtokové plochy jako v předcházejícím případě, na rozdíl od distribučovaných modelů mají ale homogenní prostorové parametry – př. stejný druh půd, reliéf, vegetace. Mezi semi-distribučované modely patří model SWAT, MIKE-BASIN.

Klasifikace dle Wageren et al., (2004)

Jak zmiňuje Wagener et al., (2004), kombinace lineárních a nelineárních funkcí byla vyvinuta a implementována do softwarových aplikací na počátku šedesátých let a proto vyvinul komplexní klasifikaci pro různé kategorie hydrologických modelů a klasifikoval je do tří hlavních odlišných kategorií.

Metrické modely:

- Metrické modely sestavují strukturu modelu na odpovídající hodnotu, pomocí informací časové řady. Jsou v souladu s informacemi, které mají přístupné z dat, a protože neexistují žádné předchozí znalosti o hydrologickém procesu, nazývají se datové, black-boxové nebo empirické modely. Obecně platí, že jsou prostorově soustředěny a modelují systém jako jeden celek.

Parametrické modely:

- Parametrické modely sestavují strukturu modelu na odpovídající hodnotu, prostřednictvím pochopení hydrologického systému a z tohoto důvodu se nazývají konceptuální modely, nebo gray-box modely. Parametrické modely mají strukturu, která je specifikována před jejich použitím, a mnoho modelovaných procesů je integrováno do prostorových a časových znaků do jediného parametru, ke kterému nelze snadno přistupovat pomocí měření v terénu.

Mechanické modely:

- Mechanické modely jsou fyzicky-založené modely, nebo také white-box modely. Stali se praktickými v používání od osmdesátých let díky rozvoji výpočetní techniky. Jsou preferovány pro své schopnosti zachování hmoty, pohybu a energie. Avšak tyto modely trpí extrémní poptávkou po datech, mají problémy s měřítkem a parametrizací. Jednou z charakteristik těchto modelů, které stojí za zmínku, je jejich prostorová diskretizace. To znamená, že se stávají důležitými a vhodnými, když je při modelování zapotřebí vysoká úroveň prostorové diskretizace.

3.5 Použití hydrologických modelů:

Jeníček (2007a) dle tohoto principu se dělí modely na 3 kategorie

- **Modely používané v operativní hydrologii**
Jedná se o uplatnění modelu v operativní hydrologii, kde jsou vstupní data okamžitě automaticky předávána modelu a předností je rychlost jejich zpracování a převedení na krátkodobou předpověď vodního stavu či průtoku v určitém profilu.
- **Modely aplikované pro návrhovou a projekční činnost v oblasti vodního hospodářství.**
Modelování srážko-odtokových procesů v povodí pro různé vstupní podmínky, dlouhodobá řešení protipovodňové ochrany, modely se používají při projektování řešení nejrůznějších technických staveb.
- **Modely využívané ve výzkumu.**
Hlavním cílem modelů ve výzkumu je podrobnější pochopení srážko-odtokového procesu a vytvořit model, který co možná nejpřesněji simuluje dané povodí.

3.6 Konceptuální modely

Tato kategorie hydrologických modelů se snaží modelovat všechny složky hydrologických procesů, včetně interakcí mezi jednotlivými procesy. Tyto modely se používají k napodobování rozdílných hydrologických režimů povodí (Hrádek, Kuřík, 2002).

Základní jádro modelu se skládá z jedné, nebo více propojených nádrží, které představují fyzikální části povodí. Nádrže jsou doplňovány srážkami, infiltrací a perkolací a vyprazdňují se odpařováním, odtokem, drenáží. Pro výpočet této oblasti jsou používány empirické rovnice. Modely se poté řeší pomocí obyčejných diferenciálních rovnic. Díky spojení fyzikálního a empirického přístupu je tato kategorie označována jako „grey-box“ modely (Jeníček, 2007). Wageren et al. (2004) klasifikuje tuto kategorii jako parametrické modely a Kulhavý a Kovář (2000) jí klasifikuje jako deterministickou a koncepční.

Parametry modelu lze nejnáze stanovit kalibrací modelu pomocí souboru dat, který obsahuje přímo naměřené časové řady vstupů i výstupů daného povodí. Každé povodí může být takto charakterizováno vektorem parametrů modelu. Pokud se povodí nemění, nemění se ani jemu příslušné hodnoty parametrů modelu (Kulhavý, Kovář, 2000).

Pro kalibraci je zapotřebí velké množství dat z meteorologických a hydrologických záznamů za delší časové období. Díky tomu je zajištěno dostatečné a zřetelné chování systému z pohledu uživatele, který může na základě svých zkušeností při nastavování parametrů ovlivňovat výstupní výsledky modelu (Daňhelka, 2007).

Na základě této charakterizace konceptuálních modelů existuje další klasifikace, která dělí modely na epizodní a kontinuální modely Daňhelka et al., (2003).

Daňhelka et al. (2003) dělí modely dle délky období simulace:

- Epizodní (událostní modely): slouží pro modelování jednotlivých významných srážko-odtokových epizod. Tento typ modelu bývá nenáročný na vstupní data, díky krátké době simulace není potřeba do výpočtu zahrnovat některé hydrologické a hydrochemické procesy.
- Kontinuální (bilanční modely) modely: modely s delší dobou simulace v řádu dnů, měsíců až let, čímž se simulace hodí více pro větší povodí. Výhodou je lepší podchycení vstupních podmínek lokality.

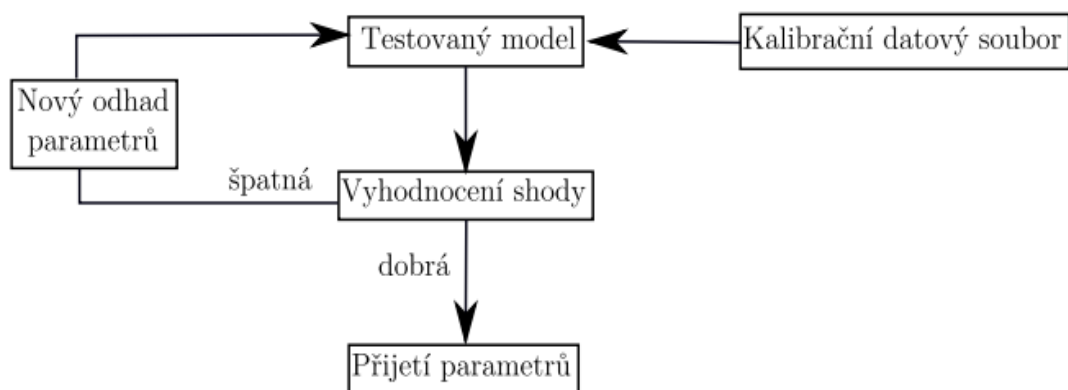
Konceptuální modely popisují matematicky hlavní hydrologické procesy:

- Povrchové procesy – intercepce, evapotranspirace, povrchová retence a akumulace v mikro a makro depresích, tání sněhu, formování povrchového odtoku a svahový odtok.
- Podpovrchové procesy - infiltrace, vláhová dynamika, půdní odtok, nasycené a nenasycené zóny, proudění podzemní vody, tvorba základního odtoku
- Korytové procesy - vznik soustředěného odtoku, transformace odtoku v údolnici (Kulhavý, Kovář, 2000)

3.6.1. Kalibrace modelu

Použití fyzikálně orientovaných tak i celistvých konceptuálních hydrologických modelů v praxi, vyžaduje modifikaci hydrologických modelů na místní podmínky daného povodí. Tento proces většinou obsahuje kalibraci hydrologických modelů s cílem najít takové parametry hydrologického modelu, které by dávaly nejlepší shodu mezi skutečnými a modelovanými hydrologickými hodnotami daného hydrogramu. Kalibrací se rozumí první test hydrologického modelu pro dané povodí, kdy jsou optimalizačními metodami vyhledávány nejméně pravděpodobnější kombinace parametrů řešení pro konkrétní časové úseky se známým vývojem srážkoodtokového procesu (Kulhavý, Kovář, 2000).

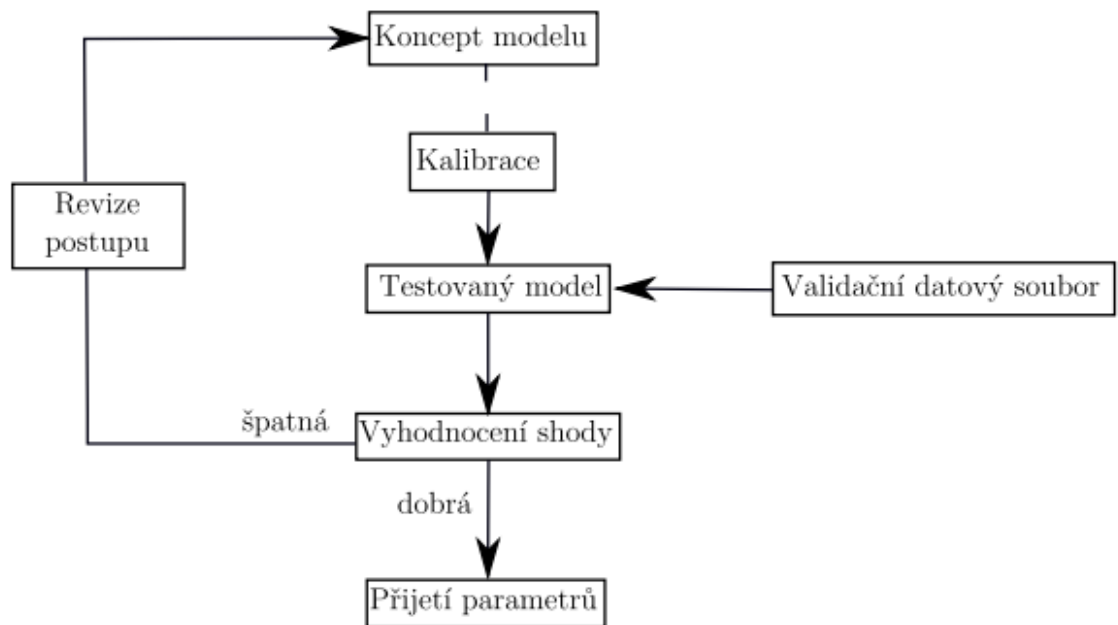
Ve fázi kalibrace hydrologického modelu by měla být využita data reprezentativní, nejméně charakterizující podmínky aplikace modelu. Je u nich třeba zvolit systém kontrol minimálně v rozsahu, který vyloučí hrubé chyby, vzniklé v předchozích operacích, např. chybným přepisem, vymazáním části souboru apod. Data je vhodné podrobit statistické analýze a posoudit věrohodnost získaných statistických charakteristik (např. variační rozpětí hodnot, průměrnou hodnotu) srovnáním s fyzikálně opodstatněným a tedy předpokládaným průběhem měření. Volba systému kontrolních analýz závisí na typu dat a rozsahu studie (Kulhavý, Kovář, 2000).



Obrázek 5: Obecné schéma kalibrace (Dingman, 2002)

3.6.2. Validace modelu

Validace hydrologického modelu se provádí na nezávislých datech, kdy je bez korekce parametrů modelu testována shoda skutečných a modelovaných průtokových řad (Kulhavý, Kovář, 2000).



Obrázek 6: Obecné schéma validace (Dingman, 2002)

3.6.3. Kriteriační funkce

Při kalibraci hydrologického modelu je používána celá řada kriteriačních funkcí. Mezi nejdůležitější patří tyto:

Nash-Sutcliffe koeficient účinnosti

Nash-Sutcliffe koeficient (NS) je pravděpodobně nejpoužívanější kritérium při hodnocení hydrologických modelů. Hodnoty NS se mohou pohybovat od $-\infty$ do 1. Účinnost $NS = 1$ odpovídá dokonalému shodě výstupních dat z modelu s pozorovanými údaji. Čím blíže je účinnost modelu 1, tím přesnější je model. Při srážkoodtokovém modelování v jednodenním časovém kroku je obecně brána hodnota NS větší nebo rovna 0,5 jako dostatečně kvalitní simulace. Jeho výpočet vychází z rovnice:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t - \bar{Q})^2}$$

kde Q_t je pozorovaný průtok v čase t , \hat{Q}_t simulovaný průtok v čase t a \bar{Q} je střední hodnota průtoků.

Chybová kritéria

ME (Mean Error) Střední chyba

$$ME = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Q_t - \hat{Q}_t$$

MAE (Mean Absolute Error) Střední absolutní chyba (MAE)

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |Q_t - \hat{Q}_t|$$

MSE (Mean Squared Error) Střední kvadratická chyba

$$MSE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_t - \hat{Q}_t)^2$$

RMSE (Root Mean Squared Error) Odmocnina střední kvadratické chyby

Root Mean Square Error (RMSE) je standardní odchylka residuí. Měřítka přesnosti, porovnává chyby v predikci při modelování různými modely pro konkrétní proměnnou a ne chyby mezi proměnnými.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_t - \hat{Q}_t)^2}$$

Symboly:

T je celkový počet dat

Q_t je pozorovaný průtok v čase t

\hat{Q}_t je simulovaný průtok v čase t

\bar{Q} je střední hodnota průtoku

3.6.4. Přehled nejznámějších konceptuálních hydrologických modelů

BILAN. Tento český konceptuální hydrologický model, počítá v denním i měsíčním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. Základním principem tohoto modelu je rozdělení povodí na schematizovanou soustavu nádrží, vertikálně jsou rozlišeny 3 úrovně – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody. Parametry modelu jsou toky mezi jednotlivými úrovněmi nádrží. Velikosti toků mezi jednotlivými nádržemi jsou vymezovány algoritmy modelu, které jsou ovládány šesti volnými parametry (o dva méně než v měsíční verzi), považovanými za časově neměnné. Společné pro obě verze je odlišení tří typů režimů závisících na teplotě (Horáček et al., 2009). Během svého vývoje byl odzkoušen nejenom na řadě povodí v různých zemích Evropy, ale také byl použit v asijských a afrických zemích. V České republice je obvykle používán pro hydrologické rozbory povodí. Od roku 1992 ho používá ČHMÚ pro výpočty hydrologické bilance a od roku 2001 je používán

pro výpočty hydrologické bilance jako součásti vodní bilance. Používá se také při studiích změny klimatu na hydrologickou bilanci (Hanel et al., 2011).

HBV (Hydrologiska Byrans Vattenavdelning model). Tento model je příkladem semi-distribovaného konceptuálního modelu. Celé povodí je rozděleno do dílčích povodí, které jsou dále rozděleny do různých výškových a vegetačních zón. Model má 9 parametrů, které se kalibrují, pracuje v denním časovém kroku a skládá se ze sněhového modulu, modulu půdní vlhkosti, modulu tvorby odtoku, modulu nádrže a perkolačního modulu. Používá se jako standardní nástroj pro odtokové simulace a předpovědi ve Švédsku, Norsku a Finsku. V současnosti, jsou k dispozici různé verze modelů a používají se v různých zemích s různými klimatickými podmínkami (Bergström, 1995). Tento model byl také použit pro rozsáhlé analýzy týkající se dopadů globálního oteplování na vodní zdroje (Andréasson et al., 2004).

SAC-SMA (Sacramento-Soil Moisture Accounting). Sacramento je typický celistvý, deterministický, konceptuální hydrologický model. Slouží jak pro účely simulace srážko-odtokových událostí, tak i kontinuální hydrologické bilance. Jako vstupní data využívá tento model časové řady srážek a potenciální evapotranspiraci. Přímý odtok je řešen přes jednotkový hydrogram (Andréassian et al., 2006). Tento model je poměrně složitý, má 16 parametrů, kalibruje se 13 parametrů a to automaticky, nebo manuálně. Používá se pro předpověď povodní a bývá součástí větších předpovědních systémů. Byl vyvinut ve Spojených státech amerických a poprvé byl použitý pro povodí řeky Sacramento v Kalifornii z čehož, pochází část názvu současného modelu. V České republice je tento model sloučen do softwaru Aqualog, který ČHMÚ používá k operativní předpovědi v povodí Labe a Vltavy (Jeníček, 2005).

HYRRM (Hydrological Rainfall-Runoff Model) Tento srážko-odtokový konceptuální model simuluje hydrologický cyklus v denním časovém kroku. Jako vstupní data využívá tento model časové řady srážek a potenciální evapotranspiraci. Model obsahuje celkem 19 parametrů, kalibruje se 9 parametrů a to interaktivně, nebo automaticky. Zbýlých 10 parametrů má pevně přednastavené hodnoty. Struktura modelu je zjednodušená, význam optimalizace parametrů spočívá spíše v přesném určení tzv. efektivního deště (část tvořící přímý odtok). Tento model lze úspěšně aplikovat až do 200 km² povodí (Blackie, Eeles, 1985).

IHACRES (Identification of unit hydrographs and component flows from rainfall, evaporation and streamflow data) Tento srážko-odtokový konceptuální model simuluje hydrologický cyklus jak v hodinovém časovém kroku pro povodí do 1km², nebo v denním časovém kroku pro větší povodí. Jako vstupní data využívá tento model časové řady srážek, průtoků a teploty vzduchu. Model obsahuje celkem 6 parametrů, které se dělí do dvou skupin. První skupinu tvoří nelineární modul, který má 3 parametry, druhou skupinu tvoří lineární modul jednotkového hydrogramu, který má zbylé tři parametry. Parametry nelineárního modulu se nastavují za pomoci Nash-Sutcliffova kriteria. Parametry lineárního modulu se optimalizují automaticky. Model převádí celkové srážky přes modul jednotkového hydrogramu na odtok. Přepočít srážek v povodí na efektivní srážky je založen na půdní vlhkosti. Jednotkový

hydrogram pak odvádí efektivní srážky z povodí. V současné době mezi nedostatečně vyvinuté funkce patří filtrování základní odtoku, přímý odhad jednotky hydrogramu, nástroje spektrální analýzy a verze deficitu nelineárního modulu s deficitem vlhkosti (Littlewood, Jakeman, 1994).

TOPMODEL. Jedná se o semi-distribovaný konceptuální srážko-odtokový model, který využívá topografických informací související s tvorbou odtoku. Ale Beven et al. (1986), považují tento model za fyzicky založený model, protože jeho parametry lze teoreticky měřit. Jinými slovy může být definován jako konceptuální model s variabilní oblastí působení, který ukazuje směr vývoje hydrologického modelování. Lze jej použít v jednom nebo více dílčích povodích s použitím údajů o velikosti povodí. Model simuluje explicitní interakce mezi podzemní vodou a povrchovou vodou předvídáním pohybu vodní hladiny, ale je především zaměřen na simulaci odtoku z proměnlivých zdrojových ploch povodí a predikci hydrologického chování povodí. Hlavními faktory, které jsou v tomto ohledu zvažovány, jsou topografie povodí a propustnost půdy. Hlavním cílem je výpočet deficitu půdní vlhkosti, nebo hloubky hladiny podzemní vody v libovolném místě. Vzhledem k tomu, že ukazatele jsou založeny na topografii povodí, model dává výpočty pouze do topografických indexů TOPSi. Využívá spojení s GIS (Geografický Informační Systém) pro automatické vyhodnocení plošných indexů TOPSi a dalších parametrů (Beven 1986, Blažková 1993).

3.7. Hydrologický model GR4J

Model GR4J (Mód'le du Ge'nie Rural a `4 parame'tres Journalier) je poslední upravenou verzí navrženou Perrin (2000) a podrobně popsána Perrin (2002) a Perrin et al. (2003) pocházející z tříparametrového modelu GR3J navrženého Edijatno, Michel (1989), kterou Nascimento (1995) vylepšil jedním pevným parametrem

Perrin et al. (2001) demonstrovali, že malý počet parametrů (tři až pět), zcela dostačuje k dosažení uspokojivých výsledků, při simulaci povrchového odtoku v denním časovém kroku a konstrukce modelu je přesně uspořádána.

Jedná se o celistvý čtyřparametrový srážko-odtokový model, který počítá celkový povrchový odtok v denním časovém kroku. Patří do kategorie konceptuálních modelů, avšak tento model byl vytvořen na bázi empirického přístupu, což v praxi znamená, že tento model spoléhá na velké množství hydrologických dat, které jsou rozhodující pro nejefektivnější modelovou strukturu s cílem získat obecný, účinný a robustní model (Perrin et al., 2003).

Model GR4J je jedním z jednodušších hydrologických modelů, nemá žádnou fyzikální podstatu. Obsahuje dva zásobníky produkční a transformační a má pouze čtyři parametry pro optimalizaci během kalibrace (Perrin et al., 2003).

Produkční zásobník je založen:

- výpočet efektivní srážky na základě intercepčního zásobníku s nulovou kapacitou a produkčního zásobníku
- na zásobě půdní vlhkosti, určující část celkových srážek, ze kterých se stanou efektivní srážky a aktuální evapotranspirace
- korekce na základě maximálního výměnného koeficientu povodí (v případě pomalé odezvy řešena jako součást bilance v nelineárním transformačním zásobníku).

Transformační zásobník je založen:

- na perkolaci z produkčního zásobníku
- rozdělení efektivní srážky do dvou komponent (90%) pomalá odezva povodí je směřováno na jednotku hydrogramu *UH1* a (10%) rychlá odezva povodí je směřováno na jednotku *UH2* a jejich transformace pomocí pouze jednotkového hydrogramu *UH* anebo jednotkového hydrogramu (*UH*) a nelineárního transformačního zásobníku.

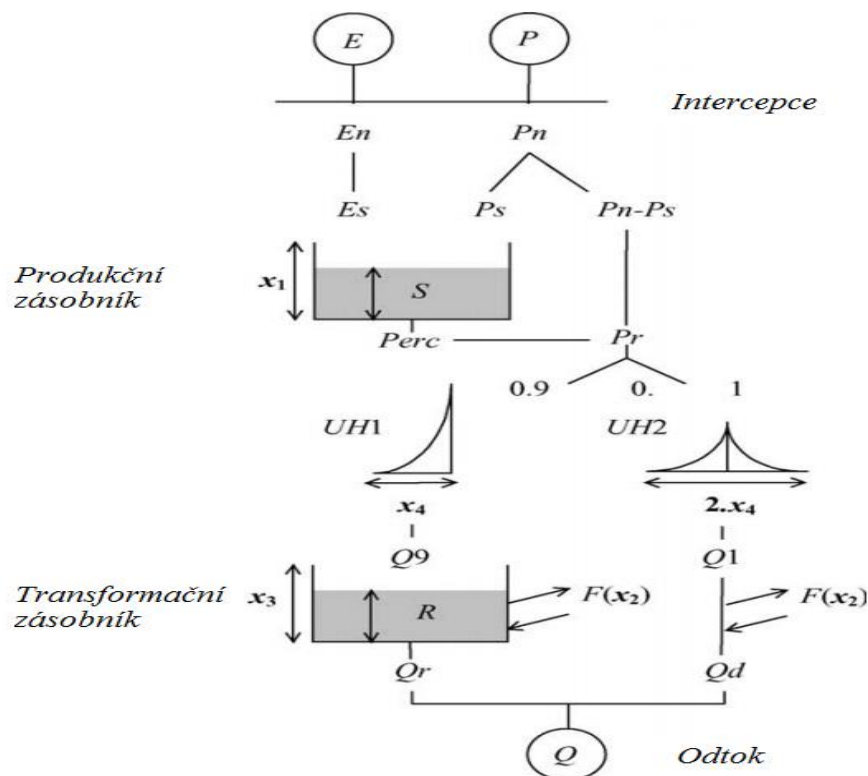
Vstupní data:

Časové řady srážek P [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]

Potenciální evapotranspirace E [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]

Výstupní data:

Časová řada simulovaného odtoku R [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]



Obrázek 7: Struktura modelu GR4J(Perrin et al., 2003)

Tabulka 1- Popis parametrů modelu GR4J

E	Potenciální plocha evapotranspirace
E_n	Čistá evapotranspirace
E_s	Skutečná rychlost odpařování
$F(x_2)$	Doba výměny podzemních vod
P	Plošné spádové srážky
P_n	Čisté srážky
$P_n - P_s$	Množství čistých srážek, které jde přímo do směrovacích funkcí
P_r	Celkové množství vody pro dosažení směrovacích funkcí
P_s	Množství čistých srážek, které jde přímo do produkčního zásobníku
$Perc$	Netěsnost prosakováním
Q	Celkový povrchový odtok
$Q1$	Výstup UH2
$Q9$	Výstup UH1
Q_d	Složka s přímým tokem
Q_r	Součást směrovaného průtoku
R	Obsah vody v transformačním zásobníku
S	Obsah vody v produkčním zásobníku
$UH1, UH2$	Jednotkové hydrogramy
x_1	Maximální kapacita produkčního zásobníku (mm)
x_2	Maximální výměnný koeficient povodí (mm)
x_3	Maximální kapacita transformačního zásobníku (mm)
x_4	Časový parametr jednotkového hydrogramu (den)

Popis principu modelu GR4J (Perrin et al., 2003).

První operaci pro výpočet v daném časovém kroku, zapisujeme množství srážek P a potenciální odhad evapotranspirace E , které jsou vstupy do modelu. P je odhad plošných srážek, které lze vypočítat jakoukoliv interpolační metodou z dostupných dešťových měřidel. E může být založeno na dlouhodobých průměrných měsíčních

nebo denních hodnotách, což znamená, že stejný potenciální evapotranspirační cyklus by mohl být opakován každý rok, i když zaznamenané časové řady E by měly přinést lepší výsledek.

Všechna množství vody (vstup, výstup, vnitřní proměnné) jsou vyjádřena v mm, podle potřeby dělením objemů vody podle povodí. Všechny níže popsané operace jsou vztaženy k danému časovému kroku a odpovídají formulaci diskrétního modelu (získané po integraci spojité formulace v průběhu časového kroku).

Stanovení čistých srážek a PE

První operací modelu je odečítání E od P , aby se určila buď čistá dešťová srážka P_n nebo čistá evapotranspirační kapacita E_n . V GR4J je tato operace vypočtena tak, jako by existovala záchytná paměť s nulovou kapacitou. P_n a E_n jsou počítány s následujícími rovnicemi:

$$\text{if } (P \geq E) \text{ then } (P_n = P - E) \text{ and } (E_n = 0)$$

v opačném případě:

$$(P_n = 0) \text{ and } (E_n = E - P)$$

Produkční zásobník

Tento zásobník může být považován za úložiště půdní vlhkosti (SMA). V případě, že P_n není nula, část P_y z P_n vyplní produkční zásobník. Určuje se jako funkce úrovně S v úložišti podle:

$$P_s = \frac{x_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{x_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}{1 + \frac{S}{x_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}$$

Rovnice 3 a rovnice 4 vyplývají z integrace v časovém kroku diferenciálních rovnic, které mají parabolickou formu s termíny v $(S/x_1)^2$, jak podrobně popsal (Edijatno, Michel 1989).

V opačném případě, když E_n není nula, je skutečná rychlost vypařování určena jako funkce hladiny v produkčním zásobníku pro výpočet množství vody E_s , která se bude z produkčního zásobníku vypařovat. Vypočítává se:

$$E_s = \frac{S \cdot \left(2 - \frac{S}{x_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{2 + \left(1 - \frac{S}{x_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}$$

Obsah vody v produkčním zásobníku se pak aktualizuje pomocí:

$$S = S - E_s + P_s$$

Únik perkolací $Perc$ z produkčního zásobníku se pak vypočítá jako výkonová funkce obsahu zásobníku:

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} \frac{S}{x_1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\}$$

$Perc$ je vždy nižší než S . Obsah produkčního zásobníku se stává:

$$S = S - Perc$$

Perkolační funkce v rovnici nastane, jako by pocházela z produkčního zásobníku s maximální kapacitou $9 \div 4 \cdot x_1$. Vzhledem k mocninovému zákonu matematické formulace to znamená, že perkolace nepřispívá k odtoku, ale je zajímavá hlavně pro simulace nízkého průtoku.

Lineární vedení s jednotkovými hydrogramy

Celkové množství P_r vody, která dosáhne směrovacích funkcí, je dáno:

$$P_r = Perc + (P_n - P_s)$$

P_r je rozdělen do dvou složek průtoku podle pevného rozdělení: 90% P_r je směřováno jednotkou hydrogramu $UH1$ a nelineárním směřováním, a zbývajících 10% P_r je směřováno pomocí hydrogramu na jednotku $UH2$. S $UH1$ a $UH2$, lze simulovat časovou prodlevu mezi případné srážky a výsledný vrchol povrchového toku. Jejich souřadnice se v modelu používají k šíření efektivních srážek během několika po sobě následujících časových kroků. Oba hydrogramy jsou závislé na stejném parametru x_4 vyjádřeném ve dnech. Nicméně, $UH1$ má časovou základnu x_4 zatímco $UH2$ má časovou základnu $2 x_4$ dni. x_4 může mít skutečné hodnoty a je větší než 0,5 dne.

Výměna podzemních vod povodí

Termín výměny podzemní vody F , který působí na obě složky průtoku, se potom vypočítá jako:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{\frac{7}{2}}$$

Kde R je hladina v transformačním zásobníku, x_3 její "referenční" kapacita a x_2 koeficient pro výměnu vody. x_2 může být buď pozitivní v případě přítoku vody, negativní pro odtok vody nebo nula, jestliže neexistuje změna hladiny vody. Čím vyšší je úroveň vody v transformačním zásobníku, tím větší je výměna. V absolutní hodnotě nemůže být F větší než x_2 : x_2 představuje maximální množství vody, které může být přidáno (nebo uvolněno) do (z) každé složky toku modelu, když se úroveň transformačního zásobníku rovná x_3 .

Nelineární směrovací úložiště

Hladina v modulu směrování je aktualizována přidáním výstupu Q_9 z $UH1$ a F takto:

$$R = \max(0; R + Q_9 + F)$$

Odtok Q_r nádrže se pak vypočítá jako:

$$Q_r = R \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right] \frac{1}{4} \right\}$$

Q_r je vždy nižší než R . Formulace výstupu úložiště je stejná jako perkolace z modulu SMA. Hladina v nádrži se stává:

$$R = R - Q_r$$

I když transformační zásobník může přijímat vstupní vodu větší než je deficit nasycení x_3 . R na začátku časového kroku, úroveň v nádrži nemůže nikdy překročit kapacitu x_3 na konci časového kroku. Kapacita x_3 by proto mohla být nazývána "maximální denní kapacita". Tato úložná trasa je schopna v případě potřeby simulovat recese s dlouhým tokem.

Celkový povrchový odtok

Stejně jako obsah úložiště směrování, výstup Q_1 z $UH2$ podléhá stejné výměny vody F , čímž se získá průtok komponent Q_d následujícím způsobem:

$$Q_d = \max(0; +Q_1 + F)$$

Celkový odtok Q je konečně získán:

$$Q = Q_r + Q_d$$

Výstupní data:

Časová řada simulovaného odtoku R [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]

Kalibrace

Kalibrují se všechny 4 parametry modelu. Optimalizace začíná z výchozího nastavení parametrů, což jsou zprůměrované hodnoty naměřené na větším množství povodí. Potom se v parametrickém prostoru vyhledávají kombinace, které co nejvíce vyhovují. Vyhledávání se zastaví, když se nalezne vyhovující optimum (Perrin et al. 2003).

Parametry

Model GR4J má 4 parametry, které popisuje tabulka č.2

Tabulka 2- Definice parametrů modelu (Zdroj: Perrin et al., 2003)

Parametr	Popis	Jednotky	Výchozí	Rozsah
x_1	Maximální kapacita produkčního zásobníku	mm	350	1-1500
x_2	Maximální výměnný koeficient povodí	mm	0	-10,0-5,0
x_3	Maximální kapacita transformačního zásobníku	mm	40	1-500
x_4	Časový parametr jednotkového hydrogramu	dny	0,5	0,5-4,0

Porovnání simulačních účinností GR4J s jinými konceptuálními modely uvádí srovnávací studie koncepčních modelů srážkových odtoků GR4J, AWBM a Sacramento v horním povodí řeky Godavari, Indie Kunnath-Poovakka, A. & Eldho, T.I.J. Earth Syst Sci (2019). Srovnávací studie uvádí, že model GR4J poskytuje o něco lepší NSE, R a PBIAS pro většinu povodí během kalibračního a validačního období. Bylo rovněž konstatováno, že GR4J znázorňuje vysoký průtok srážko – odtokových událostí lépe než AWBM a Sacramento. GR4J je jednoduchý model se dvěma zásobníky oproti pěti zásobníkovým modelům AWBM a Sacramento a má k optimalizaci pouze čtyři parametry během kalibrace, zatímco například AWBM má osm parametrů a Sacramento má 22 parametrů. Přírůstek v řadě parametrů, během kalibrace prodlužuje dobu kalibrace z důvodu časové prodlevy v konvergenci parametrů. Jako jednoduchý model vyžaduje GR4J méně času pro kalibraci.

Také Andre´assian (2003) zmiňuje, že modely jako GR4J se zdají být nejlepší volbou vhodné pro detekci změn v chování povodí.

Zlepšená spolehlivost modelů jako GR4J zvyšuje důvěru v jejich používání v rozsahu hydrologické aplikace, kdy vodohospodářští inženýři hledají spolehlivé nástroje například pro simulaci průtoků, nebo regulaci vodních děl. Model GR4J, zapojený se stochastickým srážkovým modelem, by mohl být aplikován k vyhodnocování povodní (Perrin, Michel, 2003).

4. VÝSLEDKY A DISKUZE

Stanovení parametrických sad pro hydrologický model GR4J

Cílem práce bylo stanovení parametrických sad pro hydrologický model GR4J na vybraných pozorovaných povodích ČR z projektu HAMR. Bližší informace o povodích jsou k dispozici na: online systém pro zvládání sucha – operativní řízení během suché epizody | VTEI. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace [online]. Copyright © 2019 [cit. 08. 04. 2019]. Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2018/10/hamr-online-system-pro-zvladani-sucha-operativni-rizeni-behem-suche-epizody/>, nebo na dotaz administrátorům projektu.

Pro každé povodí byly určeny vstupní data pro model GR4J v podobě řady srážek a potenciální evapotranspirace určené metodou dle Oudina, která je nejjednodušším způsobem zjištění intenzity potenciální evapotranspirace. Ve výpočtu užívá totiž pouze teplotní hodnoty. Délka celkových datových setů se pohybovala od 3469 - 5477 do 3469 – 5768 dní. Pro fázi kalibrace byla zvolena první polovina z datového setu, pro validaci pak druhá polovina.

Výsledné sady parametrů jsou z důvodu velikosti tabulky uvedené v příloze A1. Vyhodnocení kalibrace a validace je uvedené v příloze A.2. Na tomto místě jsou uvedeny jen statistické charakteristiky pro kritéria při kalibraci tabulka 3 a při validaci tabulka 4. Z těchto tabulek je vidět, že simulace poskytovaly poměrně konzistentní výsledky ve smyslu porovnání statistik pro kalibraci a validaci. Dále je zřejmé, že jako uspokojivé je možné brát cca 25 % modelů – třetí kvartil při validaci má hodnotu 0,5718 což je nad výše stanovenou hranicí 0,5 pro uspokojivou simulaci. Polovina všech modelů má kvalitu simulace pod hodnotou 0,43. Nízké procento simulací je zřejmě způsobeno různorodostí povodí v celém datovém setu. Nachází se zde velká i malá povodí více či méně ovlivněná. Jednoduché vyhodnocení závislosti kvality simulace na velikosti povodí a dalších vybraných charakteristikách je uvedeno v následující kapitole.

Tabulka 3-Základní statistika NSE pro dosažené hodnoty kritéria NSE při kalibraci

Min.	1 Q	Median	Mean	3 Q	Max.
0.0868	0.3704	0.4355	0.4353	0.5171	0.6892

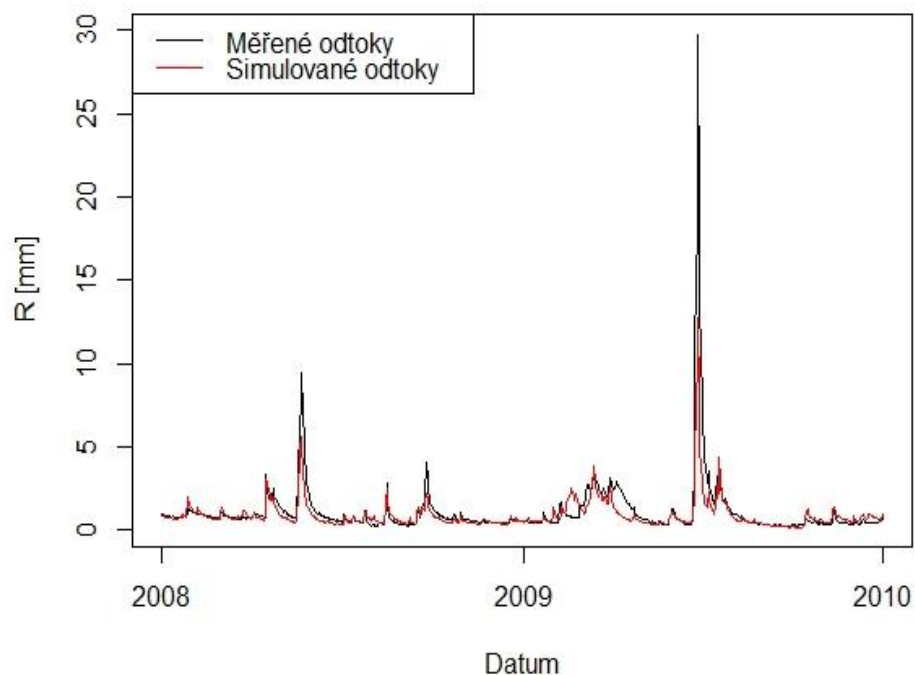
Tabulka 4 - Základní statistika NSE pro dosažené hodnoty kritéria NSE při validaci

Min.	1 Q	Median	Mean	3 Q	Max.
0.1133	0.3429	0.4300	0.4525	0.5718	0.7639

Ověření simulační účinnosti modelu.

Pro demonstraci průběhu simulací byly vytvořeny tři níže uvedené hydrogramy vybraného úseku pro validaci na povodí, kde bylo dosaženo nejvyšší hodnoty NSE, pak kde bylo dosaženo hodnoty mediánu NSE a nakonec kde byla nejnižší hodnota NSE. Vizuální znázornění umožňuje ve snadno uchopitelné formě prezentovat simulace modelů a zhodnotit jejich kvalitu, ačkoliv je nutné brát v úvahu, že to může být i zavádějící.

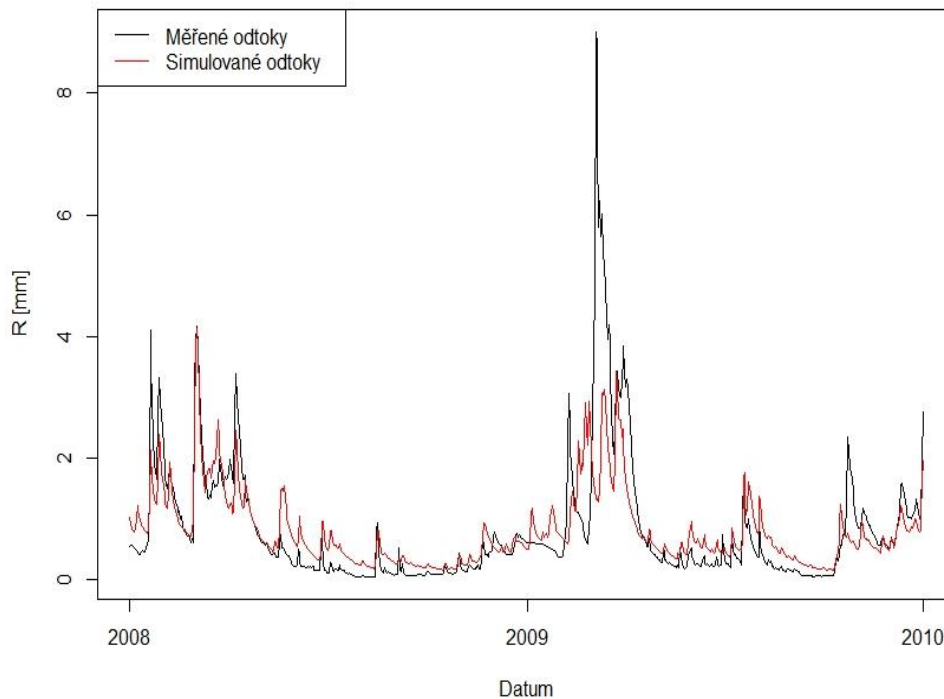
Hydrogram pro povodí s nejvyšší dosaženou hodnotou NSE.



Obrázek 8 - Hydrogram toku Vidnávka

Nejvyšší hodnoty 0,76 NSE bylo dosaženo na toku Vidnávka ID 309000 (Obr. 8). Jak je z hydrogramu patrné simulovaný odtok se relativně shoduje s měřeným odtokem. Výjimku tvoří jen povodňové špičky, kde simulace dosahuje zhruba 50 procent měřeného odtoku.

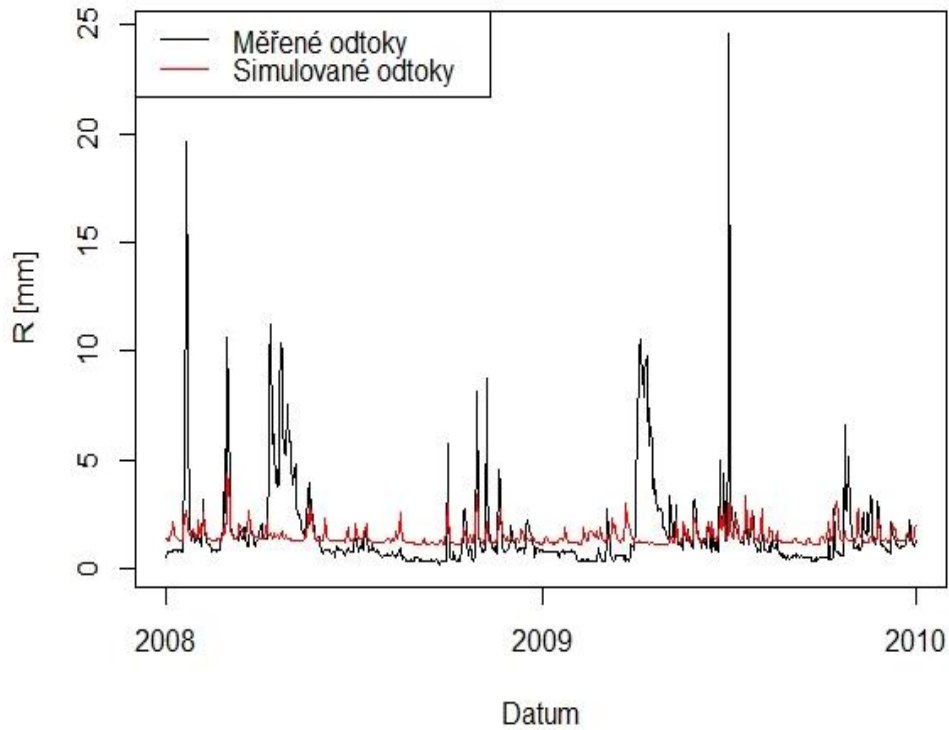
Hydrogram pro povodí s průměrnou hodnotou NSE.



Obrázek 9 - Hydrogram toku Kněžná

Mediánové hodnoty 0,43 NSE bylo dosaženo na toku Kněžná ID 30000 (Obr. 9). Jak je z hydrogramu patrné simulovaný odtok je ve středních a nízkých odtocích nadhodnocen a naopak ve vysokých odtocích je simulace podhodnocena. Nadhodnocení je výraznější v sestupných větvích jednotlivých událostí v rámci prezentovaného hydrogramu.

Hydrogram s nejnižší hodnotou NSE.

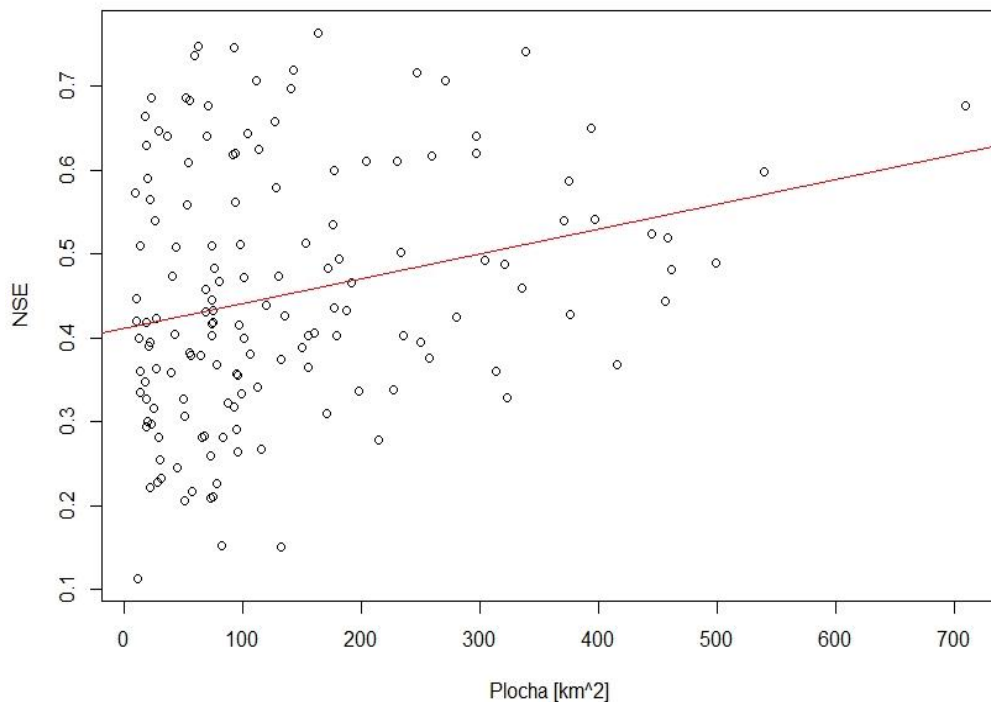


Obrázek 10 - Hydrogram toku Čistá

Nejnižší hodnoty 0,08 NSE bylo dosaženo na toku Čistá ID 3100 (Obr. 10). Jak je z hydrogramu patrné simulovaný odtok se v celém rozsahu neshoduje s měřeným odtokem. Dokonce ani základní odtok nedosahuje dobré simulace.

Závislost hodnoty NSE na ploše povodí A

Na obrázku č.11 je vidět závislost hodnoty NSE na ploše povodí v km². Jedná se o X-Y bodový graf. Na ose X je plocha, na ose Y je hodnota NSE. Dále je zde přímka trendu určená pomocí lineární regrese. Jak je vidět na obrázku č.11, je zde určitá závislost NSE na ploše povodí, ačkoliv celková korelace je zejména u malých ploch povodí nízká. Vzestupný trend zde sice není příliš výrazný, nicméně můžeme usuzovat, že na větších povodích bude GR4J dosahovat lepších simulací. Směrnice přímky má zde hodnotu $2.956e-04$.



Obrázek 11 - XY bodový graf se stanovenou křivkou trendu

DISKUZE

V literární rešerši jsem se zabýval vývojem hydrologického modelování a velmi mě zaujal Robert E. Horton, který je často nazývaný otcem americké hydrologie. Na svoji dobu byl obrovským přínosem pro hydrologii zejména svojí myšlenkou konceptu nadměrné infiltrace.

Co mě však překvapilo nejvíce při studiu, jaká existuje široká klasifikace hydrologických modelů, které se navzájem od sebe odlišují různými přístupy jednotlivých složek srážko-odtokového procesu a jak je značně ztížena vzájemně překrývajícími se vlastnostmi mezi různými typy modelů. Dle mého názoru by měla být klasifikace hydrologických modelů jednodušší pro správné orientování. Jednodušší klasifikace by byla užitečná pro pracovníky ve vodohospodářství, kteří by lépe porozuměli charakteristikám hydrologických modelů předtím, než se rozhodnou s nimi pracovat a mohli přesně určit schopnosti a možnosti každého modelu.

Hydrologický model GR4J se mě jeví při své jednoduchosti, jako dobrý nástroj pro simulaci srážko – odtokových událostí. Jejich zlepšenou spolehlivost by mohli využít vodohospodářští inženýři například pro simulaci průtoků, nebo regulaci vodních děl.

V praktické části jsem se, věnoval stanovením parametrických sad na vybraných povodí v ČR v programovém prostředí R. Dále jsem, vytvořil tři hydrogramy od nejnižší hodnoty NSE po nejvyšší hodnotu NSE, kde jsem zhodnotit jejich kvalitu. Dále jsem vytvořil přímkou trendu, z které se dá usuzovat, že na větších povodích bude GR4J dosahovat lepších simulací. Závěrem práce je statistické vyhodnocení závislosti NSE na plochu povodí A z které se dá opět usuzovat, že na větších povodích bude GR4J dosahovat lepších simulací.

5. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo stanovit parametrické sady pro model GR4J na vybraných pozorovaných povodích v ČR.

V literární rešerši jsem charakterizoval vývoj hydrologického modelování a různorodost klasifikace hydrologických modelů dle různých autorů. Dále jsem popsal podrobně hydrologický model GR4J.

V praktické části jsem se věnoval stanovením parametrických sad na vybraných povodích v ČR a jejich jednoduchému vyhodnocení. U modelu GR4J je z výsledků patrné, že jen na 25 procentech povodí model poskytl minimální kvalitu 0.51 NSE. Takto nízké procento kvalitních simulací je způsobeno velkou rozdílností použitých povodí.

Díky této práci jsem se dopodrobna seznámil se zajímavým vědním oborem hydrologií. Dále pak s problematikou klasifikace členění hydrologických modelů, hydrologickým modelováním a programovým prostředím R.

6. SEZNAM ZKRATEK

1Q	První čtvrtina
3Q	Třetí čtvrtina
AGNPS	A Non-Point-Source Pollution Model
airGR	Sada hydrologických modelů GR pro modelování srážení- odtoku
AWBM	Australian Water Balance Model
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
GR4J	Mód'le du Ge'nie Rural a `4 parame`tres Journalier
HBV	Hydrologiska Byrans Vattenavdelning model)
HEC-1	Hollerith Electronic Computer
HYRROM	Hydrological Rainfall-Runoff Model)
ID	Identifikace ve výpočetní technice
IHACRES	Identification of unit hydrographs and component flows from rainfall, evaporation and streamflow data)
MAE	Mean Absolute Error)
Max	Maximální
ME	Mean Error
Median	MEDIÁN
Min -	Minimální
MSE	Mean Squared Error
NS	Nash-Sutcliffe
NSE	Nash-Sutcliffe koeficient
PBIAS	Percent bias
R	Projekt R pro statistické výpočty
RMSE	Root Mean Squared Error
RSE	Residual Standard Error
SAC-SMA	Sacramento-Soil Moisture Accounting
SHE	European Hydrologic Systém
SMA	půdní vlhkosti
SWM	Stanford Watershed Model
VTEI	Vodohospodářské technicko-ekonomické informace
WMO	World Meteorological Organisation

7. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

Abbott M.B., Bathrust J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E. and Rasmussen J., 1986: An introduction to European hydrological system - systeme hydrologique Europeen (SHE) Part 2. Structure of a physically based distributed modeling system. *Journal of Hydrology* 87, 61-77

Andréassian V., Hall A., Chahinian N., Schaake J., 2006: Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment – MOPEX. IAHS Redbook, 307. ISBN 1901502732.

Andréasson J., Bergström S., Carlsson B., Graham L.P., Lindström G., 2004: Hydrological chase – climate change impact simulations for Sweden. *Ambio*, 33(4-5), Pages 228-234.

Becker A., Serban P., 1990: Hydrological models for water – resources system design and operation. Operational Hydrology Report No. 34, WMO, Geneva, 80 s.

Bergström S., 1995: The HBV model. In: Singh, V.P. (ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resource Publications, Highland Ranch, Pages 443 – 476.

Beven K.J., 2006: Searching for the Holy Grail of scientific hydrology: $Q_t = H(S, R, Dt)A$ as closure, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 609 – 618.

Beven K.J., 1986: Runoff production and flood frequency in catchments of order n : an alternative approach. In: *Scale Problems in Hydrology*, editor GUPTA, V.K. et al. pp. 107-131. D. Riedel Publishing Comp.

Beven K.J., 1996: A discussion of distributed hydrological modelling. In: Abbott, M.B., Refsgaard, J.C. 1996: *Distributed hydrological modelling*. Kluwer, Dordrecht, s. 255-279

Beven, K.J., 2001: *Rainfall-Runoff Modelling, The Primer*. John Wiley & Sons, Chichester, 360 s.

Blackie J. R., Eeles, C. W. O., 1985: Lumped catchment models. In: *Hydrological Forecasting* ed. by M. G. Anderson & T. P. Burt, 311-346. Wiley

Blažková Š., 1993: Srážkovodkové modely založené na principu jednotkového hydrogramu. *Práce a studie VÚV, sešit, 183*, VÚV TGM Praha.

Blöschl G., Grayson R., 2002: Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung. In: *Wiener Mitteilungen – Band 164 – Niederschlag-Abfluss Modellierung – Simulation und Prognose*, Technische Universität Wien, s. 33-55

Buchtele J., 2002A: Úvod k metodám a modelům hydrologických předpovědí. In: Patera, A. et al., 2002: *Povodně: prognózy, vodní toky a krajina*. ČVUT, Praha: s. 33 - 35

Buchtele J., 2002B: Okolnosti ovlivňující využití modelů a tendence v uplatňování různých přístupů. In: Patera A. et al., 2002: *Povodně: prognózy, vodní toky a krajina*. ČVUT, Praha: s. 51-55

Daňhelka J., 2007: *Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí*, Český hydrometeorologický ústav, Praha: 104 s.

- Daňhelka J., Krejčí J., Šálek M., Šercl P. a Zezulák J., 2003: Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU Praha, Praha: 214 s. ISBN 80-86690-03-2.
- Dingman L. S., 2002: Physical hydrology. Prentice Hall, 456 s.
- Edijatno, Michel C., 1989: Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres, La Houille Blanche, 113-121.
- Gareth J., Witten D., Hastie T., Tibshirani R., 2014: An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R. Springer Publishing Company, Incorporated. Springer New York Heidelberg Dordrecht London ISSN 1431-875X ISBN 978-1-4614-7137-0
- Gosain, A.K., Mani A., Dwivedi C., 2009: Hydrological Modelling-Literature Review. Climawater, Report NO.1.
- Hanel M., Kašpárek L., Mrkvičková M. et al., 2011: Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha.
- Hladný J., Miklánek P., 2010: Aspekty strategie hydrologického rozvoje na počátku 21. století. In Hydrologické dny 2010 – voda v měnícím se prostředí, Sborník příspěvků 7. mezinárodní konference českých a slovenských hydrologů a vodohospodářů (CD-ROM). ČHMÚ, Hradec Králové
- Horáček S., Rakovec O., Kašpárek L., Vizina A., 2009“ Vývoj modelu hydrologické bilance BILAN. VTEI, 51(mimořádné číslo 1), 2–5.
- Hrádek F., Kuřík, P. 2002: Hydrologie. ČZU ISBN 80-213-0950-4.
- Chow W. T. et all., 1998: Applied Hydrology. McGraw Hill, USA, 572 p., ISBN 0-07-010810-2
- Jeníček M., 2009: Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany. Disertační práce na PřF UK, Praha: Page 128.
- Jeníček M., 2005: Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. In Langhammer, J (ed.): Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko. PřF UK, Praha:Pages 112-126.
- Jeníček M., 2007A: Modelování srážko-odtokových procesů na malých a středně velkých povodích. In Langhammer, J. (ed.): Povodně a změny v krajině, PřF UK v Praze a MŽP ČR, Praha: s. 101-109.
- Kavka P., Müller M., Strouhal L., Kašpar M., Bližňák V., Landa M., Weyskrabová L., Pavel M., Dostál T., 2018: Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině: metodika. České vysoké učení technické v Praze, ISBN 8001063631,
- Keith, Beven, 2004: Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes". Hydrol. Process. 18 (18): 3447–3460.
- Kulhavý Z., Kovář P., 2000: Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. Praha: VÚMOP, Praha: 96 s. ISSN 1211-3972.

- Littlewood I.G., Jakeman A.J., 1994: A new method of rainfall-runoff modelling and its applications in catchment hydrology. In: Environmental Modelling. Computational Mechanics Publications, UK. Volume II, Pages 143-171.
- Moradkhani, H., Sorooshian, S., 2008: General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. Hydrological modeling and the water cycle. Springer. 291 p. ISBN 978-3-540-77842-4
- Nascimento N. O., 1995: Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant, Thèse de Doctorat thesis, 550 pp, CERGRENE/ENPC, Paris.
- Perrin C., 2000: Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse de Doctorat thesis, 530 pp, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony).
- Perrin C., 2002: Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, La Houille Blanche, 84-91.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V., 2001: Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, J. Hydrol., 242(3-4), 275-301.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V., 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, J. Hydrol., 279, 275-289.
- Refsgaard J.C., Storm B., 1996: Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott, M.B., Refsgaard, J.C., 1996: Distributed hydrological modelling. Kluwer, Dordrecht, s. 41-54
- Reggiani, P., Sivapalan M., Hassanizadeh S.H., 2000: Conservation equations governing hillslope responses, Water Resour. Res., 38(7), 1845 – 1863
- Singh V.P. and D.K. Frevert, 2002: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Water Resource Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA., ISBN: 9781887201346, Pages: 891.
- Slavík L., Neruda M., 2007: Voda v krajině. Fakulta životního prostředí UJEP, Ústí nad Labem
- Smith M.B., Koren V.I., Zhang Z., Reed S.M., Pan J-J., Moreta F. 2004: Runoff response to spatial variability of precipitation: an analysis of observed data. Journal of Hydrology, Volume 298, s 267-286
- Todini E., 1988: Rainfall-runoff modelling-past, present, and future. Journal of Hydrology 100 p. 341- 352.
- Wagener T., Gupta H V., Whearter H., 2004: Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. London: Distributed by World Scientific, ISBN 1860944663.
- Wagener T., Sivapalan M., Troch P. A., McGlynn B. L., Harman C. J., Gupta H. V., Kumar, P., Rao P. S. C., Basu N. B., Wilson J. S., 2010: The future of hydrology: An evolving science for a changing world. Water Resources Research, 46, 10 s.
- Wmo-No. 168, 1983: Guide to hydrological practices, Volume II – Analysis, Forecasting and other application. WMO, Geneva

INTERNETOVÉ ZDROJE

A comparative study of conceptual rainfall-runoff models GR4J, AWBM and Sacramento at catchments in the upper Godavari river basin, India | SpringerLink. Home - Springer [online]. Copyright © 2018 Springer Nature Switzerland AG. Part of [cit. 09.04.2019]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12040-018-1055-8>

Coron, L., Perrin, C., Delaigue, O., Thirel, G. and Michel, C. (2018). airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.0.15.2. URL: <https://webgr.irstea.fr/en/airGR/>

ČHMÚ, Český hydrometeorologický ústav. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/pruvodce_vodohospodari_modelove_predpovedi.html

Jeníček M., Klasifikace hydrologických modelů. Studijní materiál pro potřeby posluchačů předmětu „Modelování hydrologických procesů“, Univerzita Karlova v Praze. Přírodovědecká fakulta (online) [cit. 09.04.2019] Dostupné z: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=dokumenty&cislo=7>

Mauricio Zambrano-Bigiarini. (2017) hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series R package version 0.3-10. URL <http://hzambran.github.io/hydroGOF/>. DOI:10.5281/zenodo.840087.

R Development Core Team (2012): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, online: <http://www.R-project.org/>.

8. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma srážkoodtokového procesu v modelu SACRAMENTO (CHMU,2012)	11
Obrázek 2: Obecné schéma hydrologického modelu (Dingman, 2002	14
Obrázek 3: Klasifikace hydrologických modelů Chow et al. (1988)	16
Obrázek 4:Klasifikace hydrologických modelů (Kulhavý, Kovář, 2000).....	18
Obrázek 5: Obecné schéma kalibrace (Dingman,2002)	21
Obrázek 6: Obecné schéma validace (Dingman,2002)	22
Obrázek 7: Struktura modelu GR4J(Perrin et al 2003)	26
Obrázek 8 - Hydrogram toku Vidnávká	33
Obrázek 9 - Hydrogram toku Kněžná	34
Obrázek 10 - Hydrogram toku Čistá	35
Obrázek 11 - XY bodový graf se stanovenou křivkou trendu.....	36

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1- Popis parametrů modelu GR4J	27
Tabulka 2- Definice parametrů modelu (Zdroj: Perrin et al 2003)	31
Tabulka 3-Základní statistika NSE pro dosažené hodnoty kritéria NSE při kalibraci. 32	
Tabulka 4 - Základní statistika NSE pro dosažené hodnoty kritéria NSE při validaci 32	

9. PŘÍLOHY

Výsledky optimálních hodnot parametrů pro model GR4J příloha A.1

Vyhodnocení kalibrace a validace příloha A.2