

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**



Bakalářská práce

**SROVNÁNÍ REGIONALIZAČNÍCH PŘÍSTUPŮ PŘI
ODHADU HYDROLOGICKÝCH CHARAKTERISTIK
NA NEPOZOROVANÝCH POVODÍCH**

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

Bakalant: David Holeček

© 2020 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

David Holeček

Územní technická a správní služba

Název práce

Srovnání regionalizačních přístupů při odhadu hydrologických charakteristik na nepozorovaných povodích

Název anglicky

Comparison of regionalization approaches for hydrological characteristics estimation on ungauged catchments

Cíle práce

Cílem práce je na základě dostupné literatury provést porovnání tří nejčastěji využívaných regionalizačních přístupů určených k odhadu zájmových hydrologických charakteristik (např. parametrů konceptuálních srážko-odtokových modelů) na nepozorovaných povodích.

Metodika

Rešeršně zaměřená práce.

- 1) Literární rešerše na zadané téma: regionalizace obecně a podrobněji se zaměřit na přístupy prostorové blízkosti povodí, fyzické podobnosti povodí regresní analýzy.
- 2) Na základě již publikovaných výsledků provést vyhodnocení efektivity těchto tří nejběžnějších regionalizačních přístupů.

Doporučený rozsah práce

30-50

Klíčová slova

regionalizace, nepozorované povodí, konceptuální model

Doporučené zdroje informací

- BÁRDOSSY A., 2007 Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments (online) [cit. 2007.01.17] dostupné z <<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/703/2007/hess-11-703-2007.pdf>>.
- LOUDINE L., ANDRÉ ASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., LE MOINE N., 2007 Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments (online) [cit. 2008.03.18] dostupné z <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007WR006240/pdf>>.
- WAGENER, T. – WHEATER, H. – GUPTA, H V. *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. London: Distributed by World Scientific, 2004. ISBN 1860944663.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2018

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2018

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/závěrečnou práci na téma: Srovnání regionalizačních přístupů při odhadu hydrologických charakteristik na nepozorovaných povodích vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 20.3.2020

Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Martinovi Heřmanovskému, Ph.D., rodině a přátelům za podporu během mého studia.

Srovnání regionalizačních přístupů při odhadu hydrologických charakteristik na nepozorovaných povodích

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá porovnáním tří nejčastěji používaných regionalizačních přístupů – fyzikální podobnosti, prostorové blízkosti a regrese – při odhadu zájmových hydrologických charakteristik pro nepozorovaná povodí. Pro porovnání bylo vybráno několik publikovaných srovnávacích studií, které se liší použitým konceptuálním modelem, souborem povodí (dle počtu povodí a jejich lokace), použitým souborem charakteristik povodí a modifikací daných regionalizačních přístupů. Na základě prezentovaných výsledků se jako efektivní jeví nejvíce dva přístupy, a to fyzikální podobnosti a prostorové blízkosti, které vedou k poklesu simulační účinnosti při přechodu z kalibrační fáze do fáze regionalizace v mediánu okolo 13 %. Regresní přístup vedl naopak ve většině studií k nejvyššímu poklesu simulační účinnosti modelu při přechodu z kalibrační fáze do fáze regionalizace, a to přibližně v mediánu o 18 %. Z hlediska konkrétního řešení přístupu prostorové blízkosti i fyzikální podobnosti se zdá jako nejlepší možnost použití více donorů v kombinaci s průměrováním výstupů, což bylo zaznamenáno v několika studiích. S přihlédnutím k tomu, že prostorová blízkost měla jednoznačně nejlepší výsledky ze všech regionalizačních metod ve všech studiích, ve kterých byla obsažena, vychází celkově jako efektivnější regionalizační metoda prostorová blízkost.

Klíčová slova: Regionalizace, fyzikální podobnost, prostorová blízkost, regrese, hydrologie

Comparison of regionalization approaches in estimation of hydrological characteristics on ungauged catchments

Abstract

The bachelor thesis deals with the comparison of the three most commonly used regionalization approaches - physical similarity, spatial proximity and regression - in estimating the hydrological characteristics of interest for ungauged catchments. For comparison, several published comparative studies were selected, differing in the conceptual model used, the set of river basins (according to the number of river basins and their location), the set of river basin characteristics used and modifications of given regionalization approaches. Based on the presented results, it is possible to approach the physical similarity and spatial proximity that lead to achieving simulation efficiency in the transition from the calibration phase to the regionalization phase in a median of about 13%. Available, regression approaches led in various studies to the highest number of simulation skills in transition from the calibration phase to the regionalization phase, up to 18%. From the point of view of the concrete solution of the view of spatial proximity and physical similarity, it seems to be the best option to use more donors in the option with average output, which were obtained in the targeted studies. Taking into account that spatial proximity has the best results of all regionalization methods in all the studies in which it was included, spatial proximity was evaluated as a more effective regionalization method.

Keywords: Regionalization, physical similarity, spatial proximity, regression, hydrology

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Cíle práce	2
2 Literární rešerše.....	3
2.1 Nepozorované (neměřené) povodí a regionalizace	3
2.2 Základní rozdělení regionalizačních metod.....	5
2.2.1 Přístup prostorové blízkosti	5
2.2.2 Regresní analýza	7
2.2.3 Přístup fyzikální podobnosti	9
2.2.3.1 Charakteristika povodí	10
2.2.3.2 Volba algoritmu pro vyhledávání nejpodobnějších povodí	12
2.2.3.3 Výběr metody odhadu hydrologické charakteristiky	14
3 Vyhodnocení efektivity regionalizačních přístupů	15
3.1 Studie vybrané pro porovnání regionalizačních přístupů	15
3.2 Souhrnné výsledky na základě vybraných studií	22
3.2.1 Nejlepší výsledek regionalizační metody ve studii.....	27
4 Diskuze	28
5 Závěr	32
6 Seznam použitých zdrojů	34

1 Úvod

Za posledních několik desetiletí bylo v rámci hydrologického modelování získáno mnoho nových poznatků, a to především z důvodu zlepšujících se technologií. Díky tomuto vědeckému pokroku se tak mohou vyvíjet stále účinnější nástroje poskytující přesnější simulace celkového odtoku z povodí (Oudin a kol., 2008). Mezi tyto nástroje patří například konceptuální hydrologické modely, které se snaží co nejpřesněji napodobovat hydrologický cyklus v rámci povodí a obsahují mnohá zjednodušení. Konceptuální modely se skládají ze základních rovnic a jsou také pouze volně založeny na základních fyzikálních zákonech (Merz a Blöschl, 2004).

Téměř všechny typy hydrologických modelů je potřeba kalibrovat proti pozorovaným časovým řadám odtoku, a to z důvodu zisku optimální sady parametrů modelu. Tuto důležitou část použití hydrologických modelů v praktických aplikacích bohužel nelze provádět na nepozorovaných povodích. Důvodem, proč toto nelze provádět na nepozorovaných povodích je, že data (pozorovaného odtoku) nejsou na nepozorovaných povodích k dispozici anebo jsou nedostatečná. Řešením tohoto problému je regionalizace, respektive různé regionalizační přístupy. Tyto přístupy se začaly ve velkém testovat převážně od sedmdesátých let minulého století. Od té doby se hydrologové pokoušejí vyvíjet různé nové strategie pro odhad parametrů svých modelů bez kalibrace (Parajka a kol., 2005). V rámci nalezení optimální regionalizační techniky se jednotlivé regionalizační přístupy porovnávají. Výsledky, které jsou získány z hlediska výběru optimální metody, jsou nejednoznačné. Avšak některé obecné závěry lze na základě těchto studií vyjádřit.

1.1 Cíle práce

Cílem práce je na základě dostupné literatury provést porovnání tří nejčastěji využívaných regionalizačních přístupů určených k odhadu zájmových hydrologických charakteristik (např. parametrů konceptuálních srážko-odtokových modelů) na nepozorovaných povodích.

Metodika:

Rešeršně zaměřená práce.

V rámci této práce byla nejprve provedena rešerše dostupné literatury se zaměřením na:

- 1) Regionalizační proces obecně
- 2) Přístupy spojené s regionalizací zájmových hydrologických charakteristik

Na základě výsledků několika odborných publikací bylo provedeno zhodnocení popsanych regionalizačních přístupů z hlediska jejich efektivity při simulaci odtoku na nepozorovaných povodích.

2 Literární rešerše

2.1 Nepozorované (neměřené) povodí a regionalizace

Přestože je na celém světě instalováno několik desítek tisíc vodoměrných stanic, je většina povodí světa stále nepozorovaná. Například, pokud sledovaná proměnná nebyla měřena v požadovaném rozlišení nebo po dobu nezbytnou pro kalibraci modelu, povodí je považováno za nepozorované. Proměnné, které jsou důležité, mohou být jakékoliv z hydrologických proměnných, jako jsou například srážky či odtoky (Razavi, 2014).

Na nepozorovaných je nutné odvodit hydrologické údaje pomocí speciálních metodických postupů, využívajících hydrologické analogie. Hydrologickou analogií je myšleno aplikování vztahů mezi fyzicko-geografickými a hydrologickými charakteristikami na pozorovaných povodích pro odvození hydrologických charakteristik na nepozorovaných povodích (Oudin a kol., 2008).

Pojem regionalizace má kořeny v procesu klasifikace hydrologického režimu povodí a seskupování povodí podle tohoto režimu (Pardé, 1933; Gottschalk a kol., 1979) a byl později rozšířen v kontextu modelování srážko-odtokového procesu na přenos parametrů ze sousedních pozorovaných povodí na nepozorovaná povodí (Oudin a kol., 2008). Dnes se tento pojem vztahuje na všechny metody, jejichž cílem je odhadnout hodnoty parametrů modelu na jakémkoli nepozorovaném povodí v definovatelné oblasti konzistentní hydrologické odezvy (Kleeberg, 1992; Sivapalan a kol. 2003; Wagener a Wheeler 2006). V tab. 1 jsou prezentovány definice regionalizace, tak jak se měnily postupem času.

autoři	použitý termín	definice
Riggs (1973)	regionální analýza	rozšíření záznamů v prostoru
Gottschalk (1985)	regionalizace	klasifikace povodí na základě zvolené hydrologické charakteristiky
Blöschl a Sivapalan (1995)	regionalizace	přenos informace z jednoho povodí na druhé
Wagener a Wheeler (2006)	regionalizace nebo prostorové zobecnění	identifikace statistického vztahu mezi měřitelnými charakteristikami povodí a parametry modelu na souboru pozorovaných povodí a jeho použití na nepozorovaném povodí
Young (2006)	regionalizace	Spojení hydrologického fenoménu s fyzikálními a klimatickými charakteristikami povodí nebo regionu
Oudin a kol. (2010)	regionalizace	všechny metody, které umožňují přenos hydrologické informace z pozorovaných povodí na nepozorovaná povodí

Tab. 1: Chronologické definice regionalizace, jak se objevovala v odborné literatuře (He a kol. 2011).

Historie regionalizačního výzkumu v hydrologii je poměrně dlouhou a velice zajímavá. Neustále se během posledních desetiletí vyvíjí a to převážně z jednoho hlavního důvodu, pokusit se o lepší predikování odtoku na nepozorovaných povodích. Existují dva typy studií, které využívají regionalizační techniky pro nepozorovaná povodí. První z nich odhaduje parametry statistik odtoku a ve většině případů kvantily povodní. Druhý typ odhaduje parametry srážko-odtokového modelu pro simulaci kontinuálního odtoku nebo odhaduje kontinuální odtok bez nutnosti použití modelu. Téměř všechny metody aplikované na posledně jmenovaný mohou být aplikovány na první z nich (He a kol. 2011).

Definice regionalizace, viz (tab.1) se liší v závislosti na kontextu a klade důraz na extrapolace časových řad, klasifikace povodí nebo odvozené statistické vztahy. Historie vývoje regionální analýzy pro statistiku odtoku je vcelku bohatá a dlouhá. Značná část jejího vývoje přispěla k pokroku v regionálním odhadu parametrů srážko-odtokových modelů

(Vogel, 2005). Téměř všechny metody aplikované na posledně jmenované jsou adaptovány od první, a tudíž použitelné pro první z nich, s výjimkou řady nově se objevujících metod, které byly testovány pouze u srážko-odtokových modelů. Nejintuitivnější metoda regionalizace je identifikace podobných nebo zástupných (proxy) povodí, ať už jde o jejich umístění nebo o chování. Koncept podobnosti povodí je základem všech regionálních metod založených na zvoleném měřítku vzdálenosti (He a kol. 2011).

2.2 Základní rozdělení regionalizačních metod

Mezi základní tři regionalizační metody patří fyzikální podobnost prostorová blízkost a regrese (Oudin a kol., 2008).

2.2.1 Přístup prostorové blízkosti

Přístup prostorové blízkosti je založen na přenosu informace (např. parametrů modelu) z geograficky sousedících povodí na nepozorované povodí. Předpokládá se, že povodí, která jsou geograficky blízko sebe, by se měla hydrologicky chovat podobně (Parajka a kol. 2005). Tato podobnost se dá vysvětlit následujícím způsobem. Pokud platí, že povodí s podobnými charakteristikami mají podobné hydrologické chování a dále, pokud platí, že sousední povodí by měla mít velmi podobné klíčové charakteristiky (např. klima) řídící celkový odtok z povodí, pak by se sousední povodí měla hydrologicky chovat podobně. Přístup prostorové blízkosti je jedním z nejčasnějších pokusů o modelování celkového odtoku na nepozorovaných povodích. Tento přístup je pro hydrology intuitivně atraktivní (Oudin a kol., 2008).

Největší nevýhodou přístupu prostorové blízkosti je skutečnost, že z hydrologického hlediska se sousední povodí nemusejí chovat podobným způsobem (Merz a Blöschl (2004). Odlišnost sousedních povodí může být způsobena například rozdílem v geomorfologii povodí a také vegetačním krytu, a to i přes fakt, že sousední povodí mají zcela identické klima, na což poukázali například Acreman a Sinclair (1986).

Mezi další nevýhody tohoto přístupu patří skutečnost, že efektivita přístupu prostorové blízkosti je velmi ovlivněna hustotou sítě pozorovaných povodí. Sousední povodí mohou být v tomto případě někdy i stovky kilometrů daleko a jejich klima (i půdní a geologické charakteristiky) mohou být diametrálně odlišné. Poslední nevýhodou tohoto přístupu je skutečnost, že prediktivní sílu silně ovlivňuje parametrická ekvifinalita, tj. existence více možných parametrických sad, které vedou k velmi podobným simulačním výsledkům (Oudin a kol., 2008).

Geograficky sousední povodí lze vybírat na základě určitého měřítka vzdálenosti (např. Euklidova vzdálenost mezi těžišti povodí nebo uzávěrovými profily povodí). Dále je možno vybrat jedno nejbližší povodí (single donor přístup) anebo více povodí (multiple donor přístup) (Oudin a kol., 2008). Optimální počet donorů se nejčastěji vybírá metodou pokus – omyl, např. v Oudin a kol. (2008) nebo Zhang a Chiew (2009). Další variantou je vymezení geografického regionu kolem nepozorovaného povodí (např. v Parajka a kol., 2005). Při této variantě se vymezí region kolem nepozorovaného povodí, tj. zvolí se vhodný rádius kolem nepozorovaného povodí (např. 50 km použitých ve studii Parajka a kol., 2005) a v takto vymezeném regionu se hydrologická informace pro nepozorované povodí určuje například aritmetickým průměrem, váženým průměrem, maximálně věrohodným odhadem (maximum likelihood method) anebo metodou krigingu. Kriging je přístup, kde jsou parametry modelu regionalizovány nezávisle na sobě na základě jejich prostorové korelace. Ve studii Vandewiele a Elias (1995) byl aplikován měsíční model vodní bilance na 80 belgických povodích, která byla považována za nepozorovaná. Použity byly dvě prostorové techniky: kriging a maximálně věrohodný odhad na základě všech povodí, která byla do maximální vzdálenosti 30 km od nepozorovaného povodí. Z výsledků studie je patrné, že lepší výsledky poskytl kriging. Ve studii Parajka a kol., (2005) měl přístup kriging jedny z nejlepších výsledků.

2.2.2 Regresní analýza

Regresní analýza je označení statistických metod, které umožňují odhadnout hodnoty jistých náhodných veličin na základě znalosti jiných veličin. Regresní analýza dnes patří k nejdůležitějším metodám matematické statistiky a samostatně nebo ve spojení s jinými metodami se používá prakticky v každé oblasti empirické a aplikované vědy (Cook a Weisberg 1982; Freedman, 2009).

Regrese se využívá i v regionalizaci a je považována za nejoblíbenější metodu. V případě regionalizace se jedná o nalezení matematického vztahu mezi např. parametry modelu (závislá veličina) a charakteristikami povodí (nezávislé veličiny) (Oudin a kol. 2008).

Omezením regresního přístupu je skutečnost, že prediktivní síla regresní rovnice silně ovlivňuje parametrická ekvifinalita (tj. existence více možných parametrických sad, které vedou k velmi podobným simulačním výsledkům). Aby se toto možné zkreslení snížilo, Hundedea a Bardossy (2004) navrhli alternativní metodu, která byla použita i ve studii Bardossy (2007). Tato metoda spočívá v zavedení funkční formy vztahu mezi parametry modelu a charakteristikami povodí. Principiálně se velice podobá jednostupňové regresi nebo regionální kalibraci od Fernandez a kol. (2000). Jako příklad studií využívajících regresi pro regionalizační účely lze uvést např. studie, které prezentovali Magette a Shanhol (1976), Sefton a Howarth (1998), Post a Jakeman (1999), Merz a Blösch (2004) a mnozí další.

Nejvíce využívané regresní metody lze rozdělit do tří skupin:

- Jednorozměrová regrese
- Symbolická regrese
- Fuzzy regrese

U jednorozměrové regrese používá většina softwarových balíčků sofistikované přístupy, protože řešení, které je založené na metodě nejmenších čtverců, může mít špatné numerické charakteristiky. Nelinearita je zde někdy zahrnuta transformací závislých nebo nezávislých proměnných použitých v regionální modelové struktuře. Jednorozměrová regrese

předpokládá, že parametry modelu nejsou korelovány, což je předpoklad, který není v mnoha případech platný. (Wagener a kol. 2004)

Struktura jednorozměrové regrese se dá vyjádřit tímto vzorcem:

$$\theta_L = \Phi\theta_R + \varepsilon_R \quad (1.0)$$

Struktura jednorozměrové regrese (Wagener a kol. 2004)

- Kde:
- θ_L = závislá proměnná,
 - Φ = matice charakteristik povodí nepozorovaného povodí,
 - θ_R = vektor regresních parametrů,
 - ε_R = je chybový vektor.

Symbolická regrese je typ regresní analýzy, která prohledává prostor matematických výrazů a hledá model, který nejlépe odpovídá danému datovému souboru, a to jak z hlediska přesnosti, tak jednoduchosti. Jako výchozí bod algoritmu není poskytován žádný konkrétní model. Místo toho jsou počáteční výrazy tvořeny náhodným kombinováním matematických stavebních bloků, jako jsou matematické operátory, analytické funkce, konstanty a stavové proměnné. Obvykle jsou nové rovnice vytvářeny rekombinováním předchozích rovnic pomocí genetického programování. Symbolická regrese je proto obor genetického programování, které je samo o sobě typem evolučního algoritmu. Genetické programování je inspirováno Darwinovskou teorií evoluce. Tato teorie je o přežití a chovu nejchytřejších členů rozvíjejících populací. Teorie může být popsána tak, že algoritmus začíná náhodnou specifikací počáteční populace. Tato specifikace jsou matematické prvky.

Matematickým prvkem může být například logaritmická transformace, parametr či určitá fáze inicializace. Někteří členové jsou vybráni k produkci potomků. Tento výběr souvisí s několika aspekty (např. vhodnost vybraných členů). Členové, kteří jsou vybráni tímto způsobem, pak vytvářejí nové náhodné kombinace, dokud alespoň jeden z vybraných členů populace neprodukuje dostačující (vysoký) výkon. Zatím je jen málo příkladů využití tohoto genetického programování v hydrologii (např. Drecourt, 1999; Babović a Bojkow, 2001). Genetické programování je výpočetně velmi náročné, ovšem i tak nabízí zajímavou alternativu ke konvenční regresi (Wagener a kol. 2004).

Fuzzy regrese je určitá variace klasické regresní analýzy. Tato regrese byla studována a aplikována na různé oblasti. Mezi dva typy fuzzy regresních modelů patří fuzzy přístup nejmenších čtverců a Tanakaho lineární programování. Fuzzy regrese je tak alternativní přístup k standardním statistickým přístupům. Může být lineární či nelineární. Fuzzy regrese může být v některých případech vhodnější než klasická statistická regrese, a to z několika důvodů. Prvním z nich je, když není statistická regresní analýza podporována kvůli malému výběrovému vzorku (omezený počet povodí). Dalším důvodem je, pokud je regresní model nevhodný a poslední možností je, pokud se jedná o lidský úsudek. Fuzzy regrese má výhodu v tom, že je vhodná i pro malé velikosti vzorků (Wagener a kol. 2004).

2.2.3 Přístup fyzikální podobnosti

Přístup fyzikální podobnosti je spojení přístupu založeného na prostorové blízkosti a přístupu založeného na regresi. Výběr dostatečně kvalitní kolekce charakteristik povodí je klíčový pro metodiku tohoto přístupu (více o charakteristikách povodí v kapitole 2.3.1). Předpokladem přístupu fyzikální podobnosti je, že povodí s podobnými charakteristikami by měla mít podobné hydrologické chování. Tato myšlenka není však nijak nová, pochází od Acremama a Sinclaira (1986) a Nathana a McMahona (1990). Přístupem fyzikální podobnosti se ve svých studiích zabývali např. Burn a Boorman (1993), McIntyre a kol. (2005), Oudin a kol. (2008), Samuel a kol. (2011), Zhang a Chiew (2009) a mnozí další. Nevýhodou tohoto přístupu může být situace, kdy chybí pro analýzu charakteristiky povodí, které mají nejvýraznější vliv na hydrologickou odezvu povodí. Metodikou přístupu jsou tři kroky: sestavení kolekce charakteristik povodí, výběr vyhledávacího algoritmu, výběr metody odhadu hydrologické charakteristiky na nepozorovaném povodí (Oudin a kol., 2008; Razavi a Coulibaly, 2012).

2.2.3.1 Charakteristika povodí

Charakteristika povodí je taková vlastnost povodí, kterou lze jasně a přesně kvantifikovat, pokud možno číselnou hodnotou charakteristiky povodí, používané pro účely regionalizace, by měly dobře charakterizovat faktory, které řídí hydrologickou odezvu povodí (Ruda, 2014).

Výběr charakteristik povodí může být proveden na základě expertní znalosti. V takovém případě se vybírají konkrétní charakteristiky pro danou úlohu. Výběr charakteristiky může být také proveden na základě metody pokus - omyl, ve které se postupně testují různé kombinace charakteristik povodí, a hledá se ta kombinace, která je schopna nejlépe popsat hydrologické chování povodí viz např. ve studii Oudina a kol (2008).

Charakteristiky povodí lze rozdělit na fyzicko-geografické a klimatické charakteristiky a hydrologické charakteristiky. Fyzicko-geografické a klimatické poměry povodí mají rozhodující vliv na velikost odtoku, jeho plošné a časové rozložení a na vývoj mnoha hydrologických jevů spojených s odtokem. Fyzicko-geografické a klimatické charakteristiky popisují polohu povodí, geomorfologické vlastnosti, klimatické poměry, půdní poměry a vegetační poměry. Poloha každého povodí je určena především jeho geografickou polohou. Polohu lze identifikovat s pomocí zeměpisných souřadnic, zařazením do geografického pásma či výškového stupně. Geografická poloha se obvykle doplňuje i hydrologickou polohou. Hydrologickou polohou se rozumí postavení vůči sousedním povodím (Ruda, 2014). Hydrologické charakteristiky, které velmi dobře popisují hydrologické chování daného povodí, jako například variabilitu odtoku, jsou odvozovány na základě časových řad pozorovaného odtoku. Tato skutečnost prakticky omezuje jejich využití pro regionalizační studie spojené s predikcí hydrologických charakteristik na nepozorovaných povodích (Yadav a kol., 2007).

Klimatické charakteristiky poskytují zejména informace o množství, rozložení a chodu jednotlivých klimatologických charakteristik. Jsou to například srážky, výpar a teplota (Chmelová a kol., 2013; Ruda, 2014). Využity byly například ve studiích Parajka a kol. (2005) - dlouhodobé průměrné roční srážky, průměrné dlouhodobé maximální letní/zimní srážky a další, Oudin a kol. (2008) a Zhang a Chiew (2009) – index aridity.

Půdní charakteristiky líčí fyzikální vlastnosti půdy ve zvoleném profilu (např. bod vadnutí, nasycená hydraulická vodivost a další). Mezi půdní charakteristiky se řadí taktéž relativní zastoupení jednotlivých půdních druhů a typů na povodí (viz např. kategorie dle USDA pro MOPEX povodí od Miller a White (1998)). Dále půdní charakteristiky ovlivňují intenzitu vsakování do podložních vrstev zvětralin a hornin s ohledem na zrnitostní složení, strukturu, obsah humusu a minerálních látek v horizontech půdy (Ruda, 2014). Využity byly například ve studii Merz a Blöschl (2004) - formou relativního zastoupení půdních typů na povodí.

Geologické charakteristiky povodí, tj. relativní zastoupení a druh matečné horniny, mají také velký vliv na odtok. Tvrdé krystalické horniny, jako například žuly a andezit, jsou v nezvětralém stavu nepropustné a urychlují povrchový odtok. V případě jejich zvětrávání vytvářejí hrubozrnný zvětralinový plášť, který zintenzivňuje infiltraci. Vysokou propustnost vykazují také porézní pískovce, písky, štěrky, hluboko mechanicky zvětralé nebo tektonicky narušené tvrdé horniny (Ruda, 2014). Geologické charakteristiky byly využity například v práci Parajka a kol. (2005) a Merz a Blöschl (2004) – formou relativního zastoupení hlavních geologických celků na povodí.

Vegetační kryt má vcelku výrazný vliv na odtok vody. Může zintenzivňovat povrchový odtok nebo infiltraci. Lesy mají pozitivní význam pro zadržování vody v krajině a usnadnění její regulace. Vliv lesů na odtok vody v krajině spočívá ve zvýšení intercepce (zadržování části srážek na povrchu listů, větví a kmenů), zvětšování akumulace vody (kořeny, co vyčnívají, vytváří prohlubně a tak zvyšují drsnost povrchu v povodí), zvýšení intenzity infiltrace (v důsledku vzniku lesního humusu se rozkládá odpad), zvětšení retenční schopnosti povrchu (kořeny a dolní větve snižují rychlost stékání vody z povrchu) a prodloužení infiltrační období (v zimě a v noci se snižuje vyzařování dlouhovlnného záření tedy tepla) (Ruda, 2014). Využity byly například ve studii Oudin a kol. (2008) – relativní zastoupení lesních porostů na povodí.

Geomorfologické charakteristiky se zabývají především morfologií povodí. Mezi geomorfologické charakteristiky povodí patří plocha povodí (je potřebná k výpočtu některých měrných jednotek odtoku), délka hlavního toku (měří se od pramene k uzávěrovému profilu povodí), délka povodí (je vzdálenost od uzávěrového profilu povodí k nejzazšímu bodu povodí), tvarové charakteristiky povodí (určují vliv na tvorbu odtoku při dešti a tání sněhu - ke srovnání jednotlivých povodí je potřeba kvantitativně vyjádřit jejich tvarové vlastnosti), hustota říční sítě (je údaj představující podíl součtu délek všech vodních toků v povodí a plochy povodí), průměrný sklon povrchu povodí (určuje sklonové poměry), sklon vodního toku (vyjadřuje rozdíl nadmořských výšek dvou bodů sledovaného úseku vodního toku) a průměrná nadmořská výška povodí (je jednou ze základních geomorfologických charakteristik - lze ji určit graficky z hypsografické křivky, nebo na základě vhodného mapového podkladu vypočítat podle vzorce) (Ruda, 2014). Využity byly například ve studiích Parajka a kol. (2005) a Merz a Blöschl (2004) – plocha povodí.

2.2.3.2 Volba algoritmu pro vyhledávání nejpodobnějších povodí

Existují různé algoritmy (metodické postupy) pro vyhledávání nejpodobnějších povodí. Tyto algoritmy mohou být velmi jednoduché (např. index podobnosti) až výpočetně složitější (metody shlukové analýzy dat). V následujícím textu budou stručně popsány některé z nich.

Shluková analýza je vícerozměrná statistická metoda, která se používá ke klasifikaci objektů. Shluková analýza se rozděluje na dva přístupy hierarchického shlukování, a to na aglomerativní a divizivní. Při aglomerativních metodách se spojují objekty navzájem nejpodobnější, poté se s každou skupinou pracuje jako se samostatným objektem až do okamžiku, kdy zůstane pouze jedna skupina. Tento postup není vhodný pro data, která jsou objemná. U divizivních metod se celý soubor dělí nejčastěji na dvě části. Každou z částí lze potom považovat za samostatný soubor. Analýza je určena k třídění jednotek do skupin tzv. shluků tak, aby si jednotky náležící do stejné skupiny byly podobnější než objekty z ostatních skupin. Tato analýza může být prováděna na množině znaků, které mají charakteristiku určitého souboru objektů. Jsou to nositelé těchto znaků a také na množině objektů, ze kterých musí být popsány prostřednictvím stejného souboru znaků, který má smysl v dané množině

sledovat. Hierarchické shlukování vytváří podmnožiny, kde průnikem dvou podmnožin shluků je buď prázdná množina, nebo jeden ze shluků. Pokud nastane alespoň jednou druhý případ, tedy shluk, je systém hierarchický. Toto se však nehodí pro větší datové soubory. Existuje několik přístupů, jak vytvářet shluky. Mezi základní přístupy patří například metoda nejbližšího souseda. U této metody je výsledný shluk vytvořen ze dvou shluků na základě vzdálenosti dvou nejbližších objektů z těchto dvou shluků. Další metodou je metoda nejbližšího souseda. Tato metoda je přesným opakem metody nejbližšího souseda. Může být ještě zmíněna metoda centroidní, kde je výsledný shluk vytvořen ze dvou shluků na základě vzdálenosti jejich těžišť. Poslední metodou je Wardova metoda. Pro tuto metodu je důležitá analýza rozptylu, ze které Wardova metoda vychází. Tato metoda je velice účinná, i když vytváří pouze malé shluky (Lukasová a Šarmanová, 1985; Virrantaus, 2016).

Metoda RAS je určena k vyhledávání povodí s podobnými charakteristikami a její postup lze shrnout do následujících kroků (Oudin a kol, 2008): Prvním krokem je výpočet absolutních hodnot odchylek mezi charakteristikou X nepozorovaného povodí a charakteristikou X všech pozorovaných povodí. Druhým krokem je přiřazení pořadí jednotlivým pozorovaným povodím podle velikosti odchylky (pořadí 1 je přiřazeno pozorovanému povodí s nejmenší hodnotou odchylky, pořadí 2 pozorovanému povodí s druhou nejmenší odchylkou atd.). Pokud se testují kombinace s více než jednou charakteristikou, provede se opakování kroků 1 a 2 pro každou charakteristiku. Posledním krokem je výpočet celkového pořadí pozorovaných povodí jako aritmetický průměr dílčích pořadí. Každé charakteristice použité pro regionalizaci je v systému hodnocení přidělena stejná váha (Oudin a kol., 2008; Zhang a Chiew, 2009).

Metoda ROI (Region Of Influence), kterou navrhl Burn (1990), je založena na předpokladu formování regionů kolem nepozorovaných povodí. To znamená, že pro každé nepozorované povodí je vytvořen samostatný region (shluk), v jehož centru je toto nepozorované povodí umístěno. Do regionu jsou postupně přiřazována pozorovaná povodí podle zvoleného kritéria podobnosti (např. Euklidovská vzdálenost ve vícerozměrném prostoru charakteristik povodí). Po přiřazení potenciálně podobných pozorovaných povodí je vhodné provést kontrolu vnitroregionové homogenity (např. pomocí vhodných statistických testů). Základní rozdíl mezi metodou ROI a klasickou shlukovou analýzou je v tom, že

v přístupu ROI může jedno pozorované povodí být přiřazeno do více regionů současně (Burn,1990).

2.2.3.3 Výběr metody odhadu hydrologické charakteristiky

U přístupu fyzikální podobnosti, a i prostorové blízkosti se využívají dvě metody výpočtu celkového odtoku nepozorovaného povodí. Tyto metody jsou průměrování parametrů a průměrování výstupů. Metodu průměrování parametrů můžeme popsat tak, že parametrická sada pro nepozorované povodí se vypočte jako průměr na základě parametrických sad vybraných donorů. Tento průměr může být aritmetický nebo také vážený. Metoda průměrování výstupu se dá popsat tak, že celkový odtok z nepozorovaného povodí je vypočten jako průměr simulací na základě parametrických sad vybraných donorů a vstupních časových řad nepozorovaného povodí (jako vstupní časové řady může posloužit teplota, srážky a potenciální evapotranspirace). Průměr je i v tomto případě aritmetický nebo vážený (McIntyre a kol. 2005).

3 Vyhodnocení efektivity regionalizačních přístupů

3.1 Studie vybrané pro porovnání regionalizačních přístupů

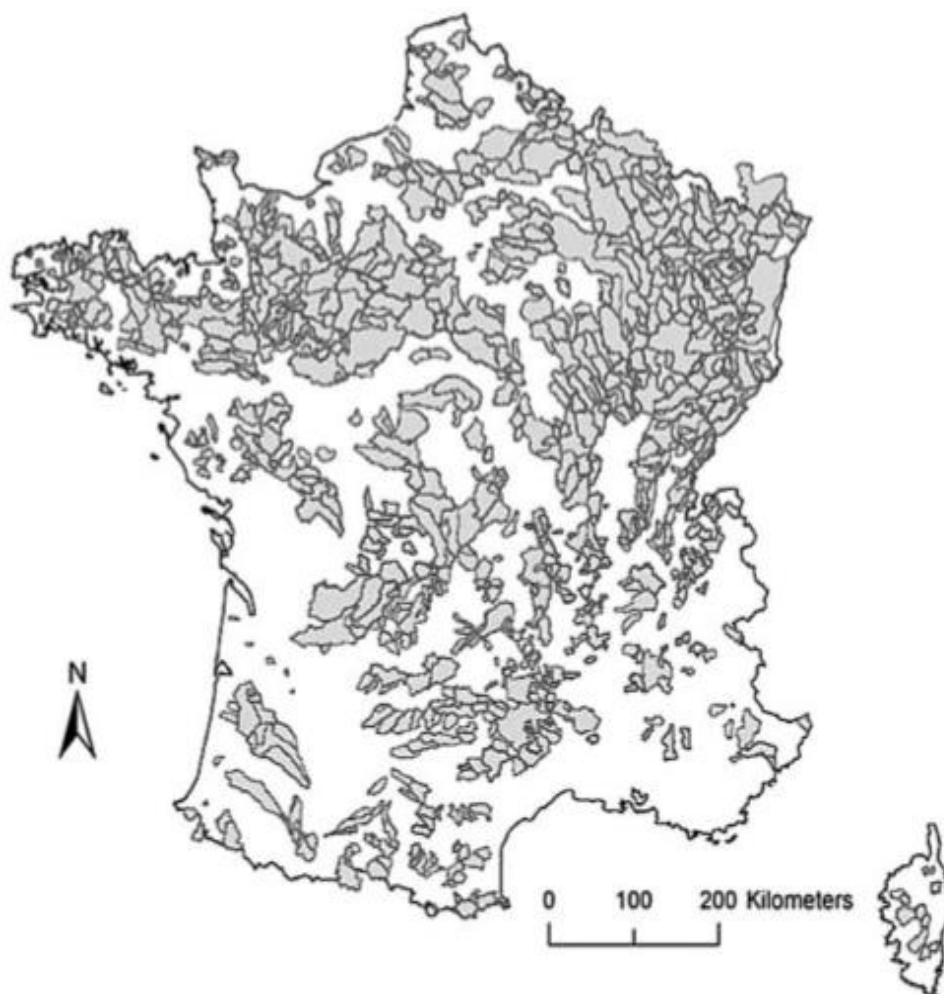
Pro porovnání efektivity tří regionalizačních přístupů bylo vybráno šest studií, které jsou stručně charakterizovány v tab. 2 a podrobněji popsány v následujícím textu.

studie	Lokace souboru povodí	Počet povodí v souboru	modely	regrese	prostorová blízkost	fyzikální podobnost
Oudin a kol. (2008)	Francie	913	GR4J, TOPMO	ano	ano	ano
Parajka a kol. (2005)	Rakousko	320	HBV	ano	ano	ano
Zhang a Chiew (2009)	Austrálie	210	SIMHID, Xinanjiang	ne	ano	ano
Merz a Blöschl (2004)	Rakousko	308	HBV	ano	ano	ne
Young (2006)	Velká Británie	260	IHACRES	ano	ne	ano
Kokkonen a kol. (2003)	USA	13	IHACRES	ano	ne	ano

Tab.2: Základní přehled vybraných studií.

Oudin a kol. (2008) ve své studii porovnali výkonnost regrese, prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti na souboru 913 povodí ve Francii (viz obr. 1) na základě simulační účinnosti dvou modelů: GR4J (4 kalibrované parametry) a TOPMO (6 kalibrovaných parametrů). Simulační účinnost obou modelů byla v kalibrační, verifikační i regionalizační fázi hodnocena na základě Nash-Sutcliffeova koeficientu (Nash a Sutcliffe, 1970) a jeho modifikací využívajících transformaci časových řad odtoku pomocí funkcí logaritmus a druhá odmocnina. Pro vyhledávání nejpodobnějších/nejbližších povodí byla použita metoda RAS (fyzikální podobnost), nebo Euklidovská vzdálenost mezi těžišti povodí (prostorová blízkost). Pro přístupy fyzikální podobnosti a regrese byl sestaven soubor 6 charakteristik pro každé povodí: plocha povodí, průměrný sklon povodí, medián nadmořské výšky povodí, hustota říční sítě, podíl lesních porostů na povodí a index aridity. V rámci přístupů fyzikální podobnosti povodí a prostorové blízkosti byl testován různý počet donorů a s tím spojené dvě

metody výpočtu celkového odtoku nepozorovaného povodí: průměrování parametrů a průměrování výstupů.

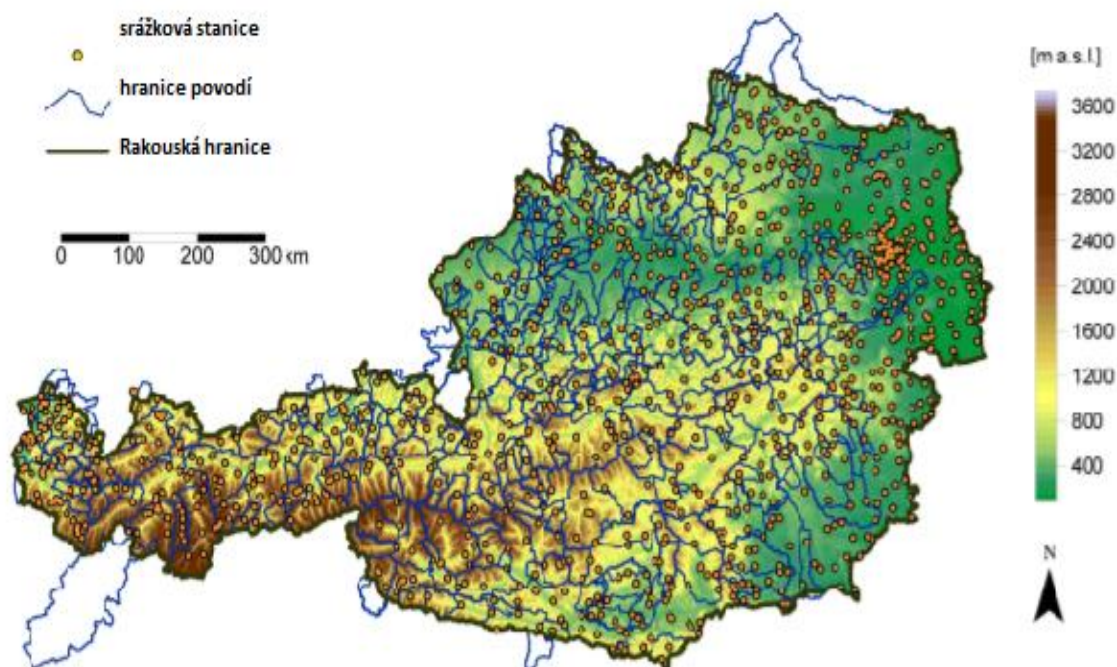


Obr. 1: Lokace 913 povodí použitých ve studii Oudin a kol. (2008).

Parajka a kol. (2005) ve své studii porovnali výkonnost regrese, prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti na souboru 320 povodí v Rakousku (viz obr. 2) na základě simulační účinnosti modelu: HVB (11 kalibrovaných parametrů). Simulační účinnost modelu byla v kalibrační, verifikační i regionalizační fázi hodnocena na základě kritéria, které v sobě agregovalo Nash-Sutcliffeův koeficient, relativní objemovou chybu a kritérium pro vyhodnocení množství sněhové pokrývky na povodí. Testovány byly čtyři skupiny regionalizačních metod: průměrovací metody, regrese, fyzikální podobnost a prostorová blízkost. V první skupině byly u průměrovacích metod parametrické sady pro nepozorované povodí vypočteny jako aritmetický průměr parametrických sad ze všech povodí (globální průměr). Další možností této skupiny byl lokální průměr. V této metodě jsou k výpočtu průměrné parametrické sady použity parametrické sady povodí do vzdálenosti 50 km od

nepozorovaného povodí. Obě dvě metody jsou vlastně triviální formou prostorové blízkosti (které však byly ve studii odděleny).

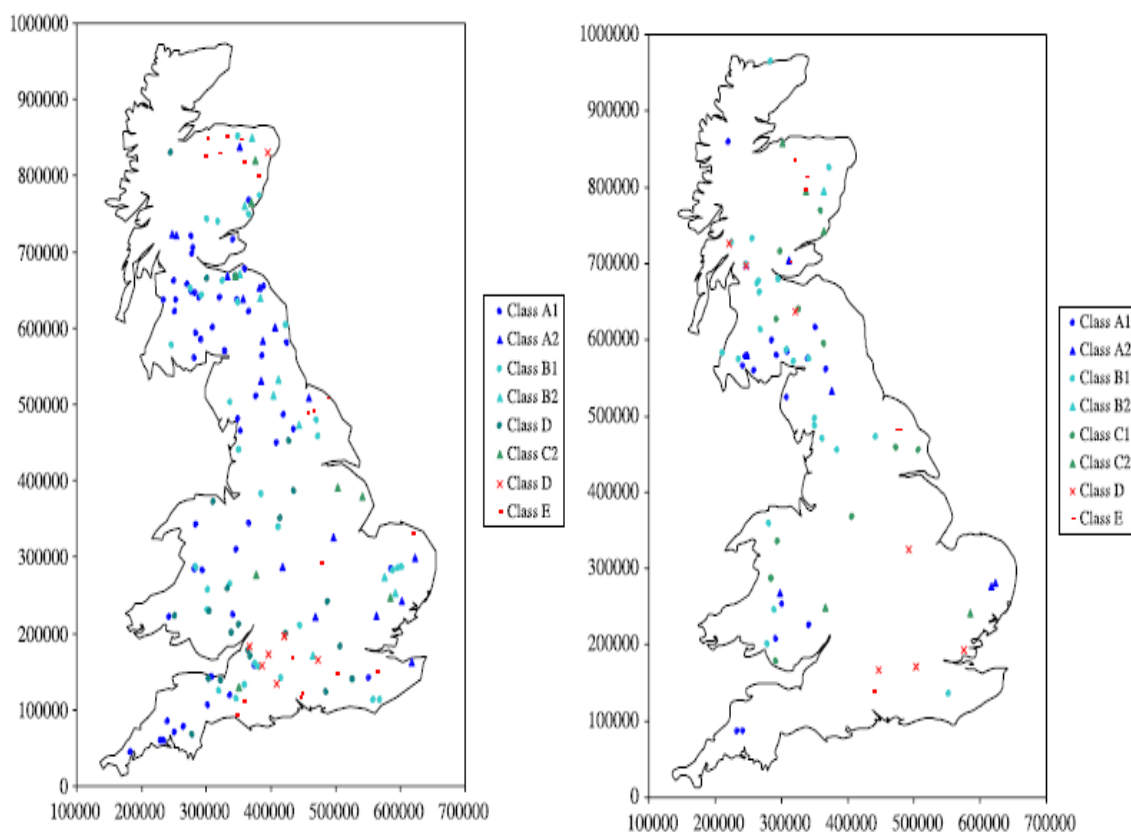
Druhá skupina regionalizačních metod byla založena na prostorové blízkosti a v rámci ní byly využity následující metody: single donor přístup (přenos parametrické sady z geograficky nejbližšího povodí) a multiple donor přístup založený na váženém průměru (váhou byla převrácená hodnota vzdálenosti mezi nepozorovaným a pozorovaným povodím) a krigingu. Třetí skupina metod byla založena na regresi a v rámci ní byly využity tyto metody: globální regrese (pro odvození regresních rovnic bylo použito všech 320 povodí), lokální regrese (pro odvození rovnic byla použita pouze povodí v okruhu do 50 km od nepozorovaného povodí) a georegrese. Čtvrtá skupina metod byla založena na fyzikální podobnosti. V rámci fyzikální podobnosti byl využit single donor přístup a pro nalezení nejpodobnějšího povodí byl využit index podobnosti a charakteristiky povodí, které obsahovaly informace využití půdy, dále pak klimatické, půdní a geomorfologické charakteristiky (Parajka a kol, 2005).



Obr. 2: Lokace 320 povodí využitých ve studii Parajka a kol. (2005). Body ukazují umístění srážkoměrných stanic.

Merz a Blöschl (2004) ve své studii porovnali výkonnost zvolených regionalizačních metod na souboru 308 povodí v Rakousku na základě simulační účinnosti modelu: HBV (11 kalibrovaných parametrů). Simulační účinnost modelu byla v kalibrační, verifikační i regionalizační fázi hodnocena na základě stejného kritéria jako v případě studie Parajka a kol. (2005). Testováno bylo osm regionalizačních metod ve čtyřech skupinách: expertní odhad, globální průměr, regrese (globální, lokální a optimalizovaná lokální regrese) a prostorová blízkost (průměr z nejbližších povodí do vzdálenosti 50 km, kriging). V první metodě se v regionalizaci expertně vybrala sada parametrů (přednastavené parametry) a aplikovala se na všechna povodí. Výběr byl tak založen na odborném úsudku. Druhou metodou byl globální průměr. Tato metoda je stejná jako ve studii Parajka a kol. (2005). Ve třetí skupině metod byla použita globální regrese (pro odvození regresních rovnic bylo použito všech 308 povodí), lokální regrese (do ní byla zahrnuta pouze povodí do vzdálenosti 50 km od nepozorovaného povodí) a optimalizovaná lokální regrese (podobná lokální regresi, ale navíc byly optimalizovány korelační koeficienty). Ve čtvrté skupině byly testovány tři metody založené na prostorové blízkosti. První metoda čtvrté skupiny je založena na výpočtu parametrické sady nepozorovaných povodí (parametrické sady jsou vypočteny jako průměr z parametrických sad nejbližších povodí). Druhá a třetí metoda čtvrté skupiny je založena na metodě kriging. V druhé metodě čtvrté skupiny byla použita všechna povodí pro prostorovou interpolaci (s výjimkou nepozorovaného povodí). Ve třetí metodě čtvrté skupiny je kriging - multiple donor. Pro regresi byly použity tyto charakteristiky: plocha povodí, střední nadmořská výška povodí, střední sklon povodí, vegetační kryt a relativní zastoupení půdních typů na povodí další.

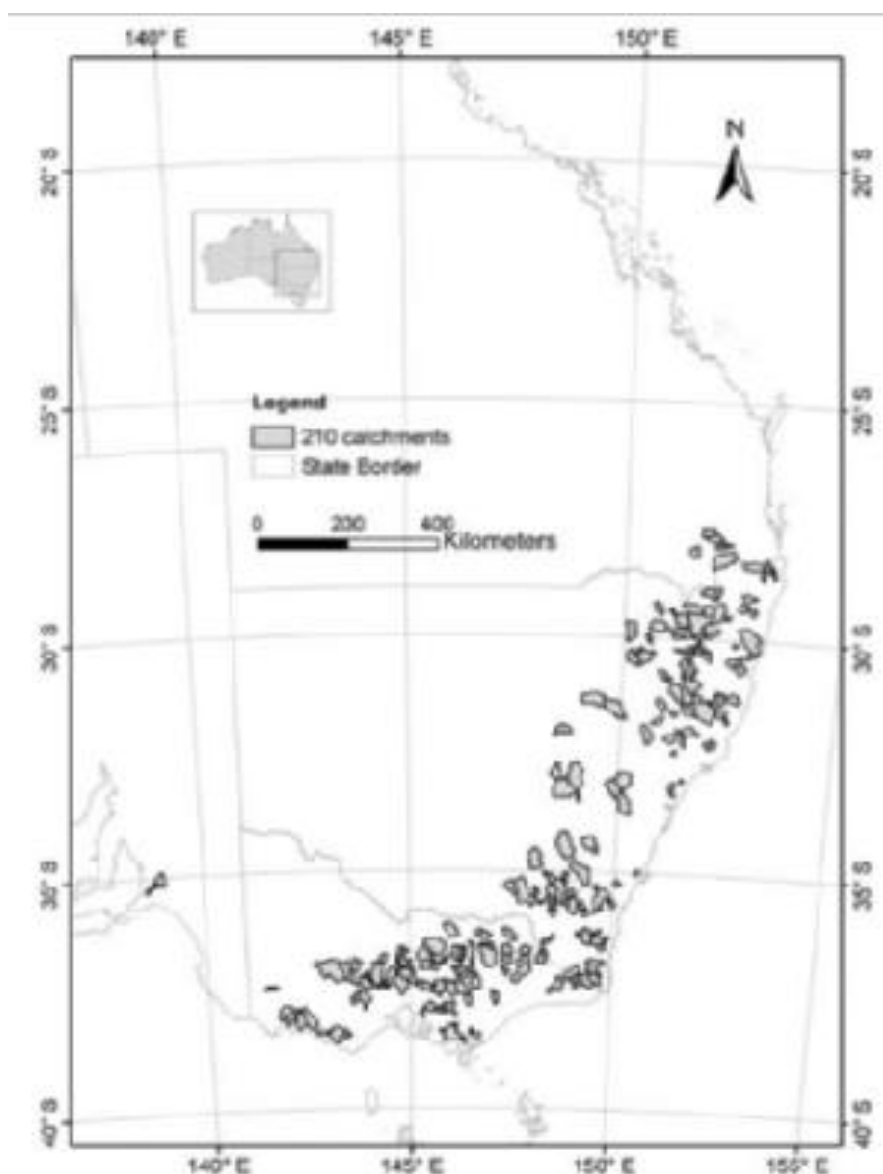
Young (2006) ve své studii porovnal výkonnost regrese a fyzikální podobnosti na souboru 260 povodí ve Spojeném království na základě simulační účinnosti modelu IHACRES (8 kalibrovaných parametrů). Byla zde použita tři kritéria. Nash-Sutcliffeův koeficient, BIAS (relativní objemová chyba) a střední součet rozdílů čtverců (squared differences) mezi pozorovanými odtoky a simulovanými odtoky nad pozorovanými (které jsou umístěny v nejnižší třetině pozorovaného rozdělovacího odtoku), které byly agregovány. V rámci přístupu fyzikální podobnosti byla použita metodika na základě ROI a v rámci regrese se využila vícerozměrná regresní analýza.



Obr. 3: Lokace 260 povodí použitých ve studii Young (2006), levý obrázek ukazuje povodí, která byla použita pro kalibraci regionalizačního postupu, pravý obrázek ukazuje povodí, která byla použita pro validaci regionalizačního postupu (odlišné značky povodí souvisí s dostupností a kvalitou klimatologických dat pro každé povodí).

Zhang a Chiew (2009) ve své studii porovnali výkonnost prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti na souboru 210 povodí v Austrálii viz (obr. 4) na základě simulační účinnosti dvou modelů: Xinanjiang (14 resp. 12 kalibrovaných parametrů) a SIMHYD (10 kalibrovaných parametrů) v původních verzích (potenciální evaporace řešena dle Penmana a Monteitha) a v revidovaných verzích (potenciální evaporace řešena dle Penmana a Monteitha na základě MODIS-LAY). Pro hodnocení simulační účinnosti modelu byla použita kritéria Nash-Sutcliffeův koeficient a WBE (Water Balance Error) - relativní objemová chyba. Ve studii byl použit single donor a také multiple donor přístup v kombinaci s průměrováním výstupů. Bylo zde zvažováno osm charakteristik povodí pro přístup fyzické podobnosti: plocha povodí, index aridity, průměrná nadmořská výška povodí, průměrný sklon povodí, délka hlavního toku na povodí, využitelná vodní kapacita a střední hloubka půdy. Pro

vyhledávání donorů pro přístup prostorové blízkosti byla použita Euklidovskou vzdálenost mezi těžišti povodí. Pro fyzikální podobnost byla použita metoda RAS.



Obr. 4: Lokace 210 povodí použitých ve studii Zhang a Chiew (2009).

Kokkonen a kol. (2003) ve své studii zkoumali výkonnost regrese a fyzikální podobnosti na souboru 13 povodí v USA na povodí Coweeta (viz obr. 5) na základě simulační účinnosti modelu IHACRES (6 kalibrovaných parametrů). Simulační účinnost modelu byla v kalibrační i regionalizační fázi řešena na základě Nash-Sutcliffeova kritéria. Ve studii byly použity geomorfologické charakteristiky povodí: hustota říční sítě, plocha povodí, průměrný

sklon povodí a další. Ve studii byly použity tři různé metody regionalizace. První z nich byla globální průměrovací metoda (ta předpokládala, že všechna povodí v regionu jsou podobná svým hydrologickým chováním a že všechny rozdíly v hodnotách parametrů vyplývají z náhodných faktorů). Dvě z metod, které byly testovány, byly založeny na regresi (klasická regrese a regrese s ohledem na korelaci mezi parametry modelu). Poslední metoda regionalizace byla založena na přenosu celé parametrické sady z hydrologicky nejpodobnějšího povodí. Podobnost zde byla řešena pomocí podobnosti v nadmořské výšce uzávěrového profilu nepozorovaného povodí a pozorovaného povodí.



Obr. 5: Mapa povodí Coweeta. Kokkonen a kol., (2003)

3.2 Souhrnné výsledky na základě vybraných studií

Výsledky porovnání vybraných studií jsou prezentovány v tab. 3, 4 a na obr. 6. V tabulce 3 jsou prezentovány výsledky jednotlivých studií formou mediánu Nash-Sutcliffeova koeficientu v kalibraci i při regionalizaci. U výsledků studie Oudin a kol. (2008) jsou uvedeny výsledky pro průměrování výstupů (první číslo) a průměrování parametrů (druhé číslo) jak pro fyzikální podobnost, tak i pro prostorovou blízkost. Výsledky kalibrace i fyzikální podobnosti studie Kokkonen a kol. (2003) byly odhadnuty na základě grafu prezentujícího celkové výsledky, které studie nabízela, a výsledek regrese byl vypočítán průměr z obou testovaných regresních metod. Ze studií Parajka a kol. (2005) a Merz a Blöschl (2004) byly všechny výsledné hodnoty vypočítány průměrem z každé metody. Výsledná hodnota přístupu fyzikální podobnosti ve studii Young (2006) byla také odhadnuta z grafu, který studie obsahovala. Z důvodu, že se u některých výsledků jedná o odhad z grafu, nemusejí být prezentovaná čísla zcela přesná.

studie	model	kalibrace	regrese	fyzikální podobnost	prostorová blízkost
Oudin a kol. (2008)	GR4J	0,82	0,68	0,71/0,71	0,74/0,73
	TOPMO	0,78	0,55	0,69/0,60	0,71/0,65
Zhang a Chiew (2009)	SIMHID	0,79	-	0,47	0,48
	Xinanjiang	0,78	-	0,5	0,51
Parajka a kol. (2005)	HBV	0,72	0,62	0,65	0,66
Merz a Blöschl (2004)	HBV	0,67	0,52	-	0,56
Young (2006)	IHACRES	0,71	0,70	0,40	-
Kokkonen a kol. (2003)	IHACRES	0,88	0,71	0,85	-

Tab. 3: Simulační účinnosti použitých modelů v kalibrační a regionalizační fázi hodnocené mediánem Nash-Sutcliffeova koeficientu pro vybrané studie.

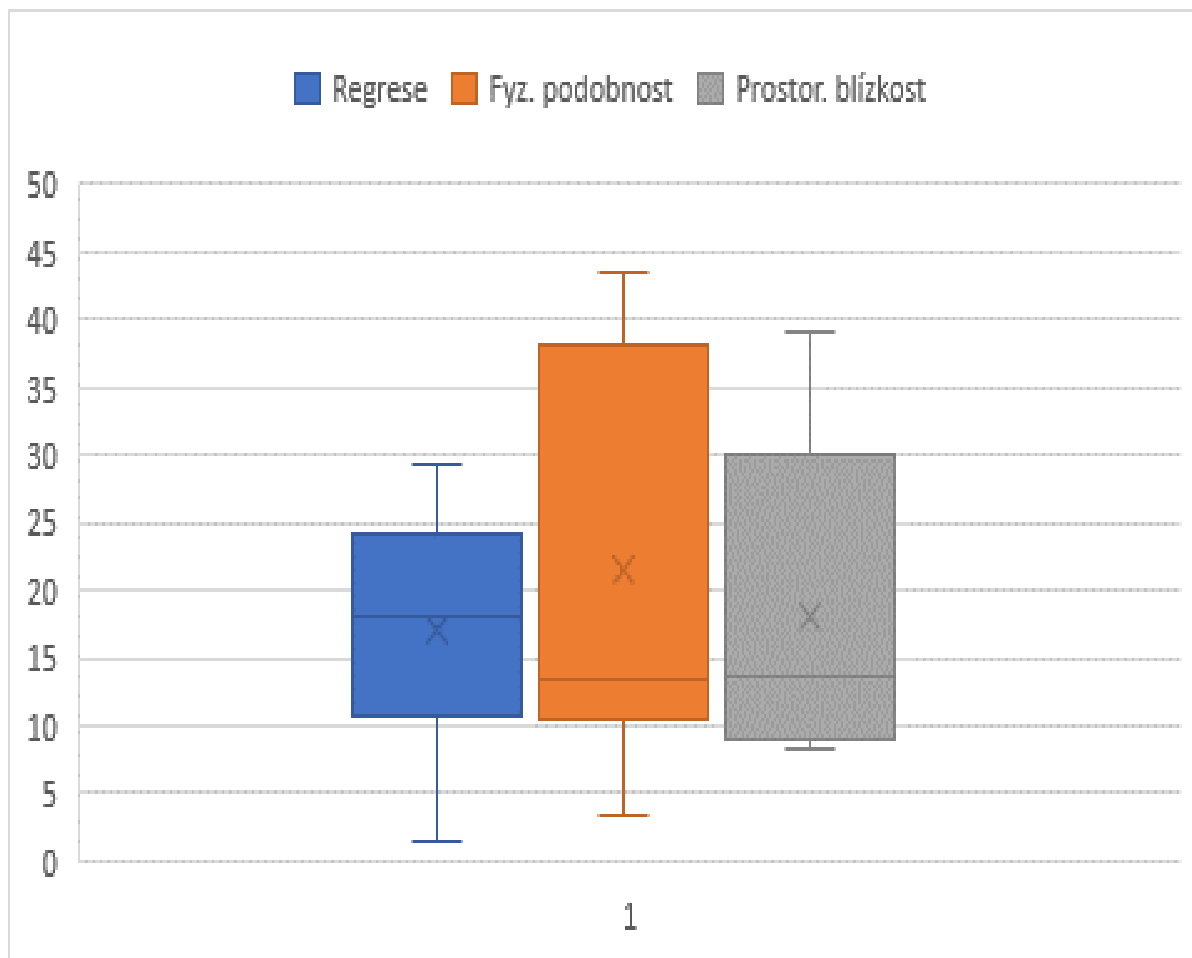
V tabulce 4 jsou prezentovány relativní poklesy simulační účinnosti, které byly vypočteny na základě výsledků prezentovaných v tab. 3. Výpočet relativního poklesu byl řešen na základě následující rovnice:

$$Rel. pokles = 100 - 100 \cdot \frac{NSE_{reg}}{NSE_{kal}} \quad (2.0)$$

kde NSE_{reg} je medián NSE regionalizační metody a NSE_{kal} je medián NSE z kalibrační fáze.

studie	model	regrese	fyzikální podobnost	prostorová blízkost
Oudin a kol. (2008)	GR4J	17,1 %	13,4 % / 13,4 %	9,8 % / 11,0 %
	TOPMO	29,5 %	11,5 % / 23,1 %	9,0 % / 16,7 %
Zhang a Chiew (2009)	SIMHID	-	40,5 %	39,2 %
	Xinanjiang	-	35,9 %	34,6 %
Parajka a kol. (2005)	HBV	13,9 %	9,7 %	8,3 %
Merz a Blöschl (2004)	HBV	22,4 %	-	16,4 %
Young (2006)	IHACRES	1,4 %	43,7 %	-
Kokkonen a kol. (2003)	IHACRES	19,3 %	3,4 %	-

Tab 4: Relativní pokles simulační účinnosti při přechodu z kalibrační fáze do fáze zregionalizace.



Obr. 6: Relativní pokles simulační účinnosti modelu při přechodu z kalibrační fáze do fáze regionalizace (v krabicovém grafu je medián znázorněn vodorovnou čarou, průměr křížkem, horní a dolní kvartil jsou vymezeny horní a dolní stranou krabice a vousy zobrazují minimum a maximum).

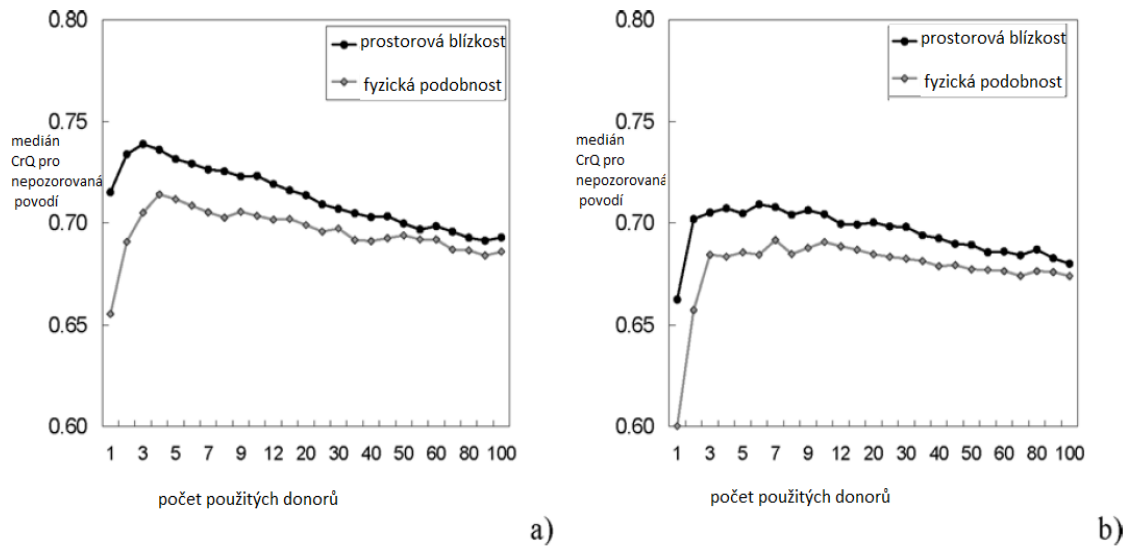
Z tabulky 4 a obrázku 6 je patrné, že dle mediánu je relativní pokles simulační účinnosti při přechodu z kalibrační fáze do fáze regionalizační nejmenší u přístupu fyzikální podobnosti (13,4 %). Naopak nejvyšší je u regresního přístupu (18,15 %). Ačkoliv u přístupu prostorové blízkosti je medián relativního poklesu simulační účinnosti nepatrně vyšší (13,65 %) než u přístupu fyzikální podobnosti, přesto se, dle obr. 6, jeví tento přístup jako lepší (menší mezikvartilové rozpětí, nižší průměr, nižší maximum). Nejvýraznější relativní poklesy simulační účinnosti byly zaznamenány u studie Zhang a Chiew (2009), naopak nejméně výrazné ve studii Parajka a kol. (2005).

Výsledky ukazují určitou souvislost mezi simulační účinností v regionalizační fázi a počtem povodí v souboru. Při vyšším počtu povodí v souboru byl častěji zaznamenán menší relativní pokles simulační účinnosti, viz studie Parajka a kol. (2005) a Oudin a kol. (2008). Naopak, u studií Kokkonen a kol. (2003), Young (2006) a Zhang a Chiew (2009) byly poklesy v simulační účinnosti vyšší nebo více rozkolísané.

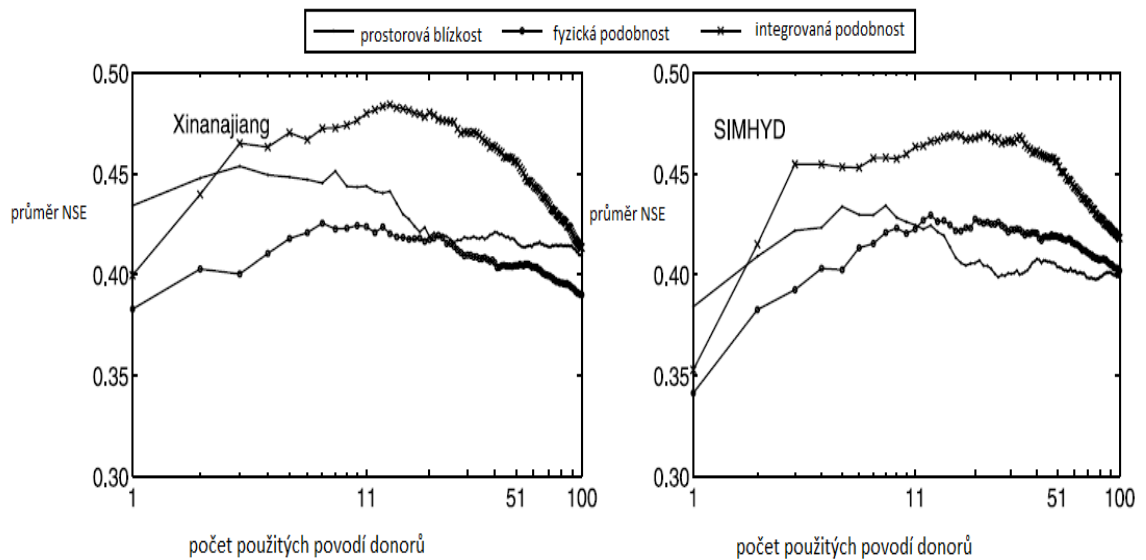
Výsledky prezentovaných studií ukazují, že pro přístup fyzikální podobnosti je jednoznačně lepší posuzovat podobnost na základě charakteristik povodí z více kategorií. Např. ze studie Oudin a kol. (2008) je patrné, že optimální kombinace by měly obsahovat geomorfologické a klimatické charakteristiky doplněné o informaci o vegetačním pokryvu (medián nadmořské výšky, průměrný sklon povodí, index aridity, relativní zastoupení lesních porostů na povodí). Podobné výsledky prezentovali i Parajka a kol. (2005).

Z hlediska porovnání metod průměrování parametrů a průměrování výstupů je ze studie Oudin a kol. (2008) patrné, že průměrování výstupů vede k lepším výsledkům než metoda průměrování parametrů. Velikost rozdílu mezi oběma metodami je, dle výsledků této studie, závislá hlavně na struktuře použitých modelů.

Na základě studií Oudin a kol. (2008), Zhang a Chiew (2009), Parajka a kol. (2005), Merz a Blöschl (2004) je zřejmé, že v rámci přístupů fyzikální podobnosti i prostorové blízkosti vede multiple donor k lepším simulačním výsledkům než single donor přístup. Toto je patrné z obr. 7 ze studie Oudin a kol. (2008) a obr. 8 ze studie Zhang a Chiew (2009), kdy rozdíl v simulační účinnosti činí v mediánu 0,02 až 0,10 v závislosti na regionalizačním přístupu a použitém modelu. Z obou obr. je dále patrné, že optimální počet donorů se může výrazněji lišit mezi jednotlivými přístupy a použitými modely

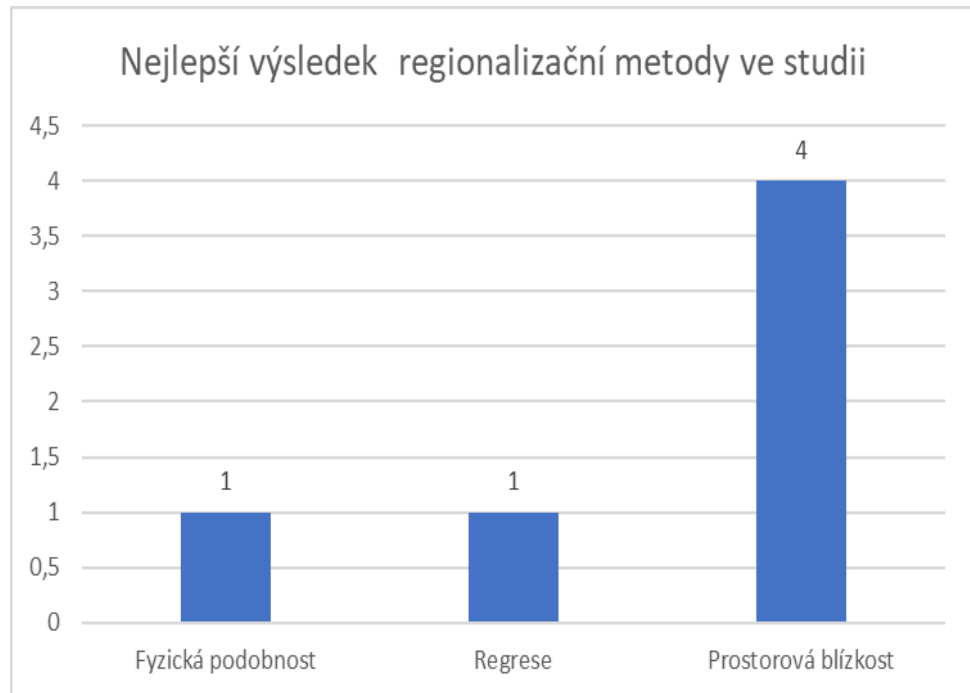


Obr. 7: Změna mediánu NSE (data transformována druhou odmocninou) v závislosti na počtu použitých donorů pro přístup fyzikální podobnosti a prostorové blízkosti pro model GR4J (a) a TOPMO (b) ze studie Oudin a kol. (2008).



Obr. 8: Změna průměrné hodnoty NSE v závislosti na počtu použitých donorů pro přístup fyzikální podobnosti, prostorové blízkosti a integrované podobnosti pro model Xinanjiang (vlevo) a SIMHYD (vpravo) ze studie Zhang a Chiew (2009).

3.2.1 Nejlepší výsledek regionalizační metody ve studii



Obr. 9: Početní zastoupení nejlepšího výsledku regionalizace v jednotlivých studiích

Ačkoliv byl přístup prostorové blízkosti zahrnut v nejméně porovnávaných studiích (4), tak dosáhl nejlepších výsledků ve všech regionalizačních studiích, ve kterých byl zahrnut. Regrese a fyzická podobnost měly shodné zastoupení v pěti regionalizačních studiích, nejlepší naměřený výsledek dosáhly obě metody regionalizace pouze v jedné studii, viz (obr. 9).

4 Diskuze

Dle výsledků prezentovaných v tab. 3, 4 a na obr. 6 je patrné, že přístupy fyzikální podobnosti a prostorové blízkosti vedou nižším relativním poklesům v simulační účinnosti modelu při přechodu z kalibrační fáze do fáze regionalizace oproti regresnímu přístupu.

Důvody, proč regresní přístup vede k neuspokojivým výsledkům, mohou být následující. Prvním může být chybný předpoklad lineární závislosti mezi parametry modelu a charakteristikami povodí a tedy i volba lineární regrese jako regionalizačního přístupu. Na tento problém poukázal ve své studii Heuvelmans a kol. (2005). Druhým důvodem může být obecná neexistence vztahu mezi parametry modelu a zvolenými charakteristikami povodí, což vede k tomu, že odvozené rovnice mohou mít velmi slabou prediktivní sílu (viz prezentované korelace mezi parametry modelu a charakteristikami povodí ve studii Oudin a kol. (2008)). Zejména druhý prezentovaný důvod je dále negativně ovlivňován parametrickou ekvifinalitou. Třetí možné vysvětlení můžeme spojit s využitím parametrických sad špatně modelovaných povodí při odvození regresních rovnic, kdy parametrické sady takových povodí mohou negativně ovlivnit hodnoty regresních koeficientů zvláště v případě lokální regrese (Oudin a kol., 2008).

Výsledky studií dále ukazují srovnatelné poklesy simulační účinnosti u přístupů prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti. Tento výsledek můžeme spojit s předpokladem, že geograficky blízká povodí mohou být skutečně v mnoha případech i podobná i dle charakteristik povodí (klimatické charakteristiky, a dále i ty charakteristiky, které klima zásadně ovlivňuje - vegetační kryt a některé půdní charakteristiky), které nejvýrazněji ovlivňují dynamiku celkového odtoku z povodí.

Porovnáme-li výsledky přístupu prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti, pak příčiny, proč je přístup prostorové blízkosti efektivnější, leží jednak ve velké hustotě pozorovaných povodí (viz studie Oudin a kol. (2008), Parajka a kol. (2005) nebo Zhang a Chiew (2009)) a dále v malém počtu použitých charakteristik povodí. Čím hustší síť povodí je použita, tím je pravděpodobnější, že každé povodí v souboru bude mít i několik potenciálních donorů s podobným hydrologickým chováním. Naproti tomu, při použití řídké sítě povodí hrozí, že geograficky nejbližší povodí mohou být velmi vzdálená, a tedy i velmi

hydrologicky odlišná (např. vlivem odlišného klimatu). V případě menší kolekce charakteristik povodí (viz studie Oudin a kol. (2008), nebo Zhang a Chiew (2009)) hrozí, že tato nemusí obsahovat klíčové charakteristiky ovlivňující hydrologické chování povodí. Navíc lze předpokládat, že každé povodí je jedinečné, a tedy klíčové charakteristiky ovlivňující dynamiku celkového odtoku se mohou mezi povodími lišit. Identifikované optimální sady charakteristik pak mohou být skutečně optimální jen pro určitou (i když většinovou) část souboru povodí.

Výsledky studií dále ukazují, že pro přístupy založené na prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti je lepší multiple donor než single donor. Tento výsledek lze pravděpodobně spojit s tím, že větší počet donorů umožňuje vyhladit chyby v simulaci odtoku spojené s jednotlivými donory (Oudin a kol, 2008). Výběr pouze jednoho donoru byl tak pro účely regionalizace přímo škodlivý.

Dalším výsledkem je, že průměrování výstupů je lepší metodou odhadu celkového odtoku na nepozorovaném povodí než průměrování parametrů (viz studie Oudin a kol. (2008), nebo Zhang a Chiew (2009)). Metoda průměrování parametrů uvažuje každý parametr jako jedinečný a ignoruje tak možné a nevyhnutelné interakce mezi parametry. Studie ukázaly, že průměrování výstupů může snížit nejistotu v předpovědích odtoku na nepozorovaných povodích (Oudin a kol, 2008; Zhang a Chiew, 2009).

Ze studií dále vyplývá, že kombinace charakteristik z více kategorií je lepším měřítkem podobnosti povodí než výběr pouze z jedné kategorie charakteristik. Důležitým poznatkem je skutečnost, že absence charakteristik, které jsou klíčové, může vést k selhání přístupu fyzikální podobnosti povodí.

Tabulky 3 a 4 ukázaly značné rozdíly mezi jednotlivými studii. Tyto rozdíly lze pravděpodobně vysvětlit několika následujícími důvody. Jako důležitý faktor se ukázalo, že větší počet povodí poskytuje mnohem lepší a průkaznější výsledky než studie, které byly založeny na relativně malých souborech povodí. Studie Oudina a kol. (2008) a Parajky a kol. (2005) s vyšším počtem povodí dosahují jiných výsledků než studie a Younga (2006) a Kokkonena a kol. (2003) s nižším počtem zkoumaných povodí. Jedním z důvodů, proč to tak je, může být to, že výsledky na menším vzorku povodí mohou být více ovlivněny několika

málo povodími, jejichž hydrologické chování je více rozdílné oproti zbytku souboru povodí. U takovýchto povodí se velice špatně hledají vhodné donory, protože tyto nemusejí být skutečně hydrologicky podobné. Tato skutečnost tedy poté může vést k nižším průměrným účinnostem pro celý soubor povodí. Ve studii Oudin a kol. (2008) se ale také připouští, že v rozsáhlém a mnohem rozmanitějším souboru povodí nejsou charakteristiky povodí natolik relevantní, aby vysvětlily chování v povodí.

Dalším důvodem, proč uvedené studie měly často velice rozdílné výsledky, může být geografická lokace použitých souborů povodí. Studie byly prováděny v různých regionech a tento faktor tak může být jedním ze zásadních důvodů značné rozdílnosti zkoumaných výsledků. Oudin a kol. (2008) - Francie, Parajka a kol. (2005) a Merz a Blöschl (2004) - Rakousko, Young (2006) – Velká Británie, Zhang a Chiew (2009) – Austrálie a Kokkonen a kol. (2003) – USA. Například Oudin a kol. (2008) ve své studii použili taková povodí, kde sníh neměl nějaký větší vliv na odtokový proces. Naopak Parajka a kol. (2005) ve své studii použil i Alpská povodí a sníh zde měl o mnoho výraznější vliv na odtokový proces. Z tohoto důvodu navíc musel být ve studii Parajka a kol. (2005) v modelu řešen sněhový modul, což mělo za následek větší parametrickou nejistotu.

Dalším důvodem mohla být dostupnost použitých charakteristik povodí, která se mezi studii velmi liší, například ve studii Kokkonen a kol. (2003) byly vynechány charakteristiky související s geologií, půdními charakteristikami, vegetací a klimatem. Tento důvod mohl výrazně ovlivnit zejména přístup fyzikální podobnosti povodí, kdy v některých studiích nebyly použity charakteristiky významně ovlivňující hydrologické chování povodí. To mohlo vést u tohoto přístupu k nižším simulačním účinnostem.

Jako další důvod rozdílnosti výsledků může být skutečnost, že různé studie využívají různé modely: Oudin a kol. (2008) - GR4J a TOPMO, Zhang a Chiew (2009) - SIMHID a Xinanjiang, Parajka a kol. (2005) a Merz a Blöschl (2004) – HBV, Young (2006) a Kokkonen a kol. (2003) – IHACRES. Použité modely se liší strukturou a počtem parametrů, což má vliv na simulační účinnost. Velký vliv zde má také citlivost jednotlivých parametrů na změnu a parametrická ekvifinalita.

Posledním důvodem rozdílnosti výsledků, mohou být použité metodologie v každém typu regionalizačního přístupu. Ty závisí na řadě nevyhnutelných libovolných rozhodnutí autorů, které mohou ovlivnit výkonnost regionalizovaného modelu např. volba počtu donorů, metoda vyhledávání donorů (RAS vers. index podobnosti), nebo použití špatně modelovaných povodí jako donorů.

5 Závěr

Tato bakalářská práce měla za cíl na základě dostupné literatury provést popis a také porovnání tří nejčastěji využívaných regionalizačních přístupů určených k odhadu zájmových hydrologických charakteristik na nepozorovaných povodích a na základě výsledků několika odborných publikací provést zhodnocení popsanych regionalizačních přístupů z hlediska jejich efektivity.

Porovnáním šesti vybraných studií bylo zjištěno, že nejmenší pokles simulační účinnosti je při přechodu z kalibrační fáze do fáze regionalizační v mediánu u regionalizačních přístupů fyzikální podobnosti (13,4 %) a prostorové blízkosti (13,65 %). Největší pokles má v mediánu regionalizační přístup regrese (18,15 %). Bylo však nutné přihlídnout ke skutečnosti, že přístup prostorové blízkosti zaznamenal zcela nejlepší výsledky ve všech vybraných studiích, ve kterých byl použit.

Diference mezi studii mohou mít více faktorů například: velikost povodí (větší počet povodí poskytuje mnohem lepší a průkaznější výsledky, než studie s malým počtem povodí), geografická lokace (v některých studiích byla přítomna povodí se sněhovým režimem a naopak), dostupnost charakteristik (v některých lokalitách, nejsou žádná či velice špatná data určitých charakteristik), hustota povodí, využití různých modelů (každý model má trochu jiné vlastnosti) a také libovolné rozhodnutí autorů.

Porovnání výsledků však naznačuje, že odpověď na otázku, která metoda regionalizace je nejvhodnější za každých podmínek, je na dalším a delším zkoumání a usilovné práci odborníku na hydrologii v oblasti regionalizace. Téma regionalizace tedy zcela jistě ještě nevyčerpalo všechny své neznámé a jsou na místě další snahy a pokusy o odkrývání a nalézání ideální regionalizační metody, jejího modelu a vybraných charakteristik a je tedy stále ještě dosti značný prostor pro pokrok v oblasti modelování nepozorovaných povodí.

Vyhlídkou na možná zlepšení a zpřesnění do budoucnosti, kdy by mohlo být dosaženo dosti značného pokroku na tomto vědeckém poli, je zjištění, jak používat různé regionalizační přístupy a to způsobem, který by byl komplementární. Tedy použitím tzv.

multiregionalizačního přístupu, o kterém se někteří odborníci na hydrologii ve svých studiích zmiňují např. studie Oudin a kol. (2008). Multiregionalizační metoda by mohla díky spojení více regionalizačních metod využít jejich jedinečných výhod a dosáhnout tak zcela unikátních a možná i výrazně rozdílných výsledků, než byly získány doposud. Možnost použití multiregionalizačního přístupu je zatím spíše jen teoretické přání odborníků na tuto problematiku. Je však zapotřebí dalšího výzkumu, aby bylo možné určit, která pravidla by byla nutná k výběru a priori multiregionalizačního přístupu, který by přinesl nejlepší výkon modelu. Tato pravidla však nejsou zatím zcela jasná. Rozšíření možnosti průměrování výstupů modelu by však mohlo být kombinací simulací odtoku získaných přístupy prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti jako nové varianty regionalizačních schémat. Když se podíváme, kam se regionalizace se svým poznáním za posledních několik desítek let pohnula, mohou být vyhlídky do příštích desetiletí této vědní disciplíny i multiregionalizačního přístupu jistě optimistické.

6 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.
- **BABOVIC V., BOJKOW V. 2001:** Runoff Modeling with Genetic Programming and Artificial Neural Networks. D2K Technical Report D2K TR 0401-1.
- **BARDOSSY A. 2007:** Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 703–710.
- **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.
- **COOK R. D., WEISBERG S. 1982:** Criticism and Influence Analysis in Regression, *Sociological Methodology*, pp. 313-361 in S. Leinhardt (ed.) *Sociological Methodology*. San Francisco: Jossey-Bass
- **DRECOURT J.P. 1999:** Application of natural networks and genetic programming to rainfall runoff modeling. D2K Technical report 0699-1-1. Danish Hydraulic Institute Denmark
- **FERNANDEZ W., VOGEL R., SANKARASUBRAMANIAN, A. 2000:** Regional Calibration of a Watershed Model. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*. 45. 10.1080/02626660009492371.

- **FREEDMAN D. A. 2009:** Statistical Models: Theory and Practice. Cambridge University Press. ISBN 978-1-139-47731-4.
- **GOTTSCHALK L., JENSEN J. L., LUNDQUIST D., SOLANTIE R., TOLLAN A. 1979:** Hydrologic regions in the Nordic countries, Nord. Hydrol., 10, 273–286
- **GOTTSCHALK L. 1985:** Hydrological regionalization of Sweden, Hydrol. Sci., 30, 65–83
- **HE Y., BÁRDOSSY A., ZEHE E.:** 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.
- **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
- **CHMELOVÁ P. R., FRAJER J. 2013:** Základy fyzické geografie 1: Hydrologie – 978-80-244-3843-6 Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013, 1. vyd. 142 s.
- **KLEEBERG H. B. 1992:** Regionalisierung in der Hydrologie. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung, Weinheim, Basel
- **KOKKONEN T., JAKEMAN A. J., YOUNG P. C., KOIVUSALO H. J. 2003:** Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. Hydrol. Process., 17(11), 2219–2238.

- **LUKASOVÁ A., ŠARMANOVÁ J. 1985:** Metody shlukové analýzy. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 210 s
- **MAGETTE W. L., SHANHOL V.O. 1976:** Estimating selected parameters for the Kentucky watershed model from watershed characteristics, *Water Resour. Res.*, 12, 472–476
- **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
- **MERZ R., BLÖSCHL G. 2004:** Regionalization of catchment model parameters. *J. Hydrol.*, 287(1–4), 95–123
- **MILLER D.A., WHITE R.A. 1998:** A conterminous United States multi layer soil characteristics data set for regional climate and hydrology modeling. *Earth Interact.* 2 (2), 1–26.
- **NASH J. E., SUTCLIFFE J. V. 1970:** River flow forecasting through conceptual models Part one: A discussion of principles., *J. Hydrol.*, 27, 282–290
- **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.
- **PARDÉ M. 1933:** Fleuves et rivières. Revue de Géographie Alpine Année 21-4 pp. 851-854
- **POST D. A., JAKEMAN A. J. 1999:** Ecological Modelling - Predicting the daily streamflow of ungauged catchments in SE Australia by regionalising the parameters of a lumped conceptual rainfall-runoff model
- **RAZAVI T., COULIBALY P. 2012:** Performance of Potentially Universal Runoff Signatures for the Classification of Ontario Basins
- **RAZAVI T. 2014:** Streamflow Estimation in Ungauged Basins Using Regionalization Methods. Department of Civil Engineering and School of Geography and Earth Sciences. McMaster University
- **RIGGS H. C. 1973:** Regional analyses of streamflow characteristics. Techniques of Water Resources Investigations, vol. Book 4, Chapter B3, U.S. Geological Survey, Washington, DC
- **RUDA A. 2014:** Hydrografie vodních toků Brno: Katedra geografie, Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity, (online) [cit. 2020.02.16], dostupné z <https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/pages/08_hydrografie.html>.
- **SEFTON C. E. M., HOWART S. M. 1998:** Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. J. Hydrol., 211(1–4), 1–16
- **SIVAPALAN M. 2003:** Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology, Hydrological Processes, 17(15), 3163-3170

- **VANDEWIELE G. L., ELIAS A. 1995:** Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalisation, *J. Hydrol.*, 170, 277–291
- **VIRRANTAUS K. 2016:** Clustering and Regionalization (online) [cit. 2020.02.19], dostupné z <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/221241/mod_folder/content/0/Lecture_2_SDM_2016.pdf?forcedownload=1>.
- **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, 2005.
- **WAGENER T., GUPTA H. V., WHEATER H. S. 2004:** Rainfall-runoff Modelling In Gauged And Ungauged Catchments World Scientific, DOI: 10.1142/9781860945397 Imperial College Press , 169-240
- **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
- **YADAV M., WAGENER T., GUPTA H. V. 2007:** Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins *Adv. Water Resour.*, 30(8), 1756–1774
- **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

