

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**



Bakalářská práce

Predikce odtoku na nepozorovaných povodích

Adam Šejstal

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Adam Šejstal

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Predikce odtoku na nepozorovaných povodích

Název anglicky

Runoff prediction in ungauged catchments

Cíle práce

Práce je zaměřena na problematiku spojenou s predikcí odtoku na nepozorovaných povodích. Cílem práce je na základě publikovaných studií porovnat a kriticky zhodnotit tři nejčastěji využívané regionalizační přístupy.

Metodika

- 1) Literární rešerše na téma predikce odtoku obecně a podrobněji se zaměřit na regionalizační přístupy prostorové blízkosti povodí, fyzické podobnosti povodí a regresní metody.
- 2) Na základě již publikovaných výsledků provést porovnání a kritické zhodnocení tří nejčastěji využívaných regionalizačních přístupů.

Doporučený rozsah práce

30 – 50 stran

Klíčová slova

predikce odtoku, nepozorované povodí, regionalizace

Doporučené zdroje informací

- He, Y., Bárdossy, A., and Zehe, E.: A review of regionalisation for continuous streamflow simulation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3539–3553, <https://doi.org/10.5194/hess-15-3539-2011>, 2011.
- UDIN, Ludovic, Vazken ANDRÉASSIAN, Charles PERRIN, Claude MICHEL a Nicolas LE MOINE. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research* [online]. 2008, 44(3) ISSN 0043-1397. Dostupné z: [doi:10.1029/2007WR006240](https://doi.org/10.1029/2007WR006240)
- PATIL, S. a M. STIEGLITZ. 2012. Controls on hydrologic similarity: role of nearby gauged catchments for prediction at an ungauged catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 16(2): 551-562 DOI: 10.5194/hess-16-551-2012. ISSN 1607-7938. Dostupné z: <https://hess.copernicus.org/articles/16/551/2012/>
- 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. and 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
- SIVAPALAN, Murugesu. 2003. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes* [online]. 17(15): 3163-3170. DOI: 10.1002/hyp.5155. ISSN 0885-6087. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.5155>
- ZHANG, Yongqiang a Francis H. S. CHIEW. 2009. Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments. *Water Resources Research* [online]. 45(7). DOI: 10.1029/2008WR007504. ISSN 0043-1397. Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008WR007504>
-

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 22. 2. 2024

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 24. 02. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Predikce odtoku na nepozorovaných povodích" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v textu a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 28.3. 2024

Poděkování

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

Predikce odtoku na nepozorovaných povodích

Abstrakt

Bakalářská práce s názvem "Predikce odtoku na nepozorovaných povodích" se zabývá výzvami spojenými s odhadem odtoku v oblastech, kde nejsou dostupná tradiční monitorovací data. Cílem práce je porovnat efektivitu tří hlavních regionalizačních přístupů – prostorové blízkosti, fyzikální podobnosti a regresní metody – při predikci odtoku na nepozorovaných povodích z hlediska jejich efektivity vyjádřené Nash-Sutcliffeovým koeficientem. Analýza byla založena na pěti studiích a ukazuje, že přístup prostorové blízkosti představuje nejúčinnější metodu, zejména díky jeho schopnosti minimalizovat pokles simulační účinnosti při přechodu z kalibrační fáze do fáze aplikace na nepozorovaných povodích. Práce tak přináší důležité srovnání mezi metodami a přispívá k lepšímu pochopení a řízení vodních zdrojů v oblastech bez dostupných monitorovacích dat.

Klíčová slova:

nepozorovaná povodí, regionalizační přístup, regrese, prostorová blízkost, fyzikální podobnost

Prediction of runoff in unobserved catchments

Abstract

The bachelor's thesis, "Predicting runoff in unmonitored catchments", addresses the challenges associated with estimating runoff in areas where traditional monitoring data are not available. The aim of the thesis is to compare the effectiveness of three main regionalisation approaches - spatial proximity, physical similarity and regression methods - in predicting runoff on unobserved catchments in terms of their effectiveness as expressed by the Nash-Sutcliffe coefficient. The analysis was based on five studies and shows that the spatial proximity approach represents the most effective method, mainly due to its ability to minimize the decrease in simulation efficiency when moving from the calibration phase to the application phase on unobserved catchments. The work thus provides an important comparison between methods and contributes to a better understanding and management of water resources in areas without available monitoring data.

Keywords:

unobserved catchments, regionalisation approach, regression, spatial proximity, physical similarity

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Cíl práce a metodika	11
3 Literární rešerše	12
3.1 Nepozorované povodí	12
3.2 Hydrologická regionalizace	12
3.3 Základní rozdělení regionalizačních metod	14
3.3.1 Metoda prostorové blízkosti	15
3.3.2 Regresní metody	18
3.3.3 Metoda fyzikální podobnosti	22
3.3.4 Charakteristika povodí	22
3.3.5 Fyzicko-geografické charakteristiky povodí	23
3.3.6 Výběr algoritmu pro vyhledávání nejpodobnějších povodí.....	24
3.3.7 Výběr metody odhadu hydrologické charakteristiky	27
4 Vyhodnocení a porovnání efektivity regionalizačních metod	28
4.1 Studie zvolené pro porovnání regionalizačních metod	28
4.2 Porovnání výsledků na základě vybraných studií	34
4.3 Nejlepší výsledek regionalizační metody ve studii	37
5 Diskuze	39
6 Závěr.....	41
7 Seznam použitých zdrojů	43
8 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk	47
8.1 Seznam obrázků	47
8.2 Seznam tabulek	47
8.3 Seznam grafů.....	47

1 Úvod

V současné době stojí odborníci v oblasti hydrologie a správy vodních zdrojů před rostoucími výzvami způsobenými změnami klimatu, zvyšujícím se tlakem na vodní zdroje a demografickým vývojem. Jednou z klíčových vědeckých výzev je přesná predikce odtoku v oblastech, které jsou označovány jako "nepozorovaná povodí". V těchto lokalitách, kde chybí dostatečná monitorovací data, je komplikované provádět spolehlivé předpovědi, což je nezbytné pro efektivní plánování a řízení vodních zdrojů.

Významnost této problematiky byla již dříve identifikována ve vědecké komunitě, jak dokládá studie Sivapalan et al. (2003), která zdůrazňuje potřebu efektivních metod pro identifikaci a predikci hydrologických procesů v těchto méně zkoumaných oblastech. Tyto výzvy nejen, že ovlivňují lokální a regionální vodní hospodářství, ale mají také širší dopady na globální úrovni, zejména v souvislosti s udržitelným rozvojem a adaptací na klimatické změny.

Přes tyto obtíže se současné výzkumné snahy zaměřují na hledání nových přístupů a metodologií, které by umožnily překonat nedostatek dat a zlepšit přesnost predikcí odtoku v nepozorovaných povodích. Tato bakalářská práce se vkládá do tohoto kontextu s cílem prozkoumat dostupnou literaturu na téma predikce odtoku, a to zejména se zaměřením na porovnání různých metodologických přístupů. Skrze tento průzkum se práce snaží přispět k lepšímu pochopení možností, které stojí před vědci a praktiky v oblasti hydrologie a nabídnout přehled současných metod a výzev v této důležité oblasti vědy a praxe.

2 Cíl práce a metodika

Cílem práce je na základě literární rešerše identifikovat problematiku spojenou s predikcí odtoku na nepozorovaných povodí. Dílčím cílem je na základě výsledků studií provést porovnání a kritické zhodnocení tří nejčastěji využívaných regionalizačních přístupů.

V teoretické části je provedena komparace odborných zdrojů k získání pohledu na problematiku predikce odtoku obecně a podrobněji se zaměřuje na regionalizační přístupy prostorové blízkosti povodí, fyzické podobnosti a regresní metody. Tato část poskytuje základ pro praktickou část.

V praktické části jsou porovnávány publikované výsledky a kritické zhodnocení tří nejčastěji využívaných regionalizačních přístupů. Hodnocení simulační účinnosti vybraných modelů bylo provedeno pomocí Nash-Sutcliffeova kritéria. V regresním přístupu a v přístupu fyzikální podobnosti povodí bylo testováno 6 charakteristik povodí.

3 Literární rešerše

3.1 Nepozorované povodí

Nepozorované povodí označuje oblast s nedostatečnými záznamy hydrologických pozorování, a to jak z hlediska jejich množství, tak i kvality. Tyto záznamy jsou nezbytné pro výpočet hydrologických veličin, jako je množství nebo kvalita vody, v odpovídajícím prostorovém a časovém měřítku s přesností odpovídající praktickým aplikacím. Například, pokud není sledovaná veličina, která je objektem zájmu, dostatečně měřena s požadovaným rozlišením nebo požadovanou časovou periodou nutnou pro předpovědi či kalibraci modelů, dané povodí je klasifikováno jako nepozorované v této konkrétní oblasti. Zájmovými proměnnými mohou být například srážky, odtok, míra eroze, koncentrace sedimentů v průtoku atd., takže každé povodí je v určitém ohledu nepozorované (Sivapalan et al., 2003).

Podle He et al. (2011) se v širším a praktickém smyslu pod pojmem nepozorovaná povodí nerozumí pouze povodí, u nichž nebyly v minulosti měřeny průtoky, ale také povodí, u nichž se očekává, že v budoucnu dojde k významným klimatickým a/nebo fyzikálním změnám.

Předpovědi odtoku na nepozorovaných povodích jsou považovány za jednu z nejnáročnějších úloh v povrchové hydrologii (Sivapalan et al., 2003).

3.2 Hydrologická regionalizace

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).

Regionalizace se obvykle používá pro studie spojené s predikcí odtoku v rámci PUB (Prediction Ungauged Basin), což je proces přenosu hodnot parametrů z pozorovaného povodí do cílového nepozorovaného povodí (Blösch a Sivapalan, 1995).

V současné době se pojem regionalizace vztahuje na všechny metody, jejichž cílem je odhadnout hodnoty modelových parametrů na jakémkoli nepozorovaném povodí v definované oblasti s konzistentní hydrologickou odezvou (Oudin et al., 2011).

Bez ohledu na typ hydrologického modelu, který se používá k určení srážko-odtokových vztahů, je odhad parametrů modelu a předpověď v nepozorovaných povodích obzvláště obtížná a vždy je spojena se značnou nejistotou. Odhad statistik průtoků v nepozorovaných povodích je dalším problémem, se kterým se vždy setkáváme, když je třeba provést inženýrský návrh hydraulických struktur. Zaměření výzkumu na předpověď v nepozorovaných povodích bylo formálně schváleno a stanoveno ve vědeckém a realizačním plánu PUB (Prediction in Ungauged Basin) v roce 2003 (Sivapanlan et al., 2003).

Definice regionalizačních metod, viz Tabulka 1, je různá v závislosti na kontextu a kladou důraz na předpověď časových řad, klasifikaci nebo statistický vztah. Historie vývoje analýz odtoku v regionech je relativně dlouhá a bohatá. Značného pokroku ve vývoji analýz bylo dosaženo v odhadu regionálních hodnot parametrů srážko-odtokového modelu pro simulaci kontinuálního odtoku (Vogel, 2005). Jsou zde dva typy studií, které využívají regionalizační techniky pro nepozorovaná povodí. První z těchto studií provádí odhad parametrů statistik odtoku, zahrnující i větší část kvantilů povodní. Druhá metoda buď odhaduje parametry pomocí srážko-odtokového modelu pro simulaci celkového odtoku, nebo celkový odtok odhaduje přímo bez použití modelu. Většina postupů používaných v této druhé metodě vychází z těch, které jsou využívány v první metodě. To znamená, že jsou použitelné i pro první případ. Existuje ale několik nových metod, které vznikly nedávno a byly testovány jen na srážko-odtokových modelech. Nejjednodušší metodou regionalizace spočívá v identifikaci podobných nebo reprezentativních povodí, buď z hlediska jejich geografické polohy nebo chování. Koncept podobnosti povodí je základem všech metod regionalizace založených na vzdálenosti mezi dvojicí povodí. (He et al., 2011). Tato kategorie je uvedena v kapitole 3.3.1 Metoda prostorové blízkosti. Dalším modelem je regionální analýza založená na regresi, která je uvedena v kapitole 3.3.2 Regresní metody.

Tabulka 1 - Chronologické definice regionalizace (He et al., 2011)

Autoři	Použitý termín	Definice
Riggs (1973)	Regionální analýza	Rozšíření záznamů v prostoru.
Göttschalk (1985)	regionalizace	Klasifikace povodí na základě hydrologického významu.
Blöschl a Sivapalan (1995)	regionalizace	Přenos informací z jednoho povodí do druhého.
Wagener a Wheeler (2006)	Regionalizace nebo prostorové zobecnění	Statistický vztah mezi charakteristikami povodí a parametry modelu, který se aplikuje na nepozorovaném povodí
Young (2006)	Regionalizace	Vztah hydrologických jevů k fyzikální a klimatické charakteristice povodí/regionu.
Oudin et al. (2010)	Regionalizace	Všechny metody umožňují přenos hydrologických informací z od pozorovaných k nepozorovaným místům.

3.3 Základní rozdělení regionalizačních metod

Při výběru povodí, jehož optimalizované parametry slouží k modelování odtoku pro cílové nepozorované povodí, se obvykle uplatňují tři metody regionalizace, které jsou dále podrobněji popsány, a to je metoda prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti a metoda regrese (Blöschl a Sivapalan, 1995; Oudin et al., 2008).

3.3.1 Metoda prostorové blízkosti

Metoda prostorové blízkosti je založena na využití geografické blízkosti povodí, což představuje jeden z nejstarších pokusů o modelování nepozorovaných hydrologických oblastí (Egbuniwe a Todd, 1976; Vandewiele et al., 1991; Oudin et al., 2008).

Regionální analýza založená na vzdálenosti se v podstatě zabývá tématem klasifikace povodí. Pokud je možné pomocí různých klasifikačních přístupů identifikovat hydrologicky homogenní oblasti, buď spojitě nebo nespojitě, můžeme přenášet informace z dobře zmapovaných povodí do těch, které mají omezená data. Nejvhodnějším způsobem je využít geografické vzdálenosti jako základ pro hodnocení podobnosti povodí (He et al., 2011). Předpokládá se, že povodí v geograficky blízká, by měla mít podobné hydrologické charakteristiky. Tento předpoklad vychází z faktu, že blízká povodí často sdílejí podobné charakteristiky, které významně ovlivňují celkový odtok vody, jako jsou klimatické podmínky nebo typy půdy (Parajka et al., 2005; Oudin et al., 2008).

Prostorová vzdálenost

Tato metodika stojí na předpokladu, že blízká povodí vykazují podobné hydrologické chování. Argumentuje se tím, že hydrologické změny pravděpodobně postupují plynule v geografickém kontextu, a tudíž prostorová blízkost je přirozeným indikátorem podobnosti mezi povodími (Parajka et al., 2005). Nejčastějším vzorcem pro výpočet geografické vzdálenosti mezi dvojicí povodí je Euklidovská vzdálenost d (He et al., 2011).

Používané vzorce pro výpočet geografické vzdálenosti:

Minkowského vzdálenost (Wikipedia contributors, 2006):

$$D = (\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^p)^{1/p}$$

Minkowského vzdálenost je zobecněním jak Euklidovské, tak Manhattan vzdálenosti. Definuje se jako p -tá odmocnina ze součtu n -tých mocnin absolutních hodnot rozdílů souřadnic bodů, kde n je parametr, který určuje typ vzdálenosti. Pro $p=1$ dostaneme Manhattan vzdálenost, pro $p=2$ Euklidovskou vzdálenost (Thant, Aye; 2020).

Při $p = 1$ dostaneme Manhattanskou vzdálenost (Wikimedia Foundation, 2006):

$$D = \sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|$$

Manhattan vzdálenost, počítá vzdálenost, jakou by musel urazit bod, kdyby se pohyboval pouze po pravoúhlé síti cest. Je to součet absolutních hodnot rozdílů odpovídajících souřadnic bodů. Manhattan vzdálenost je vhodná pro situace, kdy je pohyb mezi body omezen na pravoúhlé směry (Thant, Aye; 2020).

Při $p = 2$ dostaneme Euklidovu vzdálenost (Wolfram MathWorld, 1999):

$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^2}$$

Euklidovská vzdálenost je nejčastěji používaným typem vzdálenosti. Jedná se o geometrickou vzdálenost ve vícedimenzionálním prostoru, která odpovídá přímé vzdálenosti mezi dvěma body (Thant, Aye; 2020).

Při $p \rightarrow \infty$ dostaneme Chebyshevovu vzdálenost (Wikimedia Foundation, 2023):

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

kde D představuje vzdálenost mezi dvěma povodími, kdy:

- x_{ik} = souřadnice těžiště pozorovaného povodí,
- x_{jk} = souřadnice těžiště nepozorovaného povodí.

V rámci metody prostorové blízkosti se zvyšuje účinnost modelu, když jsou parametry přenášeny z více blízkých (donorových) povodí namísto pouze jednoho donoru. Tento přístup bere v úvahu, že i když je geografická vzdálenost mezi povodími co nejmenší, nemusí mít stejný „nejlepší“ soubor parametrů pro modelování. Průměrování parametrů z více donorových povodí pomáhá zachovat různorodost, a to z důvodu více možných zdrojů pro získání informací. (Poissant, 2017).

Pokud se rozhodneme využít více donorů pro odhad zájmové hydrologické veličiny, především parametrů modelu, používáme metodu průměrování parametrů. Tato metoda je založena na následující rovnici (Oudin et al., 2008):

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

Kde Q je průměrný denní průtok pro den j , m je počet donorů a X_i je vektor hodnot parametrů modelu pro povodí donoru i .

Další metodou při odhadu celkového odtoku z nepozorovaného povodí je možné využít metodu průměrování výstupů, pokud máme k dispozici více vybraných dárců. Tato metoda je definována následující rovnicí (Oudin et al., 2008):

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

Kde m je počet měřených donorů povodí a X_i je vektor parametrů pro povodí donoru i .

Poněkud propracovanějším postupem, který využívá parametry ze sousedních pozorovaných povodí, je použití geostatistických metod, jako je „kriging“ a „IDW“ (Inverse Distance Weighting) k interpolaci hodnot parametrů v geografickém prostoru (např. Vandewiele a Elias, 1995; Merz a Blöschl, 2004; Parajka et al., 2005; Viviroli et al., 2009). Hlavním myšlenka tohoto modelu je, že na hodnotu jevu v neznámém místě mají větší vliv bližší známé hodnoty než hodnoty vzdálenější.

Nicméně, uvádějí se různé výsledky, například Vandewiele a Elias (1995) zjistili, že ze 75 belgických povodí lze 72 % dobře modelovat pomocí krigingu ve srovnání se 44 % při použití charakteristik sousedních povodí. Na druhou stranu Merz a Blöschl (2004), zjistili jen nepatrné snížení výkonosti modelu při použití krigingu ve srovnání s charakteristikami sousedních povodí v Rakousku. Další z přístupů, který aplikuje Archfield a Vogel (2010) je krigingový přístup, aniž by se zabývali parametry modelu. Interpolují korelace párových časových řad průtoků ve studovaném území a jako donor pro nepozorované povodí vybírají pozorovaný úsek s nejvyšší korelací. Zjistili lepší odhad průtoku ve srovnání s použitím

nejbližšího sousedního povodí. Tato práce implicitně předpokládá, že korelace časových řad průtoků souvisí s určitými fyzicko-klimatickými charakteristikami povodí.

Není nečekané, že prostorová blízkost je v různých studiích uváděna jako dobrý a v jiných naopak špatný ukazatel hydrologické podobnosti povodí.

V mnoha výzkumech se využívá přístupu prostorové blízkosti. Nicméně sousední povodí mohou být v rámci regionu hydrologicky velmi odlišné, zatímco dvě hydrologicky podobná povodí se mohou nacházet ve velkých geografických vzdálenostech (Acreman a Sinclair, 1986). Charakteristiky a reakce povodí se mohou náhle změnit, což činí prostorovou blízkost neurčitým ukazatelem podobnosti (He et al., 2011).

3.3.2 Regresní metody

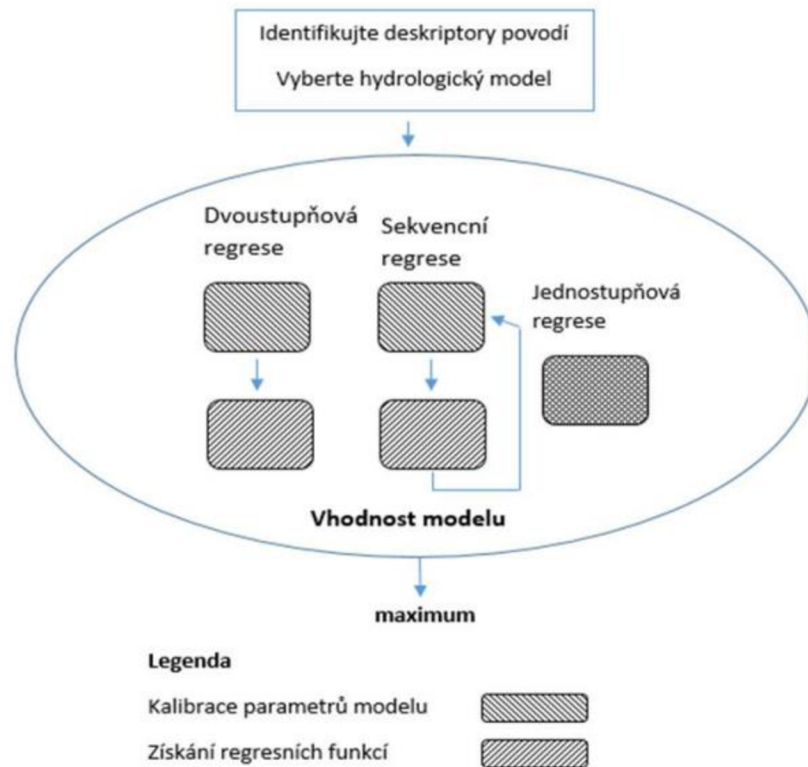
Mezi metodami regionalizace jsou regresní metody nejoblíbenější. Používají se přibližně ve dvou třetinách studií, které Razavi a Coulibaly (2012) uvádějí, přestože základní hypotézy těchto metod jsou často kritizovány. Regresní metoda spočívá v odhalení matematického vztahu mezi hydrologickou charakteristikou (například parametry modelu) a vybranými charakteristikami povodí, jak konstatují Swain a Patra (2017). Tyto identifikované vztahy jsou posléze aplikována k určení parametrů modelu pro nepozorovaná povodí, jak uvádějí Oudin et al. (2008).

Pro získání regresních rovnic je zásadní vytvořit soubor správně vybraných pozorovaných povodí s dostatečným množstvím známých nebo správně odvozených charakteristik povodí. Následně je třeba vybrat vhodný srážko-odtokový model a provést jeho kalibraci na daném souboru pozorovaných povodí, jak konstatují McIntyre et al. (2005) a Oudin et al. (2008).

He et al. (2011) uvádějí několik přístupů viz Obrázek č.1, jak efektivně využít regresního přístupu:

- dvoustupňová regrese,
- jednostupňová,
- sekvenční regrese.

Obrázek 1 - Postupy tří regionalizačních metod, které využívají regresi (He et al., 2011).



Dvoustupňová regrese

Dvoustupňová regrese je nejpoužívanější metodou regionalizace, při níž se z charakteristik povodí a optimalizovaných parametrů na pozorovaných povodích vypočítá regionální model, viz Obrázek č. 2. V druhém kroku se na základě těchto dedukovaných vztahů a fyzikálních charakteristik nepozorovaného povodí odhaduje sada parametrů pro toto nepozorované území (He et al., 2011).

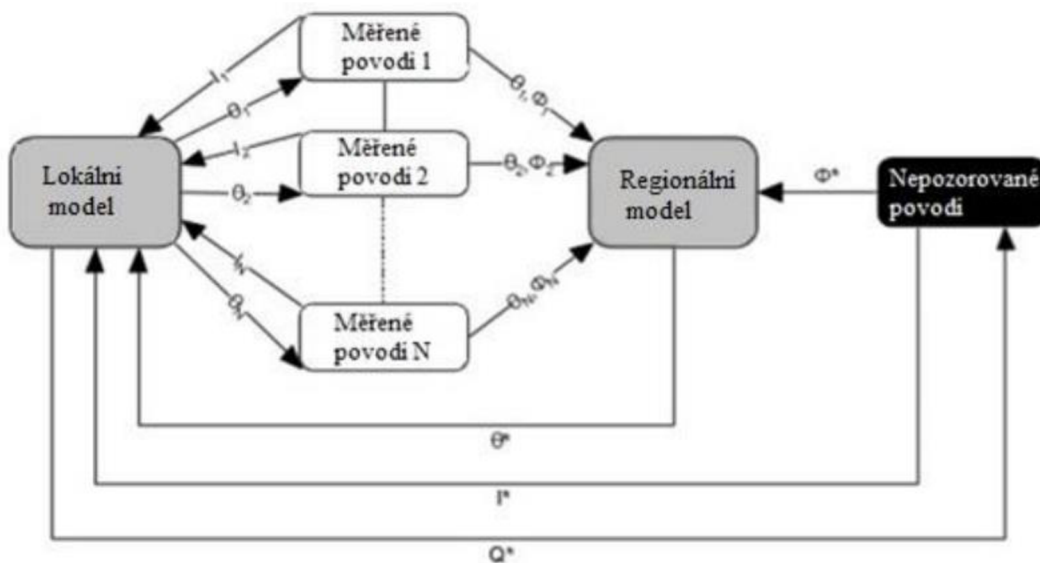
Tato metoda se zdá být účinná a jednoduchá při určování modelových parametrů v nepozorovaných povodích, ale zjištěné vztahy mezi modelovými parametry a charakteristikami povodí jsou často slabé a předpovědi v nepozorovaných povodích dosahují jen omezených úspěchů (Fernandez et al., 2000; Hundecha a Bárdossy, 2004; Kim a Kaluarachchi, 2008).

Kromě toho může být více charakteristik povodí vysoce korelováno mezi sebou nebo s nějakou jejich lineární kombinací a snižovat spolehlivost a stabilitu regresních koeficientů (Hirsch et al., 1993; Parajka et al., 2005).

Na Obrázku 2 je schématické znázornění postupu za použití dvoustupňové regionalizace, kde:

- I – matice vstupních proměnných,
- θ – sada parametrů modelu,
- Q – simulovaný průtok,
- Φ – fyzikálně-geografické a meteorologické charakteristiky povodí (Wagener, Wheater, 2006).

Obrázek 2 - Schématické znázornění postupu za použití dvoustupňové regionalizace (Wagener a Wheater, 2006)



Jednostupňová regrese

Jednostupňová regresní technika vychází z konceptu dvoustupňové regresní metody. Tato metoda spojuje dva kroky do jednoho a provádí kalibraci modelu souběžně se všemi objektivními funkcemi, proto se také označuje za simultánní regresi (He et al., 2011).

Nicméně při srovnání dvoustupňové regrese s jednostupňovou regresí nebylo zaznamenáno významné zlepšení výkonosti modelu (Nash, 1960; Fernandez et al., 2000).

Například studie Fernandez et al. (2000) prezentuje jednostupňovou metodu a provádí její testování na měsíčním modelu vodní bilance v jihovýchodní části Spojených států. Tato metoda se liší od dvoustupňového přístupu tím, že model není kalibrován nezávisle na charakteristikách povodí, ale používá objektivní funkci, která zahrnuje koeficient determinace R^2 a shodu mezi předpovídaným a pozorovaným odtokem pro každé povodí v daném časovém kroku. K optimalizaci 120 proměnných se využívá zobecněný algoritmus redukovaného gradientu. Výsledky naznačují, že regresní vztahy jsou téměř dokonalé a jsou testovány na třech dalších povodích. Překvapivě nebylo zaznamenáno žádné zlepšení v porovnání s tradičním dvoustupňový přístupem. Ztráta výkonnosti modelu při aplikaci na validační povodí je téměř identická u obou přístupů. Z těchto výsledků vyplývá, že dvoustupňová regresní analýza není schopna odhalit základní fyzikální zákonitosti a je zapotřebí formulovat základní vztahy mezi charakteristikami povodí a modelovými parametry fyzikálně správně pro pokrok v regionální studii.

Sekvenční analýza

Sekvenční regrese je navržena pro vyřešení konkrétní výzvy spojené s obtížnou identifikací parametrů modelu. Metoda vlastně modifikuje kalibrační postup. Místo nastavení všech parametrů modelu najednou se přistupuje k postupné kalibraci od nejnázez identifikovatelného parametru směrem k tomu nejtěžšímu. Při každém kalibračním kroku mohou být použity různé objektivní metriky, aby se zohlednily specifické charakteristiky hydrologické odezvy, které jsou obvykle spojeny s konkrétním parametrem. Tento přístup je detailně popsán jako více krokové automatické kalibrační schéma v práci Hogue et al. (2000). Pořadí parametrů, které mají být kalibrovány, je často založeno na hydrologickém hodnocení (Calver et al., 2005).

Výhodou sekvenční regrese je, že zlepšuje identifikovatelnost parametrů modelu. Studie provedená Wagenerem a Wheaterem (2006) ukazuje, že každé kolo kalibrace přináší zlepšení identifikace parametrů, avšak toto zlepšení neznamená posílení vztahu mezi modelovým parametrem a charakteristikou povodí. V obecnosti je uváděno, že sekvenční regrese dosahuje lepších výsledků než dvoustupňová regrese (např. Lamb et al., 2000; Lamb a Kay, 2002, 2004; Calver et al., 2005). Nicméně problém může být předpoklad lineární korelace mezi parametry a charakteristikami povodí, což se

nemusí vždy ukázat jako správné tvrzení, jak dokumentuje výzkum provedený Heuvelmansem et al. (2006).

3.3.3 Metoda fyzikální podobnosti

Povodí je neoddělitelným spojením krajiny, geologie, klimatu a lidských aktivit, které jsou obecně považovány za fyziografické a klimatické charakteristiky. V praxi sběr a analýza charakteristik povodí vyžaduje různé metody přizpůsobení měřitek, protože povodí vykazuje obrovskou míru heterogenity a variability jak v prostoru, tak v čase (Blösch a Sivapalan, 1995). Koncept podobnosti je zde zohledněn při porovnání charakteristik povodí, které mají přímou souvislost s hydrologickým chováním, což umožňuje provádět hydrologickou regionalizaci smysluplným způsobem (Göttschalk, 1985).

Metoda fyzikální podobnosti se zaměřuje na předání hydrologických informací z povodí, která jsou pozorována, na ta, která nejsou pozorována, ale podobají se jim v určitých charakteristikách. Tento koncept není nový a vychází z předešlých studií klasifikace povodí (Acreman a Sinclair, 1986; Nathan a McMahon, 1990), které naznačují, že povodí s podobnými charakteristikami se pravděpodobně budou chovat podobně. Pokud je dárcovské povodí dostatečně podobné cílovému nepozorovanému povodí, lze mezi nimi přenášet parametrické sady. Výhodou přenosu celé parametrické sady z dárcovského povodí na cílové povodí je to, že se zachovává její integrita (He et al., 2011).

Postup metodiky zahrnuje tři hlavní kroky: shromáždění charakteristik povodí, volbu vhodného modelu a výběr metody pro odhad hydrologických charakteristik na nepozorovaném povodí (Oudin et al., 2008; Razavi a Coulibaly, 2012).

3.3.4 Charakteristika povodí

Charakteristika povodí znamená vlastnost daného povodí, kterou lze přesně a jasně měřit, ideálně pomocí numerických hodnot. Tyto charakteristiky povodí, používané pro účely regionalizace, by měly efektivně popisovat faktory ovlivňující hydrologickou odezvu povodí (Ruda, 2014).

Výběr správných charakteristik povodí může být určen na základě odborných znalostí. V takových případech jsou specifické charakteristiky vybírány podle konkrétních potřeb. Jinou možností je experimentální výběr charakteristik, při němž jsou postupně zkoušeny různé kombinace charakteristik povodí s cílem najít optimální sadu, která nejlépe reflektuje hydrologické chování povodí, jak je popsáno ve studii Oudin et al. (2008).

3.3.5 Fyzicko-geografické charakteristiky povodí

Fyzicko-geografické charakteristiky povodí mají klíčový vliv na množství a rozložení odtoku v čase a prostoru, a ovlivňují také vývoj různých hydrologických jevů spojených s odtokem a jeho doprovodnými aspekty. Tato část se zaměřuje především na umístění povodí, jeho geomorfologické charakteristiky, klimatické podmínky, charakter půdy a vegetace (Ruda A., 2000).

Geomorfologické charakteristiky

Geomorfologické charakteristiky se zabývají především morfologií povodí. Mezi geomorfologické charakteristiky povodí patří plocha povodí, délka vodního toku, délka povodí, tvar povodí, hustota říční sítě, průměrný sklon povrchu povodí, sklon vodního toku a průměrná nadmořská výška vodního toku (Ruda, 2014). Tyto charakteristiky byly využity například ve studiích Parajka et al. (2005).

Geologické poměry

Geologické charakteristiky povodí, zejména typ matečné horniny, hrají klíčovou roli při ovlivňování procesu odtoku vody. Tvrdé krystalické horniny, jako jsou žuly a andezity, v původním stavu brání pronikání vody a zrychlují povrchový odtok. Avšak s postupným zvětráváním těchto hornin vzniká hrubozrnný povrch, který usnadňuje infiltraci vody. Podobně dobrou propustnost pro vodu také vykazují porézní pískovce, písky, šterky a hluboce zvětralé nebo tektonicky narušené tvrdé horniny (Ruda, 2014). Geologické charakteristiky byly studovány například v práci Yokoo et al. (2001).

Klimatické poměry

Klimatické poměry poskytují hlavně informace o množství, distribuci a chování různých klimatických faktorů, jako jsou srážky, teplota a relativní vlhkost. Kromě těchto faktorů hraje důležitou roli také výpar a výparnost. Výparnost, která se zjišťuje pomocí map

výparnosti nebo výparu z volné hladiny, nebo odvozením z grafu vztahu mezi výparem z vodní hladiny a nadmořskou výškou povodí, ukazuje maximální možnou hodnotu výparu při dostatečné vlhkosti půdy (Ruda, 2014). Využití našly například ve studiích Parajka et al. (2005).

Půdní poměry

Podobný význam jako geologické poměry mají i půdní poměry, které zejména s ohledem na zrnitost, strukturu, obsah humusu, minerálních látek atd. ovlivňují schopnost vsakování vody do podložních vrstev zvětralin a hornin (Ruda, 2014). Půdní poměry byly využity ve studii Merz a Blöschl (2004).

Vegetační kryt

Podle Rudy (2014) má rostlinný pokryv významný vliv na tok vody. Má vliv, jak na povrchový odtok, tak i schopnost půdy absorbující vodu. Lesní oblasti hrají pozitivní úlohu v zadržování vody v krajině, což usnadňuje regulaci toku. Lesní vegetace může pozitivně ovlivnit tok vody v krajině zvýšením retence vody (zachycování srážek na povrchu listů, větví a kmenech). Stromové kořeny přispívají ke zlepšení absorpce vody v krajině tím, že vytvářejí prohlubně, které zlepšují povrchovou strukturu. Vytváření lesního humusu z opadaného listí zvyšuje schopnost půdy absorbovat vodu. Tyto kořeny, spolu s organickým materiálem v půdě, vegetací pod stromy a větvemi na zemi, pomáhají zvýšit zadržení vody na povrchu tím, že snižují rychlost povrchového odtoku. To vede ke zvýšení vlhkosti vzduchu při nižších teplotách a vyvážení vyššího odpařování nižším výparem a menší transpirací rostlin v nižších vrstvách vegetace. Rovněž prodlužují dobu, po kterou může docházet k infiltraci – snižují se ztráty vyzařovaného dlouhovlnného záření (tepla) v zimě a v noci. Lesní podloží a rozkládající se humusová vrstva přispívají k zadržení tepla a zabránění hlubšímu promrznání, což pomáhá rozmrazování půdy pod sněhovou pokrývkou, která díky zastínění stromy vydrží výrazně déle. (Ruda, 2014). Zhang a Chiew (2009) využili vegetační kryt jako součást své studie.

3.3.6 Výběr algoritmu pro vyhledávání nejpodobnějších povodí

Při výběru nejpodobnějších povodí se využívají různé vyhledávací algoritmy, které se řadí od jednoduchých (například index podobnosti) až po relativně složité výpočetní postupy (například metoda shlukové analýzy dat).

Index podobnosti

V případě fyzické podobnosti se vzdálenost mezi povodími počítá pomocí indexu podobnosti (Φ), který definovali Burn a Boorman (1993):

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

Zde pro absolutní podobnost mezi povodími platí $\Phi = 0$ – index podobnosti definovaný jako součet absolutních rozdílů mezi k-vybranými fyzikálními charakteristikami pozorovaného povodí (X^G) a zájmového nepozorovaného povodí (X^U), vydělený normalizovaným rozsahem charakteristik (ΔX).

Shluková analýza

Metoda je založena na zkoumání podobnosti vícerozměrných prvků a jejich seskupování do kategorií neboli shluků, na základě určené podobnosti. Podle metody seskupování se rozděluje na hierarchické a nehierarchické (Meloun a Mílitký 2002). U této metody lze sledovat jak podobnost jednotlivých prvků, tak i podobnost faktorů. Výsledky lze přehledně znázornit graficky pomocí tzv. dendrogramu, neboli stromu kategorií (Bartůňková, 2010).

Dendrogram proměnných odhaluje seskupení faktorů, které mají vysokou korelaci a jsou tudíž vzájemně substituovatelné (Meloun a Mílitký, 2002). Dendrogram není jenom jednoduchým seznamem seskupení, ale ilustruje hierarchickou strukturu s několika úrovněmi, kde seskupení na jedné úrovni jsou spojena s těmi na jiné úrovni.

Mezi základními přístupy nalezneme například techniku nejbližšího souseda. V tomto přístupu je výsledný shluk vytvořen spojením dvou shluků na základě vzdálenosti dvou nejbližších objektů z těchto shluků. Dalším způsobem je využití techniky nejvzdálenějšího souseda, která se vyznačuje opačným principem než technika nejbližšího souseda.

Další z metod pro ověření výsledku dané hierarchické metody shlukování můžeme využít metodu k-průměrů. Jedná se o postup, který není hierarchický, a používá následující algoritmus:

Prvním krokem je určení počátečního rozdělení n objektů do k shluků. Toto rozdělení obvykle zvolíme náhodně. Následně identifikujeme výběrové centroidy v každém z aktuálních shluků. Výběrový centroid shluku je hypotetický objekt, jehož vektor pozorování odpovídá vektoru průměrů všech objektů v daném shluku.

Poté spočítáme vzdálenosti všech objektů od výběrových centroidů a přiřadíme každý objekt do shluku, jehož centroidu je nejbližší. Pokud nedojde k žádné změně v přiřazení, pokračujeme ke konečnému určení shluků. V opačném případě se vrátíme k druhému kroku. Analýza rozptylu (ANOVA) nám pomůže posoudit vliv jednotlivých proměnných na zařazení objektů do shluků (Huang, 1998).

Posledním přístup představuje Wardova metoda, která se opírá o analýzu rozptylu. Její efektivita je významná, avšak přináší především menší shluky (Lukasová a Šarmanová, 1985; Virrantaus, 2016).

Metoda RAS

Druhou metodou, která se používá k vyhledání povodí s podobnými charakteristikami je metoda RAS (Rank-accumulated similarity meth).

Jde zaprvé o vypočtení absolutních hodnot odchylek mezi charakteristikou nepozorovaného povodí a odpovídající charakteristikou všech ostatních pozorovaných povodí. Zadruhé přiřadíme pořadí jednotlivým povodím podle velikosti odchylky, kdy povodí s nejmenší odchylkou má pořadí 1, poté je pořadí 2 pro povodí s druhou nejmenší odchylkou a tak dále. Pokud je pro regionalizaci zapojeno více charakteristik (donorů), opakuje se 1 a 2 část tohoto postupu pro každou z charakteristik. Posledním krokem je výpočet konečného pořadí každé charakteristiky pozorované povodí jako aritmetický průměr jednotlivých povodí. Každá charakteristika pozorovaného povodí má stejnou váhu v systému hodnocení (Oudin et al., 2008).

Metoda ROI

Tento postup, popsáný Burnem (1990), pracuje s předpokladem vytváření oblastí kolem nepozorovaných povodí. Jinými slovy, každé nepozorované povodí je centrem vlastní oblasti (skupiny), do které postupně zařazujeme pozorovaná povodí na základě vybraného měřítka jejich podobnosti. Po zařazení potenciálně podobných pozorovaných povodí do

jednotlivých regionů je důležité ověřit homogenitu uvnitř dané oblasti, a to pomocí zvoleného statistického testu. Tímto testem se zjistí, jaká povodí jsou odlišná a následně je můžeme z regionu vyřadit.

Hlavním rozdílem mezi metodou ROI a tradiční shlukovou analýzou je skutečnost, že v metodě ROI může jedno pozorované povodí být přiřazeno do více regionů zároveň a, proto je brán jako lepší a univerzálnější postup. (Burn, 1990).

3.3.7 Výběr metody odhadu hydrologické charakteristiky

McIntyre et al. (2005) přistupují k odhadu časových řad průtoků pomocí souborového přístupu, který zahrnuje průměrování parametrů a průměrování výstupů několika pozorovaných povodí. Hodnoty získané z jednotlivých pozorovaných povodí pro každý vybraný model jsou využity jako apriorní a posteriorní pravděpodobnosti, podobně jako v rámci generalizovaného pravděpodobnostního odhadu nejistoty (GLUE) (Beven a Binley, 1992).

Metoda průměrování výstupu funguje tak, že simulovaný odtok z nepozorovaného povodí je spočítán jako vážený průměr odtoků, který je založen na sadách parametrů, které jsou vybrány od donorů povodí, a vstupních časových řad pro nepozorované povodí (jako jsou teplota a srážky). Průměr může být buď aritmetický nebo vážený v závislosti na konkrétní situaci (McIntyre et al., 2005).

Tento přístup se jeví nadějný, jelikož redukuje nebo minimalizuje dopad nepřesných či špatně přizpůsobených modelů (například kvůli nedůvěryhodným vstupním datům nebo struktuře modelu) a zároveň selektuje pozorovaná povodí tak, aby nedosahovala fyziograficko-klimatických charakteristik, které se výrazně liší od cílových povodí (He et al., 2011).

4 Vyhodnocení a porovnání efektivity regionalizačních metod

4.1 Studie zvolené pro porovnání regionalizačních metod

V této části práce jsou srovnávány výsledky různých metod regionalizace na základě zvolených výzkumných prací, které jsou zkráceně popsány v Tabulce 2. a dále rozepsány v následujících kapitolách.

Tabulka 2 – Jednotlivé regionalizační metody (na základě studií)

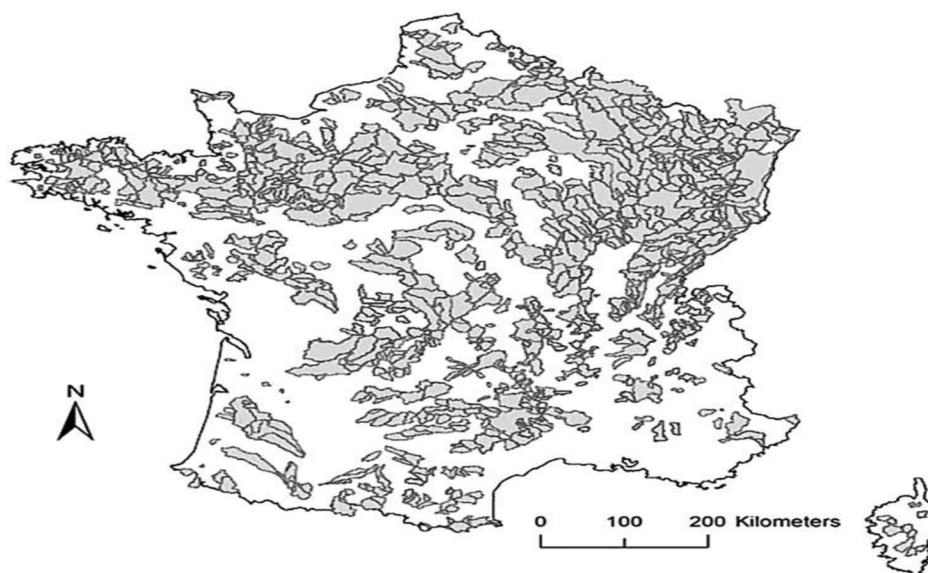
Studie	Lokace souboru povodí	Počet povodí v souboru	Model	Regrese	Prostorová blízkost	Fyzikální podobnost
Oudin et al. (2008)	Francie	913	GR4J, TOPMO	ano	ano	ano
Zhang a Chiew (2009)	Jihovýchodní Austrálie	210	Xinanjiang, SIMHYD	ne	ano	ano
Poissant (2017)	Kanada (Québec)	266	GR4J	ano	ano	ano
Swain a Patra (2017)	Jižní a východní Indie	32	SWAT	ano	ano	ano
Parajka et al. (2005)	Rakousko	230	KBV	ano	ano	ano

Oudin et al. (2008) ve své studii porovnávali regionalizační přístup založený na prostorové blízkosti povodí s regresním přístupem a přístupem fyzikální podobnosti. Analýza byla provedena na souboru 913 povodí situovaných ve Francii (viz Obrázek 3).

Ve studii byly použity dva celistvé konceptuální modely: GR4J se čtyřmi kalibrovanými parametry (Perrin et al., 2003) a TOMPO se šesti kalibrovanými parametry, který vychází z TOPMODELU (Beven a Kirkby, 1979). K hodnocení simulační účinnosti vybraných modelů v kalibrační, validační i regionalizační fázi bylo použito Nash-Sutcliffeovo kritérium (Nash a Sutcliffe, 1970). Měřitkem podobnosti, res. blízkosti, povodí byla v přístupu prostorové blízkosti Euklidovská vzdálenost vypočtená mezi souřadnicemi těžišť povodí. V regresním přístupu a v přístupu fyzikální podobnosti povodí bylo testováno 6 charakteristik povodí: plocha povodí (A_c), sklon povodí (S_c), střední nadmořská výška povodí (Z_c), hustota říční sítě (d_c), relativní zastoupení lesních porostů na povodí (f_c) a index aridity (E/R_{mm}).

Vyhledávání podobných povodí v přístupu fyzikální podobnosti bylo provedeno metodou RAS, kdy byly testovány všechny kombinace charakteristik metodou pokus-omyl. K odhadu simulovaného odtoku na nepozorovaných povodích byly v regresním přístupu použity parametrické sady odvozené na základě získaných regresních vztahů. Odhady simulovaného odtoku byly v případě přístupu prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti založeny na metodách průměrování parametrů a průměrování výstupů.

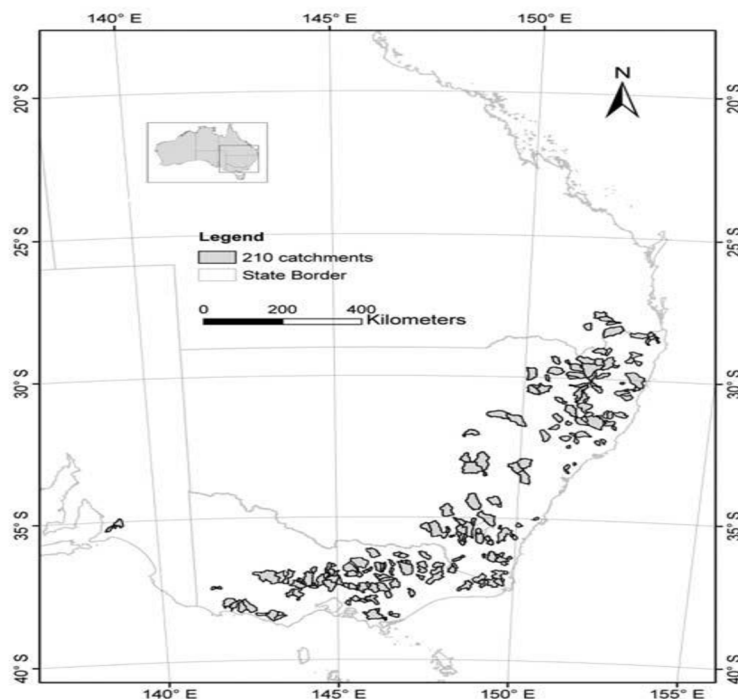
Obrázek 3 – Poloha 913 povodí (Oudin et al., 2008)



Zhang a Chiew (2009) ve své studii porovnávali regionalizační přístup založený na prostorové blízkosti s přístupem fyzikální podobnosti a integrované podobnosti. Analýza byla provedena na 210 povodích v jihovýchodní Austrálii (viz Obrázek 4), které nejsou příliš ovlivněny antropogenními vlivy. Ve studii byli použity dva celistvé konceptuální modely. Xinanjiang se 14 kalibrovanými parametry a SIMHYD. Měřítkem podobnosti, resp. blízkosti, povodí byla v přístupu prostorové blízkosti Euklidovská vzdálenost vypočtená mezi souřadnicemi těžišť povodí. Ve studii bylo testováno 8 charakteristik povodí: plocha povodí, index aridity (ET_p/P), průměrná nadmořská výška povodí, průměrný sklon povodí ve stupních, délka hlavního toku na povodí, využitelná vodní kapacita, vegetační kryt a hloubka půdy (Zhang a Chiew, 2009). K hodnocení simulační účinnosti vybraných modelů v kalibrační, validační i regionalizační fázi bylo použito Nash-Sutcliffeovo kritérium (Nash a Sutcliffe, 1970).

Vyhledávání podobných povodí v přístupu fyzikální podobnosti bylo provedeno metodou RAS, kdy byly testovány všechny kombinace charakteristik metodou pokus-omyl.

Obrázek 4 – Poloha 210 povodí (Zhang, Chiew; 2009)

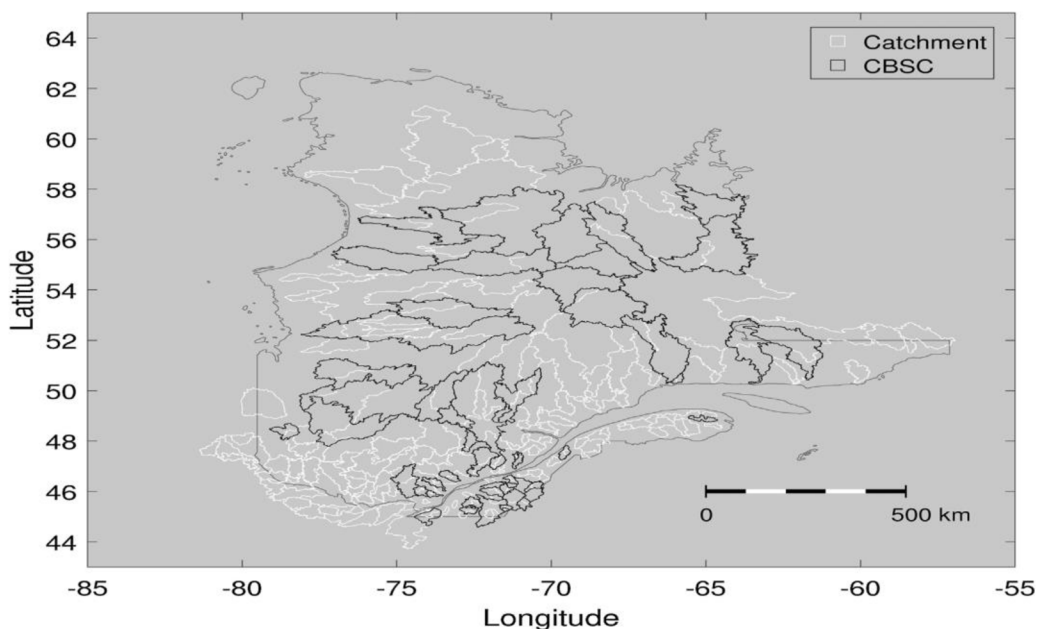


Poissant (2017), ve své studii porovnával regionalizační přístup založený na prostorové blízkosti povodí s lineárním vícenásobným regresním přístupem a přístupem fyzikální

podobnosti. Analýza byla provedena na souboru 266 povodí situovaných v provincii Québec v Kanadě (viz Obrázek 5). Ve studii byl použit konceptuální modely GR4J (Perrin et al., 2003) se čtyřmi kalibrovanými parametry rozšířený o modul CemaNeige (Valéry, 2010) se dvěma kalibrovanými parametry. Měřítkem podobnosti, res. blízkosti, povodí byla v přístupu prostorové blízkosti Euklidovská vzdálenost vypočtená mezi souřadnicemi těžišť povodí. K hodnocení simulační účinnosti vybraných modelů v kalibrační, validační i regionalizační fázi bylo použito Nash-Sutcliffeovo kritérium (Nash a Sutcliffe, 1970). Ve studii byly testovány 4 charakteristiky povodí: nadmořská výška povodí, délka hlavního toku na povodí, zeměpisná šířka povodí a sklon povodí.

Vyhledávání podobných povodí v přístupu fyzikální podobnosti bylo provedeno metodou indexu podobnosti (Burn a Boorman, 1993). K odhadu simulovaného odtoku na nepozorovaných povodích bylo použito vícenásobného lineárního regresního přístupu (Wagner a Wheeler, 2006). Odhady simulovaného odtoku byly v případě přístupu prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti založeny na metodách průměrování parametrů a průměrování výstupů.

Obrázek 5 – Poloha 266 povodí (Poissant, 2017)

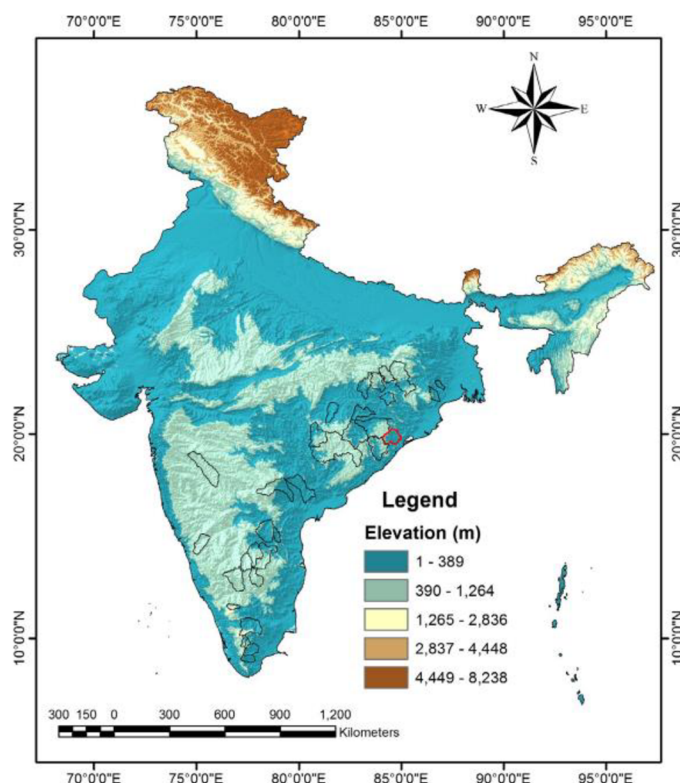


Swain a Patra (2017) ve své studii porovnávali regionalizační přístup založený na prostorové blízkosti povodí s regresním přístupem a přístupem fyzikální podobnosti. Analýza byla provedena na souboru 32 povodí situovaných v jižní a východní Indii (viz Obrázek 6).

Ve studii byl použit celistvý konceptuální model SWAT s dvaceti pěti kalibrovanými parametry (Swain a Patra, 2017). K hodnocení simulační účinnosti vybraných modelů v kalibrační, validační i regionalizační fázi bylo použito Nash-Sutcliffeovo kritérium (Nash a Sutcliffe, 1970). Měřítkem podobnosti, res. blízkosti, povodí byla v přístupu použita metoda IDW a kriging. V regresním přístupu a v přístupu fyzikální podobnosti povodí bylo testováno 10 charakteristik povodí: zeměpisná šířka povodí, zeměpisná délka povodí, plocha povodí, střední nadmořská výška povodí, střední sklon povodí, průměrný měsíční odtok, hustota říční sítě, průměrný roční úhrn srážek, hloubka půdy a podíl lesních porostů na povodí.

Vyhledávání podobných povodí v přístupu fyzikální podobnosti bylo provedeno metodou přenosu charakteristiky z nejpodobnějšího povodí. K odhadu simulovaného odtoku na nepozorovaných povodích byly v regresním přístupu použity parametrické sady odvozené na základě získaných lineárních regresních vztahů.

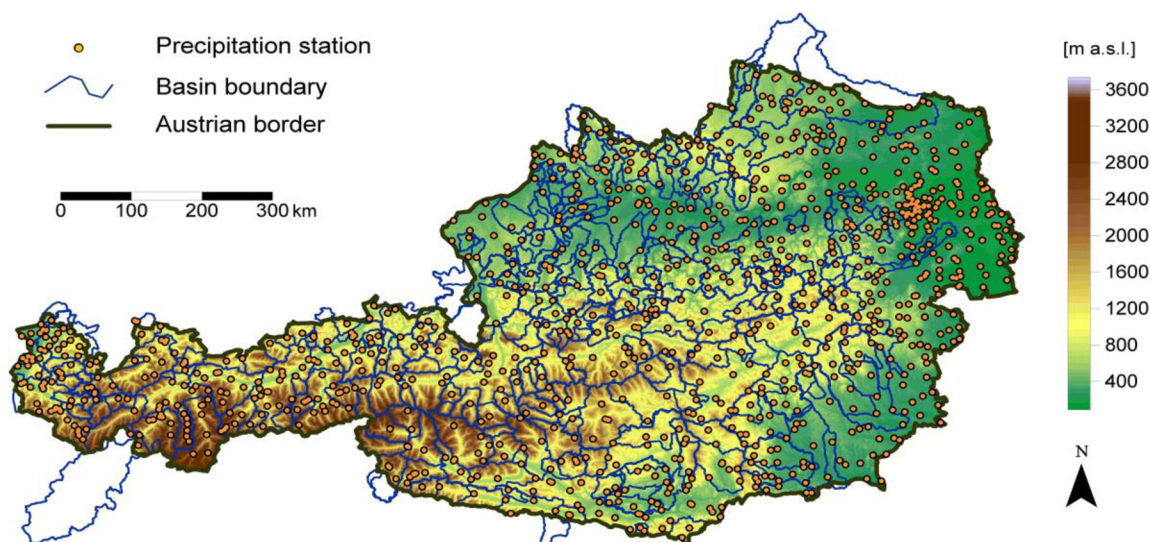
Obrázek 6 – Poloha 32 povodí (Swain, Patra; 2017)



Parajka et al. (2005) ve své studii porovnával regionalizační přístup založený na prostorové blízkosti povodí s regresním přístupem a přístupem fyzikální podobnosti. Analýza byla provedena na souboru 320 povodí situovaných v Rakousku (viz Obrázek 9). Ve studii byl použit celistvý konceptuální model HBV s 11 kalibrovanými parametry (Bergstrom, 1976). K hodnocení simulační účinnosti vybraných modelů v kalibrační, validační i regionalizační fázi bylo použito Nash-Sutcliffeovo kritérium (Nash a Sutcliffe, 1970). Měřítkem podobnosti, res. blízkosti, povodí byl v přístupu prostorové blízkosti použit single donor a multiple donor založený na váženém průměru.

Vyhledávání podobných povodí v přístupu fyzikální podobnosti bylo provedeno metodou indexu podobnosti. Pomocí regrese se odhadují parametry modelu, které jsou pak využity při simulaci odtoku pro dané nepozorované povodí. Odhady simulovaného odtoku byly v případě přístupu prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti založeny na metodách průměrování parametrů a průměrování výstupů.

Obrázek 7 – Poloha 320 povodí (Parajka et al., 2005)



4.2 Porovnání výsledků na základě vybraných studií

Porovnání výsledků na základě vybraných studií je zaměřeno na simulační účinnosti v kalibrační fázi a simulační účinnosti jednotlivých regionalizačních přístupů znázorněných pomocí Nash-Sutcliffova koeficientu.

V Tabulce 3 u studie Oudin et al. (2008) jsou zobrazeny dva výsledky v případě prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti, kdy první číslo představuje medián výsledků založených na průměrování výstupů a druhé číslo medián výsledků založených na průměrování parametrů.

Tabulka 3 - Přehled výsledků vybraných studií pomocí Nash-Sutcliffova koeficientu
(na základě vybraných studií)

Studie	Kalibrace	Model	Regrese	Prostorová blízkost	Fyzikální podobnost
Oudin et al. (2008)	0,82	GR4J	0,68	0,74/0,73	0,71/0,71
	0,78	TOPMO	0,55	0,71/0,65	0,69/0,60
Zhang a Chiew (2009)	0,78	Xinanjiang	x	0,51	0,5
	0,79	SIMHYD	x	0,48	0,47
Poissant (2017)	0,7	GR4J	0,67	0,6	0,6
Swain a Patra (2017)	0,7	SWAT	0,54	0,58	0,52
Parajka et al. (2005)	0,72	HBV	0,62	0,66	0,65

Ve studii Parajka et al. (2005) bylo používáno několik různých metod jak regresních, tak metod prostorové blízkosti a také fyzikální podobnosti. Z tohoto důvodu jsou výsledné hodnoty v Tabulce 4 vypočítány průměrem z každé metody, tzn. průměr všech regresních metod je 0,62, průměr metody prostorové blízkosti je 0,66 a průměr fyzikální podobnosti je 0,65.

Na základě hodnot z Tabulky 3 je v Tabulce 4 vypočítán pokles simulační účinnosti při přechodu z kalibrace do fáze regionalizace.

Pro výpočet poklesu simulační účinnosti při přechodu z kalibrace do regionalizace byl použit následující vzorec (Holeček, 2020):

$$Rel.pokles = 100 - 100 * \left(\frac{NSE_{reg}}{NSE_{kal}} \right)$$

ve kterém:

- NSE_{reg} = medián NSE regionalizační metody,
- NSE_{kal} = medián NSE z kalibrační fáze.

Tabulka 4 - Přehled poklesu simulační účinnosti při přechodu z kalibrace do regionalizace
(na základě vybraných studií)

Studie	Kalibrace	Model	Regrese	Prostorová blízkost	Fyzikální podobnost
Oudin et al. (2008)	0,82	GR4J	17,1 %	9,8 % / 11 %	13,4 % / 13,4 %
	0,78	TOPMO	29,5 %	9 % / 16,7 %	11,5 % / 23,1 %
Zhang a Chiew (2009)	0,78	Xinanjiang	x	34,6 %	35,9 %
	0,79	SIMHYD	x	39,2 %	40,5 %
Poissant (2017)	0,7	GR4J	4,3 %	14,3 %	14,3 %
Swain a Patra (2017)	0,7	SWAT	22,9 %	17,1 %	25,7 %
Parajka et al. (2005)	0,72	HBV	19,3 %	8,3 %	9,7 %

Z Tabulky 4 lze vidět, že ve studii Oudin et al. (2008) průměrování výstupů (první číslo) vede k lepším výsledkům než průměrování parametrů. Z této studie je patrné, že optimálních výsledků může být dosaženo, jestliže studie bere v potaz kombinaci geomorfologické a klimatické charakteristiky doplněné o informace jako je: průměrný sklon povodí, medián nadmořské výšky, relativní zastoupení lesních porostů na povodí atd.

Ze studie Zhang a Chiew (2009) je zřejmé, že metoda prostorové blízkosti má lepší výsledky ve srovnání s metodou fyzikální podobnosti. Lepších výsledků, zde dosahuje díky modelování za použití povodí s více donory oproti povodí s jedním donorem.

Ze studie Poissant (2017), vychází jako nejlepší metoda regrese, neboť vykazuje nejmenší pokles (4,3 %) oproti metodám prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti, které zaznamenaly vyšší pokles (14,3 %) a mezi sebou stejné % poklesu účinnosti.

Ve Studii Swain a Patra (2017) je vidět, že prostorová blízkost má nejmenší pokles účinnosti, zatímco fyzikální podobnost a regrese měly vyšší poklesy.

Z poslední zkoumané studie Parajka et al. (2005) vyplývá, že metoda prostorové blízkosti vykazuje nejnižší pokles účinnosti, následuje metoda fyzikální podobnosti a regrese.

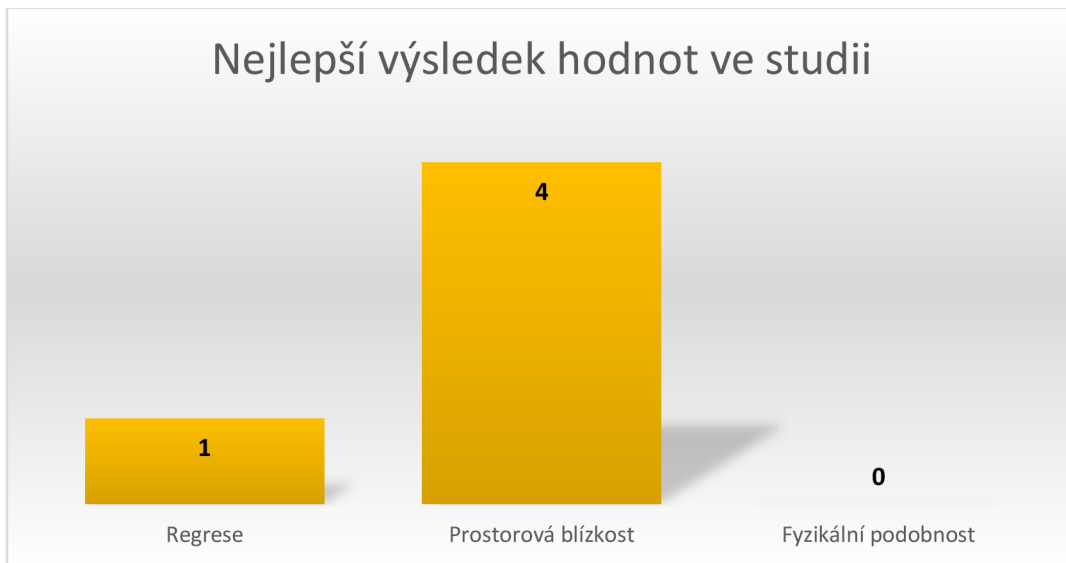
Výsledky výše zmiňovaných studií znázorňují, že existuje jistá souvislost mezi simulační účinností v regionalizační fázi a počtem povodí. Nižší pokles relativní simulační účinnosti je především u studií, které zohledňují vyšší počet povodí, např. studie Oudin et al. (2008). Vyšší či kolísavější pokles je především ve studiích, které zahrnují menší počet zkoumaných povodí, např. Swain a Patra (2017).

Z těchto zjištění vyplývá, že efektivita různých přístupů k regionalizaci se různí v závislosti na jedinečných vlastnostech povodí a na typu aplikovaného modelu. Je důležité podotknout, že neexistuje jedna metoda, která by byla nejlepší ve všech případech, a výběr vhodného přístupu by měl vycházet z konkrétních požadavků a vlastností daného povodí.

4.3 Nejlepší výsledek regionalizační metody ve studii

Nejlepších výsledků ze všech studií, dosáhla metoda prostorové blízkosti (viz Graf 1). Regionalizační metoda regrese dosáhla nejlepšího výsledku pouze jednou, ale na druhou stranu, byla použita jen ve čtyřech studiích, zatím co prostorová blízkost a fyzikální podobnost měla zastoupení ve všech pěti studiích. Nejhuř dopadla metoda fyzikální podobnosti, která neuspěla ani v jedné ze studií.

Graf 1 - Přehled nejlepších výsledků hodnot ve studiích.



5 Diskuze

Diskuze této bakalářské práce se bude zabývat výsledky, které byly zjištěny na základě průzkumu výše zmíněných studií, které jsou zobrazeny v Tabulkách 3,4.

Výsledky studií jsou ovlivněny tím, zda je použit přenos parametrů z jediného donorového povodí či z více donorů při modelování průtoku v nepozorovaných povodích. Přístup založený na využití jediného donorového povodí obvykle nedosahuje tak dobrých výsledků, jako metody využívající data od více donorů. Tuto skutečnost potvrzují studie od Oudina et al. (2008) a Zhang a Chiew (2009), které naznačují, že spoléhání na jedno geograficky nejbližší donorové povodí může být problematické. Hlavním problémem je závislost na hydrologické podobnosti s tímto jediným vybraným povodím. V kontrastu k tomu, přístupy zahrnující data z více donorových povodí kombinují informace o hydrologickém chování z několika zdrojů, což vede ke zvýšení přesnosti a účinnosti modelování. Metody s více donory tak nabízejí robustnější základ pro předpovědi a analýzy, jelikož integrují širší spektrum hydrologických charakteristik.

Všechny studie, které využívají prostorovou blízkost povodí jako měřítko hydrologické podobnosti, by měly vykazovat podobné hydrologické vlastnosti, z toho důvodu by využití dat z jednoho nejbližšího povodí mělo být účinnější než použití dat z více povodí, ale výsledky studií ukázaly opak. Tento rozpor může být způsoben tím, že síť povodí není dostatečně hustá, což znamená, že i nejbližší povodí mohou být od cílových povodí vzdálená, což způsobuje výrazné rozdíly v jejich vlastnostech, jako jsou klimatické podmínky. Výrazné rozdíly vlastností můžou pak zásadně ovlivnit určování množství a režimu odtoku z povodí. Také je možné, že povodí ležící geograficky velmi blízko u sebe (sousední), mohou vykazovat značné rozdíly v hydrologickém chování. Tyto odlišnosti v hydrologickém chování mezi blízkými povodími mohou být důsledkem různých charakteristik těchto povodí, které jsou zásadní pro určení dynamiky odtoku z nich. Přestože povodí nacházející se v bezprostřední blízkosti mohou sdílet určité klíčové klimatické faktory a další související charakteristiky, jako je vegetační typ nebo určité typy půd, rozdíly v morfologii, jako například ve sklonu terénu povodí, rozloze povodí a dalších aspektech, mohou vést k odlišnostem v hydrologickém chování těchto povodí.

Vybrané studie ukázaly, že celkově největší pokles zaznamenal přístup regrese. Jedním z dobře známých omezení regresního přístupu je, že parametry modelu nemusí být dobře definovány (kvůli interakcím mezi parametry), mohou existovat různé sady parametrů, které dávají prakticky stejný výkon modelu, a proto budou získané regresní rovnice pravděpodobně slabé (Oudin et al., 2008). Dalším důvodem je skutečnost, že se zřídka bere v úvahu vzájemná korelace mezi parametry a fakt, že kalibrace modelu může vést ke značně rozdílným souborům hodnot parametrů, které poskytují podobnou výkonnost modelu (problém ekvifinality), (Beven a Freer, 2001).

Rozdílnost výsledků mezi různými studii může být částečně vysvětlena použitím různých hydrologických modelů, jako jsou GR4J, TOPMO, Xinanjiang, SIMHYD, SWAT a HBV. Každý z těchto modelů přináší do procesu své specifické charakteristiky a metody pro modelování hydrologických procesů. Tato diverzita v přístupu k simulaci je klíčová pro pochopení, proč i studie zkoumající podobné jevy mohou dospět k odlišným závěrům. Tento fenomén dokládá, jak variabilita v použitých modelech přispívá k šíři výsledků, což je zásadní pro interpretaci a porovnávání hydrologických studií.

6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala hodnocením efektivity tří základních metod regionalizace pro predikci odtoku v nepozorovaných povodích: metody prostorové blízkosti, fyzikální podobnosti a regresních metod. Výsledky analýzy, které jsou založené na srovnání pěti různých studií a aplikaci těchto metod na reálná data, poskytují vhled do významu a omezení každé z uvažovaných metod. Vybranými studii byly Oudin et al. (2008), Zhang a Chiew (2009), Poissant (2017), Swain a Patra (2017) a jako poslední Parajka et al. (2005).

Na výše zmíněných studiích byla provedena analýza, která došla k výsledkům a to těm, že relativní pokles simulační účinnosti v mediánu při přechodu z kalibrační fáze do fáze regionalizační je nejmenší u přístupu prostorové blízkosti (14,3 %). O něco vyšší pokles v mediánu zaznamenal přístup fyzikální podobnosti (17,3 %). Naopak nejvyšší pokles zaznamenal v mediánu přístup regrese (19,3 %).

Výsledky uvedené výše odhalují rozdíly v účinnosti různých přístupů k regionalizaci, což poukazuje na to, že neexistuje jeden přístup, který by byl vhodný pro všechny situace. Je zřejmé, že výběr nejvhodnější metody pro konkrétní povodí musí být pečlivě zvážen s ohledem na specifické charakteristiky a potřeby daného povodí, aby bylo možné optimalizovat výsledky simulací vzhledem k unikátním vlastnostem každého povodí.

V posledních letech došlo k podstatnému zlepšení v oblasti regionalizace, což přispělo k lepšímu odhadu odtoku v nepozorovaných povodích. Díky technologickému pokroku a lepší dostupnosti dat se metody regionalizace staly sofistikovanějšími a umožnily přesnější predikce. Přesto zůstává plné porozumění a přesná predikce hydrologických procesů ve své podstatě složitým úkolem. Výzvy spočívají v komplexitě přírodních systémů a omezeních současných modelů.

Budoucnost hydrologické regionalizace závisí na inovacích. Důležitá bude integrace rozsáhlých datových sad, včetně těch získaných z nových technologií monitorování. Regionalizace musí pokračovat ve vývoji metod, které přesněji zohledňují hydrologické procesy a zlepšují předpovědi odtoku. I když jsme dosáhli významného pokroku, cesta

k úplnému pochopení a efektivní predikci odtoku v nepozorovaných povodích je stále otevřená. Vyžaduje si nepřetržitý výzkum a inovace.

7 Seznam použitých zdrojů

- ACREMAN M. C., SINCLAIR C. D. 1986: Classification of drainage basins according to their physical characteristics: an application for flood frequency analysis in Scotland. *Journal of Hydrology* 84.
- ARCHFIELD, S. A. and VOGEL, R. M. 2010: Map correlation method: Selection of a reference streamgauge to estimate daily streamflow at ungauged catchments, *Water Resour. Res.*, 46, W10513, doi:10.1029/2009WR008481.
- BEVEN, K. J. and BINLEY, A. M. 1992: The future role of distributed models: model calibration and predictive uncertainty, *Hydrol. Process.*, 6, 279–298.
- BEVEN, K. J., and M. J. KIRKBY. 1979: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43–69.
- BLÖSCHL G., SIVAPALAN, M., 1995.: Scale issues in hydrological modelling a review, *Hydrol. Process.*, 9, 251–290.
- BURN D. H. 1990: Evaluation of Regional Flood Frequency Analysis With a Region of Influence Approach DOI: 10.1080/02626669009492415.
- BURN D. H., BOORMAN D. B 1993: Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments, *J. Hydrol.*, 143, 429–454.
- CALVER, A., CROOKS, S., JONES, D., KAY, A., KJELDSSEN, T., and Reynard, N. 2005: National river catchment flood frequency method using continuous simulation, Joint Defra/EA Flood and Coastal Erosion Risk Management R&D Programme, R&D Technical Report FD2106/TR.
- EGBUNIWE, N., and D. K. TODD. 1976: Application of the stanford watershed model to Nigerian watersheds, *Water Resour. Bull.*, 12, 449–460.
- FERNANDEZ W., VOGEL R., SANKARASUBRAMANIAN, A. 2000: Regional Calibration of a Watershed Model. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*. 45. 10.1080/02626660009492371.
- GOTTSCHALK L. 1985: Hydrological regionalization of Sweden, *Hydrol. Sci.*, 30, 65–83.
- HE Y., BÁRDOSSY A., ZEHE E. 2011: A review of regionalisation for continuous streamflow simulation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3539–3553.
- HEUVELMANS G., MUYS B., FEYEN J., 2005: Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology*, 245-265.

- HOGUE, T. S., SOROOSHIAN, S., GUPTA, H., HOLZ, A., and BRAATZ, D. 2000: A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models, *J. Hydrometeorol.*, 1, 524–542.
- HOLEČEK, David, 2020. SROVNÁNÍ REGIONALIZAČNÍCH PŘÍSTUPŮ PŘI ODHADU HYDROLOGICKÝCH CHARAKTERISTIK NA NEPOZOROVANÝCH POVODÍCH [online]. [cit. 2024-03-27]. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.
- HUNDECHA Y., BARDOSSY 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.
- KIM, U. and 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.
- LAMB, R. and 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., CREWETT, J., and 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.
- LUKASOVÁ A., ŠARMANOVÁ J. 1985: *Metody shlukové analýzy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 210 s.
- McINTIRE N., LEE H., WHEATHER H., YOUNG A., WAGENER T. 2005: Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments, *Water Resour. Res.*, 41, W12434, doi:10.1029/2005WR004289.
- MELOUN, Milan; MILITKÝ, Jiří. *Kompendium statistického zpracování dat: Metody a řešené úlohy včetně CD*. Praha: Academia, 2002. 764 s.
- MERZ R., BLÖSCHL G. 2004: Regionalization of catchment model parameters. *J. Hydrol.*, 287(1–4), 95–123.
- NASH J. E., SUTCLIFFE J. V. 1970: River flow forecasting through conceptual models Part one: A discussion of principles., *J. Hydrol.*, 27, 282–290.
- NASH, J. E. 1960: A unit hydrograph study with particular reference to British catchments, *Proc. Inst. Civil Eng.*, 17, 249–282.

- NATHAN R. J., McMAHON T. A. 1990: Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation, *J. Hydrol.*, 121, 217–238.
- LOUDIN L., ANDREASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., LE MOINE N. 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments, *Water Resour. Res.*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.
- LOUDIN 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: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9(3), 157–171.
- PERRIN, C., C. Michel, and V. ANDREASSIAN. 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *J. Hydrol.*, 279, 275–289.
- RAZAVI T., COULIBALY P. 2012: Performance of Potentially Universal Runoff Signatures for the Classification of Ontario Basins.
- RUDA A. 2014: Hydrografie vodních toků Brno: Katedra geografie, Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity, (online) [cit. 2024.03.26], dostupné z <<https://is.muni>>.
- RUDA, A., 2000: Klimatologie a hydrogeografie (online) [2.2.00] dostupné z <https://is.muni.cz>.
- SIVAPALAN M. 2003: Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology, *Hydrological Processes*, 17(15), 3163-3170.
- THANT, Aye Aye a Soe Moe AYE, 2020. Euclidean, Manhattan and Minkowski Distance Methods For Clustering Algorithms. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology* [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.32628/IJSRSET2073118>.
- VANDEWIELE G. L., ELIAS A. 1995: Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalisation, *J. Hydrol.*, 170, 277–291.
- VIRRANTAUUS K. 2016: Clustering and Regionalization (online) [cit. 2024.03.26], dostupné z: <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/221241/mod_folder/content/0/L>
- VIVIROLI, D., MITTELBACH, H., GURTZ, J., and 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.

- VOGEL, R. M. 2005: Regional Calibration of Watershed Models, Chapter 3, in: Watershed Models, edited by: Singh, V. P. and Frevert, D. F., CRC Press.
- WAGENER T., WHEATER H. S. 2006: Journal of hydrology-Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. J. Hydrol., 320(1–2), 132–154.
- WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, 2006: Distance, Wikipedia, The Free Encyclopedia, dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Distance>>.
- WIKIMEDIA FOUNDATION, 2023. Chebyshev distance. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023, 16. prosince 2023 [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Chebyshev_distance
- WOLFRAM MATHWORLD, 1999. Distance. WOLFRAM RESEARCH. Mathworld.wolfram.com [online]. 15.3. 2024 [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/Distance.html>
- YOKOO, Y., KAZAMA S., SAWAMOTO M., NISHMURA H., 2001: Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169401003729?via%3Dihub>
- YOUNG A. R. 2006: Streamflow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. J. Hydrol., 320(1–2), 155–172.
- ZHANG Y., CHIEW F. H. S. 2009: Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments Water Resour. Res., 45(7), W07412.

8 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Postupy tří regionalizačních metod, které využívají regresi (He et al., 2011).	19
Obrázek 2 - Schématické znázornění postupu za použití dvoustupňové regionalizace (Wagener a Wheeler, 2006)	20
Obrázek 3 – Poloha 913 povodí (Oudin et al., 2008)	29
Obrázek 4 – Poloha 210 povodí (Zhang, Chiew; 2009)	30
Obrázek 5 – Poloha 266 povodí (Poissant, 2017).....	31
Obrázek 6 – Poloha 32 povodí (Swain, Patra; 2017).....	32
Obrázek 7 – Poloha 320 povodí (Parajka et al., 2005)	33

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chronologické definice regionalizace (He et al., 2011).....	14
Tabulka 2 – Jednotlivé regionalizační metody (na základě studií).....	28
Tabulka 3 - Přehled výsledků vybraných studií pomocí Nash-Sutcliffova koeficientu (na základě vybraných studií)	34
Tabulka 4 - Přehled poklesu simulační účinnosti při přechodu z kalibrace do regionalizace (na základě vybraných studií)	36

8.3 Seznam grafů

Graf 1 - Přehled nejlepších výsledku hodnot ve studiích.	38
---	----