

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování

Bakalářská práce

**Porovnání vybraných regionalizačních
přístupů pro predikci odtoku na
nepozorovaných povodích**

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

Bakalant: Lenka Holemářová

Praha, 2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Bc. Lenka Holemářová

Environmentální vědy
Aplikovaná ekologie

Název práce

Porovnání vybraných regionalizačních přístupů pro predikci odtoku na nepozorovaných povodích

Název anglicky

Comparison of selected regionalization approaches for runoff prediction in ungauged catchments

Cíle práce

Cílem práce je vyhodnocení efektivity vybraných regionalizačních přístupů při predikci odtoku na nepozorovaných povodích.

Metodika

- 1) Literární rešerše na zadané téma: regionalizace, základní regionalizační metody.
- 2) Vyhodnocení efektivity zvolených regionalizačních metod na základě výsledků prezentovaných komparativních studií.
- 3) Diskuze prezentovaných výsledků.

Doporučený rozsah práce

30 až 50 stran

Klíčová slova

regionalizace, nepozorované povodí, fyzikální podobnost, prostorová blízkost, regrese

Doporučené zdroje informací

- He, Y., Bárdossy, A., Zehe, E., 2011: A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3539-3553.
- Oudin, L., Andreassian, V., Perrin, C., Michel, C., Le Moine, N., 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalisation approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44, W03413.
- Parajka, J., Merz, G., Blöschl, G., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9(3), 157-171.
- Sivapalan, M., 2003: Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological processes*, 17(15), 3163-3170.
- 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.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2022

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Porovnání vybraných regionalizačních přístupů pro predikci odtoku na nepozorovaných povodích 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 28. 3. 2024

Lenka Holemářová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Martinovi Heřmanovskému, Ph.D., za odborné rady, a dále mé rodině a přátelům za podporu během mého studia.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je na základě dostupné odborné literatury provést literární rešerši týkající se problematiky regionalizačního přístupu podobnosti povodí. Práce má konkrétně přiblížit základní pojmy jako jsou regionalizace, nepozorované povodí, základní regionalizační metody – tyto metody popsat a zhodnotit efektivitu těchto metod. Jedním z hlavních cílů této bakalářské práce je komplexní analýza efektivit tří základních regionalizačních přístupů na základě 7 vybraných studií. Práce se zaměří na komparaci těchto přístupů a zhodnocení, který z nich se na základě zjištěných poznatků jeví jako nejvhodnější.

Klíčová slova: nepozorované povodí, regionalizace, regrese, prostorová blízkost, fyzická podobnost, odtok.

Abstract

The aim of the bachelor thesis is based on the available literature to conduct a literary research on the issue of the regionalization approach to river basin similarity. The work is specifically intended to approximate basic concepts such as regionalization, unobserved catchments, basic regionalization methods – describe these methods and assess the effectiveness of these methods. One of the main aims of this bachelor thesis is a comprehensive analysis of the effectiveness of three basic regionalization approaches based on 7 selected studies. The thesis will focus on comparing these approaches and evaluating which one seems to be the most appropriate based on the findings.

Keywords: ungauged catchment, regionalization, regression, spatial proximity, physical similarity, runoff.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Cíle práce.....	2
1.2	Metodika	2
2	Literární rešerše	3
2.1.	Regionalizace	3
2.2.	Důvody regionalizace a nepozorované povodí.....	3
2.3.	Hydrologické modely.....	5
2.3.1.	Klasifikace hydrologických modelů	7
2.4.	Metody regionalizace.....	9
2.4.1.	Regionalizační metody založené na geografické blízkosti.....	10
2.4.2.	Regionalizační metody založené na fyzické podobnosti	12
2.4.3.	Regionalizační metody založené na regresi	14
3	Zhodnocení efektivity metod	19
3.1	Srovnání vybraných studií.....	19
3.2	Přehled výsledků studií	27
4	Diskuze	31
5	Závěr.....	35
6	Použité zdroje.....	37

1 Úvod

Predikce odtoku v neměřených a málo měřených povodích představují klíčové oblasti hydrologického výzkumu a praxe, s důležitým dopadem na efektivní správu vodních zdrojů a další relevantní sektory (Guo a kol., 2020).

Nedostatek informací o průtoku ve vodních tocích představuje významnou překážku pro efektivní správu vodních zdrojů a zvládnání vodních rizik. Tato problematika se týká rozsáhlých oblastí, jelikož i v dnešní době stále ještě v mnoha povodích světa chybí informace o průtoku (Pool a kol., 2021) a většina povodí na celém světě je buď částečně měřená, nebo zcela neměřená (Blöschl a kol., 2013).

Kvantitativní znalosti o dostupnosti vodních zdrojů jsou tedy velmi důležité například pro potřeby odhadu povodní, vodohospodářské operace, výstavby vodních staveb atd. (Blöschl a Sivapalan, 1995).

V oblastech s dostupnými údaji o průtocích se odtok běžně předpovídá pomocí hydrologického modelu kalibrovaného na základě pozorovaných vstupních údajů a údajů o průtocích. Hydrologické modely však nemohou přímo fungovat v regionech, kde pozorované údaje o odtoku nejsou pro kalibraci modelu k dispozici (Oudin a kol., 2008; He a kol., 2011).

Jedním z možných způsobů odhadu průtoku je tak přenesení optimalizovaných parametrů hydrologického modelu z měřeného, tedy jinými slovy pozorovaného, povodí do povodí, které doposud měřeno nebylo. Takový proces je nazýván regionalizace. Tento proces/metoda umožňuje predikci hydrologického chování nepozorovaného povodí s využitím dostupných dat z kalibrovaného povodí, tedy povodí měřeného.

I přes rozsáhlý vývoj regionalizačních přístupů v posledních dekadách představuje odhad průtoku v tocích s nedostatečnou měřicí sítí v hydrologii trvalou výzvu (Pool a kol., 2021).

1.1 Cíle práce

Cílem práce je vyhodnocení efektivity regionalizačních přístupů prostorové blízkosti, fyzikální podobnosti a regrese na základě výsledků publikovaných ve vybraných studiích. Výhodiskem provedené studie je literární rešerše zaměřená na problematiku regionalizačních přístupů při predikci odtoku na nepozorovaných povodích.

1.2 Metodika

1. Provedení literární rešerše přibližující regionalizační přístupy – popis základních pojmů souvisejících s regionalizací a vybraných metod regionalizace.
2. Zhodnocení efektivity zvolených metod regionalizace na základě publikovaných studií, zhodnocení jejich kladů a záporů.
3. Diskuse prezentovaných poznatků.
4. Závěr práce bude hodnotit efektivitu těchto metod.

Očekávaným výstupem této práce je shrnutí poznatků o regionalizačních přístupech použitelných při predikci odtoku na nepozorovaných povodích.

2 Literární rešerše

2.1. Regionalizace

Region v souvislosti s pojmem regionalizace, jak uvádí Chalušová (2007), lze chápat jako soubor nedefinovaného počtu menších povodí, u nichž můžeme pozorovat určitou podobnost z hlediska vymezených hydrologických charakteristik odtokové odezvy.

Cílem takového vymezování regionů, jak dále ve svém příspěvku Chalušová (2007) uvádí, je nalezení takových skupin povodí, která si budou hydrologicky podobná do takové míry, že bude možné přenést hydrologickou informaci (např. hodnoty extrémních průtoků) v rámci regionu z jednoho povodí na druhé.

Regionalizace je tedy rozčlenění míst nebo oblastí do homogenních regionů podle určitých hledisek, vyjadřujících účel regionalizace (Linhart a kol., 1996).

Regionalizační techniky byly navrženy k tomu, aby umožňovaly odhady statistických distribučních parametrů průtokových charakteristik, např. rozdělení četnosti záplav, rozložení četnosti minimálního průtoku, křivky trvání průtoku atd., nebo parametrů srážko-odtokového modelu pro kontinuální simulaci odtoku na nepozorovaných povodích. Jejich cílem je přenášet informace z jednoho povodí nebo skupiny povodí do povodí jiného nebo do jiné skupiny povodí (He a kol., 2011).

K získání větší důvěry v extrapolaci hydrologického chování z pozorovaného povodí do povodí nepozorovaného, by všechna tato povodí měla utvářet relativně homogenní skupinu (Pilgrim, 1983; Nathan a McMahon, 1990; Post a Jakeman, 1996).

2.2. Důvody regionalizace a nepozorované povodí

Přesný odhad povrchového odtoku je klíčovým faktorem nejen pro pochopení složitých vztahů mezi různými hydrologickými procesy, ale je také zásadní pro návrhy přehrad/nádrží a rovněž pro plánování a řízení vodních zdrojů (Guo a kol., 2020).

Přesné odhady nebo předpovědi povrchového odtoku z povodí se opírají především o hydrologické modely, které hrají důležitou roli v široké škále praktických problémů ve společnosti, včetně hospodaření s vodními zdroji, predikcí sucha a povodní a propojené systémy modelování, jako je kvalita vody, hydroekologie a klima (Randrianasolo a kol., 2011). Úspěšné hydrologické modelování vyžaduje přesné vstupy (časové řady srážek, teploty a odtoku). Nicméně, vysoce přesné hydrologické a meteorologické stanice však nelze rozmístit ve všech odlehlých lokalitách. Kromě toho v mnoha rozvojových zemích existuje velmi omezený počet hydrologických a meteorologických měřících stanic, poskytujících dostatečné informace pro hydrologické monitorování a prognózy z důvodu finančních omezení. Kromě toho jsou vybrané složky hydrologického cyklu jako je výpar, infiltrace a podpovrchové proudění, obtížné měřitelné (Sivapalan, 2003). Díky výše popsanému jsou simulace a predikce odtoku v nepozorovaných povodích jednou z nejdůležitějších a nejnáročnějších problémů, kterým hydrologové čelí (Guo a kol., 2020).

Definice Sivapalana a kol. (2003) je následující: Nepozorovaná povodí jsou povodí s nedostatečnými záznamy (jak z hlediska množství dat, tak z hlediska kvality) hydrologických pozorování umožňujících výpočet hydrologických zájmových proměnných ve vhodném prostorovém a časovém měřítku a s přesností přijatelnou pro praktické aplikace. Např. pokud sledovaná proměnná nebyla měřena v požadované kvalitě nebo po dobu potřebnou pro predikci nebo pro kalibraci modelu, povodí by bylo klasifikováno jako nepozorované (s ohledem na tuto proměnnou). Zájmové proměnné mohou být např. srážky, odtok, rychlost eroze, koncentrace sedimentů v proudění atd., tedy v podstatě je každé povodí je v určitém slova smyslu nepozorované.

K odhadu pravděpodobnosti výskytu (nejen) extrémních průtoků na nepozorovaných místech se dle Burna (1997) využívají právě regionalizační metody.

V případě nepozorovaných povodí je tedy podle Šercla (2009) nutné hydrologické charakteristiky odvozovat nepřímými způsoby – na základě dostupných fyzicko-geografických a klimatických charakteristik povodí. Zpravidla se jedná o kombinaci statistických a deterministických přístupů, opírajících se o vhodně zvolené matematické modely.

Jak uvádí Blöschl (2006), je v takových případech tedy třeba parametrické sady modelu, které vyžadují kalibraci, přenést z hydrologicky podobných, ale pozorovaných povodí, a tyto přenesené parametry následně aplikovat na povodí nepozorovaná. Nejúčinnějším způsobem řešení problematiky nepozorovaných povodí je tedy shromáždění parametrů modelu z analogických povodí v daném regionu (z jednoho nebo více povodí), u kterých lze očekávat, že se budou chovat podobně jako povodí nepozorované (splnění podmínky hydrologické podobnosti je zde nezbytné).

K odvozování dat na povodích s absencí přímého pozorování průtoků jsou, jak dále uvádí Šercl (2009), následující možnosti:

a) využití empirických regresních vzorů – kdy závisle proměnnou je např. 100letý odtok a nezávisle proměnnými klimatické/fyzicko-geografické charakteristiky daného povodí (př. sklon a plocha povodí a údolnice apod.)

b) extrapolace charakteristik z vybraných dárcovských povodí

2.3. Hydrologické modely

Model je zjednodušená reprezentace složitého systému (Clarke, 1973). Hydrologické modely tedy slouží k simulaci chování hydrologického systému (odtokových procesů v povodí) s následnou tvorbou hydrologických predikcí, kdy jeho hlavním účelem je co možná nejpřesněji predikovat reakci povodí na různou intenzitu srážkových úhrnů (Duben, 2014). Hydrologický systém je podle Doogeho (1968) definován jako soubor fyzikálních, chemických a/nebo biologických procesů působících na vstupní proměnnou nebo proměnné, aby se z nich vytvořila výstupní proměnná nebo proměnné, kdy proměnnou se rozumí charakteristika systému, kterou lze měřit a která může nabývat v různých časech různých numerických hodnot.

Jak dále uvádí Hrušková (2006), podle obecné definice WMO (1994) si lze modelování hydrologického systému představit jako aplikaci matematických a logických operací, kvantitativně popisujících vazbu mezi hydrologickými charakteristikami odtoku (závislá proměnná) a charakteristikami vstupujícími do tohoto modelu, které mají na

hydrologickou odezvu povodí určitý vliv. K sestrojení srážko-odtokového modelu je tedy nezbytná znalost složek, které se v rámci daného povodí podílí na generování odtoku (Duben, 2014).

Aplikace vybraného srážko-odtokového modelu spolu s ověřením jeho chování tak, aby vhodně odrážel reálný systém – tedy povodí, se provádí následovně (Hrušková, 2006):

- příprava vstupních dat – soubor vybraných charakteristik povodí – fyzicko-geografické a klimatické charakteristiky,
- kalibrace (optimalizace) parametrů modelu – aby byl model schopen vracet užitečné informace, musí být parametry modelu správně zkalibrovány. V tomto kroku se porovnávají výsledky simulací průtoků s měřenými řadami z pozorovaných vodoměrných stanic, kdy cílem je minimalizace chyby, tj. rozdílu mezi simulovaným a pozorovaným průtokem. Kalibrace se provádí u vybraných důležitých parametrů, na něž jsou výstupy modelů citlivé. Jak podrobněji uvádí Daňhelka (2007), jedná se o proces, při kterém jsou iteračně měněny hodnoty parametrů a je testována shoda mezi pozorovaným a simulovaným hydrogramem, kdy záměrem je nalezení nejvhodnější sady parametrů poskytující nejlepší shodu mezi simulací a pozorováním pro kalibrované povodí.
- validace modelu – ověření funkčnosti modelu v predikci odtoku na časové řadě meteorologických dat za zvolené období.

K hodnocení úspěšnosti simulace (tedy rozdílu mezi simulací a měřenými daty) jsou v hydrologii využívána objektivní kritéria (Krpec, 2018). Jedním ze zmiňovaných kritérií simulačního výkonu využívaných k vyjádření síly předpovědi modelu je Nash-Sutcliffe koeficient (NSE) (Nash a Sutcliffe, 1970), pohybující se v rozmezí od $-\infty$ do 1. Hodnota NSE = 1 indikuje dokonalou shodu mezi naměřenými a simulovanými průtoky, hodnota NSE = 0 naznačuje, že simulované průtoky se shodují s průměrem naměřených průtoků. Záporné hodnoty NSE svědčí o tom, že modelované hodnoty jsou statisticky horší než průměr naměřených hodnot.

V některých studiích bývá k hodnocení účinnosti simulace využíváno normalizované NSE (NNSE) navržené Nossent a Bauwens (2012), umožňující snadnější zobrazení hodnot NSE,

v případech, kdy je mezi výsledky získanými různými modely velký rozptyl. Hodnota NNSE nabývá hodnot v rozmezí 0 až 1, přičemž hodnotu $NNSE = 1$ lze interpretovat obdobně jako $NSE = 1$, hodnotu $NNSE = 0,5$ lze interpretovat obdobně jako $NSE = 0$ a hodnotu $NNSE = 0$ lze interpretovat obdobně jako v případě kdy NSE nabývá hodnoty $-\infty$. Tímto způsobem je linearizována stupnice pro záporné hodnoty.

Dále jsou dle Skoulikarise a Piliourase (2023) využívány testy dobré shody jako např. koeficient determinace (R^2), střední kvadratická chyba (RMSE) nebo Kling-Guptova účinnost (KGE) navržená v práci Gupta a kol. (2009) –toto kritérium zohledňuje tři důležité aspekty shody: střední odchylku, variabilitu a korelaci mezi simulovanými a pozorovanými toky (přičemž mezi hlavní přednosti patří fakt, že odstraňuje interakce mezi chybovými složkami a snižuje negativní zkreslení variability ve výsledcích simulace a vyváženějším způsobem tedy kombinuje tři chybové složky z Nash-Sutcliffeova kritéria).

2.3.1. Klasifikace hydrologických modelů

Z různých důvodů je užitečné nebo dokonce nezbytné hydrologické modely určitým způsobem klasifikovat.

Knoppová (2008) ve své práci odkazuje na klasifikaci srážko-odtokových modelů dle World Meteorological Organisation (2011), která je následující:

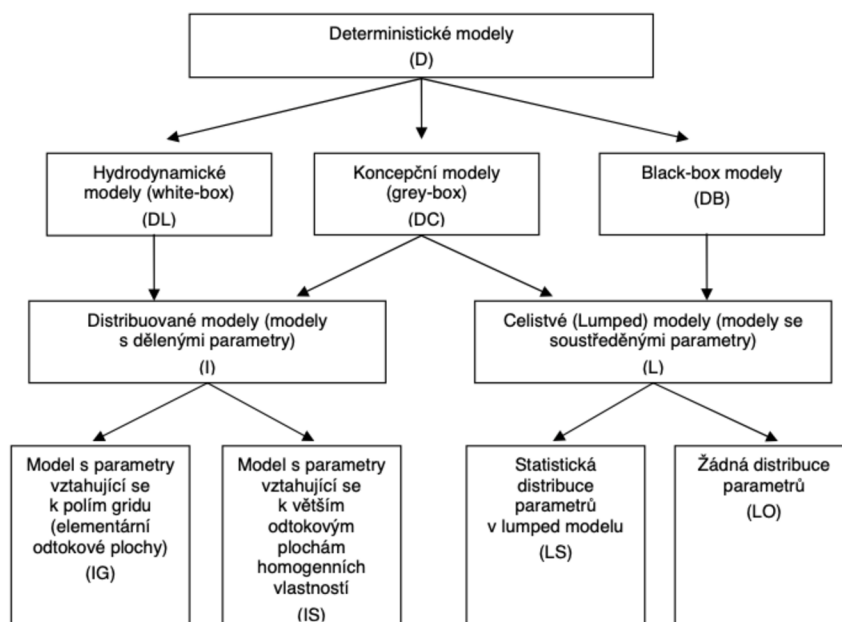
- 1) podle účelu jejich aplikace
 - modely užívané v operativní hydrologii
 - modely aplikované k návrhové činnosti ve vodním hospodářství
 - modely využívané pro výzkum
- 2) podle typu simulovaného systému/míry komplexnosti
 - modely simulující elementární systém (menší toky, jezera apod.)

- modely simulující komplexní systém (systém říčních sítí, nádrží a jezer, větší povodí)

3) podle zohledněných hydrologických procesů

4) podle stupně kauzality – kauzalita je vyjádřena ve formě vztahů příčina-následek, dělení:

- modely deterministické – zobrazují vztah závislých a nezávislých proměnných. Dělení: teoretické („white box“), koncepční („grey-box“), empirické („black box“), jak je dále podrobněji znázorněno na obr. 1. Tyto modely mají povahu zákonitostí, které při dodržení vymezených předpokladů a podmínek vždy platí.
- modely stochastické – tzv. pravděpodobnostní, absence vazby příčina-následek, je zde zahrnut prvek nejistoty/náhody. Dělí se na pravděpodobnostní (jednotlivé hydrolog. parametry mají charakterizovány pomocí určitého pravděpodobnostního rozdělení) a modely pro generování časových řad (Becker a Serban, 1990)



Obr. 1: Klasifikace deterministických modelů (Becker a Serban, 1990).

5) podle rozsahu prostorové a časové diskretizace

Jak ve své práci uvádí Daňhelka a kol. (2003), hydrologické modely lze dělit podle prostorové diskretizace závisle proměnných funkcí, parametrů a hydrologických vlastností na celistvé, distribuované a semidistribuované, které Jeníček (2005) blíže popisuje následovně:

- Celistvé modely – považují povodí za homogenní jednotku. Charakteristiky povodí jsou zpravidla získávány bodovým měřením, kdy jsou následně pomocí geostatických metod vypočteny plošné parametry, reprezentující celé nebo pouze dílčí povodí.
- Distribuované modely – u těchto typů modelů je povodí rozčleněno na subpovodí nebo gridové body, tzv. hydrotopy, kdy každá taková podjednotka má charakteristickou hodnotu parametru (velikost těchto elementárních odtokových ploch je stejná). Jedná se o modely zohledňující prostorovou nesourodost vstupních dat, díky čemuž jsou někdy též označovány také jako modely s distribuovanými parametry.
- Semidistribuované modely – přechod mezi celistvými a distribuovanými modely. Podobně jako v předchozím případě je zde povodí rozčleněno na podjednotky mající homogenní prostorové parametry, přičemž jejich je velikost rozlišná (Moravcová, 2011).

2.4. Metody regionalizace

Jak uvádí Blöschl (2006), pokud je srážko-odtokový proces na dvou povodích podobný, jejich hydrologická odezva bude také podobná. To je představa hydrologické podobnosti.

Gatechew a Kim (2018) představují jako nejběžnější metody regionalizace aritmetický průměr, metody založené na prostorové blízkosti, metody založené na fyzické podobnosti a jako poslední metody založené na regresi.

V přístupu aritmetického průměru (globální, lokální) se každý parametr modelu pro nepozorované povodí poměrně jednoduše vypočítá jako průměr jednotlivých parametrů měřených povodí. Tudíž hodnoty parametrů jsou identické pro všechna nepozorovaná povodí. (Swain a Patra, 2019). Tuto skupinu metod použili např. Parajka a kol. (2005) ve své studii provedené na 320 povodích v Rakousku, v rámci které tedy vypočítali aritmetický průměr jednotlivých parametrů ze všech 320 kalibrovaných hodnot v Rakousku (zde šlo o tzv. globální průměr), a dále jako alternativní způsob průměrování zmiňují aritmetický průměr regionu v okruhu 50 km od zájmového povodí (tzv. lokální průměr). Jak dále uvádějí, tato skupina metod předpokládá, že všechna povodí ve zvoleném poloměru jsou podobná a rozdíly v hodnotách parametrů vyplývají pouze z náhodných faktorů.

Přístup fyzické podobnosti využívá principu podobnosti, kdy hydrologická podobnost povodí je určena přibližnou podobností v deskriptorech povodí, tedy mírou shody fyzicko-geografických a klimatických charakteristik dvou nebo více povodí. Tato shoda umožňuje předpokládat, že na povodích s podobnými vlastnostmi budou probíhat podobné hydrologické procesy, a to i v případě, že se jedná o povodí, která nejsou vzájemně propojená (Blöschl, 2005).

Přístup prostorové blízkosti využívá principu geograficky nejbližších povodí.

2.4.1. Regionalizační metody založené na geografické blízkosti

V tomto prvním pojetí se předpokládá, že povodí, která jsou blízko sebe, se chovají hydrologicky podobným způsobem (Blöschl, 2006).

Základní myšlenkou tohoto konceptu je, že srážko-odtokový proces se bude s prostorem pravděpodobně plynule měnit, lze tedy předpokládat, že prostorová blízkost bude dobrým indikátorem podobnosti hydrologické odezvy povodí. Jak dále Blöschl (2006) uvádí, jedná se o jednu z tradičních metod regionalizace parametrů srážko-odtokového modelu.

Tento koncept je obvykle založen na vytyčení prostorově sousedících oblastí na mapě, kdy základními algoritmy výběru prostorově blízkých povodí jsou dle Guo a kol. (2020)

využití nejmenší Euklidovské vzdálenosti mezi těžišti povodí nebo mezi uzávěrovými profily povodí a prostorová interpolace.

Jak dále blíže popisuje Dasgupta a kol. (2023) lze v tomto případě vybrat jedno (tzv. single donor přístup) nebo více měřených povodí (tzv. multiple donor přístup), které jsou prostorově blízké nepozorovanému povodí. Hydrologické parametry jsou následně odvozeny od jednoho nejbližšího nebo více blízkých povodí.

Jak ve své studii uvádí Poissant a kol. (2017), výkon metod regionalizace založených na vzdálenosti se zvyšuje, když jsou parametry přenášeny z více dárcovských povodí spíše než z pouhého jednoho. V případě, že jsou tedy parametry přeneseny z více povodí (tzv. multiple donor přístup), hodnoty z těchto více povodí se zprůměrují (aritmetický průměr) nebo se na ně použije IDW metoda popsaná níže (např. Kay a kol., 2007). Průměrování od více dárců je tedy implementováno s cílem zachovat rozmanitost informací, které nabízí více dárcovských povodí.

K výpočtu vzdálenosti mezi geografickými souřadnicemi těžišť povodí se nejčastěji používá **Euklidova vzdálenost** (He a kol., 2011). Měřená povodí jsou následně seřazena podle vzdálenosti od nepozorovaného povodí a buď jeden, nebo několik nejbližších povodí se stane povodími tzv. dárcovskými.

Prostorově blízké povodí je možné vybírat pomocí vymezení **radiusu** v okolí nepozorovaného povodí, kdy jsou jako dárcovská povodí použita všechna měřená povodí, která do vymezené oblasti spadají. Mezi sofistikovanější postupy se řadí interpolační algoritmy jako např. vážené inverzní vzdálenosti (IDW) nebo „kriging“ (např. He a kol., 2011; Merz a Blöschl, 2004; Parajka a kol., 2005; Viviroli a kol., 2009).

Vážené inverzní vzdálenosti (IDW = Inverse Distance Weighting) jsou interpolační metodou vycházející z inverzní prostorové vzdálenosti těžišť povodí (Swain a Patra, 2019). Metoda je založena na předpokladu, že body sobě prostorově bližší si budou vzájemně podobnější než body, které jsou od sebe více vzdálené. Hodnota IDW se tedy odhaduje pomocí váženého průměru hodnot – s rostoucí vzdáleností jsou povodím přiřazeny nižší váhy (vyjádřené právě inverzní vzdáleností) a o to menší mají vliv na hodnotu zjišťované buňky (Křikavová, 2009).

Jak ve své práci uvádí Tvrzník (2019), metoda **kriging** je metodou odhadu řadící se do oblasti geostatistiky. Ve své elementární podobě metoda krigingu vypočte novou hodnotu jako váženou lineární kombinaci známých hodnot v určeném okolí bodu. Ke každému neznámému bodu jsou sestaveny váhy dle vzdálenosti, hodnoty semivariogramu a principu snížení výsledného rozptylu na minimum, pomocí řešení soustavy lineárních rovnic (Konečný, 2008). Váhy jsou zde počítány z variogramů, které měří stupeň korelace mezi povodími na základě jejich vzdáleností a směru mezi nimi (Swain a Patra, 2019).

Za vhodných předpokladů dává kriging nejlepší lineární nestrannou předpověď střední hodnoty, kdy krigování nabízí mimo odhadu interpolované hodnoty zároveň i odhad pravděpodobnosti výskytu a odhad chyby predikce. Jak dále uvádí DiBiase a kol. (2006), pojem kriging zahrnuje interpolační metody, při kterých se vypočtou pravděpodobné hodnoty proměnné buď v bodě, kde nebylo provedeno měření (tzv. bodový odhad) nebo na relativně malé ploše (tzv. blokový odhad).

2.4.2. Regionalizační metody založené na fyzické podobnosti

Tato metoda spočívá v použití měřitelných fyzicko-geografických a klimatických charakteristik povodí jako indikátorů hydrologické podobnosti. Struktura povodí a jeho hydroklimatický režim hrají dominantní roli při utváření jeho hydrologických reakcí (He a kol., 2011). Jak uvádí Blöschl (2005), pokud jsou deskriptory povodí, jako je např. půdní typ, vegetační typ a topografické charakteristiky dvou povodí podobné, dalo by se očekávat, že hydrologická odezva bude rovněž podobná.

Mezi metody zabývající se vyšetřováním míry podobnosti vícerozměrných objektů (tzn. objektů s větším množstvím znaků/charakteristik) patří **shluková analýza** (Meloun, 2007). Řadí se k nástrojům datové analýzy, která funguje na principu třídění povodí s podobnými charakteristikami do tzv. „shluků“. Vstupem procesu shlukování je datová matice, výstupem je identifikace shluků (Spohnerová, 2010).

Snahou je zde maximalizace podobnosti charakteristik v rámci jednoho shluku a co nejvyšší odlišnost od ostatních shluků nespádajících do této skupiny. Je zde třeba

identifikovat vhodné charakteristiky, které jsou významné z hlediska posouzení podobnosti těchto shluků. Metodické postupy shlukové analýzy lze dělit podle toho, jakých typů shluků chceme dosáhnout, na dva přístupy: nehierarchické (metody vektorového prostoru) a hierarchické (metody založené na vzdálenostech) dále se rozlišujících na aglomerační a divizní. Metoda nehierarchického shlukování (nebo též metoda rozkladu) přiřazuje objekty do předem určeného počtu disjunktních shluků (Spohnerová, 2010). Jak dále uvádí Meloun a Militký (2004), aglomerační (sdružovací) metody spočívají v opakovaném slučování objektů do shluků na základě jejich vzájemné vzdálenosti, kdy se v každém kroku spojí dva nejbližší objekty a vytvoří nový shluk. Následně se vypočítá nová matice vzdáleností, která zohledňuje nově vytvořený shluk. Celý postup je opakován do té doby, dokud není vytvořen jeden velký shluk nebo dokud nezůstane požadovaný počet shluků. Princip divizních (rozdělovacích) metod je opačný.

Meloun (2007) přibližuje nejčastěji užívané metriky shlukování. Metoda nejbližšího souseda je postavena na minimální vzdálenosti mezi dvěma objekty. Opačně je postavena metoda nejvzdálenějšího souseda. Další, Wardova metoda, není založena na optimalizaci vzdáleností mezi shluky, ale na co nejmenší heterogenitě shluků.

Mezi jeden z nástrojů shlukové analýzy se řadí tzv. samoorganizující se mapy, často nazývané Kohonenovy mapy. Jak dále uvádí Žáček (2012) ve své práci, jedná se o umělé neuronové sítě, kdy je jejich hlavním rysem učení bez učitele, díky čemuž je produkována nízko rozměrná reprezentace vstupního prostoru, mapa. Mezi další hlavní rysy těchto map patří funkce zajišťující uchování topologického uspořádání vstupních dat v této mapě.

Dále je možné ještě zmínit existenci metody průměrné vzdálenosti, metody těžiště, metody průměrné nepodobnosti objektů a metody mediánové (Meloun, 2007).

U **indexu podobnosti** se vychází z principu, že čím menší je vzdálenost v n-rozměrném prostoru charakteristik povodí mezi nepozorovaným a dárcovským povodím, tím více jsou si tato povodí podobná. Jak dále uvádí Burn a Boorman (1993) index podobnosti lze obecně popsat následujícím způsobem:

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

kde k je počet deskriptorů povodí použitých k výpočtu indexu podobnosti, X_i^G je i -tý deskriptor povodí hodnoceného měřeného povodí, X_i^U je i -tý deskriptor povodí nepozorovaného povodí a ΔX_i je oblastí možných hodnot i -tého deskriptoru povodí pro měřená povodí. Index podobnosti je postupně vypočten pro každé povodí a parametry modelu povodí s nejnižšími hodnotami indexu podobnosti jsou přeneseny na nepozorované povodí.

Někteří autoři zmiňují také tzv. **topografický index** – např. Kong a Rui (2003) ve své studii předpokládají, že body se stejnou hodnotou topografického indexu vykazují stejnou hydrologickou reakci na srážky (Guo a kol., 2020).

Nathan a McMahon (1990) rovněž uvádí metodu odborného úsudku, kdy jsou podobné regiony určeny z analýzy malého počtu pozorovaných povodí v každé oblasti na základě odborného úsudku podpořeného všemi dostupnými hydrologickými informacemi. Mezi tyto hydrologické informace se řadí hydrogeologické mapy, klimatické mapy, půdní a vegetační mapy a sezónnost hydrologické odezvy jako indikátory hydrologických procesů (Merz a kol., 1999).

Tato metoda tedy využívá statistických metod k určení míry podobnosti povodí a k predikci hydrologických charakteristik na nepozorovaných povodích.

2.4.3. Regionalizační metody založené na regresi

Regionalizační metody založené na regresi představují skupinu statistických metod, které se používají k predikci hydrologických charakteristik na nepozorovaných povodích na základě dat z pozorovaných povodí. Tyto metody se opírají o regresní modely, které kvantifikují vztah mezi hydrologickými charakteristikami a vybranými faktory (např. morfometrické, klimatické, půdní vlastnosti). Pravděpodobně nejoblíbenější/nejrozšířenější regionalizační technikou je dle Parajky a kol. (2005) metoda založená na regresi, vycházející ze vztahu mezi fyzicko-geografickými a klimatickými charakteristikami povodí a parametry modelu. Z informací dostupných v pozorovaných povodích je definován právě takovýto vztah, který je následně využit k predikci parametrů modelu a následně predikci odtoku na nepozorovaných povodích

(Guo a kol., 2020). Myšlenka regresního regionalizačního přístupu je postavena na předpokladu stejné platnosti vztahů na nepozorovaných povodích v rámci studovaného regionu, což umožňuje odhad parametrů modelu z charakteristik povodí (Brunner a kol., 2018).

He a kol. (2011) dělí regresi používanou k regionalizaci na: dvoustupňovou, sekvenční a jednostupňovou.

2.4.3.1. Dvukroková regrese

Je dle He a kol. (2011) nejpoužívanější regionalizační metodou a dle Becka a kol. (2016) je nejranějším přístupem regionalizace parametrů modelu.

Jedná se o analýzu vztahů mezi sadou nezávisle proměnných a jednou závisle proměnnou, ve které se snažíme predikovat hodnoty závisle proměnné z lineární kombinace dvou a více nezávisle proměnných hodnot.

Parametry jsou zde vyjádřeny jako lineární funkce řady topografických charakteristik jako je např. plocha povodí, sklon a délka hlavního toku. Regionalizace je v této metodě prováděna ve dvou krocích (Guo a kol., 2020), kdy je nejdříve provedena kalibrace parametrů modelu u každého určeného (měřeného) povodí a následně je určen vztah mezi těmito parametry modelu a deskriptory (měřených) povodí.

Vliv jednotlivých nezávisle proměnných je odhadován tak, že je kontrolováno působení ostatních nezávisle proměnných, vstupujících do modelu. Pomocí regresních koeficientů je možné určit sílu vlivu jednotlivých nezávisle proměnných na závisle proměnnou (lze tedy odhadnout proměnné s největšími vlivy).

Vícenásobná regrese je běžně řešena pomocí metody nejmenších čtverců.

Při vícenásobných regresích se ale můžeme setkat s problémem multikolinearity, pokud jeden nebo více atributů povodí vysoce koreluje s jiným atributem povodí nebo s nějakou jejich lineární kombinací, kdy multikolinearita snižuje spolehlivost regresních koeficientů (Hirsch a kol., 1992).

Z výše uvedeného důvodu je omezen počet atributů povodí použitých v regresi, kdy někdy je kombinována řada atributů do indexu, který je považován za reprezentativní pro jeden konkrétní aspekt srážko-odtokového modelu. Sekvenční regrese může pomoci při identifikaci robustních odhadů parametrů (Calver a kol., 2004).

Tento přístup se však obecně setkal s omezeným úspěchem z velké části kvůli ztrátě interakce parametrů modelu a problému ekvifinality (např. Kokkonen et al., 2003)

2.4.3.2. Sekvenční regrese

Sekvenční regrese je navržena tak, aby řešila problém špatné identifikovatelnosti parametrů modelu – tzv. „ekvifinality“ (He a kol., 2011). Jak He a kol. (2011) dále uvádí, v kontextu nepozorovaných povodí se sekvenční regrese používá k predikci hydrologických charakteristik na nepozorovaném povodí na základě časových řad dat z pozorovaných povodí. Tato metoda bere v úvahu časovou závislost hydrologických charakteristik a umožňuje tak přesnější predikci v porovnání s klasickými regresními metodami, které tuto závislost neberou v úvahu.

V této metodě jsou parametry modelu nejdříve seřazeny v určitém pořadí na základě posouzení hydrologického mechanismu nebo vztahu odezvy mezi parametry a cílovou funkcí (Calver a kol., 2005). Metoda je zaměřena na proces kalibrace, který upravuje následujícím způsobem. Namísto kalibrace všech parametrů modelu najednou v jednom kroku, se kalibrace provádí sekvenčně, tedy postupně, a to od nejlépe identifikovatelného parametru modelu až po parametr poslední. Kvůli zohlednění určitých aspektů hydrologické odezvy, které jsou ve většině případů reprezentované specifickými parametry, lze v každém kole použít různé funkce. Proces kalibrace a regrese pokračují do chvíle, dokud není zkalibrován poslední parametr a je získána jeho regresní funkce (He a kol., 2011).

Sekvenční regrese se obecně uvádí jako lepší metoda než regrese dvoukroková (např. Lamb a kol., 2000)

2.4.3.3. Simultální regrese

Tato metoda byla vyvinuta na základě dvoukrokové regresní metody popsané výše. Kombinuje dva kroky do jednoho, kdy je konstrukce regresního modelu a kalibrace prováděna najednou (Beck a kol., 2016).

Studie však ukázaly, že simultální regrese nevykazuje v simulaci o mnoho lepší výsledky ve srovnání s dvoukrokovou regresí (Guo a kol., 2020).

2.4.3.4. Příklad dalších možných metod

Zavedeným přístupem k regionalizaci parametrů srážko-odtokového modelu je podle McIntyre a kol. (2005) sice regrese parametrů modelu oproti numerickým deskriptorům povodí, avšak jak zde dále tvrdí, další zdokonalování regresní metody není vzhledem k jejím zásadním omezením optimální cestou vpřed, a představuje alternativní metodu založenou na váženém průměrování a souborovém modelování. Tato nová metoda se skládá z následujících základních kroků: 1) pro každé z řady dárcovských povodí je nalezen vzorek vhodných modelů, 2) každému modelu je přidělena váha podle toho, jak dobře fungoval, 3) tato váha je aktualizována na základě podobnosti povodí s cílovým nepozorovaným povodím, 4) všechny modely s nenulovou váhou jsou aplikovány na cílové povodí, aby se vytvořila souborová časová řada a predikce váženého průměru.

Tegegne a Kim (2018) v této studii představili návrh nové metodiky regionalizace nazvanou „Catchment runoff-response similarity“ (CRRS) – volně přeloženo jako „Podobnost povodí v odtokové odezvě“, jejímž cílem má být snížení nejistoty v predikování odtokových procesů a vyřešení problému identifikace klíčových atributů, které jsou základem principu hydrologické podobnosti. V metodě CRRS je využíván běžně používaný regionalizační přístup k dočasnému přenosu parametrů kalibrovaného modelu z měřených do nepozorovaných povodí a následně je na základě hodnoty parametru vypočítaného v prvním kroku získána odtoková odezva každého menšího vymezeného subpovodí. Na základě podobnosti odtokové odezvy dílčích povodí jsou následně identifikována podobná subpovodí měřeného a nepozorovaného povodí. Konečná

hodnota parametru v nepozorovaných dílčích povodích je stanovena na základě domněnky, že podobná subpovodí s odtokovými odezvami na podobné vstupní srážky by mohla mít podobně nastavenou strukturu modelu.

3 Zhodnocení efektivity metod

V této kapitole je provedeno porovnání vybraných studií a vyhodnocení efektivity zvolených regionalizačních metod.

3.1 Srovnání vybraných studií

Ke zhodnocení efektivity tří základních regionalizačních metod bylo vybráno 7 studií využívajících základní regionalizační metody, uvedených níže v tab. 1., přičemž jsou dále stručně popsány.

	Studie	Stát	Počet povodí v souboru	Hydrologický model	Srovnávané metody regionalizace
	Arsenault a kol. (2019)	Mexiko	30	GR4J, MOHYSE, HMETS	prostorová blízkost, fyzická podobnost, regrese
	Tegegne a Kim (2018)	Etiopie a Korea	13	SWAT	prostorová blízkost, fyzická podobnost
	Poissant, Arsenault a Brissette (2017)	Kanada	266	GR4J	prostorová blízkost, fyzická podobnost, regrese
	Swain a Patra (2019)	Indie	32	SWAT	prostorová blízkost, fyzická podobnost, regrese
	Steinschneider a kol. (2015)	USA	73	abcd	prostorová blízkost, regrese
	Li a kol. (2014)	Tibet	8	SIMHYD, GR4J	prostorová blízkost, fyzická podobnost

	Yang a kol. (2018)	Norsk o	118	WASMOD	prostorová blížkost, fyzická podobnost, regrese
--	-----------------------	------------	-----	--------	--

Tabulka 1: Přehled studií využívajících základní regionalizační metody.

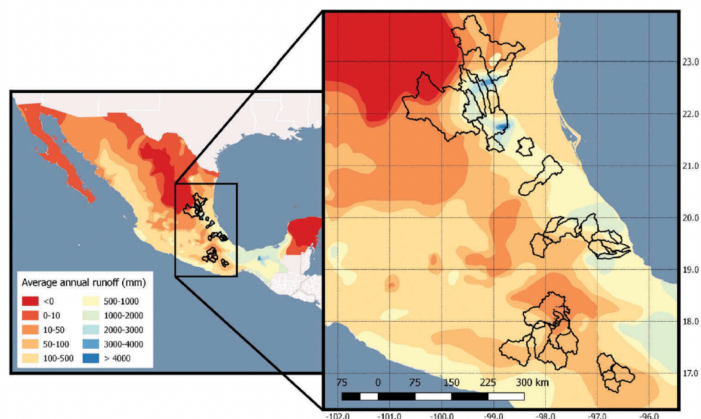
1) Arsenault a kol. (2019) ve své studii srovnávali metody prostorové blízkosti, fyzické podobnosti a regrese na souboru 30 povodí na území Mexika (obr. 2. Vyhodnocení výkonnosti srovnávaných metod bylo provedeno na základě simulační účinnosti modelů MOHYSE (8 kalibrovaných parametrů), HMETs (11 kalibrovaných parametrů) a GR4J (4 kalibrované parametry).

Simulační účinnost modelu byla v kalibrační fázi řešena na základě normalizovaného Nash-Sutcliffeova kritéria a v regionalizační fázi byla řešena na základě normalizovaného Nash-Sutcliffeova kritéria (NNSE).

Srovnávané metody vycházely ze základních regionalizačních přístupů. První z nich byla klasická vícenásobná lineární regrese. Další tři metody byly založeny na prostorové blízkosti (klasický přístup, klasický přístup s metodou IDW a regresně rozšířený přístup s metodou IDW). Poslední skupina metod vycházela z fyzické podobnosti (integrována podobnost, integrována podobnost s IDW a regresně rozšířená podobnost s metodou IDW). Ve studii byl použit multiple donor přístup v kombinaci s průměrováním výstupů.

Při provádění regionalizačních metod bylo využito křížová leave-on-out cross validace.

V rámci přístupu fyzické podobnosti bylo zvažováno devět charakteristik povodí: plocha povodí, průměrná nadmořská výška povodí, průměrné roční srážky, průměrná roční potenciální evapotranspirace, průměrný průtok, součinitel odtoku, index aridity, land use, půdní typy.

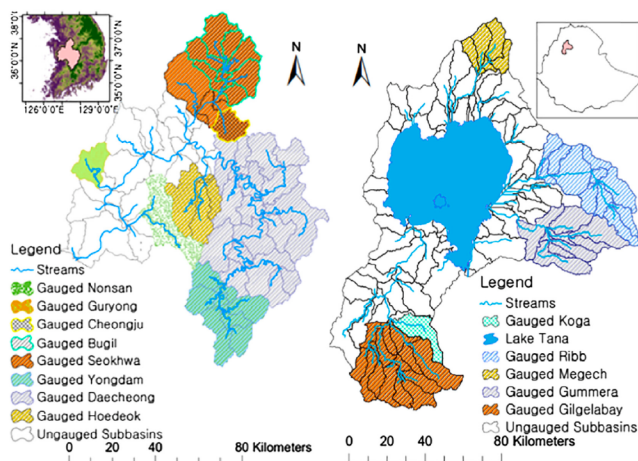


Obr. 2: Lokace povodí ve studii Arsenault a kol. (2019) - Mexiko.

2) Tegegne a Kim (2018) ve své studii srovnávali metody prostorové blízkosti a fyzické podobnosti na souboru 13 povodí na území dvou států (obr. 3). 8 povodí se nacházelo v subtropické zóně, kde v rámci hydroklimatických podmínek dominují asijské monzuny s většinou ročních srážek a odtoků probíhajících během monzunové sezony – na území Jižní Koreje. Letní monzuny jsou zde hnacím motorem hydroklimatické variability a většina srážek spadne v období dešťů (červen–září). 5 povodí se nacházelo v tropické zóně – na území Etiopie (viz obr. 3), kde je různorodé klima – od vlhkého po polosuché.

Vyhodnocení výkonnosti srovnávaných metod bylo provedeno na základě simulační účinnosti modelu SWAT. Kvůli vysokému počtu parametrů byla před kalibrací provedena analýza globální citlivosti modelu k identifikaci nejcitlivějších parametrů. Bylo identifikováno 13 důležitých parametrů, ovlivňujících predikci odtoku. Simulační účinnost byla jak v kalibrační, tak i v regionalizační fázi řešena na základě Nash-Sutcliffeova kritéria (NSE) a procentuální relativní objemové chyby (PBIAS).

Byla zde použita nově navržená metodika regionalizace, autory uváděná jako CRRS s cílem snížit nejistotu predikce hydrologických procesů a vyřešit problém identifikace klíčových atributů, upřednostňujících hydrologickou podobnost. Výkony této metody byly porovnány s výkony váženého průměrování (WAM), fyzické podobnosti a prostorové blízkosti (s využitím metody kriging).



Obr. 3: Lokace povodí ve studii Tegegne a Kim (2018) - Etiopie a Jižní Korea.

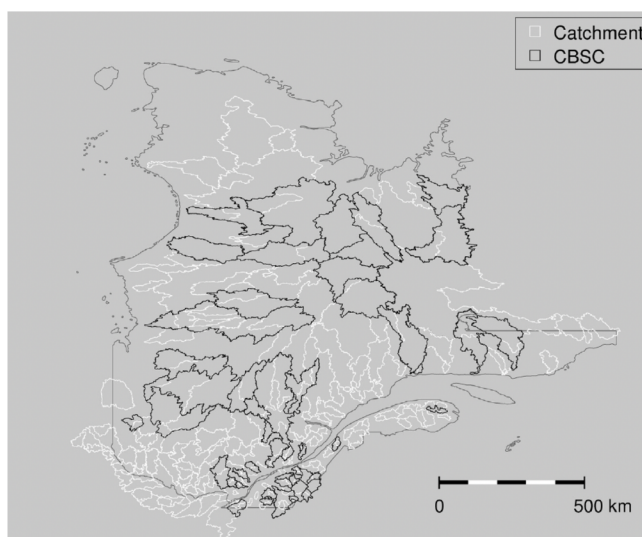
3) Poissant, Arsenault a Brissete (2017) ve své studii srovnávali metody prostorové blízkosti, fyzické podobnosti a regrese na souboru 266 povodí na území Kanady (obr. 4). Vyhodnocení výkonnosti srovnávaných metod bylo provedeno na základě simulačních účinností (více různých struktur) modelu GR4J. Autoři ve studii prostřednictvím tří struktur výše uvedeného modelu zkoumali dimenzionalitu sady parametrů na výkon a robustnost regionalizačních metod (verze s 6, 9 a 15 optimalizovanými parametry), kdy nejdříve v prvním případě ke 4 základním kalibrovaným parametrům modelu přidali sněhový modul CemaNeige se 2 kalibrovanými parametry.

Simulační účinnost modelu byla v kalibrační i regionalizační fázi hodnocena na základě Nash-Sutcliffeova kritéria.

Srovnávané metody vycházely ze základních regionalizačních přístupů. První z nich byla klasická vícenásobná lineární regrese – byl zde využit index podobnosti počítaný u metody fyzické podobnosti (byly extrahovány skupiny dárcovských povodí použité k výpočtu lineárních modelů, kdy následně bylo zkoumáno, jaký počet je optimální – nakonec vyšla 4 dárcovská povodí).

Další dvě metody byly založeny na prostorové blízkosti (využita Euklidovská vzdálenost) a fyzické podobnosti (určena indexem podobnosti). U obou těchto metod byl použit multiple donor přístup, přičemž zde byly porovnávány 3 různé metody multi-donor průměrování: první metoda přenáší pouze jednu sadu parametrů, kde každý parametr

je prostým průměrem hodnot parametrů dárcovských povodí. Druhá metoda přenáší několik parametrických sad od vybraných dárcovských povodí, kdy je simulace hydrologickým modelem vypočítána s každou touto sadou parametrů a modelovaný průtok je následně zprůměrován (aritmetický průměr). Třetí metoda implementuje inverzní vážení vzdálenosti (IDW). Simulační účinnost modelu byla v kalibrační i regionalizační fázi řešena na základě Nash-Sutcliffeova kritéria.



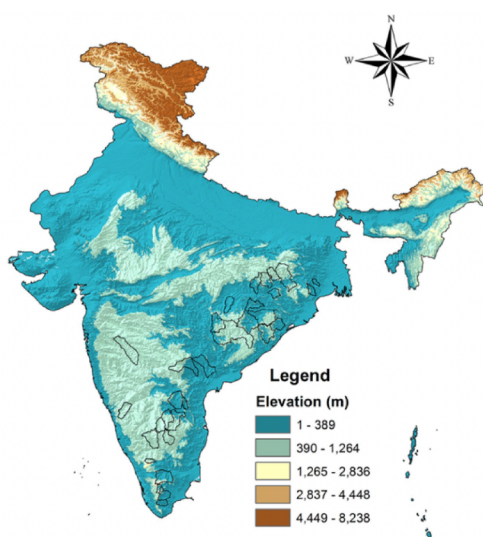
Obr. 4: Lokace povodí ve studii Poissant, Arsenault a Brissete (2017) - Kanada.

4) Swain a Patra (2019) ve své studii srovnávali různé metody prostorové blízkosti na souboru 32 povodí na území Indie (obr. 5). Vyhodnocení výkonnosti srovnávaných metod bylo provedeno na základě simulační účinnosti modelu SWAT.

Přenos hydrologických parametrů mezi různými povodími je dle názoru autorů této studie nutně spojen s chybami, v důsledku čehož je následně ovlivněna hydrologická předpověď v nepozorovaných lokalitách. Pokud jsou si povodí ovšem nějakým způsobem podobná, může to chybu v předpovědi snížit.

Autoři ve studii porovnali tři regionalizační přístupy, založené na prostorové blízkosti – přístup inverzní váženou vzdálenost, kriging a globální průměr, kdy uvedených 32 povodí bylo nejprve rozděleno do čtyř homogenních skupin pomocí metody samoorganizující se mapy.

Simulační účinnost modelu byla v kalibrační i regionalizační fázi hodnocena na základě tří kritérií: Nash-Sutcliffeova kritéria, RSR (střední kvadratická chyba) a PBIAS (procentuální relativní objemová chyba).



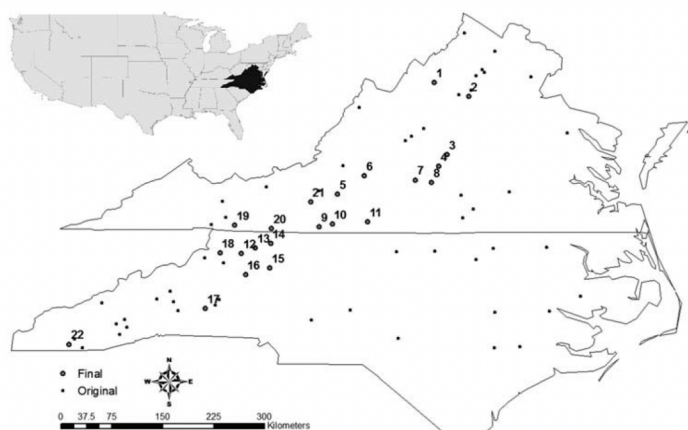
Obr. 5: Lokace povodí ve studii Swain a Patra (2019) - Indie.

5) Steinschneider a kol. (2015) ve své studii srovnávali kombinovaný regionalizační přístup zahrnující regresi na základě fyziografických charakteristik povodí a metodu prostorové blízkosti, popisující prostorové závislosti parametrů modelu, a porovnávali ji s jednoduššími přístupy založenými na regresi a prostorové blízkosti. Studie byla provedena na souboru 22 povodí na území USA (obr. 6). Vyhodnocení výkonnosti srovnávaných metod bylo provedeno na základě simulační účinnosti modelu abcd. Z původně kalibrovaných 73 povodí, byl počet povodí redukován, protože kalibrované parametry c a d nabývaly u některých povodí hodnot blízko mezím rozsahu těchto parametrů.

Simulační účinnost modelu byla hodnocena na základě Nash-Sutcliffeova kritéria, Kling-Guptova kritéria (KGE), systematické chyby průměrného průtoku a variability relativní objemové chyby.

Autoři ve studii navrhli statistickou metodu prostorové chybové regrese jako regionalizační metodu sloužící k syntéze regrese a přístupů prostorové blízkosti do konzistentního statistického rámce tak, aby bylo možné v procesu regionalizace využít více informací. Tuto nově navrženou metodu autoři následně porovnávali s dalšími

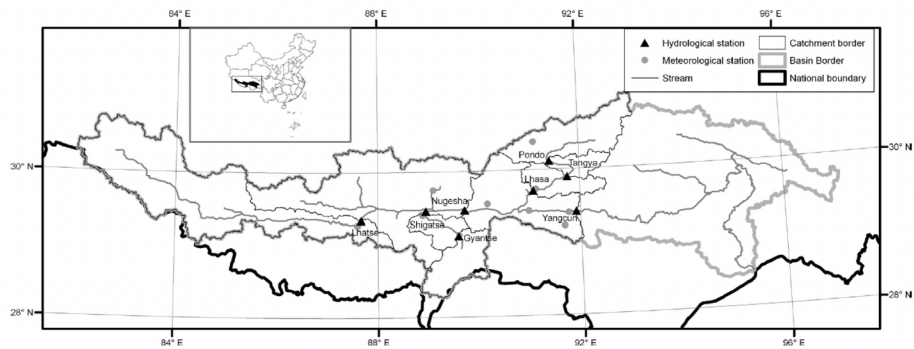
regionalizačními metodami. První z nich byla klasická regrese (klasická lineární regrese). Druhou srovnávanou metodou byla technika přenosu parametrů založená na prostorové blízkosti využívající IDW, kde byla pro každou oblast vyvinuta váhová matice inverzních vzdáleností (použita k odhadu parametrů jako vážený průměr parametrů na sousedních lokalitách). Poslední srovnávanou metodou byl uvažován přístup prostého aritmetického průměrování parametrů.



Obr. 6: Lokace povodí ve studii Steinschneider a kol. (2015) - USA .

6) Li a kol. (2014) ve své studii srovnávali metody prostorové blízkosti a fyzické podobnosti a na souboru 8 povodí na území Tibetu (obr. 7). Vyhodnocení výkonnosti srovnávaných metod bylo provedeno na základě simulační účinnosti modelu SIMHYD (9 kalibrovaných parametrů) a modelu GR4J (4 kalibrované parametry), následně k těmto modelům přidali sněhový modul CemaNeige.

Simulační účinnost modelu byla hodnocena na základě Nash-Sutcliffeova kritéria a relativní objemové chyby.

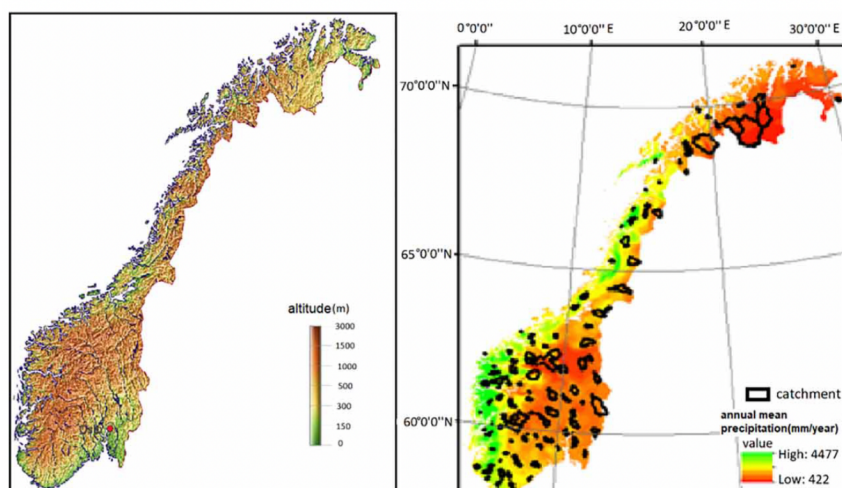


Obr. 7: Lokace povodí ve studii Li a kol. (2014) - Tibet.

7) Yang a kol. (2018) ve své studii srovnávali metody prostorové blízkosti a fyzické podobnosti a na souboru 118 povodí na území Norska (obr. 8). Vyhodnocení výkonnosti srovnávaných metod bylo provedeno na základě simulační účinnosti modelu WASMOD (4 parametry), ke kterému byl přidán sněhový modul CemaNeige se 2 kalibrovanými parametry.

Simulační účinnost modelu byla v kalibrační i regionalizační fázi hodnocena pomocí transformované druhé odmocniny Nash-Sutcliffe kritéria (NSEsqrt). Jedná se o NSE, které jako vstupy bere transformované řady odtoku, kdy transformační funkce je druhá odmocnina.

Mezi srovnávanými metodami byla prostorová blízkost (k nalezené dárcovských povodí využita Euklidovská vzdálenost mezi těžišti povodí využitím jak single – tak i multiple-donor přístupu, kdy v takovém případě byly použity jak průměrování pomocí prostého aritmetického průměru tak metoda IDW). Další regionalizační metodou byla fyzická podobnost, kde bylo použity metody jak prostého aritmetického průměru, tak i vážené inverzní podobnosti (ISW), která oproti IDW používá index fyzické podobnosti.



Obr. 8: Lokace povodí ve studii Yang a kol. (2019) - Norsko.

3.2 Přehled výsledků studií

Výsledky analýzy vybraných studií jsou zobrazeny dále v tab. č. 2. V případě, že je u daného regionalizačního přístupu a modelu uvedeno více hodnot mediánu NSE (nebo rozsah), pak se jedná o výsledky několika různých metod v rámci tohoto přístupu.

Studie	Hydrologický model	Kritérium hodnocení simulační účinnosti modelu	Kalibra ční fáze	Prostor ová blížkost	Fyzikál ní podobnost	Regres ní metody
Arsenault a kol. (2019)	GR4J MOHYSE HMETS	medián n NSE	0,76 0,80 0,79	0,69–0,71 0,69–0,73 0,5–0,71	0,67–0,70 0,70– 0,72 0,50– 0,71	0,68 0,70 0,50
Tegegne a Kim (2018)	SWAT	medián n NSE	0,49/0, 62	0,27/ 0,42	0,25/0, 50	-
Poissant, Arsenault a Brissete (2017)	GR4J	medián n NSE	0,75– 0,85	0,68– 0,75	0,81– 0,85	0,61– 0,70
Swain a Patra (2019)	SWAT	medián n NSE	0,70	0,43/0, 59/0,60	0,48	0,51

Steinschneider a kol. (2015)	abcd	mediá n NSE	0,79	0,78	-	0,76
Li a kol. (2014)	SIMHYD GR4J	mediá n NSE	0,87 0,80	0,71 0,66	0,69 0,71	-
Yang a kol. (2018)	WASMOD	mediá n NSE	0,86	0,75/0, 80/0,80	0,79/0, 80/0,81	0,61/0, 72

Tabulka 2: Výsledky analýzy vybraných studií.

Podle Arsenaulta a kol. (2019) je provádění regionalizace v hydrologicky heterogenní oblasti, jako je oblast Mexika, problematické pro metody regionalizace založené na fyzikálních deskriptorech povodí, jako jsou vícenásobná lineární regrese a metoda fyzické podobnosti. Autoři také zjistili, že metody prostorové blízkosti byly účinnější než metody fyzické podobnosti, pravděpodobně kvůli geografické heterogenitě oblasti. Navíc uvádějí, že použití přístupu s více dárci (multi-donor) není vždy lepší než přístup s jedním dárcem (single-donor), přičemž průměrování při přístupu s více dárci je optimální při geografické blízkosti, ale již není tak vhodné pro metodu fyzické podobnosti (platí pro všechny použité modely, přičemž model MOHYSE vykazoval nejhorší výsledky). Také bylo zjištěno, že výběr hydrologického modelu má významný vliv na výkon použité regionalizační metody. Studie dále prokázala, že nejlepší odhady odtoku v polosuchých a vlhkých nepozorovaných povodích poskytují kompletní sady charakteristik přenesené ze sousedního povodí.

Tegegne a Kim (2018) představili nový přístup k přenosu parametrů nazvaný CRRS, který se zakládá na dvoukrokovém modelu přenosu parametrů. Jejich cílem bylo snížit nejistotu při predikci hydrologických procesů a řešit problém identifikace klíčových atributů, které preferují hydrologickou podobnost. Výsledky tohoto nového přístupu CRRS byly porovnány s metodou přenosu parametrů WAM a s přístupy založenými na fyzické podobnosti a prostorové blízkosti. Podle očekávání autorů dosáhl nejlepších výsledků nově navržený přístup CRRS, zatímco přístup WAM dopadl nejhůře. Přístupy založené na fyzické podobnosti a prostorové blízkosti vykazovaly podobné výsledky, které se pohybovaly mezi výsledky uvedenými výše.

Výsledky studie Poissanta, Arsenaulta a Brissete (2017) naznačují, že fyzikální podobnost je účinnější než metoda prostorové blízkosti, přičemž obě tyto metody jsou překonány vícenásobnou lineární regresí. Dále výsledky ukázaly, že pro regionalizaci povodí se sněhovým režimem je globálně dostačujících 9 volných parametrů, avšak pro méně kvalitní časové řady nebo povodí s dominantním arktickým nebo subarktickým klimatem, vysokou kapacitou zásob vody nebo nízkým ročním úhrnem srážek je nezbytných 15 volných parametrů. Srovnání metod regionalizace ukázalo, že metoda fyzikální podobnosti je účinnější než metoda prostorové blízkosti, ačkoli metoda vícenásobné lineární regrese se jeví jako nejlepší. Pozorovaná spolehlivost metody fyzické podobnosti na globálním vzorku zdůrazňuje schopnost této metody regionalizovat povodí, u kterých je obtížné provést regionalizaci kvůli nižší kvalitě časových řad dárcovských povodí. Hodnoty uvedené v tabulce č. 2 byly odhadnuty z prezentovaného obrázku č. 9 předmětné studie pro global sample.

V rámci studie Swaina a Patry (2019) byly použity tři přístupy k regionalizaci: inverzní vážená vzdálenost (IGW), kriging a globální průměr založený na prostorové blízkosti mezi měřenými a nepozorovanými povodími. Povodí bylo rozděleno do čtyř homogenních skupin pomocí metody samoorganizujících se map (SOM). Z výsledků studie vyplývá, že metody IGW a kriging poskytly konkurenceschopné výsledky a dosahovaly lepších výsledků než metoda globálního průměru.

Steinschneider a kol. (2015) použili k regionalizaci parametrů srážko-odtokového modelu jimi navrženou metodu regrese prostorových chyb, kombinující regresní přístupy s přístupy prostorové blízkosti do jednotného statistického rámce, což umožnilo využití více informací při procesu regionalizace. Autoři integrovali regresi založenou na fyziografických charakteristikách povodí s technikou prostorové blízkosti, která popisuje prostorovou závislost parametrů modelu. Z výsledků studie vyplývá, že kombinovaný přístup poskytl lepší odhady parametrů podobné optimálním sadám parametrů než jakákoliv jiná testovaná regionalizační technika. Nakonec studie naznačuje, že regresní metody založené na fyziografických deskriptorech povodí mohou být pro regionalizaci srážko-odtokového modelu zcela nevhodné. Všechny hodnoty uvedené v tabulce č. 2 byly odhadnuty z prezentovaných grafů uvedených v předmětné studii.

Ve studii provedené Li a kol. (2014) přístup založený na prostorové blízkosti mírně překonává přístup fyzikální podobnosti, přičemž oba přístupy vykazují lepší výsledky než regionalizace pomocí náhodného výběru dárcovských povodí.

Autoři studie Yang a kol. (2018) dospěli k dvojímu závěru: jednak že přístupy založené na vzdálenostní podobnosti (prostorová blízkost, fyzikální podobnost) byly účinnější než přístupy založené na regresi, a jednak že kombinace metod prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti vedla k lepším výsledkům simulací. Autoři rovněž poznamenali, že klasifikace povodí do homogenních skupin nepřinesla zlepšení v simulacích nepozorovaných povodí. Hodnoty uvedené v tabulce č. 2 byly převzaty z tabulky č. 5 na str. 499 předmětné studie.

4 Diskuze

Na základě analýzy uvedených studií lze usuzovat, že většina provedených regionalizačních studií je specifická pro daný studovaný region, kdy uvedená variabilita pramení především z komplexního vlivu regionálního klimatu, antropické činnosti a dalších faktorů.

První ze studií (Arsenault a kol., 2019) naznačuje, že při srovnávání tří základních tradičních metod vykazovaly nejlepší výsledky přístupy vycházející z prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti, které oproti klasické vícenásobné lineární regresi fungovaly lépe, a dále při následném srovnání prvních dvou „úspěšných“ přístupů byl optimálnějším vyhodnocen přístup založený na prostorové blízkosti.

V hydrologicky heterogenních oblastech vykazoval tedy přístup založený právě na prostorové blízkosti nejlepší výsledky, kdy důvodem byla pravděpodobně s nejvyšší pravděpodobností právě geografická heterogenita oblasti (Mexika) ztěžující nalezení podobných povodí na základě fyzikálních charakteristik. Využívání metod založených na fyzikálních deskriptorech povodí, jako jsou vícenásobná lineární regrese a metoda fyzické podobnosti, se tedy v hydrologicky heterogenních oblastech jeví jako nevhodné.

Naopak v jedné z dalších studií (Poissant, Arsenault a Brissete, 2017) se metoda vícenásobné lineární regrese jeví jako neoptimalnější, když překonává obě dvě další výše uvedené klasické metody s tím, že nejnižší účinnost vykazovala metoda založená na geografické blízkosti. Uvedená studie byla prováděna na území Kanady a je tedy nasnadě konstatovat, že uvedené výsledky mohou být pravděpodobně zapříčiněny větší homogenitou dané oblasti a použitím metod založených právě na fyzikálních deskriptorech povodí se v takovýchto oblastech tedy jeví jako vhodnější.

Výše studovaný přístup založený na prostorové blízkosti byl vyhodnocen jako nejlepší i v další studii prováděné v Tibetu (Li a kol., 2014), který byl opět i zde mírně efektivnější než přístup založený na fyzikální podobnosti, přičemž jejich následným porovnáním s náhodným výběrem dárcovského povodí se ukázalo, že obě první metody vedoucí k lepším výsledkům.

Co se týče použitého multi-donor přístupu v první studii (Arsenault a kol., 2019), bylo zjištěno, že ten nemusí nutně vždy vést k lepším výsledkům než single-donor přístup, přičemž využití multi-donor přístupu je vhodné při regionalizaci založené na geografické blízkosti, avšak pro metodu založenou na fyzické podobnosti vždy vhodný nemusí být.

Jedna ze studií (Swain a Patra, 2019) dále mezi sebou blíže porovnávala tři regionalizační přístupy založené pouze na prostorové blízkosti (inverzní vážená vzdálenost, kriging a globální průměr) s tím, že zároveň zkoumala účinnost postupu, při kterém byly zkoumaná povodí nejdříve klasifikována, tedy rozdělena do homogenních skupin, v daném případě pomocí metody samoorganizující se mapy. Autoři studie se snažili ověřit, zda vhodná kombinace hydrologického modelu, zvolené klasifikační techniky a regionalizační metody může přinést optimálnější výsledky. Z výsledků studie vyplynulo, že metoda IGW a kriging poskytly konkurenceschopné výsledky a dosahovaly lepších výsledků než metoda globálního průměru, přičemž co se týče samotné prvotní klasifikace studovaných povodí do homogenních skupin, prvotní klasifikace do skupin měla negativní dopad na výsledky regionalizace pouze u několika málo studovaných povodí, avšak celkově výsledky provedené regionalizace zlepšovala.

Z jedné ze studií (Swain a Patra, 2019) dále vyplynulo, že přenos hydrologických parametrů mezi povodími je spojen s chybami, které ovlivňují hydrologické předpovědi v nepozorovaných lokalitách, přičemž klasifikace povodí do homogenních skupin na základě podobnosti může tuto chybu snížit. Výsledky ukázaly, že klasifikace povodí do homogenních skupin výsledky regionalizace zlepšila.

V jedné ze studií (Tegegne a Kim, 2018) nově navržený přístup CRRS pro přenos parametrů snižuje nejistotu predikce a pomáhá s identifikací klíčových atributů pro hydrologickou podobnost. V porovnání s metodou WAM a přístupy založenými na fyzické podobnosti a prostorové blízkosti dosáhl CRRS nejlepších výsledků. Nelineární regresní metody vedly k lepší predikci než lineární regrese, prostorové metody a tvorba homogenních regionů. Metody založené na fyzické podobnosti se v jedné ze studií ukázaly optimálnějšími oproti metodám prostorové blízkosti, přičemž obě překonaly vícenásobnou lineární regresi, v další vykazovaly metody IGW a kriging srovnatelné a konkurenceschopné výsledky s tím, že obě překonaly metodu globálního průměru.

V další studii (Steinschneider a kol., 2015) uváděný přístup jako prostorová chybová regrese, kombinující regresní a prostorové přístupy, sice obecně vedl k odhadům parametrů srážko-odtokového modelu, které se optimálním sadám parametrů podobaly více než ostatní z testovaných regionalizačních postupů. Navzdory této skutečnosti však, metoda prostorové chybové regrese původně slibující současně také zlepšení simulací průtoků, ve skutečnosti nedokázala překonat výsledky ostatních srovnávaných metod a účinnost simulace této kombinované metody tedy nakonec nebyla vyšší než prostá metoda založená na prostorové blízkosti. Jak je v předmětné studii uvedeno, tento výsledek byl zapříčiněn schopností metody prostorové blízkosti lépe zachovat korelaci mezi hydrologickými parametry. Je zde vhodné zdůraznit názor autorů studie, že regresní metody založené na fyziografických deskriptorech povodí mohou být k provádění regionalizace nevhodné.

Metody založené na prostorové blízkosti a fyzické podobnosti se tedy jeví na základě poznatků dostupných studií srovnávajících základní tři regionalizační techniky, zatím obecně účinnějšími oproti klasické lineární regresi, přičemž v rámci dalšího výzkumu je zároveň vhodné doporučit pokračování ve zkoumání a rozvíjení dalších nových kombinovaných metod, jakou je například výše popsaná metoda CRRS, případně v dalších publikovaných studiích (např. Golian a kol., 2021) uvedené nelineární regresní metody a techniky strojového učení. Zároveň je nutné zkoumat vliv dalších faktorů na výkon regionalizačních metod, jakými jsou kvalita dat z pozorovaných povodí a s ohledem na postupující klimatickou změnu a zlepšovat metody pro identifikaci homogenních hydrologických regionů.

Ve jedné z dalších výše zmiňovaných publikovaných studií (Golian a kol., 2021) autoři uvádějí, že dle jejich názoru je regionalizace parametrů pomocí regresních metod (např. MLR) obecně přesnější než výše zmíněné jednodušší metody. S uvedeným závěrem autorů by bylo možné se ztotožnit v tom smyslu, že regresní metody dokáží zohlednit více faktorů, které ovlivňují parametry modelu, zatímco jednodušší metody se obvykle zaměřují pouze na jeden faktor (např. vzdálenost). Dále regresní metody dokáží interpolovat parametry pro povodí, pro která nejsou dostupná data, zatímco jednodušší metody, jako je prostorová blízkost, se spoléhají na existující data, a dále vztah mezi deskriptory povodí a parametry modelu je často komplexní a nelineární, přičemž regresní

metody dále dokáží zachytit tuto komplexnost lépe než jednodušší metody, které předpokládají lineární vztah.

Klíčové poznatky z výše uvedeného lze tedy shrnout tak, že zatím nebyla vyvinuta univerzální "nejlepší" metoda regionalizace, přičemž optimálních výsledků pro nepozorovaná povodí lze dle dosavadních poznatků dosáhnout vhodnou kombinací hydrologického modelu, vhodné techniky regionalizace a metody klasifikace, kdy volba regionalizační techniky závisí především na hydrologické heterogenitě daného regionu, dostupnosti datových sad a požadované úrovni přesnosti regionalizace.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo na základě dostupné literatury jednak přiblížení problematiky tří dosud nejpoužívanějších regionalizačních přístupů v souvislosti s nepozorovanými povodími, jednak jejich srovnání, analýza a vyhodnocení efektivity (včetně případných nových) na základě výsledků vybraných komparativních studií.

V práci byly stručně popsány a zhodnoceny výsledky ze 7 studií zabývajících se regionalizačními přístupy predikce odtoku na nepozorovaných povodích, přičemž výsledkem srovnání, která z uvedených metod je nejoptimálnější řešením by bylo tvrzením pouze subjektivním, neboť výsledky jednotlivých studií se poměrně liší, přičemž odpověď na důvod této difference se v podstatě nabízí – optimální metoda regionalizace je nepřímo závislá na lokalitě daného povodí udávajících různé charakteristiky a dalších jistě rovněž podstatných faktorech a také na použitém simulačním modelu.

Nezpochybnitelným faktem je skutečnost, že regionalizační přístupy hrají důležitou roli v hydrologii a umožňují predikci hydrologických charakteristik v nepozorovaných povodích, přičemž výběr vhodné metody regionalizace je klíčovým faktorem pro dosažení spolehlivých a přesných výsledků. V této práci byly v diskusi shrnuty klíčové poznatky z relevantních studií a uvedeno doporučení pro praxi a další výzkum v oblasti regionalizace.

Při výběru vhodné metody regionalizace je důležité zvážit několik faktorů. Prvním z nich je hydrologická heterogenita oblasti. V oblastech s vysokou hydrologickou heterogenitou se osvědčily metody založené na prostorové blízkosti. Dále je důležité analyzovat dostupnost dat. Některé moderní metody, jako je například CRRS, vyžadují rozsáhlé datové soubory. V neposlední řadě je důležité si stanovit cíle regionalizace. Různé metody se hodí pro různé účely, ať už se jedná o predikci průtoků, návrhové povodně, nebo jiné.

V posledních letech se dále v oblasti regionalizace objevuje několik slibných trendů. Jedním z moderních trendů v regionalizaci je využití nelineárních regresních metod a technik strojového učení. Tyto techniky se dle některých provedených studií (např. Brunner a kol., 2018; Golian a kol., 2021) ukazují jako efektivnější než tradiční metody, jako je vícenásobná lineární regrese. Dalším trendem je kombinování různých metod

regionalizace. Hybridní přístupy, které integrují prostorovou blízkost, fyzickou podobnost a další faktory, dokáží v mnoha případech dosáhnout nejlepších výsledků.

Obecně by se tedy dalo na základě uvedených skutečností konstatovat, že metody založené na regresi jsou obecně přesnější, vyžadují ovšem větší objem dat a více výpočetního výkonu. Klasické metody jsou oproti tomu dle všeho méně přesné, ale méně náročné na data a výpočetní výkon. Nejen na základě toho lze tedy vyvodit, že nejlepší variantou jsou kombinované metody, které mohou dosáhnout nejlepšího výkonu, vyžadují ovšem složitější implementaci.

Pro modelování (nejen) povodní by tedy bylo vhodné zvážit vývoj hybridních modelů, které by využívaly silné stránky tradičních modelů, jakými jsou jednoduchost a interpretovatelnost, a zároveň integrovaly prvky nelineárních modelů pro zohlednění komplexních vztahů a dosažení vyšší přesnosti. Takový vývoj ovšem vyžaduje odborné znalosti a zkušenosti v oblasti modelování povodní a strojového učení.

V neposlední řadě je důležité uvést, že tato oblast se neustále vyvíjí a nejnovější trendy a výzkum je důležité sledovat a neustále se v oblasti regionalizačních přístupů vzdělávat.

Je třeba také zmínit, že zatím neexistuje univerzální přístup, tedy neexistuje jediná nejlepší metoda pro regionalizaci parametrů hydrologického modelu, která by se osvědčila pro všechna povodí a různé typy průtoků. Fyzikální vlastnosti povodí a klimatická variabilita ovlivňují výsledky regionalizace a není snadné najít nejlepší model pro všechna povodí a kritéria.

6 Použité zdroje

Arsenault, R., Breton-Dufour, M., Poulin, A., Dallaire, G., & Romero-Lopez, R. (2019). Streamflow prediction in ungauged basins: Analysis of regionalization methods in a hydrologically heterogeneous region of Mexico. *Hydrological Sciences Journal*, 64(11), 1297–1311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1639716>.

Bao, Z., Zhang, J., Liu, J., Fu, G., Wang, G., He, R., & Liu, H. (2012). Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 466, 37-46.

Beck, H. E., Van Dijk, A. I. J. M., De Roo, A., Miralles, D. G., Mcvicar, T. R., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. A. (2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 52(5), 3599–3622.

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

Burn, D. H., Zrinji, Z., & Kowalchuk M. (1997). Regionalization of Catchments for Regional Flood Frequency Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, s. 76-82.

Blöschl, G. (2006). Rainfall-Runoff Modeling of Ungauged Catchments. 10.1002/0470848944.hsa140.

Blöschl, G. (2005). Rainfall runoff modeling of ungauged catchments In M. L. Anderson, ed. *Encyclopedia of hydrological sciences* UK: John Wiley & Sons: 2061– 2080.

Blöschl, G., & Sivapalan, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling - a review. *Hydrological Processes* 9, 251–290.

Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (2013). Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales. *Eos Trans Am Geophys Union* 95:22.

Brunner, M. I., Furrer, R., Sikorska, A. E., Viviroli, D., Seibert, J., & Favre, A. C. (2018). Synthetic design hydrographs for ungauged catchments: a comparison of regionalization methods. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 32(7), 1993-2023.

Burn, D.H., & Boorman, D.B. (1993). Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 143, 429 – 454.

Calver, A., Kay, A.L., Jones, D.A., Kjeldsen, T., Reynard, N.S., & Crooks, S. (2004). Flood frequency quantification for ungauged sites using continuous simulation: a UK approach. In *Complexity and Integrated Resources Management, Transactions of the 2nd Biennial iEMSs Meeting*, Pahl-Wostl C., Schmidt S., Rizzoli A.E. and Jakeman A.J. (Eds.), International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs): Manno, pp. 1214 – 1218.

Calver, A., Crooks, S., Jones, D., Kay, A., Kjeldsen, T., & Reynard, N. (2005). National river catchment flood frequency method using continuous simulation.

Clarke, R.T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use.

Čekal, R., Hladný, J., & Chaloušová, J. (2007). Regionalizace povodí Labe na základě sezónní analýzy výskytu povodní. In: *Sborník příspěvků ze semináře Povodně a změny v krajině. PŘF UK a MŽP, Praha. s.91-100.*

Daňhelka, J. (2007). *Sborník prací Českého Hydrometeorologického ústavu, Praha, 104 s.*

Dasgupta, R, Das, S., Banerjee, G., & Mazumdar, A. (2023). Revisit hydrological modeling in ungauged catchments comparing regionalization, satellite observations, and machine learning approaches. *HydroResearch*. 7. 10.1016/j.hydres.2023.11.001.

DiBiase, D., DeMers, M., Johnson, A., Kemp, K., Luck, A. T., Plewe, B., & Wentz, E. (2006). *Principles of kriging. The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge. Washington, DC: Association of American Geographers. (2nd Quarter 2016, first digital).*

Dooge, J.C.I. (1968). The hydrologic cycle as a closed system. *Bull Int. ScL HydroL*, 13(1): 58-68.

Duben, J. (2014). *Modelování odtoku pomocí metod SCS CN a Green Ampt v povodí ostrovské Bystřice v Krušných horách [Diplomová práce, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie]. Digitální repozitář Univerzity Karlovy. <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/72409?show=full> .*

Engeland, K., & Hisdal, H. (2009). A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-model. *Water Resources Management*, 23(12), 2567-2586.

Golian, S., Murphy, C., & Meresa, H. (2021). Regionalization of hydrological models for flow estimation in ungauged catchments in Ireland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100859.

Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., & Wang, Z. (2020). Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. *WIREs Water*, 8(1). Portico. <https://doi.org/10.1002/wat2.1487>.

Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., & Martinez, G. (2009). Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology*. 377. 80-91. 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

He, Y., Bárdossy, A., & Zehe, E. (2011). A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 3539–3553. doi:10.5194/hess-15-3539-2011.

Hirsch, R.M., Helsel, D.R., Cohn, T.A., & Gilroy E.J. (1992). Statistical analysis of hydrological data. In *Handbook of Hydrology*, Maidment R. (Ed.), McGraw-Hill: New York, pp. 17.1 – 17.55.

Hrušková, K. (2006). Modelování odtoku z tajícího sněhu v povodí horního Hronu [Dizertační práce, Masarykova univerzita]. Archiv závěrečných prací MUNI. <https://is.muni.cz/th/mpa84/?id=80765> .

Hundecha, Y.H., & 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, *J. Hydrol.*, 292, 281–295.

Jeníček, M. (2005). Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. Článek ze sborníku *Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko*. Praha: PŘF UK, s. 112–126.

Jeníček, M. (2009). Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany [Dizertační práce, Univerzita Karlova]. Digitální repozitář Univerzity Karlovy <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/2594> .

Knoppová, K. (2018). Srážko-odtokový proces v podmínkách klimatické změny [Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně]. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=167421

- Kay, A. L., Jones, D. A., Crooks, S. M., Kjeldsen, T. R., & Fung, C. F. (2007). An investigation of site-similarity approaches to generalisation of a rainfallrunoff model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 500–515, doi:10.5194/hess-11-500-2007.
- Kim, U., & Kaluarachchi, J. J. (2008). Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia, *J. Hydrol.*, 362, 39–56.
- Kjeldsen, T., & Jones, D. (2010). Predicting the index flood in ungauged UK catchments: on the link between data-transfer and spatial model error structure. *J Hydrol* 387(1–2):1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.024>.
- Kokkonen, T., Jakeman, A. J., Young, P., & Koivusalo, H. (2003). Predicting Daily Flows in Ungauged Catchments: Model Regionalization From Catchment Descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes - HYDROL PROCESS*. 17. 2219–2238. 10.1002/hyp.1329.
- Konečný, D. (2008). Stanovení minimální absolutní chyby při procesu tvorby DMR s využitím statistického porovnání v prostředí softwaru R. Katedra geoinformatiky [Diplomová práce]. Univerzita Palackého v Olomouci.
- Krpec, P. (2018). Predikce průtoků modelem SWAT na příkladu povodí vodního díla Olešná. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 60. 17. 10.46555/VTEI.2018.05.003.
- Křikavová, L. (2009). Interpolace bodových dat v GIS [Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze]. https://maps.fsv.cvut.cz/diplomky/2009_BP_Krikavova_Interpolace_bodovych_dat_v_GIS.pdf
- Kulhavý, Z., & Kovář, P. (2000). Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. Praha: VÚMOP, 96 s. ISSN 1211-3972.
- Laaha, G., & Blöschl, G. (2005). A comparison of low flow regionalisation methods – catchment grouping. *Journal of Hydrology*, in press.
- Lamb, R., & Kay, A. L. (2002). Continuous simulation as a basis for national flood frequency estimation, in: *Continuous river flow simulation: methods, applications and uncertainties*, BHS National Meeting, CEH Wallingford, edited by: Littlewood, I., BHS Occasional Paper No. 13, 67–75.

Lamb, R., & Kay, A. L. (2004). Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain, *Water Resour. Res.*, 40, W07501, doi:10.1029/2003WR002428.

Lamb, R., Crewett, J., & Kay, A. L. (2000). Progress in the spatial generalisation of “continuous simulation” flood frequency modeling, in: *River Flood Defence*, vol. 1, edited by: Toensmann, F. and Koch, M., *Kassel Rep. Hydraul. Eng.* 9/2000, D117–D125.

Leavesley, G.H., & Stannard, L.G. (1995). The Precipitation- Runoff Modeling System – PRMS. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh V .P . (Ed.), Water Resources Publications, Highlands Ranch, pp. 281–310.

Li, F., Zhang, Y., Xu, Z., Liu, C., Zhou, Y., & Liu, W. (2014). Runoff predictions in ungauged catchments in southeast Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 511, 28–38.

Li, H., & Zhang, Y. (2017). Regionalising rainfall-runoff modelling for predicting daily runoff: Comparing gridded spatial proximity and gridded integrated similarity approaches against their lumped counterparts. *Journal of Hydrology*, 550, 279–293.

Linhart, J., Petrusek, M., Vodáková, A., & Maříková, H. (1996). *Velký sociologický slovník*. Praha: Karolinum. ISBN 80-7184-310-5.

Matoušek, P. (2015). Vyhodnocení účinnosti komplexních ochranných opatření k.ú. Jerlochovice v povodí Husího potoka [Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně]. <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/86488> .

Mcintyre, N., Lee, H., Wheeler, H., Young, A., & Wagener, T. (2005). Ensemble Predictions of Runoff in Ungauged Catchments. *Water Resour. Res.* 41. 10.1029/2005WR004289.

Meloun, M. (2007). Statistické zpracování vodohospodářských dat, 7. Přednosti analýzy shluků při klasifikaci zdrojů pitné vody, *Vodní hospodářství* 11, 391 – 402.

Meloun, M., & Militký J. (2004). Přednosti analýzy shluků ve vícerozměrné statistické analýze. In: *Zajištění kvality analytických výsledků: sborník přednášek ze semináře*. Univerzita Pardubice, Pardubice, ISBN 80-86380-22-X.

Merz, R., Piock-Ellena, U., Blöschl, G., & Gutknecht, D. (1999). Seasonality of flood processes in Austria. In *Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating*, Gottschalk L.,

Olivry J.C., Reed D. and Rosbjerg D. (1990). Proceedings of the Birmingham Symposium, IAHS Publication No. 255, IAHS: pp. 273–278.

Merz, R., & Blöschl, G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, 95–123.

Merz R., & Blöschl G. (2005). Flood frequency regionalisation – spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, 302(1–4), 283–306.

Moravcová, J. (2011). Vliv krajinných struktur na vybrané ukazatele jakosti vody při zvýšených průtocích jako podklad pro projekci KPÚ. *Disertační práce. Katedra krajinného managementu ZF JCU, České Budějovice*. 143 s.

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

Nathan, R. J., & McMahon, T.A. (1990). Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalization. *Journal of Hydrology*, 121, 217–238.

Nossent, J., & Bauwens, W. (2012). Optimising the convergence of a Sobol' sensitivity analysis for an environmental model: application of an appropriate estimate for the square of the expectation value and the total variance. *International congress on environmental modelling and software, managing resources of a limited planet: pathways and visions under uncertainty, sixth biennial meeting, Leipzig, Germany*. R. Seppelt, et al., eds. Manno, Switzerland: International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 1080–1087.

Oliver, M., & Webster, R. (2013). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *ScienceDirect*, s. 57–67.

Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, Ch., Michel, C., & Le Moine, N. (2008). Spatial Proximity, Physical Similarity, Regression and Ungaged Catchments: A Comparison of Regionalization Approaches Based on 913 French Catchments. *Water Resources Research*, 44, W03413. <http://dx.doi.org/10.1029/2007WR006240>.

Oudin, L., Kay, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2010). Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar?, *Water Resour. Res.*, 46, W11558, doi:10.1029/2009WR008887.

Parajka, J., Merz, R., & Blöschl, G. (2005). Comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*. 9. 10.5194/hessd-2-509-2005.

Pavlík, F. (2014). Kvantifikace přirozené vodní retenční schopnosti krajiny ve vybraných povodích [Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně]. <https://dspace.vut.cz/items/d500b2cc-bc69-45cd-84b6-1a2cae693d62> .

Persiano, S., Salinas, J., Stedinger, J., Farmer, W., Lun, D., Viglione, A., Blöschl, G., & Castellarin, A. (2021). A comparison between generalized least squares regression and top-kriging for homogeneous cross-correlated flood regions. *Hydrological Sciences Journal*. 66. 10.1080/02626667.2021.1879389.

Piacsek, P. (2011). Hydrologické modely - rozdíly v nárocích na vstupní data [Bakalářská práce, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích]. https://theses.cz/id/ig27sf/Petr_Piacsek_bakalsk_prce.pdf .

Pilgrim, D. H. (1983). Some problems in transferring hydrological relationships between small and large drainage basins and between regions. *Journal of Hydrology* 65: 49–72.

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. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.005>.

Pomije, T. (2011). Zhodnocení různých protipovodňových opatření v povodí při extrémních srážko-odtokových situacích. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.

Pool, S., Vis, M., & Seibert, J. (2021). Regionalization for ungauged catchments — Lessons learned from a comparative large-sample study. *Water Resources Research*, 57, e2021WR030437. <https://doi.org/10.1029/2021WR030437>.

Post, D. A., & Jakeman, A. J. (1996). Relationships between catchment attributes and hydrological response characteristics in small Australian mountain ash catchments. *Hydrological Processes* 10: 877–892.

Přeslička, J. (2012). Zpracování přehledu a popisu epizodních model srážko-odtokových událostí pro odnos látek [Bakalářská práce, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích]. https://theses.cz/id/4vwwk62/Zpracovn_pehledu_a_popisu_epizodnich_model_srko-odtokovch_.pdf .

- Randrianasolo, A., Ramos, M. H., & Andréassian, V. (2011). Hydrological ensemble forecasting at ungauged basins: Using neighbour catchments for model setup and updating. *Advances in Geosciences*, 29, 1–11.
- Rezaeian, M., Seifollah, Z., Davar, A., Singh, V., Zadeh, M., Amin, S., Khalili, D., & Singh, V. (2010). Daily Outflow Prediction by Multi Layer Perceptron with Logistic Sigmoid and Tangent Sigmoid Activation Functions. *Water Resources Management*, 24, 2673-2688. 10.1007/s11269-009-9573-4.
- 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(5), 447-459.
- Shu, C., & Burn, D. H. (2003). Spatial patterns of homogeneous pooling groups for flood frequency analysis, *Hydrolog. Sci. J.*, 48, 601–618.
- Sivapalan, M. (2003). Prediction in ungauged basins: A grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes*, 17(15), 3163–3170.
- Sivapalan, M. , Takeuchi, K. , Franks, S. W. , Gupta, V. K. , Karambiri, H. , Lakshmi, V. , Liang, X. , McDONNELL, J. J. , Mendiondo, E. M. , O'Connell, P. E. , Oki, T. , Pomeroy, J. W. , Schertzer, D. , Uhlenbrook, S., & Zehe, E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48: 6, 857 — 880.
- Skoulikaris, C., & Piliouras, M. (2023). Hydrological simulation of ungauged basins via forcing by large-scale hydrology models. *Hydrological Processes*, 37(12), e15044. <https://doi.org/10.1002/hyp.15044>.
- Spohnerová, K. (2010). Shluková analýza [Diplomová práce, Univerzita Palackého v Olomouci]. <https://theses.cz/id/lmxnjv/85121-715936965.pdf?lang=en> .
- Steinschneider, S., Yang, Y.-C. E., & Brown, C. (2015). Combining regression and spatial proximity for catchment model regionalization: A comparative study. *Hydrological Sciences Journal*, 60(6), 1026–1043.
- Swain, J. B., & Patra, K. C. (2017). Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. *Journal of Hydrology*, 554, 420–433.

Swain, J. B., & Patra, K. C. (2017). Streamflow estimation in ungauged catchments using regional flow duration curve: Comparative study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(7), 22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001509](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001509).

Swain, J. B., & Patra, K. C. (2019). Impact of catchment classification on streamflow regionalization in ungauged catchments. *SN Applied Sciences*, 1(5), 1-14.

Šercl, P. (2009). Vliv fyzicko-geografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln (1. vyd.). Praha: ČHMÚ.

Tasker, G. (2007). Comparing Methods of Hydrologic Regionalization. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 18. 965 - 970. 10.1111/j.1752-1688.1982.tb00102.x.

Tegegne, G., & Kim, Y. O. (2018). Modelling ungauged catchments using the catchment runoff response similarity. *Journal of Hydrology*, 564, 452–466. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.042>.

Tvrzník, J. (2019). Využití metody kriging v inženýrských úlohách s neurčitostmi [Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně]. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=194779.

Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., & Weingartner, R. (2009). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland-Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results, *J. Hydrol.*, 377, 208–225.

Wagener, T., Wheeler, H.S., & Gupta, H.V. (2004). Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments.

Wagener, T., & Wheeler, H. S. (2006). Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty, *J. Hydrol*, 320, 132–154.

Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P., & Woods, R. (2007). Catchment classification and hydrologic similarity, *Geogr. Compass*, 1/4, 901–931.

WMO (1994). Guide to hydrological practices - Data Acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications. WMO-No. 168, Geneva, 735 s.

WMO (1995). INFOHYDRO Manual, Second Edition, Operational Hydrology Report, No. 28, WMO Report No. 683, World Meteorological Organisation, Geneva.

WMO (2011). Manual on flood forecasting and warning [online]. Geneva: World Meteorological Organization. [cit. 2018-01-02]. ISBN 978-926-3110-725.

Yao, C., Zhang, Y., & Li, Z. (2013). Hydrological simulations and similarities in ungauged basins. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 41(02), 108–113.

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. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.071>.

Zhang, Y., & Chiew, F. H. S. (2009). Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments, *Water Resour. Res.*, 45, W07412, doi:10.1029/2008WR007504.

Zhang, Y. Q., & Chiew, F. H. S. (2009). Evaluation of regionalisation methods for predicting runoff in ungauged catchments in southeast Australia. In 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation (pp. 3442-3448). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation.

Zhang, Y., Vaze, J., Chiew, F.H., Teng, J., & Li, M. (2014). Predicting hydrological signatures in ungauged catchments using spatial interpolation, index model, and rainfall–runoff modelling. *J. Hydrol.*, pp. 936-948, 10.1016/j.jhydrol.2014.06.032.

Žáček, V. (2012). Kohonenova samoorganizační mapa [Diplomová práce, VÚT v Brně]. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52027 .