

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A**

**ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**



**Přístup geografické blízkosti povodí a jeho vliv na  
simulační účinnost srážko-odtokového modelu**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vedoucí práce: Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

Bakalant: Kseniia Belorusova

2023

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kseniia Belorusova

Aplikovaná ekologie

Název práce

**Přístup geografické blízkosti povodí a jeho vliv na simulační účinnost srážko-odtokového modelu**

Název anglicky

**The spatial proximity approach and its influence on simulation efficiency of the rainfall-runoff model**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je vyhodnocení vlivu regionalizačního přístupu geografické blízkosti na simulační účinnost vybraného srážko-odtokového modelu na souboru povodí projektu MOPEX.

### Metodika

- 1) rešerše problematiky (regionalizace obecně, regionalizační přístupy s podrobnějším popisem přístupu geografické blízkosti povodí),
- 2) sestavení souboru povodí a jeho popis, výběr srážko-odtokového modelu,
- 3) kalibrace a validace srážko-odtokového modelu,
- 4) provedení regionalizační studie,
- 5) diskuze prezentovaných výsledků a jejich srovnání s výsledky publikovaných studií.

**Doporučený rozsah práce**

30 až 50 stran

**Klíčová slova**

MOPEX, KGE, přístup jednoho donoru, přístup více donorů,

---

**Doporučené zdroje informací**

- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Le Moine, M., 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.
- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 157s–171s.
- Wagener, T., Wheeler, H.S., Gupta, H.V., 2004: Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. Imperial College Press, London, 300s, ISBN 1-86094-466-3.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2022/23 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2023

**prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2023

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 04. 03. 2023

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Přístup geografické blízkosti povodí a jeho vliv na simulační účinnost srážko-odtokového modelu vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou 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 vědoma, že odevzdáním bakalářské 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 dne 30. 3. 2023

Podpis: .....

Kseniia Belorusova

## **Poděkování**

Chtěla bych touto cestou poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Martinovi Heřmanovskému, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a připomínky, ale hlavně za čas, který mi při práci věnoval. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu během mého studia.

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce bylo vyhodnocení vlivu regionalizačního přístupu založeného na geografické blízkosti povodí na simulační účinnost srážko-odtokového modelu GR4J. Studie byla provedena na souboru 200 povodí projektu MOPEX, která se nachází v USA. Prostorová blízkost povodí byla vyjádřena Euklidovskou vzdáleností těžišť povodí. Výsledky kalibrace, validace i regionalizace modelu GR4J byly hodnoceny Kling-Guptovým koeficientem. V rámci metody prostorové blízkosti byly využity dvě metody: přístup jednoho donoru a přístup více donorů. V případě použití více donorů byla dále testována metoda průměrování parametrů a průměrování výstupů. Získané výsledky ukazují na robustnost modelové struktury i přesto, že při přechodu z kalibrační do verifikační fáze byl zaznamenán mírný pokles simulační účinnosti. Výsledky dále ukazují, že nejvýraznější vliv na simulační účinnost modelu při regionalizaci má počet použitých donorů (optimální počet donorů byl 4 pro metodu průměrování parametrů a 6 pro metodu průměrování výstupů). Dalším faktorem, který výrazně ovlivňoval účinnost modelu na nepozorovaných povodích, je způsob přenosu hydrologické informace mezi povodími. V kombinaci s průměrováním výstupů vykazoval přístup více donorů lepší výsledky než v kombinaci s průměrováním parametrů. Celkově výsledky ukázaly, že přístup geografické blízkosti vede k poměrně vysoké simulační účinnosti modelu GR4J.

**Klíčová slova:** MOPEX, KGE, přístup jednoho donoru, přístup více donorů

## **Abstract**

This bachelor thesis aimed to evaluate the impact of a regionalization approach based on the geographic proximity of catchments on the simulation efficiency of the GR4J rainfall-runoff model. The study was conducted on a sample of 200 catchments located in the USA, and the spatial proximity of the catchments was calculated as the Euclidean distance between the centroids. The results of calibration, validation, and regionalization of the GR4J model were evaluated using the Kling-Gupta coefficient. Two methods were applied as part of the spatial proximity approach: a single-donor approach and a multiple-donor approach. For the multiple-donor approach, two methods were further tested: parameter averaging and output averaging. The obtained results demonstrate the veracity of the chosen model, although a slight decrease in simulation efficiency was observed when transitioning from the calibration to the verification phase. The results also show that the number of donors used has the most significant impact on the simulation efficiency of the model in the context of regionalization (the optimal number of donors was determined to be 4 for parameter averaging and 6 for output averaging). Another significant factor that impacted the model's efficiency in ungauged catchments was the method of hydrological information transfer between catchments. The multiple-donor approach combined with output averaging showed better results than the single-donor approach combined with parameter averaging. Overall, the results indicate that the geographic proximity approach leads to a relatively high simulation efficiency of the GR4J model.

**Key words:** MOPEX, KGE, single donor approach, multiple donor approach

# Obsah

1	Úvod.....	1
1.1	Cíl práce .....	2
2	Hydrologická regionalizace.....	3
2.1	Rozdělení regionalizačních metod.....	5
2.1.1	Regionalizace na základě regrese .....	5
2.1.2	Regionalizace na základě fyzikální (deskriptorové) podobnosti.....	9
2.1.3	Regionalizace na základě prostorové (geografické) blízkosti.....	11
2.1.3.1	Přístup jednoho donoru .....	13
2.1.3.2	Přístup více donorů .....	13
3	Metodika .....	16
3.1	Vstupní data.....	16
3.2	Hydrologický model GR4J .....	19
3.3	Kalibrace a verifikace modelu GR4J .....	20
3.4	Popis regionalizační metody .....	20
4	Výsledky .....	21
4.1	Kalibrace a verifikace modelu GR4J .....	21
4.2	Regionalizační studie na souboru povodí projektu MOPEX .....	24
4.2.1	Analýza vztahu mezi simulační účinností modelu GR4J a počtem použitých donorů .....	25
4.2.2	Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J v kalibraci a validaci s regionalizačními výsledky pro průměrování parametrů a výstupů .....	26
5	Diskuze.....	29
6	Závěr .....	33
7	Seznam literatury a použitých zdrojů .....	34
8	Seznam obrázků a tabulek.....	40



# 1 Úvod

Hydrologie je multidisciplinární věda, která se zabývá studiem vodního cyklu na Zemi a jeho interakcí s prostředím. Tato věda má velký význam v lidském životě, neboť umožňuje řešit řadu problémů spojených s vodou a jejím využitím, mezi něž patří problémy jako například ochrana životního prostředí, udržitelné hospodaření s půdou a vodou, plánování energetických projektů, řízení vodních zdrojů a komunikace.

Jedním ze směrů hydrologie, který umožňuje navrhovat a implementovat opatření pro optimalizaci využití vodních zdrojů a minimalizaci rizik souvisejících s přírodními katastrofami, jako jsou povodně a sucha (Bárdossy, 2007), je studium povrchových vod. Část vědeckých prací v tomto směru je spojena s výzkumy v oblasti modelování srážko-odtokového procesu (Wagener a kol., 2004; Swain a Patra, 2017).

Hydrologické modelování je zároveň přímo spojeno s kvalitativními a kvantitativními informacemi o odtoku, které jsou nezbytné pro mnoho praktických aplikací, jako jsou operace řízení povodí, distribuce vody atd. (Bárdossy, 2007). Zvláště důležitou roli hraje modelování při predikci odtoku vody na nepozorovaných povodích (mohou ovlivnit vodní režim různými způsoby). Za nepozorovaná povodí jsou považována povodí, pro něž neexistují žádné záznamy o odtoku vody, nebo jsou tyto záznamy příliš nedostatečné či nekvalitní, což znemožňuje měření kvality a kvantity vody v odpovídajících měřících (Gupta a Sorooshian, 1985; Sivapalan a kol., 2003).

Při modelování hydrologického chování takových povodí je používána metoda hydrologické regionalizace, která umožňuje přenos informací o hydrologických parametrech a chování modelu z tzv. pozorovaných povodí, pro která bylo v důsledku měření a výpočtů shromážděné dostatečné množství hydrologických dat, na nepozorovaná povodí (Blöschl a Sivapalan, 1995; Bárdossy, 2007; Zhang a Chiew, 2009).

Hydrologická regionalizace zahrnuje několik přístupů, jedním z nich je přístup založený na prostorové neboli geografické blízkosti povodí. V této práci bude tento přístup podrobněji prozkoumán a bude také vyhodnocen jeho vliv na simulační účinnost srážko-odtokového modelu.

## 1.1 Cíl práce

Cílem práce je vyhodnocení vlivu regionalizačního přístupu geografické blízkosti na simulační účinnost srážko-odtokového modelu na souboru MOPEX povodích.

Dílčí cíle práce budou:

1. literární rešerše zaměřená na regionalizace, regionalizační přístupy a podrobný popis přístupu geografické blízkosti povodí;
2. sestavení souboru povodí a výběr srážko-odtokového modelu;
3. kalibrace a verifikace modelu GR4J;
4. provedení regionalizační studie;
5. diskuze prezentovaných výsledků a jejich srovnání s výsledky publikovaných studií.

## 2 Hydrologická regionalizace

Předpovídání hydrologických dat patří mezi největší problémy hydrologických věd (Sivapalan a kol., 2003). Je to způsobeno tím, že i když se v současnosti po celém světě používají tisíce měřicích stanic, stále existuje velké množství nepozorovaných povodí, u kterých jsou hydrologické údaje nedostatečné nebo neuspokojivé. Sběr dat v těchto případech neodpovídá potřebnému standardu, a to zvláště tehdy, když sledovaná hydrologická veličina (jako jsou srážky, odtok atd.) nebyla změřena v době potřebné pro kalibraci nebo v požadovaném rozlišení. V případě nedostatku potřebných dat není možné vytvořit spolehlivé hydrologické modely, které by mohly sloužit k efektivnímu řízení vodních zdrojů a prevenci přírodních katastrof (Wagener a kol., 2004).

Potřebné hydrologické údaje lze získat pomocí speciálních metod, například přenesením souboru parametrů ze sousedních povodí, výpočtem z tabulkových hodnot nebo na základě odborného posouzení (Parajka a kol., 2005). Proces přenosu hydrologických informací z pozorovaných (nejčastěji sousedních) povodí na nepozorované se nazývá hydrologická regionalizace (Blöschl a Sivapalan, 1995). Pomocí regionalizace může být hydrologická informace přenesena buď ve formě parametrů modelu, nebo ve formě vztahů, zjištěných mezi parametry modelu a pozorovanými charakteristikami povodí.

Termín hydrologická regionalizace se poprvé objevil v procesu klasifikace hydrologického režimu a seskupování povodí na základě tohoto režimu. Později byl častěji využíván v kontextu modelování srážko-odtokového procesu při přenosu parametrů modelu z pozorovaných povodí (donorů) na nepozorovaná povodí (akceptory) (Parde', 1933; Gottschalk a kol., 1979; Young, 2006; Wagener a Wheeler, 2006). V tabulce č. 1 jsou představeny definice termínu „regionalizace“ v kontextu modelování srážko-odtokového procesu tak, jak se tyto definice měnily v průběhu času.

<b>Autoři a rok</b>	<b>Použitý termín</b>	<b>Definice</b>
Sutcliffe a Little, (1965)	Hydrologická regionalizace	Identifikace a klasifikace regionů se stejnými hydrologickými vlastnostmi s cílem modelovat srážko-odtokové procesy
Gottschalk, (1985)	Regionalizace	Klasifikace povodí podle určité hydrologické charakteristiky
Schaake a Andreassian, (1986)	Regionalizace	Vývoj regionálních vztahů mezi hydrologickými proměnnými a charakteristikami povodí
Burn a Boorman, (1993)	Regionalizace	Proces přenosu informací z jednoho povodí na druhé
Blöschl a Sivapalan, (1995)	Regionalizace	Přenos hydrologických informací z pozorovaných povodí na nepozorovaná povodí
Wagener a Wheeler, (2006)	Prostorová generalizace	Zjištění statistického vztahu mezi pozorovanými deskriptory povodí a parametry modelu a jeho využití na nepozorovaném povodí
Oudin a kol., (2010)	Regionalizace	Všechny metody, které umožňují přenos hydrologických informací z pozorovaných povodí na nepozorovaná povodí

Tab. 1: Chronologické definice pojmu regionalizace podle výskytu v odborné literatuře.

Dnes se pojem hydrologická regionalizace vztahuje na všechny metody, které se využívají k přenosu informace o hydrologickém chování (např. parametrů modelu) mezi donorem a akceptorem v definované oblasti konzistentní hydrologické odezvy. Hydrologická regionalizace je důležitým nástrojem pro analýzu prostorových vzorců variací hydrologických jevů, jež hrají klíčovou roli při plánování a řízení vodních zdrojů (Gottschalk, 1985). Metoda získávání relevantních hydrologických dat pomocí

instalace měřicích stanic pro každé povodí a každou zájmovou charakteristiku je velmi nákladná. V tomto ohledu je upřednostňováno použití metod regionalizace, protože výrazně snižují náklady a umožňují dostatečně efektivně určit hydrologické chování dosud nepozorovaných povodí (Chian a kol., 2002). Základním předpokladem hydrologické regionalizace je, že podobnost povodí v určitých klíčových charakteristikách (např. v klíčových geomorfologických a klimatických charakteristikách nebo v geografické vzdálenosti mezi povodími) vede k podobnosti v hydrologickém chování (Li a kol., 2018).

## **2.1 Rozdělení regionalizačních metod**

Existují tři přístupy k regionalizaci, z nichž každý má své výhody a nevýhody. V následujících kapitolách budou popsány metody představující regionalizaci založenou na regresi, fyzické podobnosti a prostorové blízkosti (Blöschl a Sivapalan, 1995; Parajka a kol., 2005; Oudin a kol., 2008).

### **2.1.1 Regionalizace na základě regrese**

Regresní analýza je definice statistických metod, s jejichž pomocí lze odhadnout hodnotu jisté náhodné veličiny (tzv. závislé proměnné, nazývané také regresní proměnné) na základě znalosti jiných proměnných (Hanousek a Charamza, 1992). Tato analýza patří dnes k nejvýznamnějším metodám matematické statistiky a samostatně nebo ve spojení s jinými metodami se používá prakticky v každé oblasti empirické a aplikované vědy (Cook a Weisberg, 1982; Freedman, 2009).

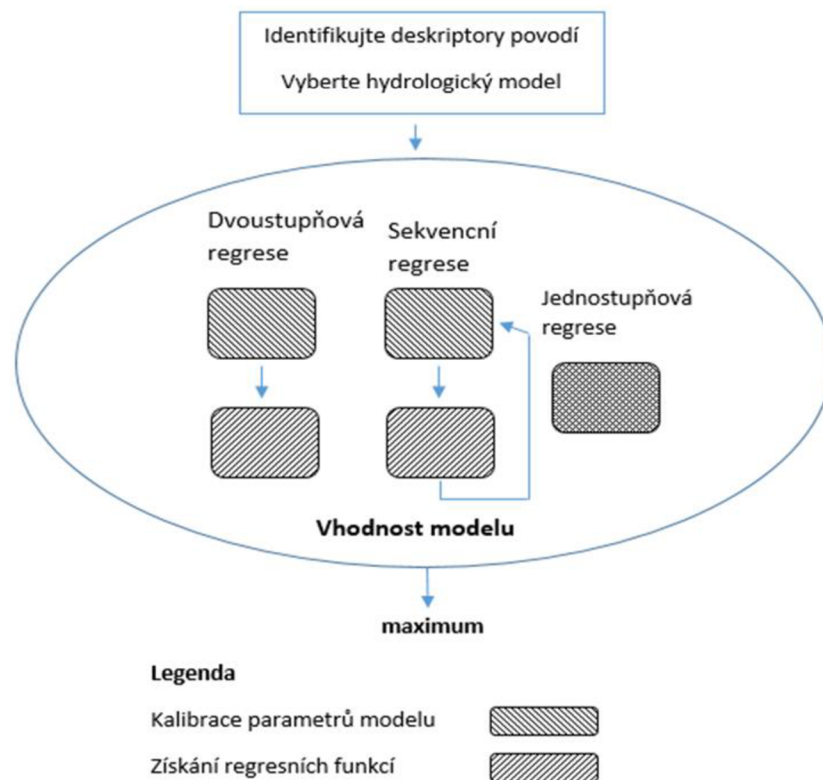
Regionalizace na základě regrese je považována za nejoblíbenější a nejpoužívanější metodu. Je založena na odvození aposteriorních vztahů (regresních rovnic) mezi geomorfologickými, klimatickými a dalšími charakteristikami pozorovaných povodí (nezávislé veličiny) a hodnotami parametrů modelu na nich kalibrovaných (závislé veličiny). Takto odvozené vztahy jsou pak využity při stanovení parametrů modelu pro nepozorovaná povodí (Oudin a kol., 2008).

Pro odvození regresních rovnic je nejprve nutné sestavit soubor vhodně zvolených pozorovaných povodí (tj. povodí, kde vybraný srážko-odtokový model dosahuje dobrých simulačních výsledků) s dostatečným počtem známých nebo korektně odvozených charakteristik povodí. Dále je nutné vybrat vhodný srážko-odtokový

model a provést jeho kalibraci na zvoleném souboru pozorovaných povodí (McIntyre a kol., 2005; Oudin a kol., 2008).

Existuje několik následujících způsobů využití regresního přístupu, které ve své práci podrobně popisují He a kol. (2011) (viz obr. č. 1):

- Dvoustupňová regrese;
- Sekvenční regrese;
- Jednostupňová regrese.

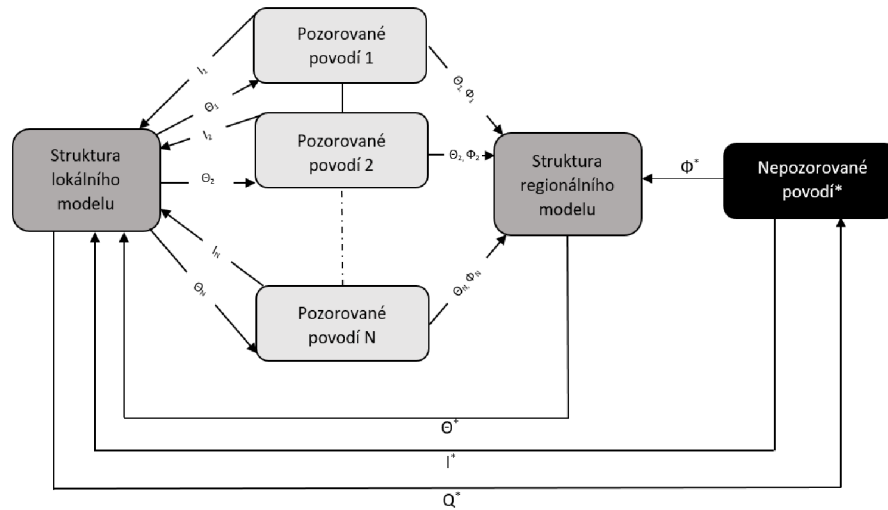


Obr. 1: Obecný postup tří regresních regionalizačních metod (He a kol., 2011).

**Dvoustupňová regrese** je nejrozšířenější metodou regionalizace a spočívá ve zjištění vztahu mezi určitými parametry modelu a deskriptory povodí (viz obr. č. 2).

Tato metoda se skládá ze dvou kroků. Prvním krokem je provedení kalibrace parametrů modelu na velkém souboru pozorovaných povodí. Druhým krokem je vyhledávání regresních vztahů mezi kalibrovanými parametry a vybranými

deskriptory povodí. Takto získané regresní vztahy se pak dále použijí k odhadu parametrů modelu na cílovém nepozorovaném povodí (He a kol., 2011).



Obr. 2: Schematické znázornění postupu regionalizaci pomocí dvoustupňové regrese, kde  $\theta$  – sada parametrů modelu,  $I$  – matice vstupních proměnných (např. srážky a teploty),  $Q$  – simulovaný průtok,  $\Phi$  – fyzikálně-geografické a meteorologické charakteristiky povodí (Wagener a Wheeler, 2006).

**Sekvenční regrese** je regrese potřebná pro řešení problému souvisejícího se špatnou identifikací parametrů modelu (Lamb a kol., 2000). Tato metoda se od dvoustupňové regrese liší tím, že kalibrace parametrů probíhá postupně od nejvíce identifikovatelného parametru k nejméně identifikovanému, na rozdíl od předchozí metody, kde byla kalibrace provedena současně pro všechny parametry. Po identifikaci a kalibraci nejcitlivějšího parametru je odvozen regresní vztah mezi ním a jednou nebo více vybranými charakteristikami povodí. Výsledný vztah je pak implementován do kalibračního procesu. Po rekalibraci modelu je nalezen druhý nejcitlivější parametr a opět je odvozen regresní vztah mezi tímto parametrem a charakteristikami povodí. Takto se pokračuje, dokud nebudou sestaveny regresní rovnice pro všechny parametry modelu (Lamb a Kay, 2002, 2004; Calver a kol., 2005; He a kol., 2011). Hogue a kol. (2000) píšou o této metodě jako o vícestupňovém schématu automatické kalibrace. Pořadí parametrů, které mají být kalibrovány, je často založeno na hydrologickém hodnocení (Calver a kol., 2005).

V důsledku svých výzkumů Lamb a kol. (2000) a Wagner a Weather (2006) dospěli k tomu, že výhodou metody sekvenční regrese je zvýšení identifikovatelnosti parametrů modelu, díky čemuž dosahuje ve srovnání s metodou dvoustupňové regrese lepších výsledků.

**Jednostupňovou** nebo **souběžnou regresí** se nazývá metoda, jež byla vyvinuta na základě dvoustupňové regrese. Spočívá v tom, že kombinuje dva kroky do jednoho a vybrané charakteristiky povodí jsou rovněž zadány do kalibrace modelu, přičemž jsou identifikovány regresní vztahy mezi parametry modelu a vybranými charakteristikami povodí. Prostřednictvím kalibrace modelu tak lze posoudit simulační výkon modelu i kvalitu odvozených regresních rovnic (Fernandez a kol., 2000; He a kol., 2011).

Výsledky jednostupňové regrese nevykazují žádné výrazné zlepšení oproti tradičnímu přístupu dvoustupňové regrese (He a kol., 2011).

Hlavní nevýhody regresního přístupu jsou potenciální parametrická ekvifinalita – tj. existence většího počtu parametrických sad, které vedou k velmi podobným simulačním výsledkům (Hundecha a Bárdossy, 2004; Oudin a kol., 2008), potenciálně chybný předpoklad lineární závislosti mezi parametry modelu a charakteristikami povodí (viz Heuvelmans a kol., 2006) a využití charakteristik povodí, které jsou samotné výsledkem extrapolace bodového měření nebo výstupem nějakého modelu, a tedy zatížené jistou dávkou nejistoty (Merz a Blöschl, 2004).

Jako příklad regionalizační studie, ve které byla použita regionalizace na základě regrese, může sloužit práce Jarboe a Haana (1974). Autoři provedli kalibraci čtyřparametrového modelu na sedmnácti povodích v Kentucky. Regresní vztahy mezi parametry modelu a topografickými, geologickými a půdními deskriptory povodí byly testovány porovnáním pozorovaných a simulovaných záznamů odtoku ze šesti povodí, která nebyla součástí původních sedmnácti povodí. Výsledky práce ukázaly, že model lze uspokojivě aplikovat na nepozorovaná povodí, kromě toho studie poskytla užitečné informace pro zvýšení přesnosti odhadu odtoku vody v nepozorovaných oblastech.

Dalším příkladem je práce Xu (2003). Studie se zabývala problematikou přenositelnosti regresních rovnic získaných pro malá sub-povodí na velká povodí.



Konkrétně byla testována přenositelnost regresních rovnic, odvozených z dat z malých sub-povodí v centrálním Švédsku na větší povodí téže lokality. Pro všechna sub-povodí v regionu byl optimalizován koncepční model sněhové a vodní bilance NOPEX-6. Prostřednictvím vícenásobné regresní analýzy byly zjištěny vztahy mezi parametry použitého modelu a charakteristikami povodí. Dále byla regresní rovnice z menších povodí přenesena na větší povodí. Výsledky ukázaly, že regresní rovnice poskytovala přesné predikce i na novém, větším povodí, což potvrdilo možnost přenositelnosti regresních rovnic z malých povodí na větší povodí, avšak důležitým detailem je to, že přesnost regresních rovnic závisí na vlastnostech a charakteristikách zkoumaného povodí.

Ještě jedním z mnoha příkladů může být studie Lamb a Kay (2004). Autoři v ní analyzovali intervaly spolehlivosti pro model simulace odtoku, který byl zobrazen pro celé území Velké Británie. Konkrétně se jednalo o spojitý model simulace průtoku, který byl vyvinut pomocí regresních závislostí mezi parametry hydrologického modelu a vlastnostmi povodí. Tento model byl testován a vyhodnocen pro různé kategorie povodí, včetně těch, které nebyly zahrnuty v původním vývoji modelu. Výsledky ukázaly, že model je schopen poskytnout spolehlivé odhady odtoku a může být použit pro vodohospodářské plánování a rozhodování v oblasti povodňové prevence. Studie přispěla ke zlepšení přesnosti modelování odtoku v celé Velké Británii a k lepšímu porozumění variability odtoku na povodích různých typů.

### **2.1.2 Regionalizace na základě fyzikální (deskriptorové) podobnosti**

Regionalizace založená na fyzikální podobnosti je syntézou přístupu prostorové blízkosti (bude podrobněji popsána dále) a přístupu založeného na regresi. Tato metoda spočívá v přenosu hydrologických informací (např. parametrů modelu) z pozorovaných povodí (donorů) na nepozorovaná povodí. Základem přístupu deskriptorové podobnosti je shoda vybraných fyzikálních charakteristik mezi různými povodími, jež jsou následně použity k vytvoření matice podobnosti mezi jednotlivými povodími, na jejímž základě pak budou povodí seskupena do různých hydrologických regionů. Geografická blízkost není v tomto případě důležitou podmínkou (McIntyre a kol., 2005; Oudin a kol., 2008).

Tato metoda byla představena Acremanem a Sinclairem (1986) a Nathanem a McMahonem (1990) a zdůvodněna byla tím, že u povodí s podobnými fyzicko-geografickými a klimatickými charakteristikami má být i velmi podobné hydrologické chování. V současné době je metoda deskriptorové podobnosti jediným přístupem k regionalizaci, při níž se ke zjištění podobnosti mezi nepozorovanými a pozorovanými povodími používají charakteristiky povodí (Parajka a kol., 2005; Swain a Patra, 2017).

Pro vyhledávání povodí, která mají být co nejvíce podobná ve zvolených charakteristikách nepozorovaným povodím, existuje celá řada metod, například metoda RAS – Rank accumulated similarity method (Oudin a kol., 2008), jejíž postup lze shrnout do následujících kroků:

1. Výpočet absolutních hodnot odchylek mezi charakteristikou  $X$  nepozorovaného povodí a charakteristikami  $X$  všech pozorovaných povodí.
2. Přiřazení pořadí jednotlivým měřeným povodím podle velikosti odchylky. Pořadí 1 bude přiřazeno pozorovanému povodí s nejmenší hodnotou odchylky, pořadí 2 – pozorovanému povodí s druhou nejmenší odchylkou atp. V případě, že pro nalezení nejpodobnějších povodí bylo použito více charakteristik povodí, kroky 1 a 2 se opakují pro každou charakteristiku.
3. Závěrečným krokem je stanovení celkového pořadí ve formě aritmetického průměru dílčích pořadí. V tomto procesu je tedy každé použité charakteristice povodí přiřazena stejná váha.

Parajka a kol. (2005) ve své práci popisují metodu, ve které je donor vybrán jako pozorované povodí s nejnižší hodnotou indexu podobnosti:

$$\Phi = \sum_{i=1}^k \frac{|X_i^G - X_i^U|}{\Delta X_i} \quad (1)$$

kde  $\Phi$  ( $\Phi = 0$ ) – index podobnosti definovaný jako součet absolutních rozdílů mezi  $k$ -vybranými fyzikálními deskriptory pozorovaného povodí ( $X^G$ ) a zájmového nepozorovaného povodí ( $X^U$ ), vydělený normalizovaným rozsahem deskriptorů ( $\Delta X$ ).

Metoda shlukové analýzy (CLA) vybraných fyziografických charakteristik povodí byla použita pro vyhledávání deskriptorově nejpodobnějších pozorovaných povodí v práci Burna a Boormana (1993). Pomocí této metody se provádí spojení povodí do regionů podle algoritmu shlukování založeného na fyzikální podobnosti.

Postup navržený Burnem a Boormanem (1993) lze shrnout do následujících kroků:

1. Seskupení pozorovaných povodí do několika regionů.
2. Rozdělení nepozorovaných povodí do regionů definovaných v kroku 1 na základě jejich charakteristik.
3. Odhad parametrů modelu pro nepozorované povodí na základě dostupných údajů a s přihlédnutím ke skupinové příslušnosti.

Ve srovnání s jinými metodami má přístup fyzikální podobnosti zřejmé výhody. Například na rozdíl od přístupu prostorové blízkosti, který je založen na distanci mezi zkoumanými povodími, není tato metoda omezena geografickou vzdáleností zájmových povodí, což umožňuje její širší využití (Swain a Patra, 2017). Pokud jde o srovnání s regresním přístupem, který je také založen na deskriptorech povodí, přístup fyzikální podobnosti nepředpokládá lineární závislost mezi charakteristikou povodí a hydrologickou charakteristikou (Parajka a kol., 2005; Samuel a kol., 2011).

Evidentní nevýhoda přístupu fyzikální podobnosti spočívá ve výběru deskriptorů povodí, které budou použity pro výpočet měřítka podobnosti povodí. To souvisí s poměrně problematickým stanovením charakteristik, které mají největší vliv na hydrologické chování povodí. Navíc kalibrované parametry modelů ve větší míře, než hydrologické chování povodí odrážejí nejistoty ve vstupních datech, což také způsobuje potíže i pro ostatní regionalizační přístupy (Oudin a kol., 2010; Poissant a kol., 2017).

### **2.1.3 Regionalizace na základě prostorové (geografické) blízkosti**

Třetí přístup k regionalizaci je založen na prostorové blízkosti povodí a je jedním z nejranějších pokusů o modelování nepozorovaných povodí (Egbuniwe a Todd, 1976; Vandewiele a kol., 1991; Oudin a kol., 2008).

Tento přístup vychází z přenosu informace o hydrologickém chování mezi povodími v závislosti na jejich prostorové vzdálenosti (z geograficky sousedících pozorovaných povodí na nepozorovaná povodí). Předpokladem je, že geograficky blízká povodí budou mít přibližně stejné hydrologické chování. Je to odůvodněno tím, že geograficky blízká povodí by měla mít velmi podobné charakteristiky povodí, které výrazně ovlivňují celkový odtok z povodí (např. klimatické nebo půdní charakteristiky). Toto pak může v důsledku vést k podobnému hydrologickému chování. Kvalita výsledků při takovém přístupu však závisí na hustotě měřené sítě povodí (Parajka a kol., 2005; Oudin a kol., 2008; He a kol., 2011; Sawicz a kol., 2014).

Podle studie Merza a Blöschla (2004) je hlavní nevýhodou přístupu založeného na prostorové blízkosti skutečnost, že sousední povodí se mohou z hydrologického hlediska výrazně lišit. Například i když sousední povodí mají téměř stejné klima, odlišnost mezi nimi může být vyvolaná výrazným rozdílem ve využití půdy, vegetačním krytu a jiných faktorech (Acreman a Sinclair, 1986; Post a kol., 1998). Dalším problémem podle práce Oudina a kol. (2008), kterým může být účinnost metody výrazně snížena, je nedostatečná hustota sítě pozorovaných povodí. V případě, že se pozorovaná povodí nacházejí ve značné vzdálenosti od sebe, může dojít k velkému rozdílu v geologických, půdních a klimatických charakteristikách povodí. Oudin a kol. (2008) také uvádějí ještě jeden problém, jenž je spojen s existencí mnoha možných sad parametrů, které vedou k velmi podobným simulačním výsledkům a ovlivňují tak kvalitu predikce odtoku z povodí.

Jak bylo řečeno výše, při použití přístupu prostorové blízkosti záleží výběr pozorovaných povodí pro nepozorované povodí hlavně na geografické vzdálenosti mezi nimi. Jako měřítko vzdálenosti lze použít geografickou vzdálenost mezi uzávěrovými profily nebo těžišti povodí (Li a kol., 2009; Parajka a kol., 2013), založenou nejčastěji na Euklidovské vzdálenosti:

$$d_{t,d} = \sqrt{(X_t - X_d)^2 + (Y_t - Y_d)^2} \quad (2)$$

kde  $X_t$ ,  $Y_t$  a  $X_d$ ,  $Y_d$  jsou zeměpisné souřadnice centroidů cílového povodí a donoru (He a kol., 2011).

K odhadu zájmové hydrologické charakteristiky (např. parametrů modelu) lze v rámci tohoto regionalizačního přístupu použít dva způsoby: využití přístupu jednoho donoru

(single donor přístup), využití přístupu více donorů (multiple donor přístup) (Oudin a kol., 2008; Randrianasolo a kol., 2011).

### **2.1.3.1 Přístup jednoho donoru**

V rámci přístupu jednoho donoru je uvažován přenos informace o hydrologickém chování z jednoho geograficky nejbližšího pozorovaného povodí. Ačkoliv by měl tento donor vykazovat nejpodobnější hydrologické chování, výsledky, které prezentovali Oudin a kol. (2008) nebo Zhang a Chiew (2009), ukazují, že tomu tak v mnoha případech není. Vysvětlení tohoto rozporu pravděpodobně souvisí s parametrickou ekvifinalitou (Hundecha a Bárdossy, 2004), nízkou hustotou sítě pozorovaných povodí (Oudin a kol., 2008) a také s tím, že geograficky nejbližší povodí se mohou výrazněji lišit v některých klíčových charakteristikách souvisejících například s morfologií povodí.

### **2.1.3.2 Přístup více donorů**

V rámci přístupu více donorů je uvažován přenos informace o hydrologickém chování z několika nejbližších donorů. Optimální počet donorů se nejčastěji vybírá metodou pokus-omyl a je společný pro všechna řešená nepozorovaná povodí (Oudin a kol., 2008; Zhang a Chiew, 2009). Naproti tomu Parajka a kol. (2005) navrhli metodu výběru optimálního počtu donorů na základě vymezení geografického regionu kolem nepozorovaného povodí (regionem je oblast s poloměrem 50 km, v jejímž středu je situováno nepozorované povodí). Počet pozorovaných povodí v takto vymezeném regionu odpovídá optimálnímu počtu donorů pro dané nepozorované povodí (každé nepozorované povodí má jedinečný optimální počet donorů).

Vzhledem k tomu, že přístup více donorů uvažuje přenos informací z více zdrojů, je nutné tyto informace určitým způsobem upravit pro nepozorované povodí. Nejjednodušším způsobem je jejich aritmetický průměr (viz studie Parajka a kol., 2005, Oudin a kol., 2008 nebo Yang a kol., 2018):

- Průměrování parametrů

Výpočet regionální sady parametrů je průměrem parametrů z donorských pozorovaných povodí aplikovaných na nepozorované povodí. Proto lze odtok z nepozorovaného povodí za den  $j$  vypočítat takto:

$$\hat{Q}(j) = \hat{Q}\left(j, \frac{\sum_{i=1,m} X_i}{m}\right) \quad (3)$$

kde  $m$  je počet uvažovaných měřených donorských povodí a  $X_i$  je vektor hodnot parametrů modelu pro povodí dárce  $i$ .

Oudin a kol. (2008) ve své studii testovali kromě průměrování parametrů ještě metodu průměrování výstupů:

- Průměrování výstupů

Výpočet odtoku z nepozorovaného povodí se provádí na základě simulací získaných pomocí sad parametrů donorských pozorovaných povodí. Proto lze odtok za den  $j$  vypočítat takto:

$$\hat{Q}(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1,m} \hat{Q}(j, X_i) \quad (4)$$

kde  $m$  je počet měřených donorských povodí a  $X_i$  je vektor parametrů pro dárcovská povodí  $i$ .

Metoda průměrování výstupů má několik výhod oproti metodě průměrování parametrů. Za prvé, na rozdíl od metody průměrování parametrů, která bere každý parametr jako danou hodnotu a zanedbává nevyhnutelné interakce mezi nimi, metoda průměrování výstupů je uspokojivější, protože bere v úvahu meziparametrické interakce a používá hydrologické chování donoru, charakterizované podle celé sady parametrů, což vede k přesnějším výsledkům. Za druhé, průměrování výstupů umožňuje zohlednit vliv různých podmínek povodí na výsledky modelu. Obvykle je to spojeno s tím, že při použití více donorů pro analýzu, bude mít každé povodí pravděpodobně jedinečné geologické, topografické a hydrologické vlastnosti, které mohou ovlivnit chování vodního režimu a přesnost modelu. Průměrování výstupních dat umožňuje zohlednit rozdíly mezi povodími a poskytnout úplnější a přesnější pohled na celkové chování vodního režimu. To přispívá ke zvýšení prediktivní schopnosti modelu a činí jej užitečnějším. Za třetí, metoda průměrování výstupů umožňuje použití více modelů nebo sad parametrů, které lze vybrat na základě jejich

individuálních silných a slabých stran. To může poskytnout větší flexibilitu při výběru modelu a parametrizaci a může také vést ke zvýšení výkonu modelu. Přestože přístup průměrování výstupů má také určité nedostatky, jako jsou například možná citlivost na extrémní výstupy z podobných povodí, závislost efektivity na počtu použitých donorů nebo ovlivnění nedostatkem dat v některých oblastech, stává se často preferovanou metodou při odhadování odtoků na nepozorovaných povodích (viz studie Oudin a kol., 2008; Arsenaul a Brissette, 2014; Qi a kol., 2022). Celkově lze říci, že metoda průměrování výstupů je vynikajícím nástrojem pro získání přesných a spolehlivých výsledků z hydrologických modelů.

Alternativou aritmetického průměru jsou interpolační metody IDW a krigingu, které použili Vandewiele a Elias (1995), Parajka a kol. (2005) nebo Samuel a kol. (2011). Výsledky těchto studií ukazují, že interpolační techniky vedou k lepším výsledkům než průměrování a Vandewiele a Elias (1995) zjistili, že kriging poskytuje lepší výsledky než IDW.

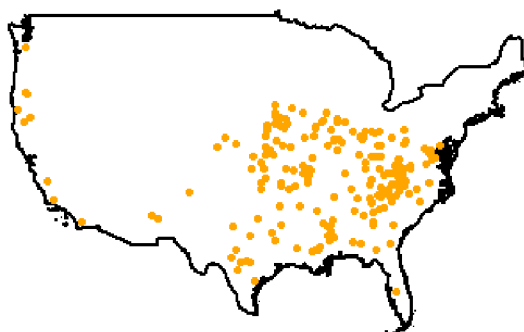
Z výše uvedeného a v souladu se studiemi, které prezentovali Oudin a kol. (2008) a Zhang a Chiew (2009), lze konstatovat, že v případě analýzy hydrologického chování na nepozorovaných povodích vede přístup více donorů k lepším výsledkům než přístup jednoho donoru. Tento výsledek pravděpodobně souvisí s tím, že větší počet donorů umožní vyhladit chyby spojené s přenosem informací o hydrologickém chování z jednotlivých donorů na nepozorované povodí.

### 3 Metodika

V rámci bakalářské práce byla provedena případová studie, ve které byl vyhodnocen vliv regionalizačního přístupu geografické blízkosti na simulační účinnost použitého srážko-odtokového modelu GR4J. Studie byla realizovaná na souboru povodí projektu MOPEX a v této kapitole jsou podrobně popsány jak použitý model, tak i zvolený regionalizační přístup.

#### 3.1 Vstupní data

K analýze byl použit soubor 200 povodí projektu MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment) (Duan a kol., 2006), neovlivněných sněhovým režimem a situovaných v USA (viz obrázek č. 3). Pro studii byl použit datový soubor čtrnáctiletých časových řad pro kalibraci modelu od 1. 1. 1954 do 31. 12. 1967 (s jednoletou „warming-up“ periodou od 1. 1. 1954 do 31. 12. 1954) a čtrnáctiletých časových řad pro validaci modelu od 1. 1. 1968 do 31. 12. 1981 (s jednoletou „warming-up“ periodou od 1. 1. 1968 do 31. 12. 1968). Pro každé povodí byly získány časové řady průměrných denních srážkových úhrnů  $P$  [mm/den], potenciální evapotranspirace  $PE$  [mm/den] a pozorovaného odtoku [mm/den]. Celková délka časových řad byla 28 let (1. 1. 1954 až 31. 12. 1981). Časové řady  $PE$  byly vypočteny metodou dle Oudina a kol. (2005) na základě průměrné denní teploty a zeměpisné šířky těžiště povodí. Z obrázku č. 3 je patrné, že největší množství povodí se nachází v jihovýchodní části USA.



Obr. 3: Rozmístění 200 povodí z projektu MOPEX na území USA, které byly použity v rámci studie.



Základní informace o použitém souboru 200 povodí projektu MOPEX jsou prezentovány v tabulce č. 2 formou vybraných charakteristik povodí. Charakteristiky jsou uvedeny s jejich označením, jednotkou měření a vybranými statistickými ukazateli. Průměrný roční úhrn srážek (MAP) byl vypočten pomocí modelu PRISM (Parameter – elevation Regressions on Independent Slopes Model) (Daly a kol., 1994). Index aridity (IA) byl pro každé povodí vypočten na základě poměru průměrné roční srážky a průměrné roční potenciální evapotranspirace. Hodnoty průměrné roční potenciální evapotranspirace byly vypočteny na základě NOAA Evaporation Atlas (Farnsworth a kol., 1982). Dlouhodobá průměrná roční teplota (MAT) byla odvozena autorkou práce na základě 26leté časové řady průměrné denní teploty vypočtené z denního teplotního minima a maxima. Relativní zastoupení půdních druhů (SANDY\_LOAM, LOAM, CLAY) na povodí bylo odvozeno na základě klasifikace USDA (Miller a White, 1998). Údaje o nasycené hydraulické vodivosti (SHC) a pórovitosti (POR) byly získány z databáze STATSGO, kterou poskytl Penn State Earth System Science Center. Pro výpočet relativního zastoupení vegetačního krytu (FOREST) a urbanizovaných ploch (URBAN) byla použita klasifikace IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) (Loveland a kol., 2000). Souřadnice těžiště povodí (X a Y) a morfologické charakteristiky (SLOPE\_MEAN, ELEV\_MEAN, EL\_IQR atd.) byly získány prostřednictvím digitálního modelu GTOPO30 s prostorovým rozlišením 30 obloukových sekund (vyvinutý US Geological Survey).

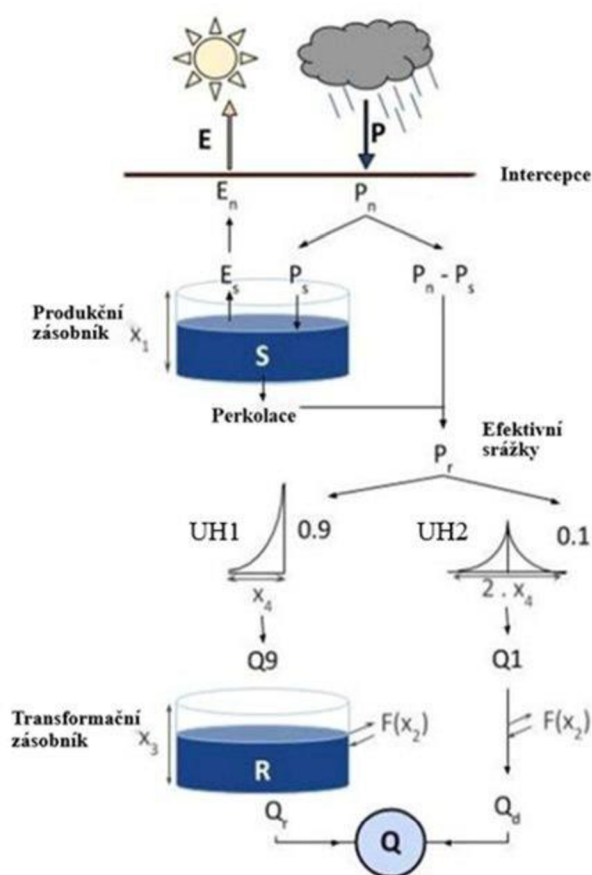
Zkratka	Název	Jednotky	Min	Max	Medián
<b>Klimatické charakteristiky</b>					
<b>MAP</b>	Dlouhodobá průměrná roční srážka na povodí	mm	357,73	2773,32	1092,50
<b>IA</b>	Index aridity	-	0,24	3,70	1,16
<b>MAT</b>	Dlouhodobá průměrná roční teplota	°C	9,13	22,40	13,40
<b>Půdní druhy</b>					
<b>SANDY_</b>	Relativní zastoupení písčitých půd na povodí	-	0,00	0,47	0,08
<b>LOAM</b>	Relativní zastoupení hlinitých půd na povodí	-	0,00	0,78	0,13
<b>CLAY</b>	Relativní zastoupení jílovitých půd na povodí	-	0,00	0,78	0,12
<b>Hydrologické charakteristiky</b>					
<b>POR</b>	Pórovitost	-	0,35	0,48	0,46
<b>SHC</b>	Nasyčená hydraulická vodivost	m/s	3,59e-07	3,57e-05	3,51e-06
<b>Vegetační charakteristiky</b>					
<b>FOREST</b>	Relativní zastoupení lesních porostů na povodí	-	0,00	1,00	0,41
<b>URBAN</b>	Relativní zastoupení urbanizovaných ploch na povodí	-	0,00	1,00	0,24
<b>Morfologické charakteristiky</b>					
<b>ELEV_</b>	Průměrná nadmořská výška	m. n. m.	3,68	2266,87	405,34
<b>MEAN</b>					
<b>SLOPE_</b>	Průměrný sklon povodí	-	0,52	19,21	4,63
<b>MEAN</b>					
<b>AREA</b>	Plocha povodí	km <sup>2</sup>	79,95	10255,36	3225,30
<b>SD</b>	Směrodatná odchylka nadmořských výšek	m. n. m.	5,06	464,43	84,98
<b>EL_IQR</b>	Interkvartilové rozpětí nadmořských výšek	m. n. m.	8,00	636,75	111,85
<b>X</b>	x souřadnice těžiště povodí	-	-1943392,00	1965108,00	902813,70
<b>Y</b>	y souřadnice těžiště povodí	-	-1824226,00	431633,50	- 811945,90

Tab. 2: Statistický souhrn vybraných charakteristik povodí pro soubor 200 povodí z projektu MOPEX.

## 3.2 Hydrologický model GR4J

Pro zpracování problematiky řešené v této bakalářské práci byl použit srážko-odtokový model GR4J (Mode'le du Ge'nie Rural a' 4 parametres Journalier).

GR4J je celistvý konceptuální srážko-odtokový model, který se skládá ze dvou zásobníků (produkčního a transformačního) a dvou jednotkových hydrogramů, které řeší časové zpoždění mezi příčinnou srážkou a odtokem z povodí. Schéma modelu je prezentováno na obrázku č. 4.



Obr. 4: Schematický diagram modelu GR4J. P – vstupní srážka, E – aktuální evapotranspirace, Q – celkový odtok z povodí (Desclaux a kol., 2017).

Model GR4J má 4 parametry, které se optimalizují během kalibrace (Perrin a kol., 2003):

- $X_1$ : maximální kapacita produkčního zásobníku (mm)
- $X_2$ : koeficient výměny vody v povodí (mm/den)
- $X_3$ : maximální jednodenní kapacita transformačního zásobníku (mm)

- X4: časový parametr jednotkového hydrogramu (den)

Vstupem do modelu GR4J jsou časové řady denních srážkových úhrnů  $P$  [mm/den] a denní potenciální evapotranspirace  $E$  [mm/den], výstupem je časová řada simulovaného odtoku  $Q$  [mm/den].

### 3.3 Kalibrace a verifikace modelu GR4J

Kalibrace modelu GR4J byla provedena na časové řadě 1. 1. 1954 až 31. 12. 1967. Pro vyhodnocení simulační účinnosti modelu GR4J byl zvolen Kling-Guptův koeficient (KGE) (Gupta a kol., 2009). KGE je numerický index, který se aktuálně často využívá pro hodnocení simulační účinnosti srážko-odtokových modelů. KGE se počítá následujícím způsobem:

$$KGE = 1 - \sqrt{(\gamma - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (r - 1)^2} \quad (5)$$

$\gamma$  = poměr směrodatných odchylek simulovaného a měřeného odtoku

$\beta$  = poměr průměrných hodnot simulovaného a měřeného odtoku

$r$  = Pearsonův korelační koeficient mezi simulovaným a měřeným odtokem.

KGE se nachází v rozmezí od  $-\infty$  do 1, přičemž ideální shoda mezi pozorovanými a simulovanými daty je při  $KGE = 1$ .

Optimální sady parametrů, které byly získány při kalibraci, byly následně využity pro verifikaci modelu na časové řadě od 1. 1. 1968 do 31. 12. 1981.

### 3.4 Popis regionalizační metody

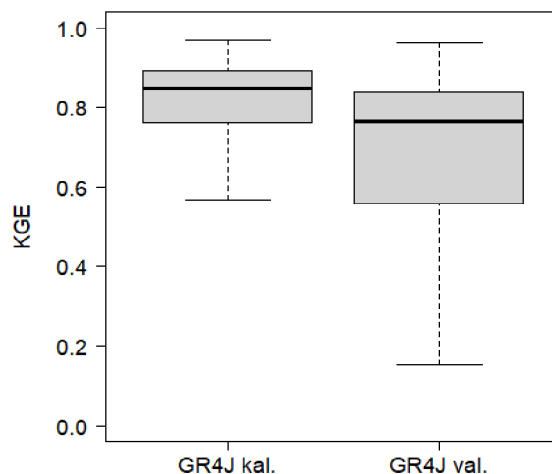
Pro případovou studii byl zvolen regionalizační přístup založený na prostorové blízkosti povodí. Vzdálenost mezi povodími byla řešena formou Euklidovské vzdálenosti mezi těžišti pozorovaného a nepozorovaného povodí, poté následoval přepočtení vypočtené vzdálenosti na vzdálenost v km (výpočet založen na Lambertově konformním kuželovém zobrazení). Těžiště povodí byla vypočtena na základě souboru souřadnic orografických rozvodnic těchto povodí. V rámci zvoleného regionalizačního přístupu byl porovnán přístup jednoho donoru s přístupem více donorů. Zároveň v rámci přístupu více donorů bylo testováno průměrování parametrů a průměrování výstupů.

## 4 Výsledky

V této kapitole jsou prezentované výsledky kalibrace a verifikace modelu GR4J a provedené regionalizační studie.

### 4.1 Kalibrace a verifikace modelu GR4J

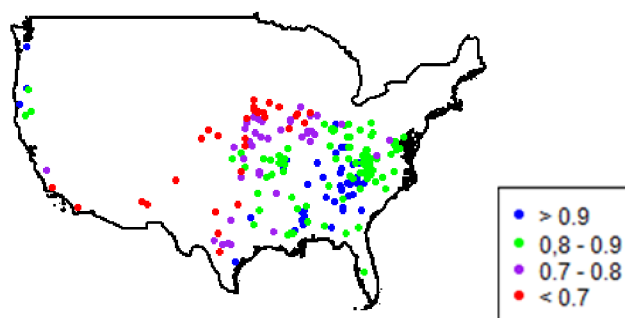
Na každém z 200 vybraných povodí projektu MOPEX byla provedena kalibrace a verifikace modelu GR4J. Jejich výsledky jsou formou kritéria KGE prezentovány na obrázku č. 5. Kalibrační výsledky ukazují relativně vysoké hodnoty kritéria KGE (medián 0,86). Při přechodu z kalibrační do verifikační fáze došlo k mírnému snížení simulační účinnosti modelu (v mediánu o cca 0,09).



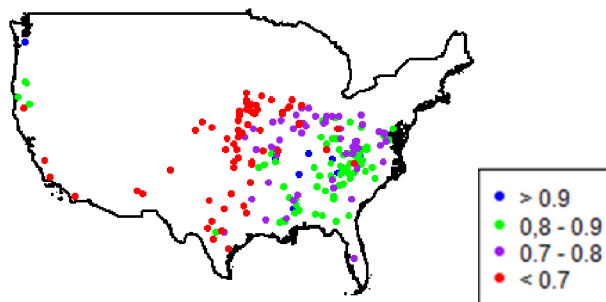
Obr. 5: Výsledky kalibrace a verifikace modelu GR4J na souboru 200 MOPEX povodí hodnocené na základě kritéria KGE. V krabicovém grafu je prezentován medián formou tučné černé čáry, dolní a horní hranu krabice vymezuje dolní a horní kvartil a vousy představují 1,5násobek mezikvartilového rozpětí.

Na obrázcích č. 6 a č. 7 jsou prezentovány kalibrační a verifikační účinnosti modelu GR4J rozdělené do 4 kategorií na jednotlivých povodích. Nejlépe simulovaná povodí v kalibrační i verifikační fázi (modré a zelené body na obrázcích č. 6 a č. 7) jsou nejčastěji lokalizovaná ve východní až severovýchodní části USA (oblast Apalačského pohoří). Dobrá výkonnost modelu může být v těchto oblastech způsobena mírným klimatem a také tím, že hydrologické procesy nejsou tak citlivé na variabilitu srážek.

Naopak nejnižších simulačních účinností modelu GR4J (fialové a červené body na obrázcích č. 6 a č. 7) bylo dosahováno na povodích v centrální části USA (oblast Velkých planin) a dále na jihu USA (Texas), což může souviset se složitou topografií a nedostatečným pozorováním srážek ke kalibraci hydrologických modelů. Na západním pobřeží byly vyšší simulační účinnosti modelu GR4J v kalibrační i verifikační fázi zaznamenány na povodích lokalizovaných blíže hranicím Kanady. Špatně simulovaná povodí na západním pobřeží byla situována na jihu (Kalifornie).



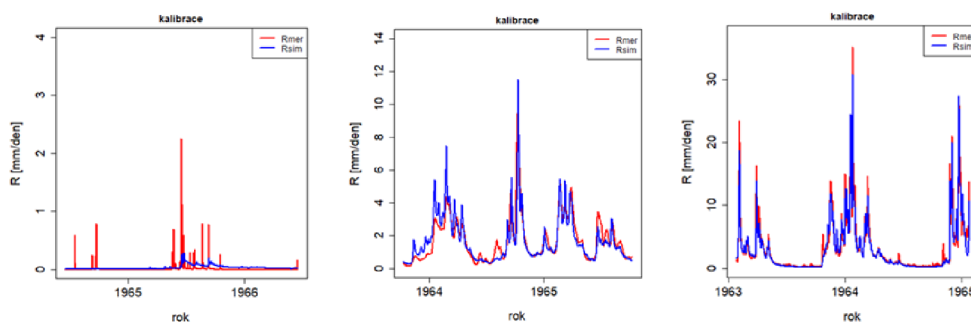
Obr. 6: Rozmístění 200 povodí z hlediska simulační účinnosti modelu GR4J v kalibrační fázi.



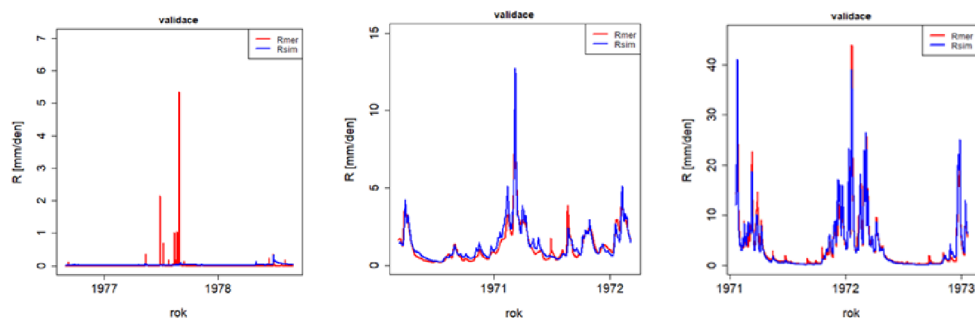
Obr. 7: Rozmístění 200 povodí z hlediska simulační účinnosti modelu GR4J ve verifikační fázi.

Na obrázcích č. 8 a č. 9 jsou prezentovány hydrogramy pozorovaných a simulovaných odtoků tří povodí v kalibrační a verifikační fázi. Povodí byla vybrána na základě kalibračního kritéria KGE: nejnižší, mediánové a nejvyšší. Zástupcem povodí s nejnižší hodnotou KGE v kalibraci je povodí Conchas River, s mediánovou hodnotou KGE v kalibraci – povodí Little Pee Dee a s nejvyšší hodnotou KGE v kalibraci – povodí Chehalis River. Vybraná povodí se mezi sebou liší svými

charakteristikami (viz tabulka č. 3). Na povodích dominují písčité půdy. Povodí Conchas River patří do skupiny aridních povodí. Povodí Chehalis River patří mezi nejhumidnější povodí souboru. Z těchto tří povodí dosahuje nejvyšší průměrné nadmořské výšky povodí Conchas River, nejvyšší hodnoty průměrné roční srážky pak povodí Chehalis River. Z obrázků č. 8 a č. 9 je patrné, že v případě nízkých hodnot kritéria KGE (povodí Conchas River) nebyl model GR4J schopen korektně simulovat celkový odtok z povodí, a to jak v kalibrační, tak i verifikační fázi (viz hydrogram odtoku na obrázku č. 8 vlevo a na obrázku č. 9 vlevo). Pokud se kalibrační hodnoty KGE pohybovaly kolem mediánu (povodí Little Pee Dee), pak model celkově dobře simuloval nízké i střední odtoky v obou fázích (viz hydrogram na obrázku č. 8 uprostřed a hydrogram na obrázku č. 9 uprostřed). Nicméně jak v kalibrační fázi, tak ve validační byly vysoké odtoky výrazně nadhodnocovány. Co se týká vysokých kalibračních hodnot kritéria KGE (povodí Chehalis River), docházelo v tomto případě k určitému podhodnocování vysokých i středních odtoků v kalibrační fázi (viz hydrogram na obrázku č. 8 vpravo), ale ve validační fázi bylo zaznamenáno nadhodnocování středních odtoků (viz hydrogram na obrázku č. 9 vpravo).



Obr. 8: Hydrogramy odtoků tří povodí, zaměřené na období s nejvyšším odtokem, podle hodnoty KGE: nejhorší (Conchas River), mediánové (Little Pee Dee) a nejlepší (Chehalis River) (zleva doprava), v kalibrační fázi, Rsim je simulovaný odtok [mm/den] – modrá čára, Rmer je pozorovaný odtok [mm/den] – červená čára.



Obr. 9: Hydrogramy odtoku tří povodí, zaměřené na období s nejvyšším odtokem, podle hodnot KGE: nejhorší (Conchas River), mediánové (Little Pee Dee) a nejlepší (Chehalis River) (zleva doprava), ve validační fázi, Rsim je simulovaný odtok [mm/den] – modrá čára, Rmer je pozorovaný odtok [mm/den] – červená čára.

	<b>Conchas River</b>	<b>Little Pee Dee</b>	<b>Chehalis River</b>
<b>Název povodí</b>			
<b>Průměrná teplota (°C)</b>	12	16	10
<b>Průměrná roční hodnota srážek (mm)</b>	358	1215	1602
<b>Index aridity</b>	0,24	1,17	2,69
<b>Průměrná nadmořská výška (m.n.m.)</b>	1708	55	252
<b>Nasycená hydraulická vodivost (m/s)</b>	4,73e-06	1,73e-05	2,08e-06
<b>Plocha povodí (km<sup>2</sup>)</b>	1332	7145	2291
<b>Dominantní půdní druhy</b>	Písčité půdy	Písčité půdy	Hlinité půdy

Tab. 3: Charakteristiky tří vybraných povodí.

## 4.2 Regionalizační studie na souboru povodí projektu MOPEX

Regionalizační studie byla provedena na souboru 200 povodí projektu MOPEX. Regionalizace byla založena na přístupu prostorové blízkosti povodí, která byla vyjádřena pomocí Euklidovské vzdálenosti těžišť povodí. Jako hodnotící kritérium byl použit Kling-Guptův koeficient (KGE).



#### **4.2.1 Analýza vztahu mezi simulační účinností modelu GR4J a počtem použitých donorů**

V této kapitole je analyzována závislost mezi simulační účinností hydrologického modelu GR4J a počtem použitých donorů. Pro analýzu byly použity dva přístupy: přístup jednoho donoru a přístup více donorů. Pro integraci informací z donorů byly použity dva přístupy: přístup průměrování parametrů, přístup průměrování výstupů. Hodnocení simulační účinnosti bylo provedeno pomocí kritéria KGE (viz rovnice č. 5). Analýza byla provedena na dvou časových řadách: 1. 1. 1954 do 31. 12.1967 (PER1 – odpovídá kalibrační periodě) a 1. 1. 1968 do 31. 12. 1981 (PER2 – odpovídá validační periodě).

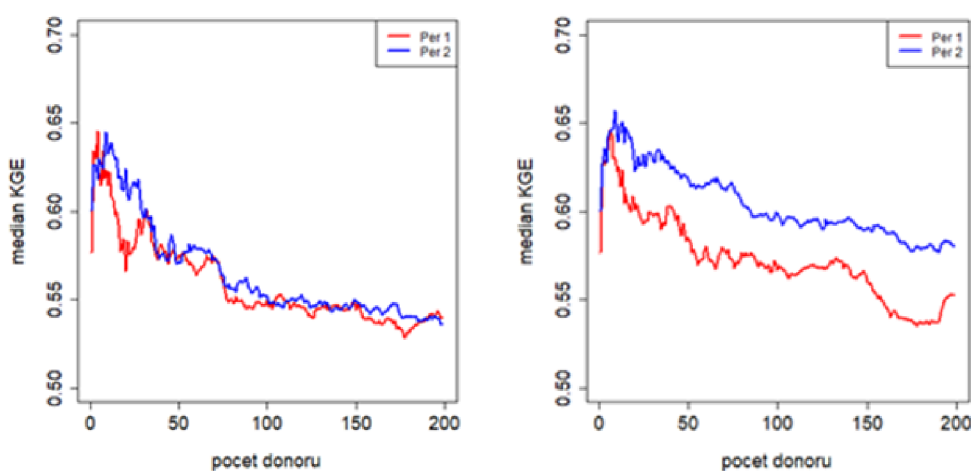
Výsledky analýzy jsou prezentovány na obrázku č. 10. Z grafů je patrné, že simulační účinnost modelu GR4J byla na nepozorovaných povodích vyšší při použití nižšího počtu donorů a v případě použití jenom jednoho donoru nebylo dosaženo vysokých hodnot KGE. Lze konstatovat, že s rostoucím počtem donorů (od počtu přibližně 4 až 5 donorů při průměrování parametrů a od počtu přibližně 6 až 7 donorů při průměrování výstupních dat) hodnoty mediánu KGE klesají.

Z obrázku č. 10 je dále patrné, že na periodě PER2 bylo dosahováno vyšších hodnot mediánu kritéria KGE pro oba přístupy průměrování než na periodě PER1 (výraznější rozdíl byl zaznamenán pro metodu průměrování výstupů, viz obrázek č. 10 vpravo).

V případě přístupu průměrování parametrů (obrázek č. 10 vlevo) je patrný výraznější pokles mediánu KGE od 6 donorů pro PER1 a od 11 donorů pro PER2 do cca 70 použitých donorů. Od 70 donorů byl pokles mediánu KGE pro obě periody již nevýrazný. Výrazný pokles mediánu KGE byl zaznamenán pro 19 donorů a periodu PER1, po němž následoval vzestup mediánu KGE do cca 30 donorů. Nejvyšší hodnota mediánu KGE byla cca 0,645 a bylo jí dosaženo při použití 4 donorů pro periodu PER1, pro periodu PER2 to bylo 9 donorů.

V případě přístupu průměrování výstupních dat (obrázek č. 10 vpravo) je patrný výraznější pokles mediánu KGE od 7 donorů pro periodu PER1 do cca 60 použitých donorů a od 150 do 190 použitých donorů. Pro periodu PER2 byl výraznější pokles mediánu zaznamenán od 14 donorů do cca 80 donorů, po kterém následoval již jen

nevýrazný pokles mediánu KGE. Kontrastní rozdíly v hodnotách mediánu KGE pro obě periody jsou patrné například při použití přibližně 35 donorů, kdy hodnota mediánu KGE byla cca 0,602 pro periodu PER1 a cca 0,625 pro periodu PER2. Nejvyšší hodnoty mediánu KGE bylo dosaženo při použití 6 donorů pro periodu PER1 (cca 0,646) a při použití 9 donorů pro periodu PER2 (cca 0,657).



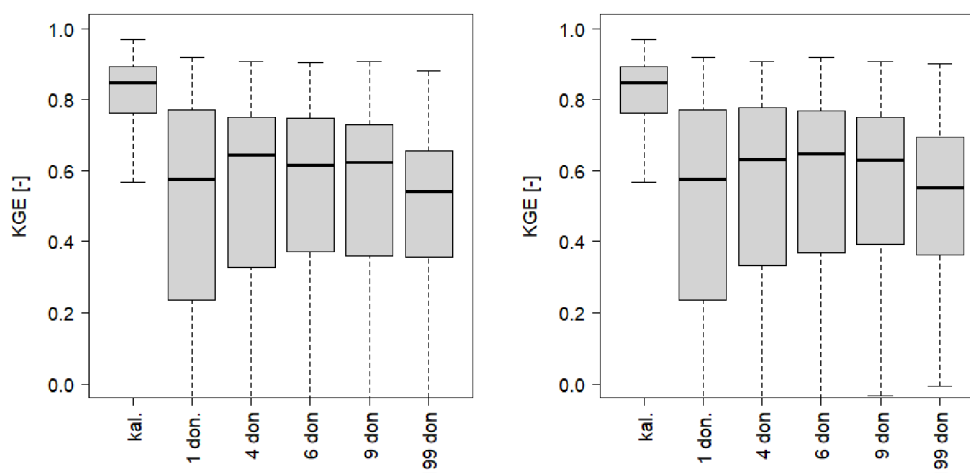
Obr. 10: Změny mediánu KGE v závislosti na změně počtu donorů v rámci přístupu průměrování parametrů (vlevo) a přístupu průměrování výstupů (vpravo) pro časové periody PER1 a PER2.

#### 4.2.2 Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J v kalibraci a validaci s regionalizačními výsledky pro průměrování parametrů a výstupů

V této kapitole jsou porovnány výsledky simulační účinnosti modelu GR4J v kalibraci a validaci s regionalizačními výsledky s použitím různých počtů donorů pro přístup průměrování parametrů a přístup průměrování výstupů na časových řadách PER1 a PER2.

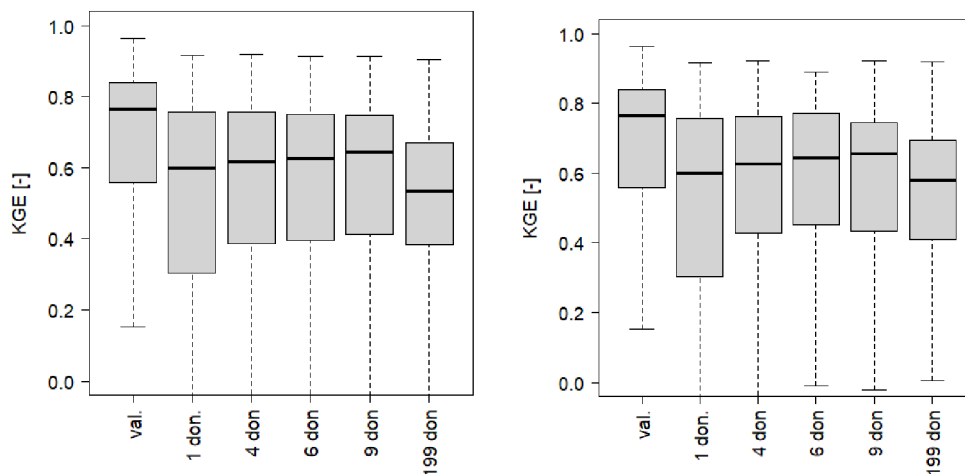
Z obrázků č. 11 a č. 12 je patrný výrazný pokles simulační účinnosti modelu při přechodu z kalibrační, resp. validační fáze do fáze regionalizace. Navzdory základnímu předpokladu přístupu prostorové blízkosti povodí nebylo nejvyšších hodnot mediánu dosaženo při použití jednoho geograficky nejbližšího donoru. Použití globálního průměru (tj. průměru ze všech 199 donorů) pro každé nepozorované povodí vedlo k nejhorším hodnotám KGE. Z obrázku č. 11 vlevo je dále patrné, že v případě průměrování parametrů byl pokles simulační účinnosti mezi kalibračními výsledky

a nejlepšími regionalizačními výsledky (4 donory) v mediánu 0,215. V případě průměrování výstupů byl pokles simulační účinnosti mezi kalibračními výsledky a nejlepšími regionalizačními výsledky (6 donory) v mediánu 0,214 (viz obr. č. 11 vpravo).



Obr. 11: Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J v kalibrační fázi s regionalizačními výsledky založenými na použití 1, 4, 6, 9 a 199 donorů pro přístup průměrování parametrů (vlevo) a pro přístup průměrování výstupů (vpravo) na časové řadě PER1. V krabicovém grafu je prezentován medián formou tučné černé čáry, dolní a horní hranu krabice vymezuje dolní a horní kvartil a vousy představují 1,5násobek mezikvartilového rozpětí.

Na obrázku č. 12 lze vidět také pokles simulační účinnosti modelu při přechodu z validace do regionalizace. Oproti hodnotě mediánu KGE při validaci (0,77) v regionalizaci s použitím přístupu průměrování parametrů byla nejvyšší hodnota mediánu zaznamenána při použití 9 donorů a rozdíl v mediánech je 0,125 (viz obr. č. 12 vlevo). Pro přístup průměrování výstupů bylo nejvyšší hodnoty mediánu KGE dosaženo také při použití 9 donorů, ale rozdíl v mediánech byl trochu menší – 0,113 (viz obr. č. 12 vpravo).



Obr. 12: Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J ve validační fázi s regionalizačními výsledky založenými na použití 1, 4, 6, 9 a 199 donorů pro přístup průměrování parametrů (vlevo) a pro přístup průměrování výstupů (vpravo) na časové řadě PER2. V krabicovém grafu je prezentován medián formou tučné černé čáry, dolní a horní hranu krabice vymezuje dolní a horní kvartil a vousy představují 1,5násobek mezikvartilového rozpětí.

## 5 Diskuze

### Kalibrace a validace modelu

Z výsledků kalibrace a verifikace modelu GR4J je patrné, že je model poměrně úspěšný v simulaci nízkých a středních odtoků na různých povodích. Přestože je mediánový pokles nevýrazný, stále existuje, a to zejména na aridních povodích, která jsou v souboru povodí přítomna (například Conchas River), což ukazuje, že model má určité strukturální nedostatky. Srážko-odtokové modely jako GR4J, které nejsou svou strukturou přímo cíleny na simulaci odtoku na aridních povodích, velice špatně simulují srážko-odtokový proces na nich, protože tento je komplexnější a více nelineární než na humidních povodích (Parajka a kol., 2005, 2013; Ibbitt a kol., 2018).

Co se týká nedostatečné kvality simulací vysokých odtoků (mírné podhodnocování nebo nadhodnocování) na humidních povodích (například povodí Chehalis River), může to být způsobeno tím, že model GR4J byl původně navržen tak, aby byl schopen zachytit interakce mezi povrchovou a podzemní vodou na povodích ve Francii, kde je hydrologický režim charakterizován relativně nízkou variabilitou srážek a teploty po celý rok. Tím pádem nemusí být model vhodný pro regiony s vysoce proměnlivými klimatickými podmínkami, a proto při simulaci vysokých hodnot odtoku, například v období povodní, může být model GR4J méně úspěšný (v období silných srážek nebere v úvahu složitou dynamiku povrchového odtoku, způsobenou vysokou rychlostí a objemem povrchového odtoku) (Perrin a kol., 2003). K podobnému závěru o omezení modelu GR4J při simulaci vysokých odtoků na humidních povodích dospěli i Bhusal a kol. (2013).

### Analýza vztahu mezi simulační účinností modelu a počtem donorů

Výsledky prezentované v kapitole 4.2.1 ukazují značné rozdíly v simulační účinnosti modelu při použití různého počtu donorů. Nejvyšší simulační účinnosti modelu bylo dosaženo při použití přístupu více donorů, avšak pouze při jejich omezeném počtu. Takové výsledky mohou být spojeny s tím, že použití více donorů umožňuje vyhlazení chyb v simulaci odtoku spojených s jednotlivými donory (Oudin a kol., 2008). Přestože základním předpokladem přístupu prostorové blízkosti je, že geograficky nejbližší povodí by mělo mít velice podobné hydrologické chování s cílovým povodím, tím pádem přístup jednoho donoru by musel být efektivnější než přístup více

donorů, výsledky analýzy ukazují, že tomu tak není. Důvod této nesrovnalosti může spočívat v nedostatečné hustotě sítě povodí, kvůli které i geograficky nejbližší povodí se mohou nacházet relativně daleko od cílových povodí. To může vést k významným rozdílům v jejich charakteristikách (např. klimatických), které hrají klíčovou roli při formování odtoku z povodí a jeho velikosti. K podobným výsledkům ve svých pracích dospěli také Oudin a kol. (2008) a Zhang a Chiew (2009).

Co se týká optimálního počtu donorů potřebných pro dosažení dobré simulační účinnosti, je z výsledků prezentovaných v kapitole 4.2.1 patrné, že v rámci metody průměrování parametrů jsou to přibližně 4 donory, v rámci metody průměrování výstupů přibližně 6 donorů. Při použití vyššího počtu donorů bylo zjištěno, že simulační účinnost klesá, a to v rámci obou metod. Tyto výsledky jsou poměrně blízké výsledkům, jež prezentovali Oudin a kol. (2008) a Qi a kol. (2022). V těchto pracích byl také použit model GR4J. Výsledky studií Oudina a kol. (2008) ukázaly, že se optimální počet donorů pohyboval kolem 5, a také bylo zjištěné, že při zvýšení jejich počtu se simulační účinnost modelu snižovala téměř lineárně. Výsledky studií Qi a kol. (2022) ukázaly, že pro přístup průměrování parametrů je optimální počet donorů 1 až 5, pro průměrování výstupů 4 až 6. Dostatečná podobnost výsledků této práce a obou studií ukazuje na robustnost použité regionalizační metody.

Pokles simulační účinnosti modelu spojený se zvyšováním počtu donorů může být způsoben rostoucí vzdáleností mezi povodími a tím pádem přítomností hydrologicky velmi odlišných povodí (Oudin a kol., 2008), jejichž parametrické sady mohou v případě průměrování parametrů negativně ovlivnit výpočet průměrné parametrické sady pro nepozorované povodí, nebo v případě průměrování výstupních dat negativně ovlivnit výpočet průměrného výstupu nepozorovaného povodí.

Rozdíl v optimálních počtech donorů pro přístup průměrování parametrů a přístup průměrování výstupních dat je nejspíše spojen s různými principy fungování těchto metod. Zatímco přístup průměrování parametrů ignoruje meziparametrické interakce, přístup průměrování výstupů s těmito interakcemi počítá a tím dosahuje vyšších simulačních účinností (Arsenaul a Brissette, 2014; Qi a kol., 2022).

## **Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J v kalibraci a validaci s regionalizačními výsledky pro průměrování parametrů a výstupů**

Výsledky prezentované v kapitole 4.2.2 představují porovnání kalibračních, validačních a regionalizačních výsledků na souboru 200 povodí projektu MOPEX. Výsledky dle kritéria KGE ukazují, že při přechodu z kalibrace, resp. validace do regionalizace se simulační účinnost srážko-odtokového modelu výrazně snížila. Tento výsledek lze nejspíše zdůvodnit tím, že se při lokální kalibraci a validaci povodí ze souboru model GR4J přizpůsobuje specifickým charakteristikám každého jednotlivého povodí, což vede k lepšímu výkonu modelu a lepším hodnotám KGE (Perrin a kol., 2003; Parajka a kol., 2007). Naopak při regionalizaci na základě prostorové blízkosti povodí s využitím průměrování parametrů a výstupů jsou všechna povodí modelována na základě parametrických sad donorů, které mohou mít více či méně odlišný hydrologický režim. Navíc je otázkou, zda je geografická blízkost povodí skutečně vhodným měřítkem hydrologické podobnosti povodí. Pokud by byla, pak by přístup jednoho donoru měl vést k nejlepším regionalizačním výsledkům (v porovnání s přístupem více donorů), které by navíc byly velmi podobné výsledkům lokální kalibrace a následné validace. Výsledky prezentované zde, ale i ve studiích Oudina a kol. (2008) a Zhanga a Chiewa (2009) a mnoha dalších, ukazují, že tomu tak není. Tento výsledek má pravděpodobně dvě příčiny: omezenou platnost tohoto regionalizačního přístupu a nedostatečnou síť donorů kolem cílových akceptorů. Acreman a Sinclair (1986) a Post a kol. (1998) uvádějí, že i geograficky velmi blízká povodí (např. sousední) se mohou výrazně lišit v hydrologickém chování. Tento rozdíl v hydrologickém chování blízkých povodí může souviset s rozdíly v charakteristikách povodí, které jsou klíčové pro dynamiku celkového odtoku z povodí (např. povodí velmi blízko sebe mohou mít podobné klíčové klimatické charakteristiky, ale i další, které klima ovlivňuje – přirozený vegetační kryt, některé půdní charakteristiky, ale liší se morfologickými charakteristikami, jako jsou sklonové poměry na povodí, plocha povodí a jiné, v důsledku toho se pak tato povodí budou lišit i hydrologickým chováním). Oudin a kol. (2008) uvádějí, že dalším limitujícím faktorem pro tento regionalizační přístup je nedostatečná hustota povodí v použitém souboru povodí. V případě nízké hustoty potenciálních donorů kolem akceptorů mohou nastat dvě situace: i geograficky nejbližší povodí v použitém souboru povodí mohou být reálně velmi vzdálená a tím pádem i hydrologicky více odlišná a nižší počet potenciálních

donorů kolem akceptorů povede k nižší pravděpodobnosti, že některý z těchto potenciálních donorů bude vykazovat podobné hydrologické chování jako cílový akceptor.



## 6 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na vyhodnocení regionalizačního přístupu prostorové (geografické) blízkosti povodí z hlediska simulační účinnosti srážko-odtokového modelu GR4J. K analýze byl použit soubor 200 povodí projektu MOPEX nacházejících se na území USA. Prostorová blízkost povodí byla stanovena na základě Euklidovských vzdáleností mezi těžišti povodí. K predikci odtoku na nepozorovaných povodích byly použity dva přístupy: přístup jednoho donoru a přístup více donorů. V rámci přístupu více donorů byly testovány metody průměrování parametrů a průměrování výstupů.

Výsledky kalibrace a validace hodnocené formou kritéria KGE ukázaly na robustnost použité modelové struktury, kdy simulační účinnost modelu byla v kalibrační i validační fázi více než uspokojivá.

Výsledky analýzy vlivu počtů donorů na simulační účinnost modelu GR4J ukázaly, že počet použitých donorů značně ovlivňuje účinnost modelu. Přístup více donorů vede k lepším výsledkům než přístup s jedním donorem, s ohledem na použité hodnotící kritérium. Nicméně je pro dosažení lepších výsledků nezbytné použít co nejmenší počet donorů (optimální počet je zde 4 a 6). Dále bylo zjištěno, že metoda průměrování výstupů vede k lepším výsledkům než průměrování parametrů.

Na základě výsledků regionalizační studie se přístup geografické blízkosti ukazuje jako efektivní způsob pro simulaci odtoku na nepozorovaných povodích při splnění klíčových podmínek, které ovlivňují jeho efektivitu (například dostatečně hustá síť povodí).

## 7 Seznam literatury a použitých zdrojů

- ACREMAN M. C., SINCLAIR C. D., 1986: Classification of drainage basins according to their physical characteristics; an application for flood frequency analysis in Scotland. *Journal of Hydrology* 84, 365–380.
- ARSENAULT R., BRISSETTE F. P., 2014: Continuous streamflow prediction in ungauged basins: the effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches. *Water Resources Research* 50 (7), 6135–6153.
- BÁRDOSSY A., 2007: Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 703–710.
- BHUSAL S. P., O'DONNELL G. M., MCALPINE C. A., 2013: Evaluation of the GR4J model parameter transferability under different climatic conditions in Australia. *Journal of Hydrology* 501, 115–125.
- BLÖSCHL G., SIVAPALAN M., 1995: Scale issues in hydrological modelling a review. *Hydrological processes* 9(3–4), 251–290.
- BURN D. H., BOORMAN D. B., 1993: Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of Hydrology* 143, 429–454.
- CALVER A., LAMB R., STEPHENSON D., HUNTER N., SHANKAR U., 2005: The potential of hydrological models for use in water management. *Hydrology and Earth System Sciences* 9(1), 19–24.
- COOK, R. D., WEISBERG S., 1982: *Residuals and influence in regression*. New York: Chapman and Hall, 230 s.
- DALY C., NEILSON R. P., PHILLIPS D. L., 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* 33, 140–158.
- DESCLAUX T., PISCHEDDA M., LEMONNIER H., LE GENDRE R., SOULARD B., 2017: Vers une modélisation déterministe des écoulements de surface en Nouvelle-Calédonie. Implémentation du code GR4H sur quatre bassins versants du Grand Nouméa. Rapport IFREMER – UR LEADNC, 35 s.
- DUAN Q., SCHAAKE J., ANDREASSIAN V., FRANKS S., GOTETI G., GUPTA H. V., GUSEV Y. M., HABETS F., HALL A., HAY L., HOGUE T., HUANG M., LEAVESLEY G., LIANG X., NASONOVA O. N., NOILHAN J., OUDIN L.,

- SOROOSHIAN S., WAGENER T., WOOD E. F., 2006: Model Parameter Estimation 67 Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology* 320(1–2), 3–17. ISBN: 0022-1694.
- EGBUNIWE N., TODD D. K., 1976: Application of the stanford watershed model to Nigerian watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 12(3), 449-460.
  - FARNSWORTH R. K., THOMPSON E. S., PECK E. L., 1982: Evaporation Atlas for the contiguous 48 United States, NOAA Technical Report NWS. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service.
  - FERNANDEZ W., VOGEL R., SANKARASUBRAMANIAN A., 2000: Regional Calibration of a Watershed Model. *Hydrological Sciences Journal* 45(5), 689-707.
  - FREEDMAN V. G., 2009: The ecological effects of climate change on freshwater ecosystems: a review. *Freshwater Biology* 54(10), 959-974.
  - GOTTSCHALK L., 1985: Hydrological regionalization of Sweden. *Hydrological Sciences Journal* 30(1), 65–83.
  - GOTTSCHALK L., JENSEN J. L., LUNDQUIST D., SOLANTIE R., TOLLAN A., 1979: Hydrologic regions in the Nordic countries. *Hydrology Research*, 10(5), 273-286.
  - GUPTA H. V., KLING H., YILMAZ K. K., MARTINEZ G.F., 2009: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80–91. ISSN 00221694.
  - GUPTA V. K., SOHOORIAN S., 1985: The automatic Calibration of conceptual catchment models using derivative – based optimization algorithmus. *Water resources research* 21, 473–485.
  - HANOUSEK Č., CHARAMZA P., 1992: Regionalization of low flows in the Czech Republic. IAHS-AISH publication 208, 51–58.
  - HE Y., BÁRDOSSY A., ZEHE E., 2011: A review of regionalisation for continuous streamflow simulation, *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 3539–3553.

- HEUVELMANS G., MUYS B., FEYEN J., 2006: Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology* 319, 245–265.
- HOGUE T. S., HSU K. L., GUPTA H. V., SOROOSHIAN S., 2000: Model parameter estimation experiment (MOPEX): an overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology* 251(1–2), 3–16.
- HUNDECHA Y., BÁRDOSSY A., 2004: Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology* 292, 281–295.
- CHIAN L. C., TSENG C. M., WU Y. M., 2002: A regionalized flood forecasting model based on a distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology* 263(1–4), 90–104.
- IBBITT R. P., SLATER L. J., WILBY R. L., 2018: The impact of climate change on flood frequency and severity in the UK and the effect of adapting mitigation strategies: GR4J model calibration and validation. *Journal of Hydrology* 561, 942–955.
- JARBOE J. E., HAAN C. T., 1974: Calibrating a water yield model for small ungauged watersheds. *Water Resources Research* 10, 256–262.
- LAMB R., KAY A., 2002: Hydrological modeling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography* 26(2), 203–225.
- LAMB R., KAY A., 2004: Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain. *Water Resources Research*, 40(7).
- LAMB R., CREWETT J., KAY A. L., 2000: Progress in the spatial generalisation of “continuous simulation“ flood frequency modeling. In: *River Flood Defence*, 1. edited by: TOENSMANN F., KOCH M. *Kassel Reports of Hydraulic Engineering* 9, 117–125.
- LI H., ZHANG Y., CHIEW F. H. S., XU S., 2009: Predicting runoff in ungauged catchments by using Xinanjiang model with MODIS leaf area index. *Journal of Hydrology* 370, 155–162.

- LI Z., ZHANG Y. K., YANG T., 2018: A hydrological regionalization method based on the nonlinear relationships of streamflow sensitivity to climate variability. *Journal of Hydrology* 556, 746–759.
- LOVELAND T. R., REED B. C., BROWN J. F., OHLEN D. O., ZHU J., YANG L., MERCHANT J. W., 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 -km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 21(6-7), 1303-1330.
- McINTYRE N., LEE H., WHEATER H., YOUNG A., WAGENER T., 2005: Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resources Research* 41. W12434.
- MERZ R., BLÖSCHL G., 2004: Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology* 287, 95–123.
- MILLER D. A., WHITE R. A., 1998: A conterminous united states multi layer soil characteristics data set for regional climate and hydrology modeling. *Earth Interactions* 2 (2),1–26.
- NATHAN R. J., McMAHON T. A., 1990: Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology* 121, 217–238.
- OUDIN L., KAY A., ANDREASSIAN V., PERRIN C., 2010: Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? *Water Resources Research* 46, W11558.
- OUDIN L., ANDRÉASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., LE MOINE M., 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44, 1–15.
- OUDIN L., HERVIEU F., MICHEL C., PERRIN C., ANDREASSIAN V., ANCTIL F., 2005: Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1–4), 290–306.
- PARAJKA J., BLÖSCHL G., MERZ R., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences* 9, 157–171.

- PARAJKA J., BLÖSCHL G., MERZ R., 2007: Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(1), 163–174.
- PARAJKA J., VIGLIONE A., ROGGER M., SALINAS J.L., SIVAPALAN M., BLÖSCHL G., 2013: Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: Runoff-hydrograph studies. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(6), 2279–2294.
- PARDE´ M., 1933: *Fleuves et Rivie`res*, Paris, 224 s.
- PERRIN C., MICHEL C., ANDRÉASSIAN V., 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology* 279, 275–289.
- POISSANT D., ARSENAULT R., BRISSETTE F., 2017: Impact of parameter set dimensionality and calibration procedures on streamflow prediction at ungauged catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 12, 220–237.
- POST D. A., JONES J. A., GRANT G. E., 1998: An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments. *Environmental Modelling and Software*, 13(3-4), 395-403.
- QI W.Y., CHEN J., LI L., XU C.Y., LI J., XIANG Y., ZHANG S., 2022: Regionalization of catchment hydrological model parameters for global water resources simulations. *Hydrology Research* 53(3), 441–466.
- RANDRIANASOLO A., RAMOS M. H., ANDREASSIAN V., 2011: Hydrological ensemble forecasting at ungauged basins: using neighbour catchments for model setup and updating. *Advances in Geosciences* 29, 1–11.
- SAMUEL J., COULIBALY P., METCALFE R. A., 2011: Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: comparison of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering* 16, 447–459.
- SAWICZ K. A, KELLEHER C., WAGENER T., TROCH P., SIVAPALAN M., CARRILLO G., 2014: Characterizing hydrologic change through catchment classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 273-285.
- SCHAAKE J. C., ANDREASSIAN V., 1986: Optimization of a distributed hydrologic model using multivariate streamflow observations. *Water Resources Research* 22(4), 539–548.

- SIVAPALAN M., TAKEUCHI K., FRANKS S. W., GUPTA V. K., KARAMBIRI H., LAKSHMI V., LIANG X., MCDONNELL J. J., MENDIONGO E. M., O'CONNELL P. E., 2003: IAHS decade on Predictions of Ungauged Basins (PUB): Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Science Journal* 48 (6), 857–879.
- SUTCLIFFE J. V., LITTLE C. H. A., 1965: Watershed experiments: 1. A technique for regional analysis of runoff characteristics in the United States. *Journal of Hydrology* 3.3–4, 330–352.
- SWAIN J. B., PATRA K. Ch., 2017: Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. *Journal of Hydrology* 554, 420–433, ISSN 0022-1694.
- VANDEWIELE G. L., ELIAS A., 1995: Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology* 170, 277–291.
- VANDEWIELE G. L., XU C. Y., HUYBRECHT W., 1991: Regionalisation of physically based water balance models in Belgium: Application to ungauged catchments, *Water Resources Management* 5, 199–208.
- WAGENER T., WHEATER H. S., 2006: Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology* 320, 132–154.
- WAGENER T., WHEATER H. S., GUPTA H. V., 2004: Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. Imperial College Press, London, 300 s, ISBN 1-86094-466-3.
- XU C., 2003: Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to a large area in central Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences* 7, 317–324.
- YANG X., MAGNUSSON J., RIZZI J., XU C.Y., 2018: Runoff prediction in ungauged catchments in Norway: comparison of regionalization approaches. *Hydrology Research* 49 (2), 487–505.
- YOUNG A. R., 2006: Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model *Journal of Hydrology* 320, 155–172.
- ZHANG Y., CHIEW F. H. S., 2009: Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments. *Water Resources Research* 45, W07412.

## 8 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Obecný postup tří regresních regionalizačních metod (He a kol., 2011).....	6
Obr. 2: Schematické znázornění postupu regionalizaci pomocí dvoustupňové regrese, kde $\theta$ – sada parametrů modelu, $I$ – matice vstupních proměnných (např. srážky a teploty), $Q$ – simulovaný průtok, $\Phi$ – fyzikálně-geografické a meteorologické charakteristiky povodí (Wagener a Wheeler, 2006). .....	7
Obr. 3: Rozmístění 200 povodí z projektu MOPEX na území USA, které byly použity v rámci studie .....	16
Obr. 4: Schematický diagram modelu GR4J. $P$ – vstupní srážka, $E$ – aktuální evapotranspirace, $Q$ – celkový odtok z povodí (Desclaux a kol., 2017).....	19
Obr. 5: Výsledky kalibrace a verifikace modelu GR4J na souboru 200 MOPEX povodí hodnocené na základě kritéria KGE. V krabicovém grafu je prezentován medián formou tučné černé čáry, dolní a horní hranu krabice vymezuje dolní a horní kvartil a vousy představují 1,5násobek mezikvartilového rozpětí. ....	21
Obr. 6: Rozmístění 200 povodí z hlediska simulační účinnosti modelu GR4J v kalibrační fázi. ....	22
Obr. 7: Rozmístění 200 povodí z hlediska simulační účinnosti modelu GR4J ve verifikační fázi. ....	22
Obr. 8: Hydrogramy odtoků tří povodí, zaměřené na období s nejvyšším odtokem, podle hodnoty KGE: nejhorší (Conchas River), mediánové (Little Pee Dee) a nejlepší (Chehalis River) (zleva doprava), v kalibrační fázi, $R_{sim}$ je simulovaný odtok [mm/den] – modrá čára, $R_{mer}$ je pozorovaný odtok [mm/den] – červená čára. ....	23
Obr. 9: Hydrogramy odtoku tří povodí zaměřené na období s nejvyšším odtokem, podle hodnot KGE: nejhorší (Conchas River), mediánové (Little Pee Dee) a nejlepší (Chehalis River) (zleva doprava), ve validační fázi, $R_{sim}$ je simulovaný odtok [mm/den] – modrá čára, $R_{mer}$ je pozorovaný odtok [mm/den] – červená čára. ....	23
Obr. 10: Změny mediánu KGE v závislosti na změně počtu donorů v rámci přístupu průměrování parametrů (vlevo) a přístupu průměrování výstupů (vpravo) pro časové periody PER1 a PER2. ....	26



Obr. 11: Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J v kalibrační fázi s regionalizačními výsledky založenými na použití 1, 4, 6, 9 a 199 donorů pro přístup průměrování parametrů (vlevo) a pro přístup průměrování výstupů (vpravo) na časové řadě PER1. V krabicovém grafu je prezentován medián formou tučné černé čáry, dolní a horní hranu krabice vymezuje dolní a horní kvartil a vousy představují 1,5násobek mezikvartilového rozpětí. ....27

Obr. 12: Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J ve validační fázi s regionalizačními výsledky založenými na použití 1, 4, 6, 9 a 199 donorů pro přístup průměrování parametrů (vlevo) a pro přístup průměrování výstupů (vpravo) na časové řadě PER2. V krabicovém grafu je prezentován medián formou tučné černé čáry, dolní a horní hranu krabice vymezuje dolní a horní kvartil a vousy představují 1,5násobek mezikvartilového rozpětí. ....28

Tab. 1: Chronologické definice pojmu regionalizace podle výskytu v odborné literatuře ..... 4

Tab. 2: Statistický souhrn vybraných charakteristik povodí pro soubor 200 povodí z projektu MOPEX. ....18

Tab. 3: Charakteristiky tří vybraných povodí. ....24