

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



**Regionalizační přístup fyzikální podobnosti povodí**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

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

Vyhotovil: Miroslav Zapletal

2020

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Regionalizační přístup fyzikální podobnosti povodí vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji 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 vědom, 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 ..... dne.....

Podpis:.....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Heřmanovskému, Ph. D. za odbornou pomoc a trpělivost při vedení této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za jejich trpělivost při psaní této práce.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce popisuje metodu fyzikální podobnosti povodí a její porovnání z hlediska simulační účinnosti s dalšími často používanými regionalizačními metodami na základě výsledků publikovaných v několika studiích.

Tento regionalizační přístup je založen na předpokladu, že povodí, která jsou si co nejpodobnější podle klíčových charakteristik, by měla vykazovat co nejpodobnější hydrologické chování.

Porovnáním výsledků mezi jednotlivými přístupy byl zjištěn pokles simulační účinnosti mezi kalibrací a regionalizačními metodami. Prezentované výsledky ukazují, že metoda fyzikální podobnosti je lepší metodou než metoda regrese a horší než metoda prostorové blízkosti, což ve své studii zjistil i Parajka a kol. (2005), kdy procentuálním vyjádřením je pokles simulační účinnosti mezi kalibrací a regionalizačními metodami a to v metodě prostorové blízkosti na hodnotu 90%, v metodě fyzikální podobnosti na hodnotu 88,9 % a v metodě regrese na hodnotu 86.8 %.

## **Klíčová slova**

Regionalizace, fyzikální podobnost, nepozorované povodí

## **Abstract**

This bachelor thesis describes the method of physical similarity of the river basin and its comparison in terms of simulation efficiency with other frequently used regionalization methods based on the results published in several studies.

This regionalization approach is based on the assumption that river basins which are as similar as possible according to key attributes should show the most similar hydrological behavior.

Comparison of results between the different approaches showed a decrease in simulation efficiency between calibration and regionalization methods. The presented results investigate that the method of physical similarity is a better method than the regression method and worse than the method of spatial attraction, which in your study awaits them as well for a bird and a bike. (2005), when the percentage is the decrease in simulation efficiency between calibration and regionalization methodology and the method of spatial accessibility to 90 %, in methodical physical similarity to 88.9 % and the regression method to 86.8 %.

## **Key words**

Regionalization, ungauged catchment, physical similarity

## Obsah

1	Úvod .....	7
1.1	Cíl práce .....	7
2	Regionalizace .....	8-9
3	Regionalizační metody .....	10
3.1	Regionalizace založená na prostorové blízkosti .....	10-11
3.2	Regionalizace na základě regrese .....	11-13
4	Regionalizace na základě fyzikální podobnosti .....	14
4.1	Charakteristika povodí .....	15
4.1.1	Fyzicko-geografické charakteristiky povodí .....	15-16
4.2	Metody výběru nejpodobnějších povodí .....	16
4.2.1	Index podobnosti .....	17
4.2.2	RAS .....	17
4.2.3	Shluková analýza (klastrová analýza) .....	18-19
4.2.4	ROI (Region of influence) .....	19
4.3	Odhad zájmové charakteristiky na nepozorovaném povodí .....	20
5	Srovnání fyzikální podobnosti s jinými regionalizačními metodami .....	21-27
5.1	Porovnání výsledků .....	27-31
6	Diskuze .....	32-33
7	Závěr .....	34
8	Přehled literatury a zdrojů .....	35-41

# 1 Úvod

Modelování srážko-odtokového procesu je klíčovou oblastí, jež se zabývá hydrologií povrchových vod na nepozorovaných povodích (Bárdossy, 2007). Cílem hydrologického modelování je vytvořit srážko-odtokový model, který co nejpřesněji simuluje chování reálného povodí. Pro povodí s nedostatečnými záznamy pozorovaných odtoků lze parametry hydrologického modelu odhadnout na základě regionální informace (Bárdossy, 2007). Srážko-odtokový model se vždy kalibruje proti pozorovaným datům a pokud nejsou (nepozorované povodí), tak není možné kalibraci provést. Pokud přesto srážko-odtokový model bude použit, pak je nutné tento problém vyřešit pomocí vhodné regionalizační techniky.

Regionalizace slouží v hydrologii k získávání hydrologických dat na nepozorovaných povodích tím, že shromažďuje hydrologické záznamy na dobře sledovaných povodích a přenáší je na povodí, u kterých jsou tyto hodnoty požadovány, ale nejsou k dispozici (Nathan a McMahon, 1990). Snahou je získat kvantitativní a kvalitativní informace o tocích, které jsou potřebné pro praktické aplikace, jako jsou operace spojené se správou povodí, predikcí povodňových stavů a sucha a další (Bárdossy, 2007).

## 1.1 Cíl práce

Cílem práce je popis přístupu fyzikální podobnosti povodí a jeho porovnání z hlediska simulační účinnosti s dalšími regionalizačními technikami. Porovnání je provedeno na základě několika publikovaných srovnávacích studií.

## 2 Definice regionalizace

Počátek termínu regionalizace spadá do období s označováním nejmenších územních jednotek – regionů. S prvními zmínkami o regionalizaci povrchových vod na určitém území se setkáváme ve 30. letech 20. století. Další vývoj rozvoje regionalizace pokračoval v 50. a 60. letech v SSSR. V České republice první regionalizaci povrchových vod vytvořil v roce 1954 O. Dub, který dle změny vodnosti během roku rozdělil území Slovenska na vysokohorské, horské, vrchoviny a nížiny (Horník a kol., 1982).

V 60. letech vznikla komise pro Mezinárodní spolupráci v hydrologii při Mezinárodní geografické unii, jejím cílem bylo sledování a zjišťování geografického a časového kolísání hydrologického cyklu v celosvětovém měřítku (Tesař, 2011).

Z hlediska srážko-odtokového modelování je termín regionalizace chápán jako identifikace vztahu mezi hydrologickou charakteristikou povodí a fyzicko-geografickými a klimatickými charakteristikami povodí (Young, 2006; Wagener a Wheeler, 2006).

V tab. 1 jsou uvedeny definice regionalizace v kontextu srážko-odtokového modelování, tak jak se měnily postupem času (He a kol., 2011).

V tabulce 1 je uveden termín nepozorované povodí. Tímto termínem se rozumí takové povodí, pro které neexistuje dostatek informací z hlediska kvality nebo časového úseku záznamu jeho toku (He a kol., 2011).



Autor	Použitý termín	Definice
Riggs (1973)	Regionální analýza	Extrapolace dat v prostoru.
Gottschalk (1985)	Regionalizace	Klasifikace, tj. rozřídění (např. povodí) do regionů na základě hydrologicky relevantního ukazatele.
Blöschl a Sivapalan (1995)	Regionalizace	Přenos informace o hydrologickém chování z jednoho povodí na druhé.
Wagener a Wheeler (2006)	Regionalizace nebo prostorová generalizace	Nalezení statistického vztahu mezi pozorovanými charakteristikami povodí a zájmovou hydrologickou charakteristikou a jeho využití na nepozorovaném povodí.
Young (2006)	Regionalizace	Vztah hydrologický jevů k fyzikálním a klimatickým charakteristikám povodí.
Oudin a kol. (2010)	Regionalizace	Všechny metody, které umožňují přenos hydrologických informací z pozorovaných na nepozorované povodí.

*Tab. 1 Definice regionalizace, jak se objevuje v literatuře chronologicky (He a kol., 2011).*

### 3 Regionalizační metody

Regionalizační metody se v základu dělí na metody využívající charakteristiky povodí jako jsou regrese, fyzikální podobnost a dále na metody nevyužívající charakteristiky povodí jako jsou prostorová blízkost, různé průměrovací metody (Parajka a kol. 2005). Dvě regionalizační metody ze tří jsou popsány v této kapitole, a to regionalizace založená na prostorové blízkosti, která je popsána v kapitole 3.1 a regionalizace na základě regrese, která je popsána v kapitole označené 3.2. Třetí regionalizační metodou v této práci je regionalizace založená na přístupu fyzikální podobnosti, která je podrobněji popsána v kapitole 4.

#### 3.1 Regionalizace založená na prostorové blízkosti

Regionalizační přístup prostorové blízkosti je založen na přenosu informace (např. parametrů modelu) mezi povodími na základě jejich geografické vzdálenosti. Tato metoda vychází z předpokladu, že povodí nacházející se v rámci jednoho regionu budou mít relativně podobné klimatické a fyzicko-geografické charakteristiky, díky kterým by tato povodí měla mít stejný hydrologický režim (Oudin a kol., 2008).

Výběr pozorovaných povodí k nepozorovanému povodí je v tomto přístupu řešen na základě jejich geografické vzdálenosti. Tuto vzdálenost lze v zásadě řešit mezi těžišti povodí (viz Oudin a kol. (2008)) nebo mezi uzávěrovými profily. Měřítkem vzdálenosti bývá nejčastěji Euklidovská vzdálenost. Lze vybrat jedno nejbližší povodí, ze kterého se přenese parametrická sada nebo hydrologická charakteristika (single donor přístup) nebo několik nejbližších povodí (multiple donor přístup) viz např. v Oudin a kol. (2008). V případě multiple donor přístupu se řeší přenos buď formou aritmetického (globální a lokální průměr) viz např. v Parajka a kol. (2005) nebo váženého průměru (IDW, kriging) viz Wandenwiele a Elias (1995).

Z hlediska porovnání jednotlivých přístupů k nalezení prostorově nejbližších povodí se jeví, že multiple donor přístup vede k lepším výsledkům než využití single donor přístupu (viz např. Oudin a kol. (2008) nebo Zhang a Chiew (2009)). V případě multiple donor přístupu je vždy lepší volit menší počet nejbližších donorů (viz Parajka a kol. (2005) při porovnání lokálního a globálního průměru). Zároveň se ukazuje, že sofistikovanější metody k odhadu zájmové hydrologické charakteristiky

(např. IDW a kriging) poskytují lepší výsledky než prostý aritmetický průměr (viz Wandenwiele a Elias (1995) nebo Parajka a kol. (2005)).

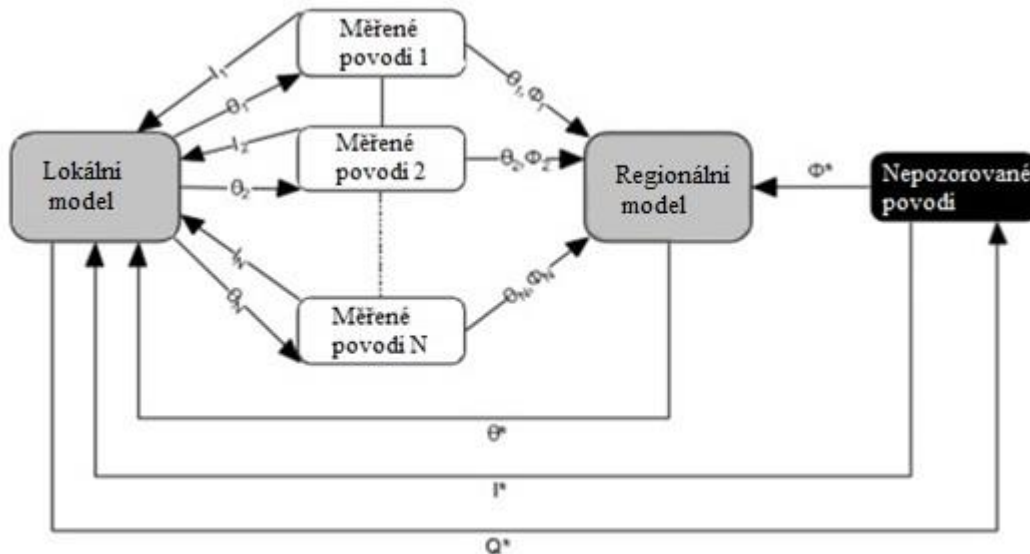
Tato teze však není úplně správná a často dochází k její kritice, a to z důvodů, že i geograficky blízká povodí mohou být rozdílná a to i z hlediska hydrologického chování (Beven, 2000; Acreman a Sinclair, 1986). Nevýhodou tohoto přístupu je, v případě málo husté sítě pozorovaných povodí v zájmovém regionu, se dá očekávat, že charakteristiky povodí, které řídí odtokový proces mohou být velmi odlišné (např. klimatické charakteristiky, půdní charakteristiky). Toto kritizuje Acreman, kdy uvádí, že sousední povodí (podobné klima, podobné půdní charakteristiky – následek podobného klimatu a podobné geologie – koevoluce popsána v knize Blöschl, Sivapalan, Wagener, Viglione, Savenije, Runoff Prediction in ungauged Basin synthesis across Processes, Places and Scales 2013) se mohou lišit hydrologickým chováním, protože tam třeba existuje výrazný rozdíl ve využití půdy (les vers. pole), nebo dle morfologických charakteristik (odlišný součinitel asymetrie povodí, jiné sklonové poměry, atd).

### 3.2 Regionalizace na základě regrese

Regresní přístup je založen na identifikaci matematického vztahu mezi hydrologickou charakteristikou (např. parametr modelu) a vybranými charakteristikami (Swain a Patra, 2017).

He a kol. (2011) uvádí několik následujících způsobů, jak regresní přístup využít.

*Dvoustupňová regrese* (viz Obr. 1) je nejpoužívanější metodou regionalizace. Prvním ze dvou kroků je kalibrace parametrů modelu na co největším souboru pozorovaných povodí. V druhém kroku jsou identifikovány vztahy mezi kalibrovanými parametry a vybranými charakteristikami povodí. Nalezené regresní vztahy jsou pak použity při odhadu parametrů modelu na cílovém (nepozorovaném) povodí (He a kol., 2011).



Obr. 1 Schematické znázornění postupu dvoustupňové regionalizace (Wagner a Wheeler, 2006).

Jednostupňová regrese vychází z dvoustupňové regrese, kdy jsou oba kroky zkombinovány do kroku jednoho. Kalibrací modelu dochází k posouzení simulačního výkonu modelu, a také kvality odvozených regresních rovnic. Při porovnání *dvoustupňové regrese* s *jednostupňovou regresí* však nebylo zjištěno výrazné zlepšení (Nash, 1960; Fernandez a kol., 2000).

#### Sekvenční regrese

Sekvenční regrese pracuje na principu řešení problému špatné identifikovatelnosti parametrů modelu. Lamb a kol. (2000) ve své studii navrhli metodu postupného odhadu parametrů modelu pro celý soubor povodí. Nejprve se nakalibruje model na všech povodích, pak se odvodí regresní vztahy mezi nekalibrovanými parametry a charakteristikami povodí, vybere se nejlepší regresní rovnice (je při ní nejlépe odhadován parametr), vloží se do modelu (tím se sníží počet kalibrovaných parametrů) a provede se recalibrace zbývajících parametrů, opět se odvodí regresní vztah mezi nekalibrovanými parametry a charakteristikami, vybere se nejlepší regresní rovnice a vloží se do modelu (opět se sníží počet kalibrovaných parametrů) a takto se postupně pokračuje až získáme regresní rovnici pro všechny parametry (He a kol., 2011).

Tato metoda dosahuje lepších výsledků než dvoustupňová regrese, díky zvýšené identifikovatelnosti parametrů modelu (He a kol., 2011).

Nevýhodou tohoto přístupu je ten, že mezi na kalibrovanými parametry a charakteristikami povodí nejsou výraznější korelace. Druhým problémem je předpoklad lineární závislosti mezi parametry a charakteristikami povodí, což nemusí být vždy pravda (viz studie Heuvelmans a kol. (2006)). Další problém je spojen s parametrickou ekvifinalitou – tj. situací, kdy existuje více parametrických sad, které vedou k velmi podobným simulačním výsledkům při kalibraci. Při vícenásobném opakování kalibrace je tedy možné získat , v závislosti na citlivosti jednotlivých parametrů, velmi rozdílné optimální parametrické sady, které mohou ovlivnit výsledné regresní rovnice.

## 4 Regionalizace na základě fyzikální podobnosti

Přístup fyzikální podobnosti je založen na přenosu informace (hydrologických charakteristik, parametrů modelu) mezi povodími, která jsou si co nejvíce podobná ve zvolených fyzicko-geografických a klimatických deskriptorech (Oudin a kol., 2008; Oudin a kol., 2010; Swain a Patra, 2017, Zhang a Chiew, 2009).

Přístup fyzikální podobnosti je jedinou regionalizační technikou, která používá charakteristiky povodí ke zjištění podobnosti mezi pozorovaným a nepozorovaným povodím (Swain a Patra, 2017).

V porovnání s regresním přístupem, který je též založen na charakteristikách povodí, přístup fyzikální podobnosti neuvažuje přímou matematickou závislost mezi zájmovou hydrologickou charakteristikou a charakteristikou povodí (např. lineární závislost v případě lineární regrese) (Swain a Patra, 2017). Výhodou přístupu fyzikální podobnosti nad metodou prostorové blízkosti je to, že jí není omezena geografickou vzdáleností řešených povodí a může být využita kdekoliv (Swain a Patra, 2017).

Zřejmá nevýhoda přístupu fyzikální podobnosti souvisí s výběrem charakteristik povodí použitých pro výpočet měřítka podobnosti, neboť je těžké určit, které charakteristiky povodí nejvíce ovlivňují hydrologické chování povodí (Oudin a kol., 2010). Dalším problémem je, že kalibrované parametry modelů spíše než chování povodí odrážejí nejistoty ve vstupních datech (Oudin a kol., 2010). Toto ovšem je problém i ostatních regionalizačních přístupů.

Obecný postup přístupu fyzikální podobnosti povodí lze shrnout do následujících kroků:

- sestavení kolekce charakteristik povodí,
- výběr vyhledávacího algoritmu,
- odhad zájmové charakteristiky.

## 4.1 Charakteristiky povodí

Prvním krokem v přístupu fyzikální podobnosti povodí je sestavení kolekce charakteristik povodí, na jejichž základě bude provedeno vyhledávání nejpodobnějších povodí. Charakteristikou povodí zde tedy rozumíme takovou vlastnost povodí, kterou lze jasně a přesně kvantifikovat (nejlépe číselnou hodnotou). Výběr charakteristik povodí může být proveden na základě expertní znalosti (pak jsou vybrány konkrétní charakteristiky řešenou úlohu) nebo na základě metody pokus-omyl, kdy jsou postupně testovány různé kombinace charakteristik povodí a hledá se ta kombinace, která je schopna nejlépe popsat hydrologické chování povodí (viz např. studie Oudina a kol., (2008)). Charakteristiky povodí lze v zásadě rozdělit na hydrologické charakteristiky a fyzicko-geografické a klimatické charakteristiky. Hydrologické charakteristiky, které velmi dobře popisují hydrologické chování daného povodí (variabilitu odtoku, retenční schopnost povodí a další), jsou odvozovány na základě časových řad pozorovaného odtoku. Patří mezi ně například součinitel odtoku, dlouhodobý průměrný průtok. Jejich zřejmou nevýhodou je skutečnost, že je lze odvodit pouze na pozorovaném povodí, což jejich použití v regionalizačních studiích velmi omezuje (Ruda A., 2000).

### 4.1.1 Fyzicko-geografické charakteristiky povodí

Fyzicko-geografické poměry povodí mají rozhodující vliv na velikost odtoku, jeho plošné a časové rozložení a na vývoj mnoha hydrologických jevů spojených s odtokem. Zde se zejména popisuje (Ruda A., 2000):

- **geomorfologické vlastnosti,**
- **klimatické poměry,**
- **geologické poměry,**
- **půdní poměry,**
- **vegetační poměry.**

**Klimatické charakteristiky** charakterizují informaci o množství, rozložení a chodu jednotlivých klimatologických veličin jako jsou srážky, teplota, sytostní doplněk, výpar a další (Ruda A., 2000). Mezi nejčastěji používané klimatické charakteristiky patří průměrná roční srážka na povodí (použita např. v Parajka a kol. (2005),

Poissant a kol. (2017), Nathan a McMahon (1990)), nebo index aridity, který vyjadřuje poměr průměrné roční srážky a roční potencionální evapotranspirace (použit např. v Oudin a kol. (2008), Oudin a kol. (2010), Zhang a Chiew (2009)).

**Geologické charakteristiky** kvantifikují druh matečné horniny, jež má velký vliv odtok z povodí. Krystalické horniny jako např. žula jsou v nezvětralém stavu nepropustné a urychlují povrchový odtok. V případě zvětrávání vytváří hrubozrný plášť, který zintenzivňuje infiltraci. Vysokou propustnost mají také porézní pískovce, písky, štěrky či narušené tvrdé horniny (Ruda A., 2000). Geologické charakteristiky povodí využili např. ve své studii Yokoo a kol, (2001).

**Půdní poměry** mají stejný význam jako geologické poměry, které s ohledem na zrnitost složení, humusu, strukturu, minerálních látek apod. v půdě ovlivňují možnost a intenzitu vsakování do vrstev zvětralin a hornin (Ruda A., 2000). Půdní poměry povodí využili např. ve své studii Acreman a Sinclair, (1986).

**Geomorfologické vlastnosti** popisující zejména údaje o výškových a sklonových poměrech povodí. Velká role v horských oblastech je dána drsností povrchu svahů a jejich složení (Ruda A., 2000). Geomorfologické vlastnosti povodí využili např. ve své studii, Yokoo a kol, (2001).

**Vegetační kryt**, který může zintenzivňovat povrchový odtok, nebo jeho infiltraci. Velký význam pro zadržování vody v krajině a usnadnění tak její regulace je přikládán lesům (Ruda A., 2000). Vegetační kryt využili ve své studii např. Oudin a kol. (2008) nebo Zhang a Chiew, (2009).

## 4.2 Metody výběru nejpodobnějších povodí

K výběru nepodobnějších povodí se používají vyhledávací algoritmy, které mohou být velmi jednoduché (např. index podobnosti) až relativně výpočetně složité (např. metoda shlukové analýzy dat).



### 4.2.1 Index podobnosti

Index podobnosti je jednoduchou metodou vyhledávání fyzikálně podobných povodí, kterou představili, ve své práci Burn a Boorman (1993) a ve své studii ji využili např. Parajka a kol. (2005).

Index podobnosti  $\Phi$  (rovnice 6.1) je dle Burna a Boormana (1993) definován následujícím způsobem:

$$\Phi = \sum_{i=1}^k \left( \frac{|X_i^G - X_i^U|}{\Delta X_i} \right), \quad (6.1)$$

kde  $x_i^G$  je i-tý charakteristika pozorovaného povodí,  $X_i^U$  je i-tý charakteristika nepozorovaného povodí a  $\Delta X_i$  je normalizovaný rozsah i-tého charakteristiky. Pro absolutní podobnost mezi povodími platí, že  $\Phi = 0$ .

### 4.2.2 RAS

Metoda RAS (Oudin a kol., 2008) je další metodou pro vyhledávání nejpodobnějších povodí. Metoda je rozdělena do tří kroků. V prvním kroku jsou vypočteny absolutní hodnoty odchylek mezi charakteristiky  $Y$  nepozorovaného povodí a charakteristiky  $Y$  všech potencionálních dárců. V druhém kroku dochází k přiřazení pořadí samostatným dárcům dle velikosti odchylek, přičemž pořadí 1 je přiřazeno donoru s nejmenší odchylkou, pořadí 2 donoru s druhou nejmenší odchylkou, atd. Je-li použito k vyhledávání nejpodobnějších povodí více charakteristik, pak dochází k opakování kroků 1 a 2. V posledním kroku je stanoveno celkové pořadí každého donoru jako aritmetický průměr dílčích pořadí. V tomto procesu je ke každé charakteristice dána stejná váha (Oudin a kol, 2008). Lze si všimnout, že na rozdíl od indexu podobnosti není nutné při této metodě testované charakteristiky povodí standardizovat.

### 4.2.3 Shluková analýza

Metoda shlukové analýzy nebo také nazývané klastrové analýzy patří mezi statistické metody, která umožňuje třídění jednotek do určitých skupin nebo tzv. shluků, tak aby si jednotky patřící do totožné skupiny byly podobnější než objekty z jiných skupin (Lepš, Šmilauer, 2000).

Výkon algoritmu shlukování závisí na podobnosti pro identifikaci sousedních povodí. Algoritmy, které jsou reprezentativní pro aglomerativní hierarchickou metodu shlukování, zahrnují: jednoduché spojení nebo nejbližšího souseda, úplné spojení nebo nejvzdálenějšího souseda, průměrné propojení a Wardův algoritmus. Tyto algoritmy se od sebe liší strategií používanou pro definování nejbližšího souseda k vybranému klastru. Shluky s nejmenší vzdáleností mezi nimi jsou sloučeny (Ramachandra a Srinivas, 2008).

Algoritmy klastrování založené na prototypch jsou nejoblíbenější třídou metod částečného klastrování, které považují prototyp, jako je klastrový centroid, za reprezentativní pro klastr. Centroid je průměr (vážený nebo nevážený průměr) rýsových vektorů v shluku. Tato metoda je známá svou účinností při sdružování velkých datových souborů s numerickými charakteristickými. Má však omezení v sdružování kategorických dat (Rambondrainy, 1995; Huang a Ng, 2003).

Huang (1997, 1998) navrhl algoritmus K-modes pro shlukování velkých skupin kategoriálních dat úpravou algoritmu K-means hodnoty. Každý cluster je reprezentován jeho režim a metoda založená na frekvenci se používají k aktualizaci režimů v procesu klastrování, aby se minimalizovala funkce nákladů na klastrování.

Pro shlukovou analýzu je nutné vybrat měřítko podobnosti ve vícerozměrném prostoru charakteristik povodí. Mezi velmi často používaná měřítka podobnosti patří např. následující (Ramachandra Rao a Srinivas, 2008):

Minkowského vzdálenost

$$D = \left( \sum_{k=1}^n |X_{ik} - X_{jk}|^t \right)^{1/t} \quad (6.2)$$

při  $t=1$  získáme Manhattanskou vzdálenost

$$D = \sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk}) \quad (6.3)$$

při  $t=2$  získáme Euklidovu vzdálenost

$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (6.4)$$

při  $t \rightarrow \infty$  získáme Chebychevovu vzdálenost

$$D = \max_{1 \leq k \leq n} |x_{ik} - x_{jk}| \quad (6.5)$$

Kde  $D$  je uvažovaná vzdálenost mezi dvěma povodími,  $X_{Gk}$  je  $k$ -tý charakteristika pozorovaného povodí  $G$ ,  $X_{Uk}$  je  $k$ -tý charakteristika nepozorovaného povodí  $U$  a  $k=1, n$  jsou zvolené charakteristiky povodí. Pro dokonalou podobnost platí, že  $ED = 0$ .

Porovnáním různých měřítek podobnosti se zabývala studie Nathana a McMahona (1990), jejíž výsledky ukázaly, že nejvhodnějším měřítkem byl čtverec Euklidovy vzdálenosti.

#### 4.2.4 ROI (Region of influence)

Přístup ROI je založen na vytváření regionů kolem nepozorovaných povodí (ta jsou situována v jejich středech), do kterých jsou přiřazována pozorovaná povodí na základě zvoleného měřítka podobnosti. Poté, co jsou do jednotlivých regionů přiřazena pozorované povodí, je nutné provést kontrolu vnitroregionové homogenity na základě vybraného statistického testu a nevhodná pozorovaná povodí z regionu odstranit. Zásadní rozdíl mezi klasickou shlukovou analýzou a ROI je v tom, že jedno pozorované povodí může být přiřazeno současně do více regionů (pokud splňuje podmínku pro přiřazení), (Burn, 1994).

Výhoda ve výběru této metody je prokázána v dřívějších pracích (Burn, 1990; Zrinji a Burn, 1994), kde dává lepší výsledky s porovnáním s klasickou shlukovou analýzou.

### 4.3 Odhad zájmové charakteristiky na nepozorovaném povodí

Posledním krokem v přístupu fyzikální podobnosti povodí je odhad zájmové hydrologické charakteristiky. V závislosti na řešeném problému lze použít různé metody. Oudin a kol. (2008) prezentují dvě průměrovací metody:

- průměrování parametrů
- průměrování výstupů

Průměrování parametrů je v tomto pojetí výpočet parametrů modelu pro nepozorované povodí jako aritmetický nebo vážený průměr parametrických sad z nejpodobnějších pozorovaných povodí (jako váha je použita převrácená hodnota zvoleného měřítka podobnosti). Burn a Boorman (1993) např. na základě parametrických sad a charakteristik povodí nejpodobnějších dárců provedli regresní analýzu a odvození regresní rovnice použili pro nepozorované povodí, dále, že je možné použít kriging, viz studie Vandenwielde a Elias (1995), nebo Parajka a kol. (2005), případně maximálně věrohodný odhad, viz studie Vandenwielde a Elias (1995). V případě průměrování výstupů je celkový simulovaný odtok z nepozorovaného povodí stanoven jako vážený průměr odtoků, které byly simulovány za pomoci parametrických sad z nejpodobnějších povodí a vstupů ve formě dostupných časových řad nepozorovaného povodí (srážky a teplota). Jako váha je použita hodnota zvoleného měřítka podobnosti.

## 5 Srovnání fyzikální podobnosti s jinými regionalizačními metodami

V této kapitole jsou porovnány výsledky jednotlivých regionalizačních přístupů na základě vybraných publikovaných studií. Přehled zvolených studií je uveden v tabulce 2.

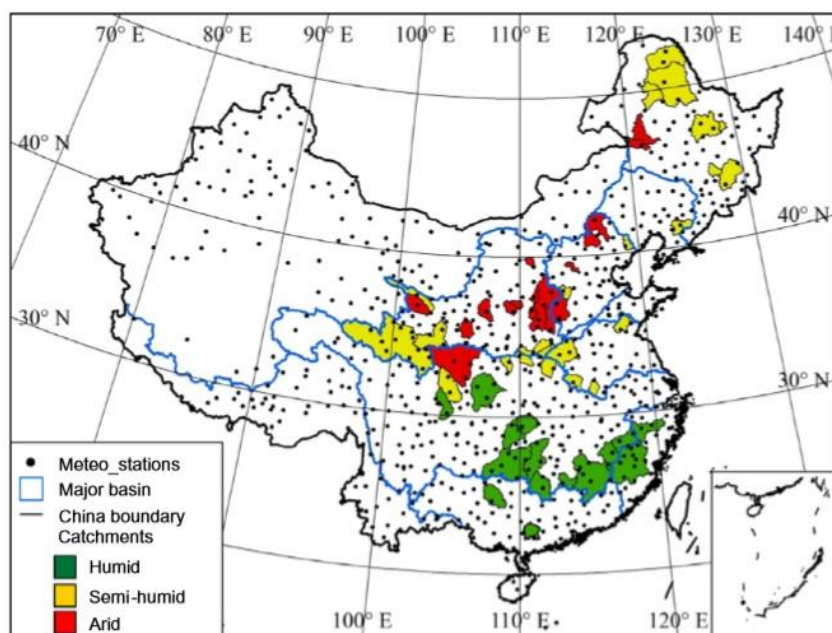
Studie	Lokace souboru povodí	Počet povodí souborů	Model	Regrese	Prostorová blízkost	Fyzikální podobnost
Bao a kol. (2012)	Čína	55	VIC	ANO	ANO (kombinovaně s fyzikální podobností)	ANO (kombinovaně s prostorovou blízkostí)
Li a kol. (2014)	Tibet	8	SIMHYD, GR4J	NE	ANO	ANO
Oudin a kol. (2008)	Francie	913	GR4J, TOPMO	ANO	ANO	ANO
Parajka a kol. (2005)	Rakousko	320	HBV	ANO	ANO	ANO
Poissant a kol. (2017)	Québec (Kanada)	266	GR4J + CemaNeige	ANO	ANO	ANO
Swain a Patra (2017)	Jižní a východní Indie	32	SWAT	ANO	ANO	ANO
Zhang a Chiew (2009)	Jihovýchodní Austrálie	210	Xinanjiang, SIMHYD	NE	ANO	ANO

Tabulka č. 2 – Výsledky jednotlivých regionalizačních přístupů na základě vybraných publikovaných studií.

Bao a kol. (2012) ve své regionalizační studii použily data z 55 povodí, která byla situována na území Číny (viz. obr. 2). V rámci kalibračního procesu byly optimalizovány pouze 3 parametry modelu VIC (ostatní parametry byly stanoveny pro každé povodí na základě půdních charakteristik). Jako hodnotící kritérium

v kalibračním procesu byl použit Nash-Sutcliffeův koeficient shody (Nash a Sutcliffe, 1970) a relativní objemová chyba. Pro regresní regionalizační přístup byla zvolena vícenásobná regrese v kombinaci s AIC kritériem pro výběr nejvhodnějšího počtu charakteristik povodí (Fan, 2006). Alternativou k regresnímu přístupu byla integrovaná podobnost, která kombinuje přístup fyzikální podobnosti s přístupem prostorové blízkosti (Zhang a Chiew, 2009), v kombinaci s testováním single/multiple donor přístupu. Pro oba testované přístupy bylo vybráno 7 charakteristik povodí ze 3 kategorií:

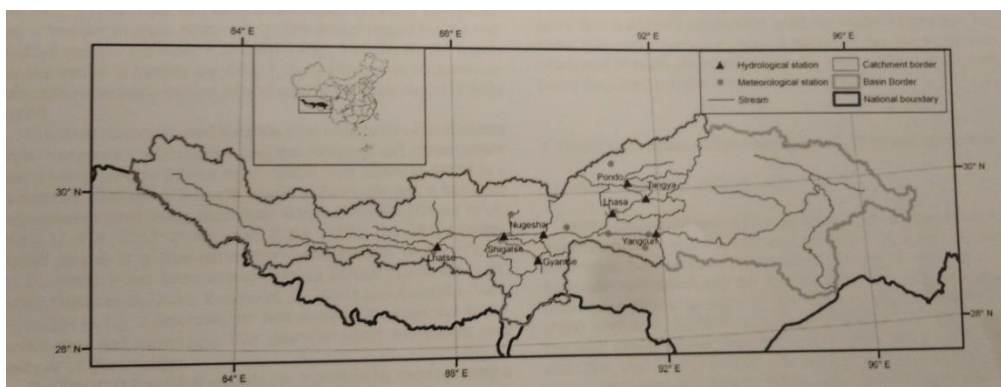
- klimatické charakteristiky (např. index aridity),
- půdní charakteristiky (např. nasycená hydraulická vodivost),
- informace o vegetačním krytu a dále souřadnice těžiště povodí.



*Obr. 2 – Lokace povodí ve studii Bao a kol. (2012).*

Li a kol. (2014) ve své regionalizační studii použily data z 8 povodí, která byla situována na území Tibetu (viz. obr. 3). V rámci kalibračního procesu bylo nejprve optimalizováno 9 parametrů modelu SIMHYD a 4 parametry modelu GR4J a následně byly tyto verze modelů doplněny o sněhový modul se 3 kalibrovanými parametry (tj. bylo kalibrováno 12 parametrů – SYMHID a 7 parametrů GR4J). Hodnotící kritérium použité při kalibraci i regionalizaci v sobě agregovalo Nash-

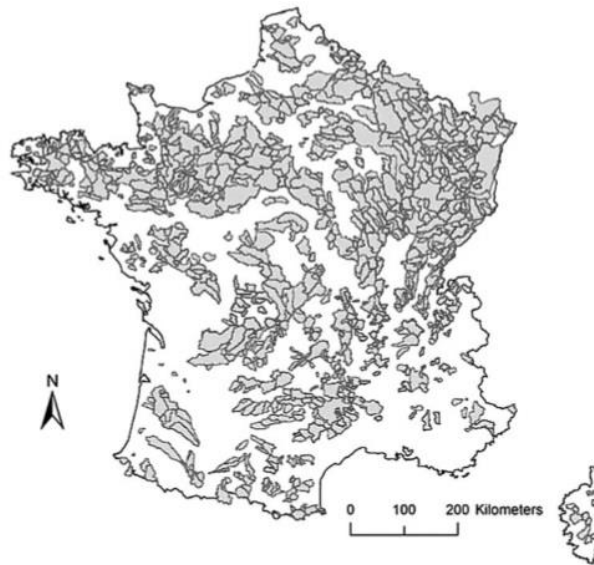
Sutcliffeův koeficient shody a relativní objemovou chybu. V rámci prostorové blízkosti byla použita geografická vzdálenost mezi těžišti povodí. K vyhledávání fyzikálně nejpodobnějších povodí byl použit index podobnosti. Ve studii bylo použito 8 charakteristik povodí z kategorií – klimatické (index aridity), geomorfologické (např. plocha povodí, sklon povodí), půdní (relativní zastoupení semihydromorfních půd) a vegetačního krytu (relativní zastoupení lesních porostů). V rámci obou regionalizačních přístupů byl uvažován pouze single donor přístup.



Obr. 3 - Lokace povodí ve studii Li a kol. (2014).

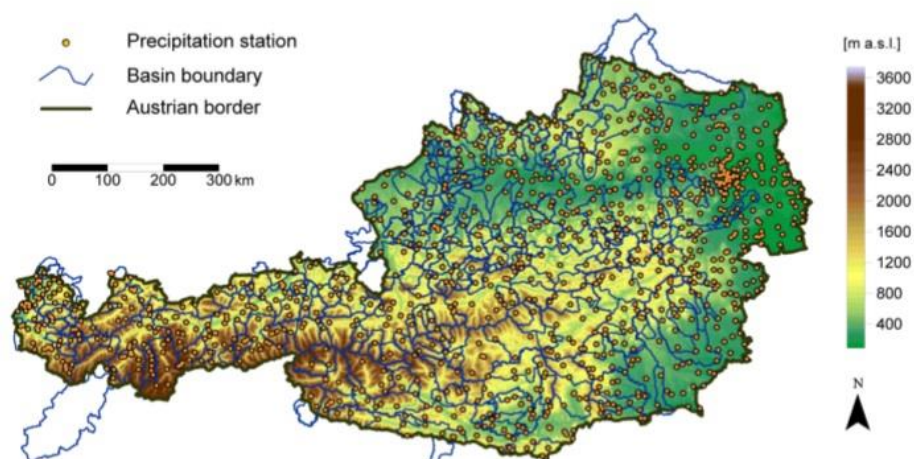
Oudin a kol. (2008) ve své regionalizační studii použily data z 913 povodí, která byla situována na území Francie (viz. obr. 4). Ve studii byly použity dva celistvé modely a to model GR4J se čtyři volnými parametry (Perrin a kol., 2003) a model TOPMO se šesti volnými parametry (Beven a Kirby, 1979; Michel a kol. 2003). Jako hodnotící kritérium v kalibračním procesu byl použit Nash-Sutcliffeův koeficient shody.

V rámci prostorové blízkosti byla použita geografická vzdálenost mezi těžišti povodí. K vyhledávání fyzikálně nejpodobnějších povodí byl použit RAS. U regionalizační metody regrese bylo použito pouze takové povodí, pro které byla výkonost modelu považována za přijatelnou, tj. s kritériem NashSutcliffe.



*Obr. 4 - Lokace povodí ve studii Oudina a kol. (2008).*

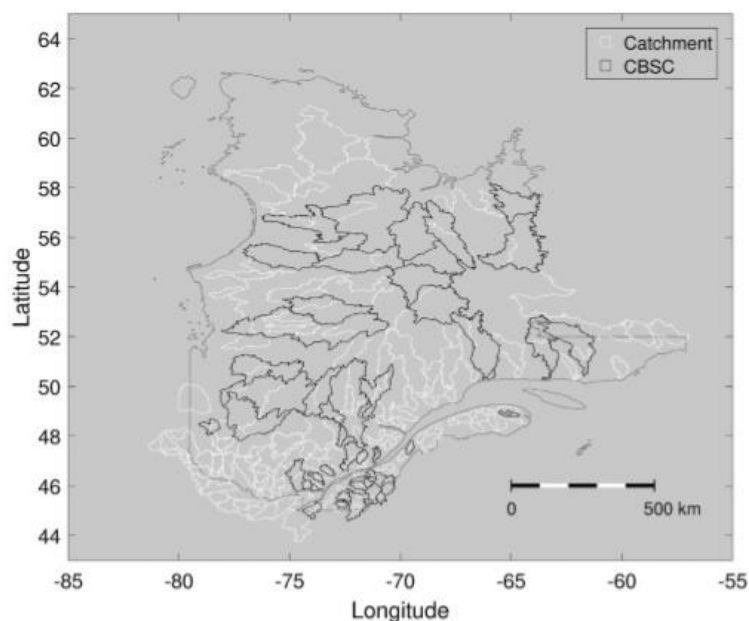
Parajka a kol. (2005) ve své regionalizační studii použily data z 320 povodí, která byla situována na území Rakouska (viz. obr. 5). V rámci kalibračního procesu bylo optimalizováno 11 parametrů modelu HBV (Bergström, 1976). Hodnotící kritérium použité při kalibraci i regionalizaci v sobě agregovalo Nash-Sutcliffeův koeficient shody a relativní objemovou chybu. V rámci prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti byl použit globální a lokální průměr. K vyhledávání fyzikálně nejpodobnějších povodí byl použit i index podobnosti. Co se týče regrese, tak zde testovali víceúrovňovou regresi.



*Obr. 5 – Lokace povodí ve studii Parajka a kol. (2005).*



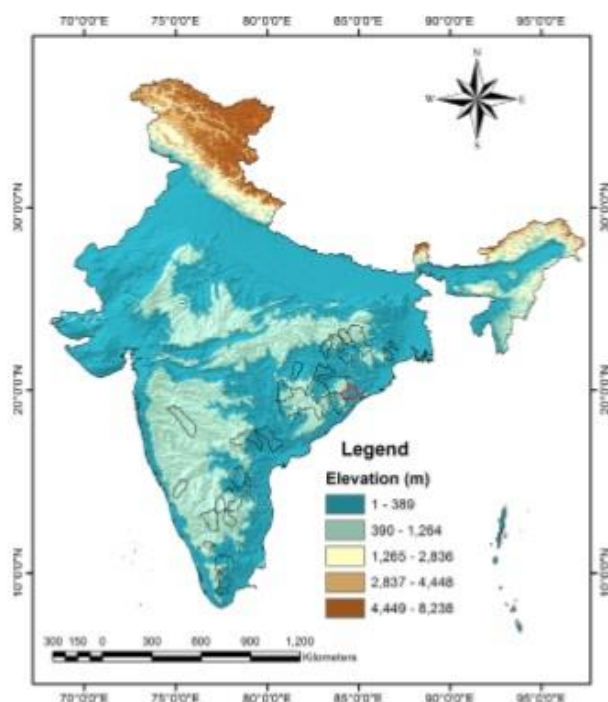
Poissant a kol. (2017) ve své regionalizační studii použily data z 266 povodí, která byla situována na území Kanady přesněji v Québecku (viz. obr. 6). Ve studii byl použit model GR4J (4 parametry) doplněný o sněhový modul CemaNeige se dvěma parametry (Poissant a kol., 2017). Testovali různé parametrizace modelu GR4J spojeného s CemaNeige, které měly 6, 9 a 15 kalibrovaných parametrů. Pro regresní regionalizační přístup byla zvolena vícenásobná regrese, pro prostorovou blízkost čtverec Euklidovské vzdálenosti a v případě fyzikální podobnosti byl použit index podobnosti. Ve studii byly použity 4 charakteristiky povodí z kategorií – nadmořská výška, délka, šířka, skol, plocha.



*Obr. 6 - Lokace povodí ve studii Poissant a kol. (2017).*

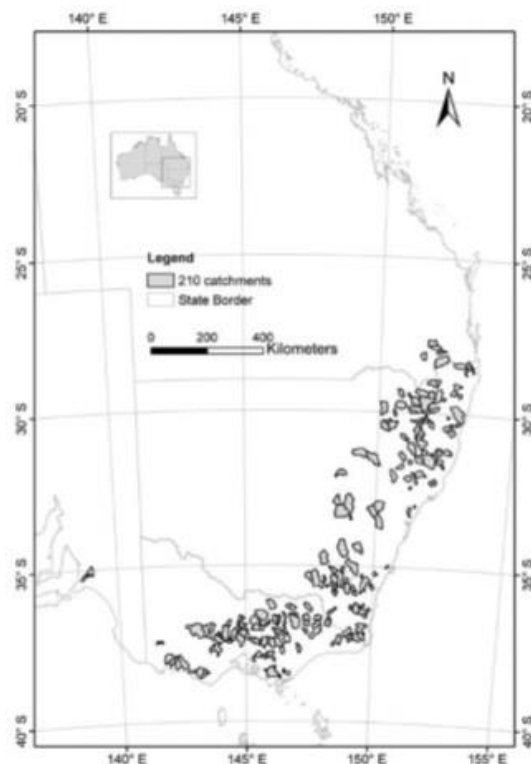
Swain a Patra (2017) ve své regionalizační studii použily data z 32 povodí, která byla situována na území jižní a východní Indie (viz. obr. 7). V rámci kalibračního procesu bylo optimalizováno 25 parametrů modelu SWAT. Jako hodnotící kritérium v kalibračním procesu byl použit Nash-Sutcliffeův koeficient shody. Pro regresní regionalizační přístup byla zvolena lineární regrese. U prostorové blízkosti byla

použita metoda kriging a IDW a metoda fyzikální podobnosti byla založena na základě přenosu parametrické sady z nepodobnějšího dárcce. Ve studii bylo použito 10 charakteristiky povodí z kategorií – plocha povodí, střední sklon, zelené lesy, zemědělská půda, apod.



*Obr. 7 - Lokace povodí ve studii Swain a Patra (2017).*

Zhang a Chiew (2009) ve své regionalizační studii použily data z 210 povodí, která byla situována na území jihovýchodní Austrálie (viz. obr. 8). V rámci kalibračního procesu bylo optimalizováno 14 parametrů modelu Xinanjiang a 9 parametrů modelu SYMHID. Ve studii byly použity dvě metody a to prostorová blízkost a fyzikální podobnost. Jako alternativa k regresnímu přístupu byla zvolena metoda prostorové blízkosti, která používá hodnoty parametrů z geograficky nejbližšího kalibrovaného povodí předpokládající, že sousední povodí by se měly chovat podobně vzhledem k podobným fyzikálním a klimatickým charakteristikám. Ve studii bylo použito 8 charakteristiky povodí z kategorií – plocha, index suchosti, délka, apod.



Obr. 8 - Lokace povodí ve studii Zhang a Chiew (2009).

## 5.1 Porovnání výsledků

V této kapitole jsou představeny a vyhodnoceny výsledky prezentované ve studiích uvedených v tab. 2. V tab. 3 jsou uvedeny výsledky jednotlivých studií formou mediánu Nash-Sutcliffeova koeficientu v kalibrační i regionalizační fázi. V případě, že autoři testovali více kombinací charakteristik povodí v rámci přístupu fyzikální podobnosti a navíc v kombinaci single/multiple donor metody, jako např. v případě studií Oudin a kol. (2008) a Zhang a Chiew (2009), jsou v tabulce 3 uvedeny jimi prezentované nejlepší výsledky.

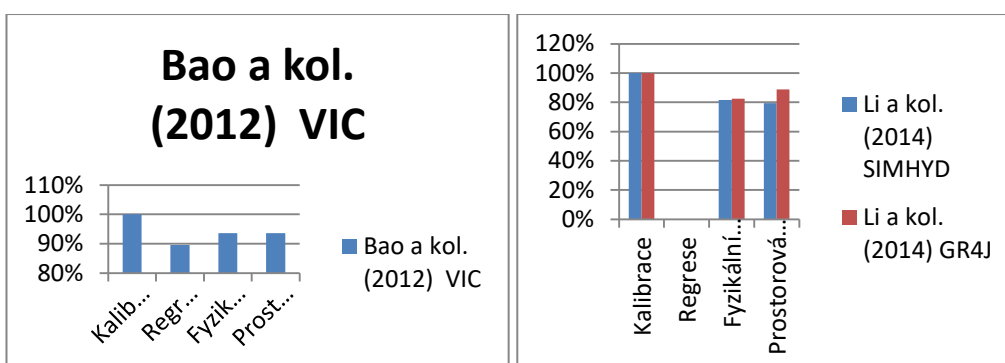
U výsledků studie Oudina a kol. (2008) jsou dále uvedeny výsledky pro průměrování výstupů (první číslo) a průměrování parametrů (druhé číslo) jak pro fyzikální podobnost, tak i pro prostorovou blízkost. Regionalizační výsledky studie Parajky a kol. (2005) jsou uvedeny formou průměrných hodnot v rámci konkrétní skupiny použitých metod pro každou regionalizační metodu.

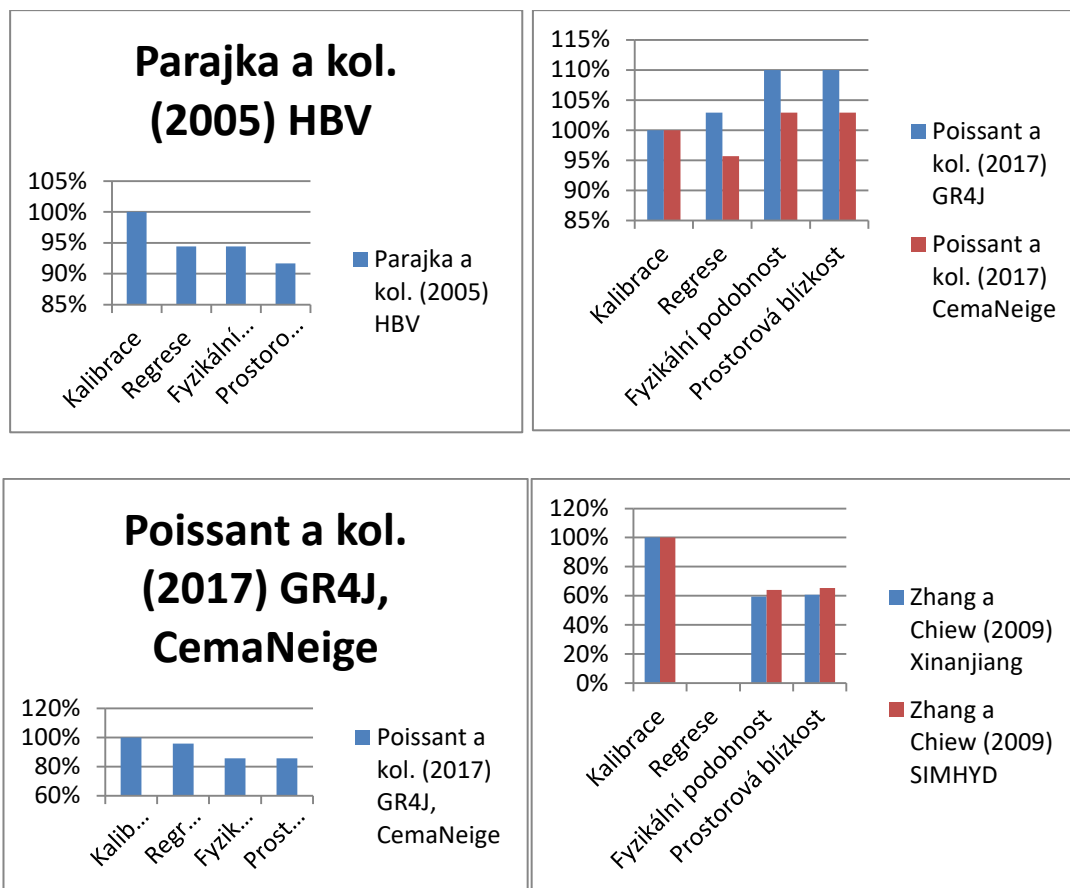
Studie	Model	Kalibrace	Regrese	Fyzikální podobnost	Prostorová blízkost
Bao a kol. (2012)	VIC	0,78	0,70	0,73	0,73
Li a kol. (2014)	SIMHYD	0,87	-	0,71	0,69
	GR4J	0,80	-	0,66	0,71
Oudin a kol. (2008)	GR4J	0,82	0,68	0,71/0,71	0,74/0,73
	TOPMO	0,78	0,55	0,69/0,60	0,71/0,65
Parajka a kol. (2005)	HBV	0,72	0,68	0,68	0,67
Poissant a kol. (2017)	GR4J				
	CemaNeige	0,70	0,67	0,60	0,60
Swain a Patra (2017)	SWAT	0,66	0,58	0,56	0,58
Zhang a Chiew (2009)	Xinanjiang	0,79	-	0,47	0,48
	SIMHYD	0,78	-	0,50	0,51

*Tab. 3: Výsledky jednotlivých studií formou mediánu Nash-Sutcliffeova koeficientu v kalibrační i regionalizační fázi.*

Studie	Model	Kalibrace	Regrese	Fyzikální podobnost	Prostorová blízkost
Bao a kol. (2012)	VIC	100%	89.6%	93.6%	93.6%
Li a kol. (2014)	SIMHYD	100%	-	81.6%	79.1%
	GR4J	100%	-	82.5%	88.8%
Oudin a kol. (2008)	GR4J	100%	82.9%	86.6%/86.6%	90.2%/89%
	TOPMO	100%	70.5%	88.5%/76.9%	91%/83.3%
Parajka a kol. (2005)	HBV	100%	94.4%	94.4%	91.7%
Poissant a kol. (2017)	GR4J CemaNeige	100%	95.7%	85.7%	85.7%
Swain a Patra (2017)	SWAT	100%	87.9%	84.8%	87.9%
Zhang a Chiew (2009)	Xinanjiang	100%	-	59.5%	60.8%
	SIMHYD	100%	-	64.1%	65.4%

Tab. 4: Relativní pokles simulační účinnosti při přechodu z kalibrační do regionalizační fáze z výsledků prezentovaných v tab. 3.





Grafy z tab. 4: Výsledky jednotlivých studií formou mediánu Nash-Sutcliffeova koeficientu v kalibrační i regionalizační fázi.

Dále byla tab. 3 přeformulována do procentového vyjádření viz tab. 4. Z této tabulky bylo vybráno náhodně šest studií a tyto byly převedeny do grafu, z kterého jsou výsledky lépe viditelné. Metoda s nejlepšími výsledky (nejmenší pokles) a metoda s nejhoršími výsledky (největší pokles). Porovnáním výsledků mezi jednotlivými přístupy byl zjištěn pokles simulační účinnosti mezi kalibrací a regionalizačními metodami. V různých studiích se ovšem výsledky různí.

Pokud vezmeme první graf Bao a kol. (2012), tak zde můžeme vidět, že nejlepší výsledky mají metody prostorová blízkost a fyzikální podobnost naopak nejhorší výsledky zde vykazuje metoda regrese.

Graf studie Li a kol. (2014) nám ukazuje, že v této studii nejlépe dopadla metoda prostorové blízkosti a naopak nejhorší výsledky ukazuje metoda fyzikální podobnosti. Regrese zde řešena nebyla.

Ve studii Parajka a kol. (2005), zjišťujeme, že nejlepší výsledky ukazují metody fyzikální podobnost a regrese. Naopak nejhorší výsledky metoda prostorové blízkost.

U studie Poissant a kol. (2017) zjišťujeme, že nejlepších výsledků ukazuje metoda regrese, kdy metody fyzické podobnosti a prostorové blízkosti mají horší výsledky.

Ve studii Swain a Patra (2017), zjišťujeme, že nejlepší výsledky ukazují metody regrese a prostorové blízkosti. Naopak nejhorší výsledky fyzikální podobnosti.

Zcela jiné výsledky ukazuje graf studie Zhang a Chiew (2009), kdy u této studie dosahuje nejlepších výsledků metoda prostorové blízkosti a nejhorších výsledků metoda fyzikální podobnosti. V této studii metoda regrese nebyla použita.

Tyto výsledky naznačují, že nelze říci, která metoda je nejlepší nebo naopak nejhorší. Vědci se zabývají již několik desetiletí po celém světě, která z metod má nejlepší výsledky, kdy ani dnes nemůžeme s jistotou říci, která metoda je tou nejlepší.

Dále z výsledků prezentovaných v tab. 3 a 4 je patrné, že nejvýraznější pokles simulační účinnosti je spojen s regresním přístupem (pokles v mediánu o 13,2 %). Přístup fyzikální podobnosti vede v poklesu simulační účinnosti v mediánu o 11.1 % a přístup prostorové blízkosti vede v mediánu k poklesu o 10 %. Výsledky dále ukazují, že nejvýraznější poklesy simulační účinnosti jsou spojeny se studii Swain a Patra (2017) a Zhang a Chiew (2009).

## 6 Diskuze

Na otázku, proč je lepší brát a průměrovat informaci více dárců, než jednoho bylo zjištěno, že v případě použití více dárců lze získat tyto informace: průměrování výstupu a průměrování parametrů. Dle studií Oudina a kol. (2008) a Zhanga a kol. (2009) bylo zjištěno, že použití parametrických sad více dárců vede k lepšímu výsledku než při použití parametrické sady jednoho dárcce. Výsledek lze vysvětlit tvrzením, že při vyšším počtu dárců je možné po zprůměrování minimalizovat možné chyby. Toto zjištění můžeme spojit i s faktem, že pokud stoupá fyzikální podobnost mezi dárcem a akceptorem, tak zároveň stoupá i hydrologická podobnost, na což poukázal ve své studii právě Oudin a kol. (2008).

Regionalizační výsledky dosahovány na humidních povodích mají lepší výsledky než na povodích aridních. Simulace proudění v suchých oblastech byla pro hydrology stále výzvou (Lin, 2001), protože výsledky byly citlivější na parametry modelu v suchých oblastech než ve vlhkých regionech. Proto vzhledem k souboru modelových parametrů se stejnými hodnotami chyb ve srovnání s optimálními parametry modelu by chyba v simulovaném toku ve srovnání s pozorovaným tokem proudění byla větší v suchých oblastech než ve vlhkých oblastech.

Výsledky ukazují, že největší přínos vychází z výběru povodí dárců a výstupní zprůměrování výsledků z víceletých povodí. Výhoda tohoto výběru oproti výběru náhodného povodí je podobná výhodě užívání vícenásobných dárců v závislosti na jediném povodí dárcce.

Obecně platí, že přístup založený na kalibraci měl přesnější výsledky než regionalizace. Přístup založený na fyzikální podobnosti byl přesnější než přístup založený na regresi a to jak pro vlhké, tak i pro suché oblasti. Těchto závěrů dospěl ve své studii i Bao a kol. (2012). Tento uváděl, že pohybem od vlhkých oblastí do suchých oblastí se přístup založený na podobnosti stal čím dál přesnější než přístup založený na regresi.



Studie ukázala, že metoda zahrnující souběžnou kalibraci a regionalizaci vedla k zlepšení mezi kalibrovanými a generalizovanými parametry modelu povodí ve srovnání s obvyklou „kalibrací a regionalizací“. Mohlo to být tím, že automatická sekvenční kalibrace přináší tuto výhodu oproti předchozím kalibračním metodám, aniž by bylo nutné souběžné generalizace. S tímto přišel ve své studii Kay a kol. (2006).

Srovnání regionalizačních metod ukázalo, že celkový sněhový podíl nemá téměř vliv na volbu metody. Podrobná analýza efektivity sněhového modelu v jednotlivých povodích odhalila tři aspekty, které ovlivňují vliv sněhového modelu. První zjištění je, že v mnoha povodích existují rozdíly ve sněhové simulaci prováděné různými regionalizačními přístupy, ale celkové měření sněhu nerozlišuje mezi nimi. Dalším probléme je, že z 11 kalibrovaných parametrů jsou pouze dva, které ovlivní simulaci sněhu.

Tato práce porovnává přístup fyzikální podobnosti povodí z hlediska simulační účinnosti s dalšími regionalizačními technikami (prostorová blízkost, regrese). Porovnání je provedeno na základě několika vybraných publikovaných srovnávacích studií. Porovnáním výsledků mezi jednotlivými přístupy byl zjištěn pokles simulační účinnosti mezi kalibrací a regionalizačními metodami. Závěry ukazují různé výsledky, kdy nelze říci, která z metod má nejlepší výsledky. Např. dle Parajky a kol. (2005) ukazují, že nejlepší výsledky měla metoda prostorové blízkosti, poté fyzikální podobnost a nejhorší výsledky byly zjištěny metodou regrese. Veškeré výsledky jsou porovnány v tabulce č. 3 - *Výsledky jednotlivých studií formou mediánu Nash-Sutcliffeova koeficientu v kalibrační i regionalizační fázi* a v tabulce č. 4 - *Relativní pokles simulační účinnosti při přechodu z kalibrační do regionalizační fáze z výsledků prezentovaných v tab. 3.*

## 7 Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na popis regionalizačního přístupu fyzikální podobnosti povodí a jeho porovnání s dalšími přístupy: regresí a prostorovou blízkostí, na základě publikovaných srovnávacích studií.

Vybrané studie byly Bao a kol. (2012), Li a kol. (2014), Oudin a kol. (2008), Parajka a kol. (2005), Poissant a kol. (2017), Swain a Patra (2017) a Zhang a Chiew (2009).

Na základě výsledků těchto studií bylo zjištěno, že mezi regionalizačními metodami se často používají regresní metody. Objevují se až ve dvou třetinách studií, a to i přes to, že základní hypotéza této metody je silně kritizována. Další oblíbená metoda je prostorová blízkost, ve které jsou optimalizovány parametry hydrologických modelů přenášeny z kalibrovaných povodí podle jejich geografické blízkosti k nepozorovanému povodí, kdy hypotézou této metody je, že sousední povodí patří do stejné homogenní a geografické oblasti, která jim poskytuje podobné hydrologické chování, což uvedl i ve své studii Samuel a kol. (2011). Třetí oblíbenou metodou je metoda fyzikální podobnosti, při níž jsou optimalizované parametry hydrologických modelů přenášeny z kalibrovaných povodí podle jejich blízkosti. I přes to, že regionalizací na nepozorovaných povodích se vědci zabývají již několik desetiletí po celém světě, ani dnes nemůžeme s jistotou říci, která metoda je nejlepší.

## 8 Přehled literatury a 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.

ANDĚL J., 1996: Sociogeografická regionalizace. Ústí n. L: PF UJEP. 85 s.

BAO Z., ZHANG J., LIU J., FU G., WANG G., HE R., YAN X., JIN J., LIU H., 2017: Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions, *Journal of Hydrology* 466-467, 37-46.

BÁRDOSSY A., 2007: Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments, *Hydrol. Earth Sys. Science* 11, 703-710.

Bergström, S.? Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchment, Dept. of Water Resour. Engineering, Lund Inst of Technol./Univ. Of Lund, Bull. Ser. A, No. 52, 1976.

Beven, K. J., and Kirby, M. J., A physically based, variable contributing, area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull., Ser. A., No. 52*, 1976.

BLÖSCHL G., SILVAPLAN M., 1995: Scale issues in hydrological modelling a review. *Hydrol. Process.* 9, 251–290.

BURN H. D., 1990: Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach, *Water Resources Research* 26, 2257-2265.

BURN H. D., 1997: Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures, *Journal of Hydrology* 202, 212-230.

BURN H. D., BOORMAN D. B., 1993: Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments, *Journal of Hydrology* 143, 429-454.

BURN H. D., ZRINJI Z., KOWALCHUK M., 1997: Regionalization of catchments for regional flood frequency analysis, *Journal of hydrologic engineering*.

BUYTAERT W., BEVEN K., 2009: Regionalization as a learning proces, Water resources research.

CLARKE R. T., 1973: A review of some mathematical models used in hydrology with observations on their calibration and use. Journal of Hydrology, 1-20.

ČEPELOVÁ D., Stanovení vlivu geometrických vlastností povodí na odtok použitím tvarové metriky, Diplomová práce, 2005.

Fan, Z. X., 2006. Long term hydrological prediction. Hohai University Press, Nanjing.

GUPTA V. K. et SOHOORIAN S., 1985a: The automatic Calibration of conceptual catchment models using derivative – based optimization algorithmus. Water resources research, V. 21: 473-485.

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, 245-365.

HE Y., BÁRDOSSY A. et ZEHE E., 2011: A review of regionalisation for continous streamflow simulation. Hydrology and Earth System Sciences.V.15: 3539- 3553.

HORNÍK, S. a kol. (1982): Základy fyzikální geografie. Státní pedagogické nakladatelství, n. p., Praha, 398 s.

HUNDECHA Y. et BARDÓSSY A., 2004: Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed mode. Journal of Hydrology. 292: 281-295.

HRÁDEK F., KUŘÍK P., 2008: Hydrologie: Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

CHMELOVÁ P. R., FRAJER J., 2014: Základy fyzikální geografie: Univerzita Palackého, Olomouc. Dostupné z: <http://distgeo.upol.cz/uploads/vyuka/skripta-pavelkova-frajer.pdf>

JENÍČEK, Michal. Rainfall-runoff modelling in small and middle-large catchments—an overview. *Geografie—Sborník ČGS*, 2007, 111: 305-313.

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. 112-126.

KAY A. L., JONES D. A., CROOKS S. M., CALVER A., REYNARD N. S., 2006: A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall-runoff models, *Hydrological processes* 20, 3953-3973.

KRAVKA, M., *Základy lesnické a krajinářské hydrologie a hydrauliky*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. Brno. 2009. 113 s

KULHAVÝ Z., KOVÁŘ P., 2000: Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. *Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy*, Praha.

Lamb R Crewett J, Calver A. 2000a. Progress in spatial generalisation of „continuous simulation“ flood frequency modelling. In *River Flood Deventer*, Toensmann F, Koch M (eds). *Kassel Reports on Hydraulic Engineering No. 9/2000*, D-117-125. Herkules Verlag: Kassel, Germany.

LI F., ZHANG Y., XU Z., LIU CH., ZHOU Y., LIU W., 2014: Runoff predictions in ungauged catchments in southeast Tibetan plateau, *Journal of Hydrology* 511, 28-38.

Lin, S.Y., 2001. *Hydrological Forecasting*. China Water and Power Press, Beijing (in Chinese).

MCINTYRE R., KNIGHT Z., CUTTER A., 2006: Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency index, *Journal of Hydrology*, 597-602.

MELOUN M., MILETKÝ J., *Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD*. Academica. Praha. 2002.

MERZ R., BLÖSCHL G., 2005: Flood frequency regionalisation – spatial proximity vs. Catchment attributes, *Journal of Hydrology* 302, 283-306.

MERZ R., BLÖSCHL G., 2004: Regionalisation of catchment model parameters, *Journal of Hydrology* 287, 95-123.

Neitsch, S. L, Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas A&M University System, College Station, Texas.

Nash, J. E.: A unit hydrograph study with particular reference to British catchments, *Proc. Inst. Civil Eng.*, 17, 249-282, 1960.

Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part 1 – a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3), 282-290.

NATHAN R. J., MCMAHON T. A., 1990: Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation, *Journal of Hydrology*, 121, 217– 238.

LOUDIN 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.

LOUDIN L., KAY A., ANDRÉASSIAN V., PERRIN CH., 2010: Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar?, *Water resources research*, 44.

PARAJKA J., MERZ R., BLÖSCHL G., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 157s–171s.

PATIL S., STIEGLITZ M., 2011: Controls on hydrologic similarity: role of nearby gauged catchments for prediction at an ungauged catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 551-562.

Perrin, C., Michel, C., and Anndréassian, V.? Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment od common catchment model structures on 429 catchmenst, J. Hydrol., 242, 275-301, 2001.

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, 220-237.

RAMACHANDRA RAO A., SRINIVAS V. V., 2008: Regionalization of Watersheds An Approach Based on Cluster Analysis.

Ruda, A., 2000: Klimatologie a hydrogeografie (online) [2.2.00] dostupné z <https://is.muni.cz>.

ŘÍHA, J., *Voda a společnost*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha. 1987. 338 s.

RUDA, A., 2014: Klimatologie a Hydrogeografie pro učitele, Masarykova univerzita, Brno.

SHAW, E. M., 1994: Hydrology in Practice. London: Spon Press.

SILVAPLAN 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.

STRÁNSKÝ D., HAVLÍK V., KABELKOVÁ I., METELKA T., SÝKORA P., DOLEJŠ M., HALOUN R., MUCHA A., PRYL K., 2010: Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí. Vodní hospodářství, 11, 298-320.

Střední škola pro ochranu a obnovu životního prostředí – Schola Humanitas  
v Litvínově: Vodní režim v krajině. Učební texty. Dostupné z:  
<http://www.humanitas.cz>.

SWAIN J. B., PATRA K. C., 2017: Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques, *Journal of Hydrology*, 420-433.

TESAŘ M., 2011: Malá povodí a jejich význam, online: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2011/cislo-9/mala-povodi-jejich-vyznam.html>, cit. 1.3.2019.

VANDENWIELE G. L. et ELIAS A., 1995: Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of hydrology*, V. 170: 277-291.

Vopravil, J., Khel, T., Vrabcová, T., Havelková, L., Procházková, E., Novotný, I., Novák, P., Fučík, P., Duffková, R., Jacko, K., Tylová, J., Hodek, T., Vliv činnosti člověka na krajinu českého venkova s důrazem na vodní režim a zadržování vody v krajině. VUMOP Praha. 2011. 75 s.

VLASÁK, T. (2008): Návrh databanky povodní Otavy a její využití v protipovodňové ochraně. Disertační práce, KFGG PřF UK, Praha, 98 s.

WMO, 2009: Guide to hydrological practices. World meteorological organization, WMO, 168.

XU C.-Y., SINGH V. P., 2004: Review on regional water resources assessment models under stationary and climate, *Water Resources Management*, 591-612.

XU C.-Y., 1999: Estimation of Parameters of a Conceptual WaterBalance Model for Ungauged Catchments *Water Resources Management* 13: 353–368, 1999. 353-368

YOUNG R. A., 2006: Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model, *Journal of Hydrology* 320, 155-172.

WAGENER T., WHEATER H. S., 2006: Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff including uncertainty, *Journal of Hydrology* 320, 132-154.



ZHANG Y., CHIEW F. H. S., 2009: Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments, *Water resources research* 45.

ZHANG Y., WAGENER T., REED P., BHUSHAN R., 2008: Reducting uncertainty in predictions in ungauged basing by combining hydrologic indices regionalization and multiobjective optimazation, *Water Resources Research* 44.