Česká Zemědělská Univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí

Regionalizační přístup geografické blízkosti povodí – vyhodnocení základního předpokladu tohoto přístupu

Diplomová práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

Vypracovala:

Bc. Jana Liščáková

Praha 2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jana Liščáková

Regionální environmentální správa

Název práce

Regionalizační přístup geografické blízkosti povodí – vyhodnocení základního předpokladu tohoto přístupu

Název anglicky

Geographical proximity approach – evaluation of the basic premise of this approach

---

Cíle práce

Cílem práce bude ověřit platnost základního předpokladu regionalizačního přístupu geografické blízkosti povodí při predikci odtoku na nepozorovaných povodích.

Metodika

1) literární rešerše na téma regionalizační metody s podrobnějším zaměřením na přístup geografické blízkosti povodí,

2) sestavení kolekce povodí a vstupních dat, výběr srážko-odtokového modelu,

3) kalibrace a verifikace srážko-odtokového modelu,

4) návrh experimentu pro posouzení platnosti předpokladu regionalizačního přístupu geografické blízkosti povodí a vyhodnocení výsledků,

5) diskuze prezentovaných výsledků.

Doporučený rozsah práce

50-80 stran

Klíčová slova

nepozorované povodí, hydrologická podobnost,

Doporučené zdroje informací

Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H., 2013: Runoff Prediction in Ungauged Basins, Synthesis across Processes, Places and Scales.Cambrige University Press, ISBN: 978-1-107-02818-0.

He, Y., Bárdossy, A., Zehe, E., 2011: A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. Hydrol. Earth. Syst. Sci., 15, 3539-3553.

Lebecherel, L., Andréassian, V., Perrin, Ch., 2016: On evaluating the robustness of spatial-proximity-based regionalization methods. Journal of Hydrology, 539, 196-203.

Patil, S. Stieglitz, M., 2012: Controls on hydrologic similarity: role of nearby gauged catchments for prediction at an ungauged catchment. Hydrol. Earth. Syst. Sci., 16, 551-562.

Vandewiele, G. L., Elias, A, 1995: Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. Journal of Hydrology, 170, 277-291.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2023

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 2. 2. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Regoinalizační přístup geografické blízkosti povodí – vyhodnocení základního předpokladu tohoto přístupu vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové 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. pod vedením Ing. Martina Heřmanovského, Ph.D., a že jsem uvedla všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne 30.3. 2023

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce Ing. Martinu Heřmanovskému, PH.D., za podněty, rady, připomínky a za čas, který mi při práci věnoval.

Abstrakt

Predikce odtoku na nepozorovaných povodích vyžaduje přenos hydrologických charakteristik z povodí, pro které jsou dostupné časové řady dat. Metody přenosu hydrologických charakteristik z donoru (potenciální dárce) na akceptor (nepozorované povodí) na základě podobnosti nazýváme regionalizací. Jednou z regionalizačních metod je prostorová blízkost. Tato metoda je založená na předpokladu, že geografická vzdálenost mezi povodími je vhodným ukazatelem hydrologické podobnosti povodí. Tato diplomová práce se zabývá vyhodnocením základního předpokladu tohoto přístupu, tj. zda jsou nejbližší povodí skutečně hydrologickými donory a jak ovlivňuje hustota potenciálních donorů nalezení hydrologických donorů. Jako vstupní data bylo vybráno 200 povodí situovaných v USA z projektu MOPEX. Použit byl čtyřparametrový, konceptuální, srážko-odtokový model GR4J. Jakmile byl model GR4J nakalibrován na všech 200 povodích, bylo provedeno testování přenosu optimálních parametrických sad z donorů na akceptory a spočítány poklesy simulační účinnosti za účelem identifikace prahové hodnoty pro přijetí hydrologického donoru. Při prahové hodnotě 1 % platí přístup prostorové blízkosti pro 17,4 % povodí. Při prahové hodnotě 20 % platí pouze pro 35,8 % povodí. Vzdálenost mezi akceptorem a nejlepším hydrologickým donorem je více než desetinásobná v porovnání se vzdáleností mezi akceptorem a nejbližším potenciálním donorem. To, že pro většinu z povodí není geograficky nejbližší povodí jejich hydrologickým donorem, je ovlivněno nedostatečnou hustotou sítě potenciálních donorů zásadním způsobem. Pokud by byla hustota donorů v blízkosti akceptoru vyšší, existovala by větší pravděpodobnost nalezení hydrologického donoru, což by následně mohlo pozitivně ovlivnit výsledky analýzy.

Klíčová slova: nepozorované povodí, hydrologická podobnost, regionalizace, hydrologické charakteristiky

Abstract

Runoff prediction at ungauged catchments requires the transfer of hydrological characteristics from catchments for which time series data are available. Methods of transferring hydrological characteristics from the (potential) donor to the acceptor (ungauged catchment) based on similarity are called regionalization. One of the regionalization method is spatial proximity. This method is based on the assumption that the geographical distance between catchments is a suitable indicator of the hydrological similarity of catchments. The aim of this thesis is the evaluation of the basic assumption of this approach, i.e. whether the nearest catchments are hydrological donors indeed and whether the density of potential donors affects the finding of a hydrological donors. 200 catchments located in the USA from the MOPEX project were selected as input data. The four-parameter, conceptual, rainfall-runoff model GR4J was used. Once the GR4J model was calibrated on all 200 catchments, testing of optimal parameter sets from donors to acceptors was performed. Subsequently the decrease in simulation efficiency was calculated to identify a threshold value for hydrological donor acceptance. At a threshold value of 1 %, the approach of spatial proximity is valid for 17.4 % of the catchments. At a threshold of 20 %, it is only valid for 35.8 % of the catchments. The distance between the acceptor and the best hydrological donor is more than ten times farther compared to the distance between the acceptor and the nearest potential donor. The fact that for most of the basins the geographically closest basin is not their hydrological donor is affected by the insufficient density of the network of potential donors significantly. If the density of donors near the acceptors would be higher, there would be a higher probability of finding a hydrological donor. That could have a positive effect on the results of this analysis.

Keywords: ungauged catchment, hydrologic similarity, regionalization, hydrological characteristics

Obsah

1 Úvod 9

1.1 Cíle práce ... 9

2 Metody regionalizace na nepozorovaných povodích 10

2.1 Nepozorované povodí ... 10

2.2 Regionalizace a koncept podobnosti povodí ... 10

2.2.1 Metody založené na vzdálenosti ... 13

2.2.2 Regresní metody ... 17

2.3 Porovnání regionalizačních metod z hlediska jejich efektivity ... 19

3 Regionalizační přístup geografické blízkosti povodí – vyhodnocení základního předpokladu tohoto přístupu 24

3.1 Vstupní data ... 24

3.2 Popis modelu GR4J ... 27

3.3 Metodický popis případové studie ... 29

3.4 Výsledky ... 31

3.4.1 Kalibrace a validace modelu GR4J ... 31

3.4.2 Testování přenosu optimálních parametrických sad z donorů na akceptory ... 35

3.4.3 Analýza platnosti přístupu geografické vzdálenosti ... 36

3.5 Diskuze výsledků ... 47

4 Závěr 51

5 Seznam použité literatury 52

1 Úvod

Charakter povodí tvoří působení fyzikálních a klimatických faktorů, lidského faktoru a krajinný ráz. Fyzikální a klimatické faktory označujeme jako charakteristiky a povodí jsou výsledkem jejich působení v prostoru a v čase (Blöschl a Sivaplan, 1995).

Časové řady pozorovaného odtoku jsou nesmírně důležité pro mnohé praktické a ekologické účely, jako je např. alokace vody, zvládání sucha, posouzení ředění odpadních vod, návrhy protipovodňových opatření, odvodňovací opatření, určení hydroenergetického potenciálu povodí, projektování vodohospodářských staveb aj. (Blöschl et al., 2013). K predikci odtoku na povodích používáme hydrologické modely, jejichž parametry kalibrujeme na základě časových řad pozorovaného odtoku. Pokud nemáme k dispozici potřebná data, kalibrace modelu pro jeho praktické použití není možná. Povodí, bez předchozího pozorování odtoku jsou označovaná jako nepozorovaná povodí (He et al., 2011). Většina povodí na světe jsou nepozorovaná, a tak nám důležité hydrologické charakteristiky na těchto povodích zcela chybí. Nezbývá tak, než odtok na nepozorovaných povodích předvídat (Blöschl et al., 2013). Hydrologové se proto od 70. let 20. století snaží vyvinout strategie, jak odhadnout parametry modelu na nepozorovaných povodích (Oudin et al., 2008).

1.1 Cíle práce

Cílem práce je ověřit platnost základního předpokladu regionalizačního přístupu geografické blízkosti povodí při predikci odtoku na nepozorovaných povodích, zjistit, zda jsou geograficky nejbližší povodí skutečně vzájemně podobná a jak ovlivňuje nalezení hydrologického donoru hustota potenciálních donorů kolem akceptoru.

2 Metody regionalizace na nepozorovaných povodích

2.1 Nepozorované povodí

Nepozorované povodí je povodí s nedostatečnými (z hlediska množství a kvality) nebo zcela chybějícími záznamy hydrologických pozorování, neumožňujícími výpočet hydrologických proměnných ve vhodném prostorovém a časovém měřítku. Prediktivní nástroje určené pro hospodaření s vodou, např. srážko-odtokové hydrologické modely, jsou kalibrovány na základě časových řad pozorovaného odtoku. Pokud tedy neexistují dostatečné záznamy časových řad měřené proměnné potřebné ke kalibraci modelu, bude povodí klasifikováno jako nepozorované. Sledované proměnné mohou být například srážky, odtok, míra eroze, koncentrace sedimentů aj. (Sivaplan et al., 2003).

2.2 Regionalizace a koncept podobnosti povodí

Každé povodí představuje jedinečný výsledek mnoha přírodních experimentů, které vyplynuly ze stejných koevolučních procesů a principů. Koncept podobnosti činí různá místa srovnatelnými a zobecňování podobností pomáhá pochopit, jak fungují různá povodí v odlišných podmínkách (Blöschl et al., 2013). Podobnost povodí na základě klimatických vlastností v kontextu hydrologie definuje regiony na základě podobných průměrných ročních srážek, teplot, intenzity srážek aj. Pro podobnost na základě fyzikálních vlastností povodí jsou relevantní charakteristiky, které ovlivňují odtokový proces. Tento proces řídí dělení, přenos, ukládání a uvolňování vody. Podobnost se vztahuje k jedné, nebo k více z těchto funkcí. Mezi tyto charakteristiky patří např. propustnost a hloubka půd, hydraulická vodivost, typ vegetačního krytu, nadmořská výška, rozloha, sklon aj. (Blöschl et al., 2013). Pro

klasifikaci povodí jsou užitečnější indexy beroucí v úvahu nejen klimatické vlastnosti, ale spíše jejich interakce s fyzikálními vlastnostmi povodí (He et al., 2011). Obvykle se volí nějaký index, který kvantifikuje podobnost povodí z hlediska klimatu (např. průměrné roční srážky) a charakteristiky povodí (např. střední nadmořská výška). Povodí jsou poté sjednocena do oblastí s podobnými vlastnostmi. Tím rozdělíme krajinu na mozaiku jednotek, které na sebe mohou, nebo nemusí navazovat. Na základě předpokladu, že povodí, která jsou si podobná ve smyslu klimatickém a ve smyslu fyzikálních vlastností povodí, se budou chovat podobně také ve smyslu hydrologickém, můžeme přenést hydrologické charakteristiky z pozorovaného povodí na povodí nepozorované v rámci vymezeného regionu (Blöschl et al., 2013). Regionalizace je tedy proces klasifikace a seskupování povodí na základě podobnosti (Oudin et al., 2008).

Vývoj regionalizačních metod má dlouhou a bohatou historii. V tab. 1 jsou uvedeny definice regionalizace tak, jak se postupně objevovaly v literatuře. Definice se liší v závislosti na kontextu a kladou důraz na extrapolaci časových řad, nebo statistických vztahů (He at al., 2011).

Autor	Použitý termín	Definice
Riggs (1973)	Regionální analýza	Rozšíření dat v prostoru.
Gottschalk (1985)	Regionalizace	Plošná klasifikace, schopnost připojit se ke skupině na základě vybrané hydrologické charakteristiky.
Blöschl and Sivaplan (1995)	Regionalizace	Přenos informací z jednoho povodí do druhého.
Wagener and Wheater (2006)	Regionalizace, či prostorová generalizace	Vymezení statistického vztahu mezi měřitelnými charakteristikami povodí a parametry modelu a následné použití pro odhad parametrů na neměřeném povodí.
Young (2006)	Regionalizace	Související hydrologické jevy fyzikálních a klimatických vlastností povodí / regionu.
Oudin et al. (2010)	Regionalizace	Všechny metody umožňující přenos hydrologických charakteristik z pozorovaného povodí na nepozorované povodí.

Tab. 1: Definice regionalizace, tak jak se objevovala v odborné literatuře chronologicky (He et al., 2011).

V zásadě lze regionalizační metody shrnout do dvou skupin. Metody založené na vzdálenosti (prostorové a fyzikální) a regresní metody. Koncept podobnosti je základem všech regionalizačních metod (He et al., 2011). K regionalizaci se může použít také integrovaný přístup, který kombinuje jednotlivé regionalizační metody, tedy regresi, fyzickou podobnost a prostorovou blízkost (Zhang a Chiew, 2009).

2.2.1 Metody založené na vzdálenosti

Prostorová blízkost

Metoda prostorové blízkosti je založena na předpokladu, že fyzikální a klimatické charakteristiky se z geografického hlediska budou měnit postupně, a proto je geografická blízkost dobrým ukazatelem hydrologické podobnosti (He et al., 2011). Předpokládá se, že fyzikální a klimatické charakteristiky budou v rámci regionu homogenní (Li et al., 2014). Podmínkou použití je existence dostatečně husté sítě, měřící zájmové hydrologické charakteristiky (např. odtok). Přístup prostorové blízkosti patří mezi hydrology k nejpoužívanějším (Oudin et al., 2008).

K výpočtu prostorové vzdálenosti mezi těžišti povodí se nejčastěji používá euklidovská vzdálenost *d* vypočtená dle rovnice (He et al., 2011):

$$d_{t,d} = \sqrt{(x_t - x_d)^2 + (y_t - y_d)^2}$$

(R1)

Kde x_t, x_d a y_t, y_d jsou zeměpisné souřadnice těžiště cílového a dárcovského povodí.

V rámci přístupu prostorové blízkosti (i fyzické podobnosti) lze uvažovat přenos hydrologické informace (např. parametrů modelu) z jednoho nejbližšího povodí – přístup jednoho donoru, nebo z většího počtu nejbližších povodí – přístup více donorů (Zhang a Chiew, 2009; Oudin et al., 2008). V případě použití více donorů se pro odhad zájmové hydrologické veličiny, zejména parametrů modelu, využívá metoda průměrování parametrů, která je založena na následující rovnici (Oudin et al., 2008):

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

(R2)

Kde $\hat{Q}$ je průměrný denní průtok pro den *j*, *m* je počet donorů a X_i je vektor hodnot parametrů modelu pro povodí donoru *i.*

V případě odhadu celkového odtoku z nepozorovaného povodí lze při více vybraných donorech použít metodu průměrování výstupů, která je založena na následující rovnici (Oudin et al., 2008):

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

(R3)

Kde $\hat{Q}$ je průměrný denní průtok pro den *j*, *m* je počet donorů a X_i je vektor hodnot parametrů modelu povodí donoru *i*.

Výhodou metody průměrování výstupů, ve srovnání s metodou průměrování parametrů je skutečnost, že neignoruje jedinečnost parametrických sad a nevyhnutelné interakce mezi parametry (Mcintyre et al., 2005; Oudin et al., 2008). Obě uvedené metody byly porovnány ve studiích Oudin et al., (2008) a Zhang a Chiew (2009) s výsledkem, že průměrování výstupů vede k lepším výsledkům při testování regionalizačních přístupů prostorové blízkosti i fyzické podobnosti.

Další možností odhadu zájmových hydrologických charakteristik v rámci přístupu prostorové blízkosti jsou interpolační metody IDW (Inverse Distance Weihting) a kriging. Metoda IDW (Inverse Distance Weihting) je jednou z nejjednodušších metod, jak určit, zda hodnoty hydrologických charakteristik mezi prostorově blízkými povodími jsou podobné (Patil a Stieglitz, 2012). Hlavním principem této metody je, že na hodnotu jevu v neznámém místě mají větší vliv bližší známé hodnoty než hodnoty vzdálenější. Hodnota je počítána váženým aritmetickým průměrem hodnot naměřených v okolí bodu, kde váhy jsou inverzní funkcí vzdálenosti mezi interpolovaným bodem a bodem měření (Burian, 2008).

Kriging je geostatická interpolační technika, která při odhadu hodnot v neznámých oblastech bere v úvahu jak vzdálenost, tak i stupeň variace mezi známými datovými body. Kriging je podobný metodě IDW, protože přiřazuje váhy okolním naměřeným hodnotám při odvozování predikce (Paramasivam a Venkatramanan 2019). Kriging je široce využíván v hydrologii a dalších vědních disciplínách. Jedná se o techniku nejlepšího nestranného lineárního odhadu pro neznámé hodnoty prostorových a časových proměnných. Hydrologické charakteristiky jsou funkce prostoru (a času) a vykazují vysokou prostorovou variabilitu. Tato variabilita není náhodná. Obecným pravidlem je, že pokud provádíme měření ve dvou různých bodech, rozdíl v naměřených hodnotách se snižuje, pokud se dva body přibližují (Chung et al., 2019). Jak si tato metoda vedla, v porovnání s přenosem parametrů ze sousedních povodí, porovnávali ve své studii Vandewiele a Elias (1995) na 75 belgických povodích. Ve studii použili 24 variant tříparametrového konceptuálního modelu operujícího v měsíčním časovém kroku, které kalibrovali na celém souboru povodí. Na základě kalibračních výsledků byla vybrána nejlepší varianta modelu, která byla následně využita pro regionalizační účely. Parametry této varianty modelu byly pro každé povodí odhadnuty pomocí krigingu a na základě všech donorů, jejichž geografická vzdálenost byla nižší než 30 km. Odhadnuté parametrické sady byly použity při simulaci odtoku a takto získané simulace byly porovnávány s kalibračními výsledky. Výsledky studie ukázaly, že parametrické sady odhadnuté pomocí krigingu

vedly k lepším simulacím než přenos parametrických sad ze sousedních povodí. Metoda krigingu se také nevíce osvědčila ve srovnávací studii Parajka et al. (2005). Autoři studie srovnávali přístup prostorové blízkosti včetně krigingu, regresní přístup a přístup fyzické podobnosti.

Přístup prostorové blízkosti je využíván v mnoha studiích. Sousední povodí mohou být nicméně 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 prostorou blízkost neurčitým ukazatelem podobnosti (He et al., 2011).

Fyzická podobnost

Způsob a rychlost hydrologických procesů v povodí jsou v konečném důsledku určeny jeho fyzikálními vlastnostmi (Acreman a Sinclair, 1986). Přístup fyzické podobnosti je syntézou regrese a prostorové blízkosti. K přenosu hydrologické informace (např. parametrů modelu) nedochází z geograficky nejbližšího povodí, ale z povodí, které je blízké ve smyslu podobných fyzických charakteristik. Podobně jako u metody prostorové blízkosti zde existuje přístup jednoho, nebo více donorů (Oudin et al., 2008). Pokud je dárcovské povodí dostatečně podobné cílovému nepozorovanému povodí, dají se mezi nimi přenášet parametrické sady. Výhoda přenesení celé parametrické sady z dárcovského povodí na cílové povodí spočívá v tom, že není narušena její integrita (He et al., 2011). Přenos je možný za splnění dvou podmínek. První podmínkou je, že parametry získané kalibrací modelu na dárcovském povodí dobře charakterizují jeho chování. Pokud model z nějakého důvodu nezachycuje správné procesy, je zbytečné přenášet chybné parametry do cílového nepozorovaného povodí. Druhou podmínkou je, že povodí klasifikovaná na základě fyzikálně-klimatických charakteristik jako blízká, se budou chovat podobně také hydrologicky. To, že povodí mají podobné fyzikálně klimatické charakteristiky, nemusí

nutně znamenat, že se budou chovat hydrologicky stejně. Predikce odtoku na nepozorovaných povodích je tak vždy spojena se značnou mírou nejistoty (He et al., 2011).

Existují různé metody, které slouží k identifikaci skupin s podobnými vlastnostmi, jejichž výběr závisí na typu a struktuře dat. Každé klasifikační schéma vyžaduje určitou míru podobnosti mezi jednotlivými povodími. Nejčastěji používaným měřítkem podobnosti je euklidovský koeficient vzdálenosti. Použitím tohoto algoritmu může být každé dvojici povodí přiřazeno číslo, které vyjadřuje, do jaké míry se podobají na základě souboru fyzikálních charakteristik (Acreman a Sinclair, 1986). Další metodou, která slouží k vyhledání povodí s podobnými charakteristikami je metoda RAS (Rank-accumulated similarity method). Pro každou charakteristiku na nepozorovaném povodí je vypočítaná absolutní hodnota odchylky mezi stejnou charakteristikou na pozorovaných povodích. Následně se přiřadí hodnota podle velikosti odchylky. Hodnotu jedna má povodí s nejmenší odchylkou, hodnotu dvě má povodí s druhou nejmenší odchylkou atd. Toto se opakuje se všemi vybranými charakteristikami. Jako dárcovské povodí je potom vybráno to, které má nejmenší celkovou hodnotu, která je sumou dílčích hodnot (Oudin et al., 2008). Index podobnosti je další z alternativ. Tuto metodu použili ve své studii např. Parajka et al., (2005). Index podobnosti je definován jako součet absolutních rozdílů k vybraným charakteristikám měřeného povodí a cílového neměřeného povodí (Parajka et al., 2005).

2.2.2 Regresní metody

Další kategorii regionalizačních metod tvoří regresní metody. Historie regionalizace pomocí regrese začíná v 60. letech 20 století. Ranný výzkum provedl Nash (1960), který se pokusil odvodit empirické vztahy mezi jednotkovými hydrogramy a charakteristikami povodí (He et al., 2011). Regrese je metoda založená na identifikaci vztahu mezi fyzikálními charakteristikami povodí a parametry modelu, které byly získány jeho kalibrací na souboru pozorovaných povodí. Jakmile jsou vztahy

identifikovány, určí se parametry na nepozorovaném povodí na základě jeho klimatických a fyzikálních charakteristik (Oudin et al., 2008).

Dělení regresních metod dle He et al. (2011):

- Dvoukroková regrese
- Jednokroková regrese
- Sekvenční regrese

U dvoukrokové regrese se v prvním kroku kalibrují parametry modelu na souboru pozorovaných povodí a identifikují se vztahy mezi parametry modelu a fyzikálními charakteristikami povodí. Ve druhém kroku se na základě takto odvozených vztahů a fyzikálních charakteristik nepozorovaného povodí odhadne parametrická sada pro nepozorované povodí. Metoda tedy začíná maximalizací dobré shody mezi pozorovanými a simulovanými výstupy pro každé pozorované povodí a následně optimální korelací získává vztahy mezi každým parametrem a jedním, nebo více charakteristikami (He at al., 2011). Tato metoda má své nevýhody. Kalibrace modelu může vést k nejedinečným sadám parametrů, které je obtížné přiřadit a přenést na nepozorované povodí (Bárdossy, 2007). Vztahy mezi parametry modelu a charakteristikami povodí bývají často slabé a úspěch predikce na nepozorovaných povodích proto bývá limitován (He et al., 2011). Charakteristiky povodí mohou být také vysoce korelované mezi sebou a snižují spolehlivost a stabilitu regrese (Hirsch et al., 1993). Metoda dvoukrokové regrese je široce využívanou metodou při mnohých studiích v různých částech světa ve srovnání s metodou jednokrokovou a sekvenční, ačkoliv se uvádí, že sekvenční regrese funguje obecně lépe, než dvoukroková a jednokroková a poskytuje obdobně dobrý výkon (He at al., 2011).

Jednokroková regrese vychází z dvoukrokové regrese, ale kombinuje oba kroky z výše uvedené současně v jednom kroku a kalibruje model současně se všemi objektivními funkcemi (He at al., 2011).

Metoda sekvenční regrese v podstatě upravuje postup kalibrace tím, že ke kalibraci parametrů dochází postupně od nejcitlivějšího parametru k nejméně citlivému místo toho, aby se kalibrovala celá sada parametrů současně. Jakmile je identifikován regresní vztah mezi nejcitlivějším parametrem modelu a zvolenou fyzikální charakteristikou (či více charakteristikami), je využit k výpočtu nové hodnoty tohoto parametru. Dále je kalibrován druhý nejcitlivější parametr, kdy je ke kalibraci využita nová hodnota parametru získaná na základě regresní rovnice. Kalibrace a regrese pokračují, dokud není nakalibrován poslední parametr. Výhodou sekvenční regrese je, že zvyšuje identifikovatelnost parametrů (He at al., 2011).

2.3 Porovnání regionalizačních metod z hlediska jejich efektivity

Jednotlivé regionalizační metody byly aplikovány při studiích na mnohých povodích v různých regionech. Níže jsou uvedeny některé z nich.

Parajka et al. (2005) testovali čtyři skupiny regionalizačních metod na 320 povodích v Rakousku. Použili 11 parametrový model HBV (Bergström, 1976; Lindström et al., 1997), jeho simulační účinnost byla hodnocena koeficientem Nash-Sutcliffea (Nash a Sutcliffe, 1970). V první skupině regionalizačních metod byly parametrické sady vypočteny aritmetickým průměrem ze všech 320 povodí (globální průměr), alternativou byl tzv. místní průměr, kdy byly hodnoty parametrů vypočteny z hodnot parametrů pouze v okruhu 50 km od nepozorovaného povodí. Tato metoda předpokládá, že rozdílné hodnoty parametrů vznikají pouze náhodně. Druhá skupina metod byla založena na prostorové blízkosti mezi dárcovským a cílovým povodím. Sem patřila metoda single donor přístupu, kdy celá sada parametrů od jednoho dárce byla přenesena do cílového povodí na základě vzdálenosti těžišť povodí a metoda multiple donor přístupu založená na krigingu. Třetí skupinu tvořili metody regresní (vícenásobná lineární regrese, georegrese) a čtvrtou skupinu metody založené na fyzické podobnosti. Cílem čtvrté skupiny bylo najít takové dárcovské povodí, aby z něj bylo možné přenést celou sadu parametrů do zájmového ne-

měřeného povodí. Jako dárcovské povodí bylo vybráno povodí s nejmenším indexem podobnosti. Nejlepších výsledků bylo dosahováno v rámci přístupu prostorové blízkosti založené na krigingu, při kterém byly parametry regionalizovány nezávisle na sobě na základě jejich prostorové korelace. Jako druhá nejlepší byla vyhodnocena metoda fyzické podobnosti, kdy byla kompletní sada parametrů přenesena z jednoho dárcovského povodí, které bylo nejvíce podobné z hlediska použitých charakteristik povodí (single donor přístup). U ostatních metod byl pokles simulační účinnosti výraznější.

Regionalizaci prostorovou, fyzickou a regresi srovnávali na 913 francouzských povodích také Oudin et al. (2008). Použili čtyřparametrový model GR4J (Perrin et al. 2003) a šestiparametrový model TOPMO (Beven a Kirkby, 1979; Michel et al., 2003). Simulační účinnost byla hodnocena koeficientem Nash-Sutcliffea. V rámci metody prostorové regionalizace byla použita Euklidovská vzdálenost mezi těžišti povodí. Pro vyhledávání fyzicky nejpodobnějších povodí byla použita metoda RAS. Pro metodu regrese a fyzické podobnosti bylo použito 6 charakteristik pro každé z 913 povodí (průměrný sklon povodí, medián nadmořské výšky, hustota říční sítě, index aridity, zalesněnost a plocha povodí). Výsledky studie ukazují, že nejlepších výsledků dosahoval regionalizační přístup prostorové blízkosti v kombinaci s průměrováním výstupů. Ve srovnání dopadla nejhůře regrese. Všechny tři metody ovšem výrazně zaostávaly za výsledky získanými kalibrací modelu proti pozorovanému odtoku. Oudin et al. (2008) se ve své studii také zabývali otázkou, kolik donorů je potřeba k dosažení optimální účinnosti. Testovali vzrůstající množství donorů od jednoho až do sta u metody prostorové a fyzické blízkosti. Pro model GR4J byli nejefektivnější čtyři donory, zatímco model TOPMO vyžadoval sedm dárcovských povodí k dosažení optimální účinnosti. Použití pouze jednoho donoru mělo nejhorší výsledky pro obě metody regionalizace.

Li et al. (2014) porovnávali přístup prostorové blízkosti a fyzické podobnosti na osmi povodích lokalizovaných v Tibetské náhorní plošině (dále TNP) v osmi horských oblastech v povodí řeky Yarlung Tsangpo (známé také pod názvem Brahmaputra) největšího povodí v TNP. TNP je nejvyšší náhorní plošinou na světě, ležící ve výšce 4700 m n. m. a hraje výchozí roli v hydrologii a klimatu východní a jižní Asie. Nachází se zde velká řada jezer a vodních toků. Autoři studie hodnotili metodu fyzické podobnosti a prostorové blízkosti, pro kontrast byla použita také metoda náhodného výběru donoru. Ve studii byly testovány dva modely: GR4J a SIMHYD (Chiew et al., 2002) doplněné o sněhové moduly. Simulační účinnost modelů byla hodnocena koeficientem Nash-Sutcliffea. V přístupu prostorové blízkosti byla použita k vyhledávání geograficky nejbližších povodí Euklidovská vzdálenost mezi těžišti povodí a v přístupu fyzické podobnosti bylo jako dárcovské povodí vybráno povodí s nejmenším indexem podobnosti. V přístupu fyzické podobnosti bylo hodnoceno osm charakteristik (plocha povodí, index aridity, průměrná nadmořská výška povodí, průměrný sklon povodí, délka hlavního toku, relativní zastoupení lesních porostů na povodí, relativní zastoupení semi-hydromorfních a vysokohorských půd). Výsledky pro oba modely ukazují, že přístup prostorové blízkosti vede k lepším simulacím odtoku (hodnoceno kritériem Nash-Sutcliffea) než přístup fyzické podobnosti. Oba testované přístupy mají potom lepší výsledky než přístup náhodného dárce.

Merz a Blöschl (2004) porovnávali prostorovou blízkost, regresi a prostorovou blízkost v kombinaci s charakteristikami povodí, pro predikci povodňových kvantilů na 575 rakouských povodích ležících v nížinách ve výšce 200 m n. m., až po povodí v Alpách ve výšce 2500 m n. m. Průměrné roční srážky se na jednotlivých povodích pohybovali od 400 mm/rok až po 3000 mm/rok. Pro 122 z 575 povodí existovali záznamy v délce 40 let a více. Použili 11 parametrový model HBV a jako hodnotící kritérium byl použit koeficient Nash-Sutcliffea. Metoda prostorové blíz-

kosti byla založena na krigingu, regresní metoda na vícenásobné regresi a georegresi, která kombinovala prostorovou blízkost s charakteristikami povodí. Nejlepší výsledky měla metoda, která kombinovala prostorovou blízkost s charakteristikami povodí. Druhý nejlepší výkon měla metoda prostorové blízkosti a výrazně horší výsledky měla metoda založená na regresi. Dále bylo zjištěno, že všechny metody mají lepší výsledky na humidních, než na aridních povodích (Merz a Blöschl, 2004).

Mcintyre et al. (2005) ve své studii na 127 povodích ve Velké Británii srovnávali přístup fyzické podobnosti a regrese. Použili verzi pravděpodobnostního pětiparametrového modelu PDM (Moore, 1985). Charakter povodí použitých ve studii byl velmi variabilní. Jednalo se o humidní povodí s ročním úhrnem srážek 2860 mm/rok situovaných ve Skotsku až po aridní povodí s nízkým úhrnem srážek 602 mm/rok situovaných v jižní Anglii. Nadmořská výška nejníže položeného povodí byla 37,1m n. m. a nejvyšší povodí bylo ve výšce 557,2 m n. m. Rozloha povodí byla od 1km^2 do 1700 km^2, průměrná rozloha byla 248 km^2. Všechna povodí byla lokalizována v nezastavěných oblastech. Jako hodnotící kritérium byl použit koeficient Nash-Sutcliffea. V rámci fyzické podobnosti použili metodu SWA (similarity weighted averaging). Metoda SWA využívá informace z pozorovaných povodí k odhadu odtoku v nepozorovaném povodí. Nejprve se vypočítá index podobnosti mezi nepozorovaným povodím a každým z pozorovaných povodí v zájmové oblasti na základě jejich fyzikálních a hydro-klimatických vlastností. Z parametrických sad povodí, která jsou dle indexu shledána jako podobná, se vytvoří jediná sada parametrů, která se použije k predikci odtoku na nepozorovaném povodí. Díky míře podobnosti založené především na rozloze povodí, propustnosti půd a srážkách byla metoda SWA mnohem úspěšnější v predikci odtoku na nepozorovaných povodích než regrese.

Zhang a Chiew (2009) ve své studii hodnotili tři regionalizační přístupy na 210 povodích v jihovýchodní Austrálii: prostorovou blízkost, fyzickou podobnost

a metodu kombinující prostorovou blízkost s fyzickou podobností. Ve studii použili dva koncepční modely Xinanjiang (Zhao, 1992) a SIMHYD, jako hodnotící kritérium byl použit koeficient Nash-Sutcliffea. Rozdíl mezi třemi přístupy byl relativně malý. Nejlépe si vedl přístup kombinující prostorovou blízkost s dvěma charakteristikami povodí. Tento přístup měl mírně lepší výsledky než přístup prostorové blízkosti. Přístup fyzické podobnosti si vedl v jejich studii nejhůře. Ve své studii také zjistili, že metoda průměrování výstupů od více dárců (multiple donor přístup) vede k podstatně lepším výsledkům než použití jediného dárcovského povodí (single donor přístup), protože zprůměruje hodnoty při použití méně vhodného dárce. Optimální počet donorů může být odlišný v závislosti na zvoleném modelu.

Dle studie Parajky et al. (2004) metody založené na vzdálenosti fungovaly lépe než regresní přístup, přičemž přístup prostorové blízkosti založený na krigingu měl nejlepší výsledek. Tento závěr podporují také další studie např. studie Oudin et al. (2008). Existují také techniky kombinující jednotlivé regionalizační přístupy viz studie Merz a Blöschl (2004). V jejich studii měla metoda georegrese kombinující přístup prostorové blízkosti s charakteristikami povodí nejlepší výsledek. Kombinovanou metodu použili také Zhang a Chiew (2009). Také v jejich studii si vedla nejlépe metoda kombinující vzdálenost s dvěma hydrologickými charakteristikami, druhý nejlepší výsledek měl přístup prostorové blízkosti, zatímco přístup fyzické podobnosti měl nejméně uspokojivé výsledky. Přestože jednotlivé regionalizační metody byly vyzkoušené v různých regionech, neexistuje jasný závěr, za jakých podmínek jsou použitelné. To může být způsobeno tím, že výběr modelů a metod je subjektivní na základě studijních oblastí a cílů autorů. Dále existuje velká rozmanitost v povodích z hlediska geografie, klimatu, geologie, topografie atd. Za další chybí znalosti o tom, jaké charakteristiky povodí hrají dominantní roli pro stanovení parametrů modelu a konečně také výběr hodnotícího kritéria ovlivňujícího výsledek, se liší v jednotlivých studiích (Yang et al., 2018).

3 Regionalizační přístup geografické blízkosti povodí – vyhodnocení základního předpokladu tohoto přístupu

Predikce odtoku na nepozorovaných povodích vyžaduje přenos hydrologických charakteristik z povodí, pro které jsou dostupné časové řady dat. Metody přenosu hydrologických charakteristik z donoru (potenciální dárce) na akceptor (nepozorované povodí) na základě podobnosti nazýváme regionalizací. Jednou z regionalizačních metod je prostorová blízkost. Tato metoda je založená na předpokladu, že geografická vzdálenost mezi povodími je vhodným ukazatelem hydrologické podobnosti povodí (tj. geograficky bližší povodí si jsou hydrologicky více podobná, než povodí geograficky vzdálenější). Cílem této případové studie je s využitím dat z 200 povodí situovaných v USA odpovědět na následující otázky:

- Ovlivňuje hustota potenciálních donorů kolem akceptorů nalezení hydrologického donoru?
- Jsou geograficky nejbližší povodí skutečně hydrologicky vzájemně podobná?

3.1 Vstupní data

Ve studii byly použity data z projektu MOPEX (Duan et al., 2006), který obsahuje data z 360 povodí situovaných v USA. Z těchto povodí bylo vybráno 200 povodí tak, aby celkový odtok z povodí byl co nejméně ovlivněn sněhovým režimem. Vybrána byla pouze povodí s nejnižší hodnotou sněhového indexu vypočítaného podle rovnice:

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^{N} SN}{\sum_{i=1}^{N} P}$$

(R4)

kde *SN* je sněhová srážka na povodí [mm·den^{-1}] a *P* je celková srážka na povodí [mm·den^{-1}], *i = 1, .., N* je počet časových kroků měřené řady. Rozdělení celkové srážky P na sněhovou srážku a dešťovou srážku bylo provedeno na základě porovnání průměrné denní teploty T_{prum} [°C] a zvolené prahové teploty T_{prah} [°C] dle rovnic:

$$T_{prum} \geq T_{prah} \rightarrow SN = 0$$

(R5)

$$T_{prum} < T_{prah} \rightarrow SN = P$$

(R6)

Pro účely studie byla zvolena pro T_{prah} hodnota 0 °C. Pro každé z 200 povodí byla sestavena kolekce vstupních časových řad obsahující denní srážkové úhrny *P* [mm·den^{-1}], denní hodnoty potenciální evapotranspirace *PET* [mm·den^{-1}], pozorovaný odtok *R* [mm·den^{-1}], denní minimální teploty *Tmin* [°C], denní maximální teploty *Tmax* [°C]. Celková délka časových řad byla 28 let (od 1. 1. 1954 do 31. 12. 1981). Časové řady potenciální evapotranspirace byly vypočteny metodou, kterou prezentovali Oudin et al. (2005) na základě studií Jensen a Haise (1963) a McGuinness a Bordne (1972). Vstupem pro výpočet PET byly časové řady průměrné denní teploty (vypočtené na základě denních teplotních minim a maxim) a zeměpisné souřadnice těžiště povodí (konkrétně zeměpisná šířka).

V tab. T2 a T3 jsou prezentovány vybrané geomorfologické a klimatické charakteristiky zvoleného souboru povodí. Popis těchto charakteristik a metod jejich odvození jsou uvedeny v následujícím textu.

	MAT [°C]	MATR [°C]	MAP [mm/rok]	IA	FO-REST	URBAN	ELEV_MEAN [m n. m.]	AREA [km2]
minimum	9,13	13,05	357,73	0,24	0	0	34,68	79,95
maximum	22,4	30,93	2773,32	3,7	1	1	2266,87	10255,40
medián	12,6	23,91	1055,61	1,16	0,31	0,05	309,14	2281,23
Q1	11,83	21,33	902,06	0,87	0,01	0	212,33	1087,56
Q3	15	27,41	1276,89	1,39	0,85	0,33	462,96	4765,55

Tab. 2: Statistické údaje pro vybrané geomorfologické a klimatické charakteristiky pro 200 povodí z projektu MOPEX (Q1 je dolní kvartil, Q3 je horní kvartil).

	TVAR	POR	SLWRF	LOAM	SANDY_LOAM	CLAY	SLOPE_MEAN
min	0,25	0,35	3,08	0	0	0	0,52
max	1	0,48	11,37	0,78	0,47	0,78	19,21
median	0,75	0,46	5,31	0,06	0,01	0,05	0,89
Q1	0,59	0,44	5,14	0,01	0	0,00	0,74
Q3	0,87	0,47	5,72	0,20	0,14	0,17	11,37

Tab. 3: Statistické údaje pro vybrané geomorfologické a klimatické charakteristiky pro 200 povodí z projektu MOPEX (Q1 je dolní kvartil, Q3 je horní kvartil).

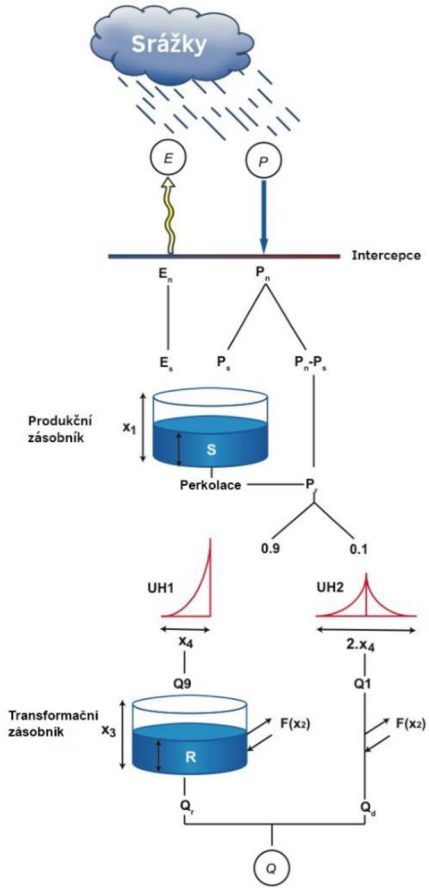
Dlouhodobá průměrná roční teplota (MAT) a průměrný rozdíl průměrné měsíční teploty nejteplejšího a nejchladnějšího měsíce v roce (MATR) byly odvozeny autorkou na základě časových řad průměrné denní teploty vypočtené z denního teplotního minima a maxima. Dlouhodobá průměrná roční srážka (MAP) byla odhadnuta

z denních záznamů gridovaných srážkových dat projektu PRISM (Daly et al., 1994) a průměrná roční potenciální evapotranspirace pro výpočet indexu aridity (index aridity byl v této studii definován jako poměr dlouhodobé průměrné roční srážky a dlouhodobé průměrné roční potenciální evapotranspirace) byla odvozena z denních záznamů gridovaných hodnot potenciální evapotranspirace z NOAA Evaporation Atlas (Farnsworth et al., 1982). Zdrojem pro charakteristiky relativní zastoupení lesních porostů (FOREST) a urbanizovaných ploch (URBAN) je databáze IGBP (Loveland et al., 2000). Geomorfologické charakteristiky průměrná nadmořská výška (MEAN_ELEV), plocha povodí (AREA) a koeficient asymetrie povodí (TVAR) byly odvozeny na základě digitálního modelu GTOPO30 s prostorovým rozlišením 30 obloukových sekund (vyvinutý US Geological Survey). Půdní hydraulické charakteristiky jako pórovitost (POR), sklon funkce retenční křivky (SLWRF) a nasycená hydraulická vodivost (SHC) byly odvozeny na základě emiprických vztahů, které prezentovali Clapp a Hornberger (1978) a Cosby et al. (1983). Relativní zastoupení vybraných půdních druhů na povodí jako písčito-hlinitých půd (SANDY_LOAM), hlinitých půd (LOAM) a jílovitých půd (CLAY) bylo odvozeno na základě databáze STATSGO, kterou vytvořil Penn State Earth System Science Center (Miller a White, 1999).

3.2 Popis modelu GR4J

Model GR4J je původem francouzský, celistvý, konceptuální srážko-odtokový model, v Evropě hojně používaný. Počítá celkový odtok v denním časovém kroku. Jeho předchůdcem je model GR3J. Struktura modelu (viz obr. 1) je založena na dvou zásobnících (produkční a transformační) a jednotkovém hydrogramu. Obsahuje 4 kalibrované parametry: X1[mm] udává maximální kapacitu produkčního zásobníku, X2[-] udává maximální výměnný koeficient povodí, X3[mm] udává maximální kapacitu transformačního zásobníku a X4 [den] udává časový parametr jednotkového hydrogramu. Vstupem do modelu jsou časové řady srážek P [mm·den^{-1}],

PE [mm·den^{-1}] je potencionální evapotranspirace a výstupem je časová řada simulovaného odtoku Q[mm·den^{-1}] (Perrin et al., 2003).



Obr. 1: Schéma modelu GR4J. In: Https://wiki.ewater.org.au/ [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: https://wiki.ewater.org.au/display/SD45/GR4J+-+SRG#app-switcher (upraveno)

Výpočet simulovaného odtoku s použitím modelu GR4J lze shrnout v následujících krocích.

1. Výpočet efektivní srážky, který je založen na bilanci v intercepčním zásobníku s nulovou kapacitou a bilanci v produkčním zásobníku.

2. Rozdělení vypočtené efektivní srážky do dvou složek (90 % efektivní srážky tvoří pomalou odezvu povodí a 10 % rychlou odezvu povodí) a jejich transformace pomocí jednotkového hydrogramu (při rychlé odezvě), nebo jednotkového hydrogramu a nelineárního transformačního zásobníku (při pomalé odezvě).
3. Úprava simulovaného odtoku na základě maximálního výměnného koeficientu povodí (při pomalé odezvě řešena jako součást bilance v nelineárně transformačním zásobníku).
4. Výpočet celkového odtoku z povodí.

3.3 Metodický popis případové studie

Regionalizační přístup prostorové blízkosti v této případové studii byl založen na metodě jednoho donoru (single donor přístup). Metodický postup případové studie je shrnut v následujících bodech (které jsou dále podrobněji popsány):

- kalibrace a validace modelu GR4J,
- identifikace hydrologických donorů,
- stanovení prahových hodnot pro přijetí hydrologického donoru,
- analýza výsledků spojených s otázkami uvedenými v kapitole 3

Model GR4J byl kalibrován na časové řadě 1. 1. 1955 do 31. 12. 1967 a validován na časové řadě od 1. 1. 1969 do 31. 12. 1981, přičemž v rámci každé periody byla na jejím začátku uvažována „warm-up“ perioda o délce 1 rok. Zařazení warm-up periody bylo z toho důvodu, že nebyly kalibrovány počáteční hodnoty stavových veličin modelu. Délka warm-up periody byla zvolena na základě výsledků studie Kim et al. (2018). Jako hodnotící kritérium simulační účinnosti v kalibraci i validaci byl použit Kling-Guptův koeficient (Gupta et al., 2009).

Optimální parametrické sady z kalibrace modelu byly použity při identifikaci hydrologických donorů. Hydrologickým donorem je v rámci této studie uvažováno každé povodí, jehož parametrická sada (tj. optimální sada parametrů modelu GR4J získaná kalibrací na základě vstupních časových řad tohoto povodí) vede k maximálnímu zvolenému poklesu simulační účinnosti na řešeném akceptoru. Tento koncept hydrologické podobnosti (resp. spíše parametrické podobnosti) byl navržen ve studii Oudin et al. (2010). Maximální pokles simulační účinnosti byl řešen současně na časové řadě využité při kalibraci modelu a jeho validaci (tj. parametrická sada hydrologického donoru musela vést na akceptoru k maximálnímu zvolenému poklesu simulační účinnosti na obou časových obdobích: 1. 1. 1955 do 31. 12. 1967 a 1. 1. 1969 do 31. 12. 1981). Postup identifikace hydrologických donorů byl následující:

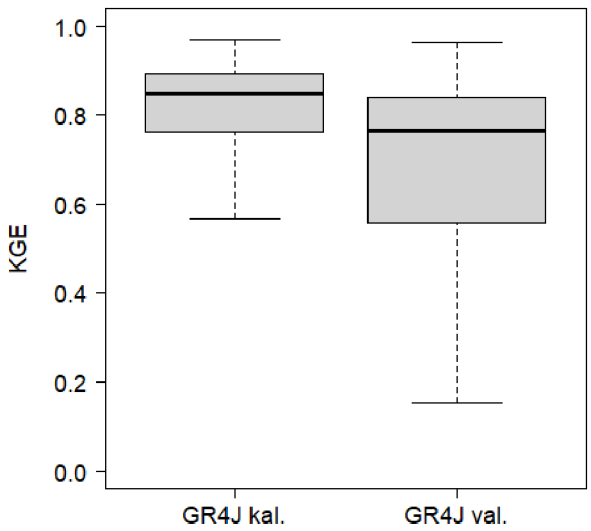
1. výběr akceptoru,
2. výběr potenciálního donoru,
3. simulace odtoku na základě parametrické sady potenciálního donoru a vstupních časových řad akceptoru (řešeno pro obě periody),
4. výpočet kritéria KGE pro obě periody,
5. výpočet poklesu simulační účinnosti v porovnání s kalibračními a validačními výsledky tohoto akceptoru.

Výše uvedený postup byl realizován na všech 200 povodích (pro každé povodí bylo tedy provedeno 199 simulací na obou periodách). Jakmile byly tyto simulace provedeny a spočteny poklesy simulační účinnosti, byly zvoleny prahové hodnoty pro přijetí hydrologických donorů, které byly využity v dalších analýzách.

3.4 Výsledky

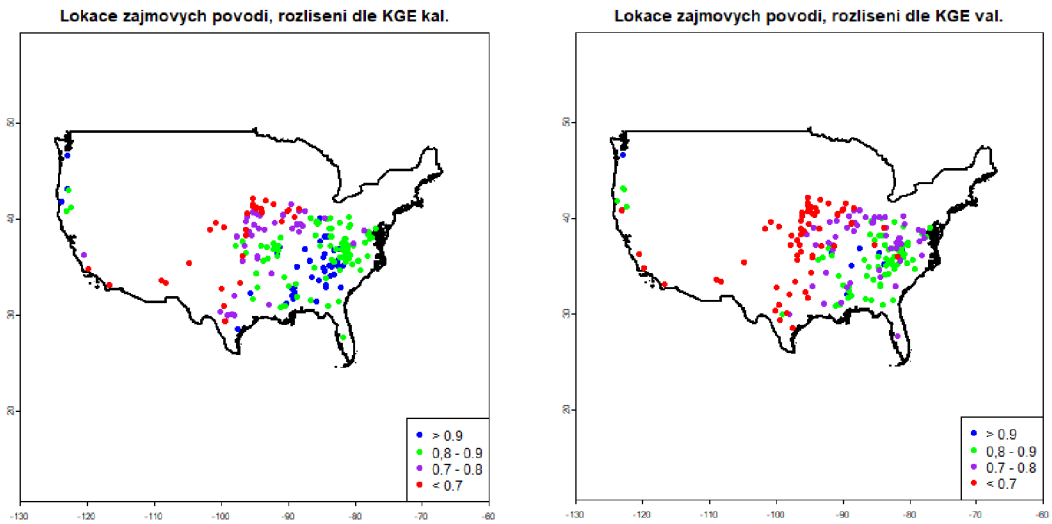
3.4.1 Kalibrace a validace modelu GR4J

Výsledky kalibrace a validace modelu GR4J hodnocené kritériem KGE jsou prezentovány na obr. 2 formou krabicových grafů. Medián KGE na celém souboru povodí dosahoval v kalibrační fázi hodnoty 0,85 a ve fázi validační 0,77. Kalibrační i validační výsledky byly vyšší na humidních povodích (index aridity ≥ 1), kdy medián KGE byl v kalibrační fázi 0,87 a ve validační fázi 0,82. V případě aridních povodí (index aridity < 1) byl medián KGE v kalibrační fázi 0,71 a ve validační fázi 0,38. Z obr. 2 je dále patrný výraznější pokles simulační účinnosti modelu při přechodu z kalibrační fáze do fáze validační, přestože v mediánu je tento pokles pro celý soubor povodí pouze cca 0,08. Vyšší pokles simulační účinnosti modelu byl zaznamenán na aridních povodích (v mediánu o cca 0,33) než na humidních povodích (v mediánu o cca 0,05).



Obr. 2: Simulační účinnost modelu GR4J v kalibrační i validační fázi hodnocená kritériem KGE na souboru 200 povodí, medián je v krabicovém grafu zobrazen tlustou černou čárou, krabice je vymezena zdola dolním kvartilem a shora horním kvartilem, vousy představují 1,5násobek mezikvartilového rozpětí.

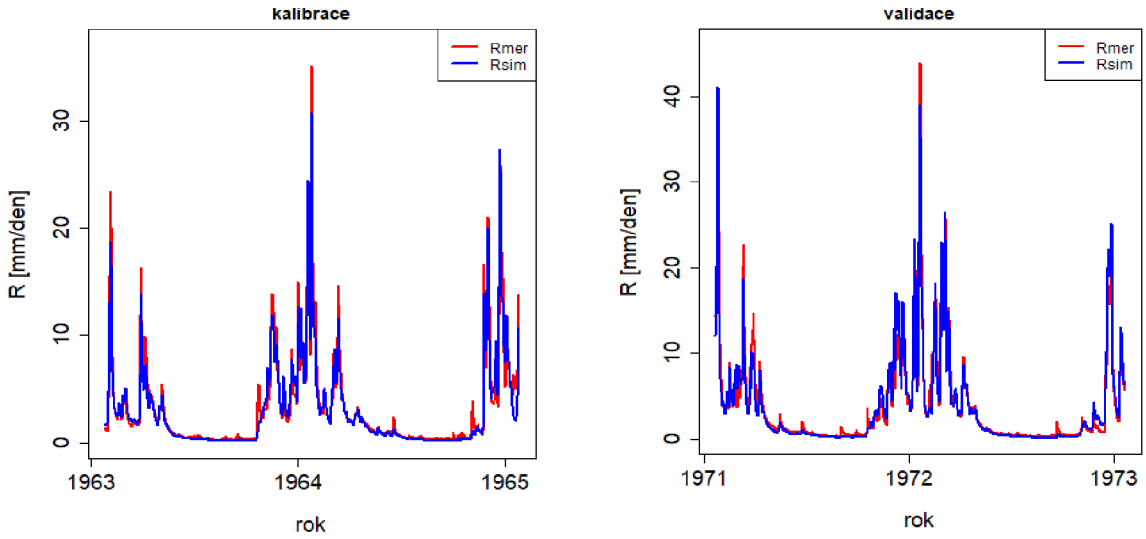
Na obr. 3 je zobrazeno umístění 200 povodí v rámci USA, která jsou rozdělena do čtyř skupin dle dosažené hodnoty KGE v kalibrační fázi (obr. 3 vlevo) a validační fázi (obr. 3 vpravo). Z obr. 3 vlevo i vpravo je patrné, že nejlépe modelovaná povodí (KGE v kalibrační i validační fázi bylo vyšší než 0,8) jsou situována zejména na východním pobřeží USA v Appalačských horách, na východní straně povodí Mississippi a dále na západním pobřeží v oblasti Kaskádového pohoří. Naopak, nejhůře modelovaná povodí v kalibrační i validační fázi jsou nejčastěji situována v centrální části USA (oblast Velkých planin) a na jihu USA (Texas).



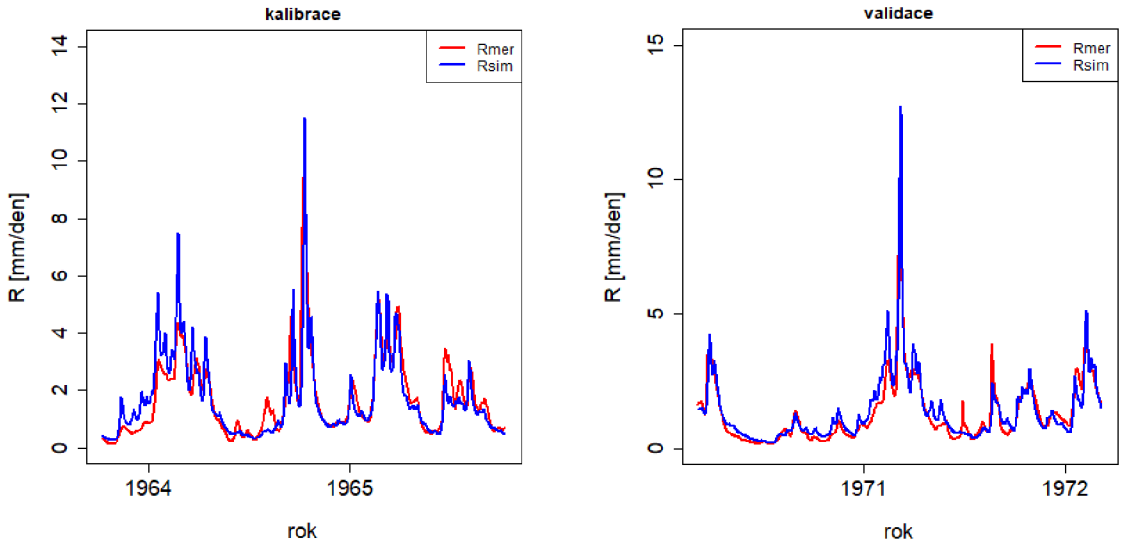
Obr. 3: Lokace 200 povodí rozdělených do 4 kategorií dle dosažené hodnoty KGE v kalibrační fázi (vlevo) a validační fázi (vpravo).

Na obr. 4 až obr. 6 jsou prezentovány vybrané části hydrogramů odtoku v kalibrační i validační fázi tří povodí: povodí Chehalis River (nejvyšší hodnota KGE při kalibraci), povodí Little Pee Dee (mediánová hodnota KGE při kalibraci) a povodí Conchas River (nejnižší hodnota KGE při kalibraci). Z obr. 4 až obr. 6 je patrné, že model GR4J při vyšších kalibračních hodnotách KGE relativně spolehlivě simuloval

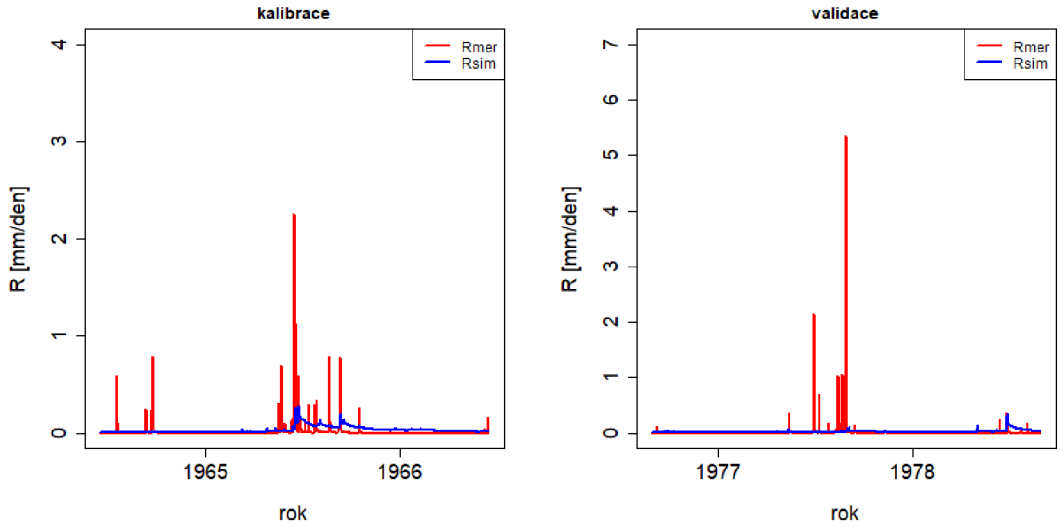
střední i vysoké odtoky v kalibrační i validační fázi (viz obr. 4 a obr. 5). Problematické byly pouze simulace nízkých odtoků (viz obr. 4 a obr. 5). V případě nízkých kalibračních hodnot KGE nebyl model GR4J schopen korektně simulovat celkovou variabilitu odtoku a extrémně podhodnocoval kulminace jednotlivých srážko-odtokových epizod jak v kalibraci, tak i ve validaci (viz obr. 6).



Obr. 4: Porovnání vybrané části simulovaného hydrogramu odtoku (Rsim – modrá čára) s pozorovanými daty (Rmer – červená čára) v kalibrační (vlevo) a validační (vpravo) fázi pro povodí Chehalis River, kde kalibrační KGE bylo 0,969 a validační KGE bylo 0,963.



Obr. 5: Porovnání vybrané části simulovaného hydrogramu odtoku (Rsim – modrá čára) s pozorovanými daty (Rmer – červená čára) v kalibrační (vlevo) a validační (vpravo) fázi pro povodí Little Pee Dee, kde kalibrační KGE bylo 0,850

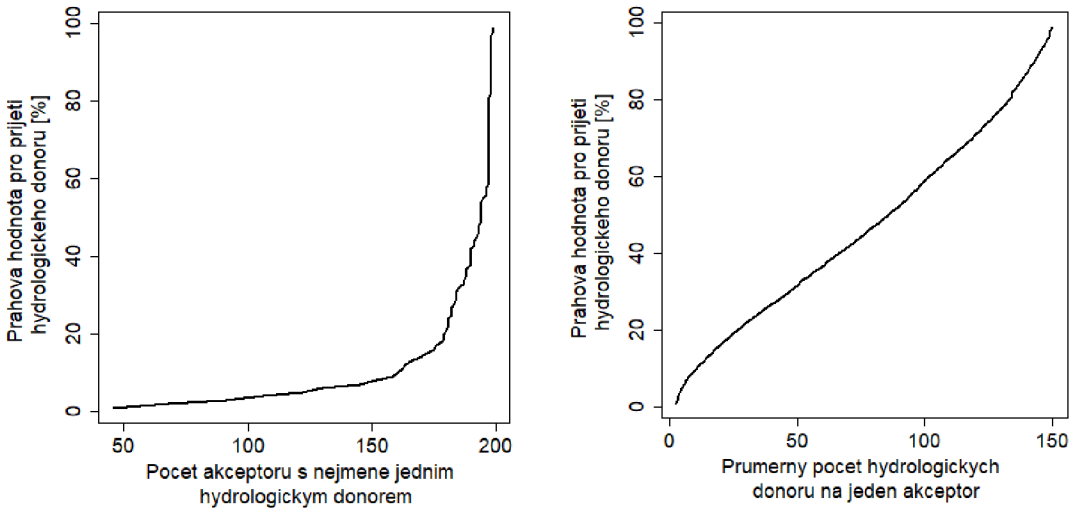


Obr. 6: Porovnání vybrané části simulovaného hydrogramu odtoku (Rsim – modrá čára) s pozorovanými daty (Rmer – červená čára) v kalibrační (vlevo) a validační (vpravo) fázi pro povodí Conchas River, kde kalibrační KGE bylo 0,148 a validační KGE bylo -2,14.

3.4.2 Testování přenosu optimálních parametrických sad z donorů na akceptory

Jakmile byl model GR4J nakalibrován na všech 200 povodích, bylo provedeno testování přenosu optimálních parametrických sad z donorů na akceptory a spočítány poklesy simulační účinnosti na obou testovaných periodách (1. 1. 1954 až 31. 12. 1967 a 1. 1. 1968 až 31. 12. 1981). Toto testování bylo provedeno za účelem identifikace prahové hodnoty pro přijetí hydrologického donoru pro další analýzy. Výsledky této analýzy jsou prezentovány na obr. 7 pro prahové hodnoty v intervalu 1 % (tj. maximálně 1% pokles simulační účinnosti) až 100 %. (tj. maximálně 100% pokles simulační účinnosti). Na obr. 7 vlevo je prezentována změna počtu akceptorů, které mají při dané prahové hodnotě poklesu simulační účinnosti alespoň jeden hydrologický donor. Z obr. 7 vlevo je patrné, že při zvolené prahové hodnotě 1 % má pouze 46 akceptorů alespoň jeden hydrologický donor (což je pouze 23 % povodí z celého souboru). Počet akceptorů s nejméně jedním hydrologickým donorem se zvyšuje relativně pravidelně a výrazně přibližně do prahové hodnoty 10 % (při prahové hodnotě 10 % má 160 povodí alespoň jeden hydrologický donor, což je 80 % povodí z celého souboru). Další zvyšování počtu akceptorů s nejméně jedním hydrologickým donorem je od prahové hodnoty 10 % již velmi nevýrazné. Na obr. 7 vpravo je prezentována změna průměrného počtu hydrologických donorů na jeden akceptor v závislosti na změně prahové hodnoty pro přijetí hydrologického donoru. Z obr. 7 vpravo je patrný relativně pravidelný růst průměrného počtu hydrologických donorů na jeden akceptor se zvyšující se prahovou hodnotou pro přijetí hydrologického donoru. Při prahové hodnotě 1 % odpovídal průměrný počet hydrologických donorů na jeden akceptor přibližně hodnotě 2,8 (tj. při této prahové hodnotě mělo 46 akceptorů zmíněných výše v průměru 2 až 3 hydrologické donory) a při prahové hodnotě 10 % odpovídal hodnotě 10,4 (tj. při této prahové hodnotě mělo 160 akceptorů zmíněných výše v průměru 10 hydrologické donorů). Na základě prezentovaných výsledků byly k dalším analýzám využity prahové hodnoty

pro přijetí hydrologického donoru: 1 %, 5 %, 10 %, 15 % a 20 %. Prahová hodnota 1 % byla zvolena z důvodu nejpřísnějšího měřítka hydrologické podobnosti (tj. byl uvažován maximální pokles simulační účinnosti na akceptoru o 1 % v porovnání s kalibračními a validačními výsledky na tomto povodí). Prahová hodnota 10 % byla zvolena na základě studie Oudin et al. (2010), ve které byla také použita. Prahová hodnota 20 % byla zvolena jako mezní v této studii. Při prahové hodnotě nad 20 % je již pokles simulační účinnosti příliš velký a hydrologická podobnost povodí se bude již výrazně snižovat. Pro porovnání byly zvoleny také hodnoty 5 % a 15 %.

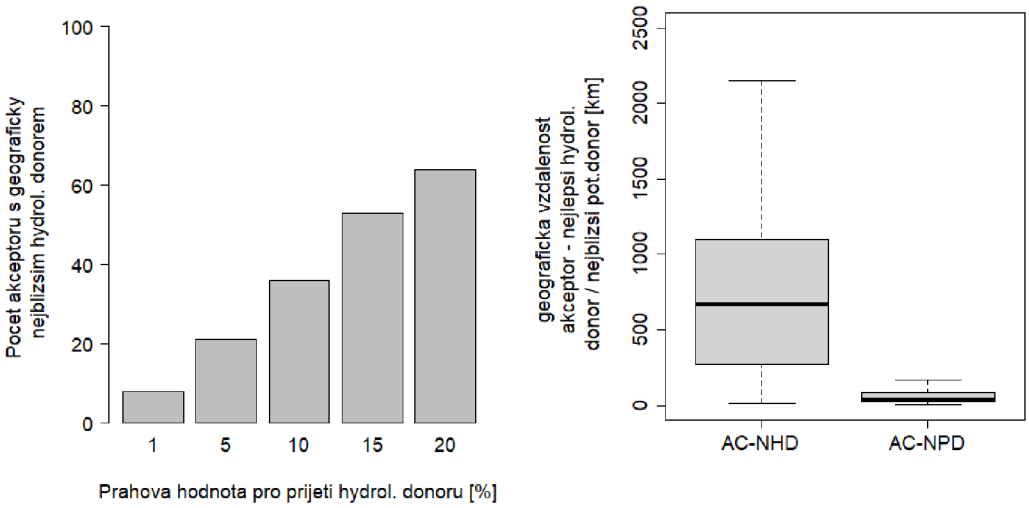


Obr. 7: vlevo: změna počtu akceptorů s alespoň jedním hydrologickým donorem v závislosti na změně prahové hodnoty pro přijetí hydrologického donoru, vpravo: změna průměrného počtu hydrologických donorů na jeden akceptor v závislosti na změně prahové hodnoty pro přijetí hydrologického donoru.

3.4.3 Analýza platnosti přístupu geografické vzdálenosti

Regionalizační přístup geografické blízkosti povodí je založen na předpokladu podobnosti hydrologického chování povodí, která jsou situována geograficky co nejblíže u sebe. Tento předpoklad by testován na souboru 200 povodí. Výsledky jsou prezentovány na obr. 8 až 19. Na obr. 8 vlevo je prezentován počet akceptorů,

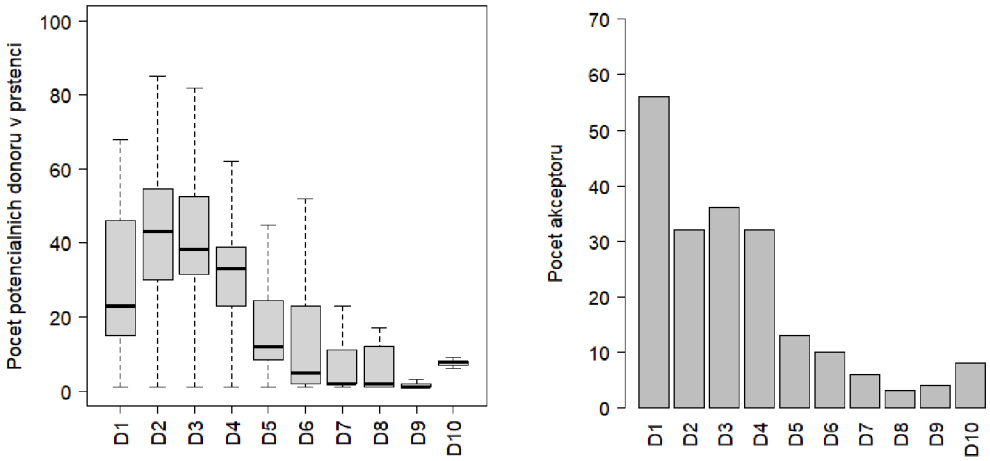
pro které platí výše uvedený předpoklad, tj. že jejich hydrologickým donorem dle zvolené prahové hodnoty pro přijetí hydrologického donoru je geograficky nejbližší povodí. Z obr. 8 vlevo je patrné, že počet akceptorů, pro která jsou geograficky nejbližší povodí hydrologickými donory, roste se zvyšující se prahovou hodnotou pro přijetí hydrologického donoru. Pro každou zvolenou prahovou hodnotu byl vypočten poměr počtu akceptorů, pro která jsou geograficky nejbližší povodí hydrologickými donory a počtu akceptorů s alespoň jedním hydrologickým donorem. Hodnota tohoto poměru roste se zvyšující se prahovou hodnotu pro přijetí parametrického donoru (při prahové hodnotě 1 % je poměr 17,4 % a při prahové hodnotě 20 % má poměr hodnotu 35,8 %).



Obr. 8: změna počtu akceptorů, pro která jsou geograficky nejbližší povodí hydrologickými donory, v závislosti na zvyšující se prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru, vpravo: geografická vzdálenost mezi akceptorem a nejlepším hydrologickým donorem (AC-NHD) a geografická vzdálenost mezi akceptorem a nejbližším potenciálním donorem (AC-NPD), popis krabicového grafu je stejný jako u obr. 2.

Na obr. 8 vpravo je prezentována geografická vzdálenost v km mezi akceptory a jejich nejlepšími hydrologickými donory (AC-NHD) a dále geografická vzdálenost v km mezi akceptory a jejich nejbližšími potenciálními donory (AC-NPD). Nejlepším

hydrologickým donorem je v tomto případě takové povodí, jehož optimální parametrická sada vede v porovnání s ostatními donory na akceptoru k nejlepším simulačním výsledkům na obou periodách. Potenciálním donorem je zde povodí, které je geograficky nejbližší (a podle základního předpokladu přístupu geografické blízkosti by mělo být hydrologicky nejpodobnější). Z obr. 8 vpravo je patrné, že 50 % akceptorů má nejlepší hydrologický donor do vzdálenosti 671 km. Vzdálenosti mezi akceptory a jejich nejbližšími potenciálními donory jsou výrazně menší (medián je 44 km). Nejvyšší zaznamenané vzdálenosti mezi akceptorem a nejlepším hydrologickým donorem byly vyšší než 3500 km, nejvyšší vzdálenosti mezi akceptory a jejich nejbližšími potenciálními donory byly kolem 400 km.



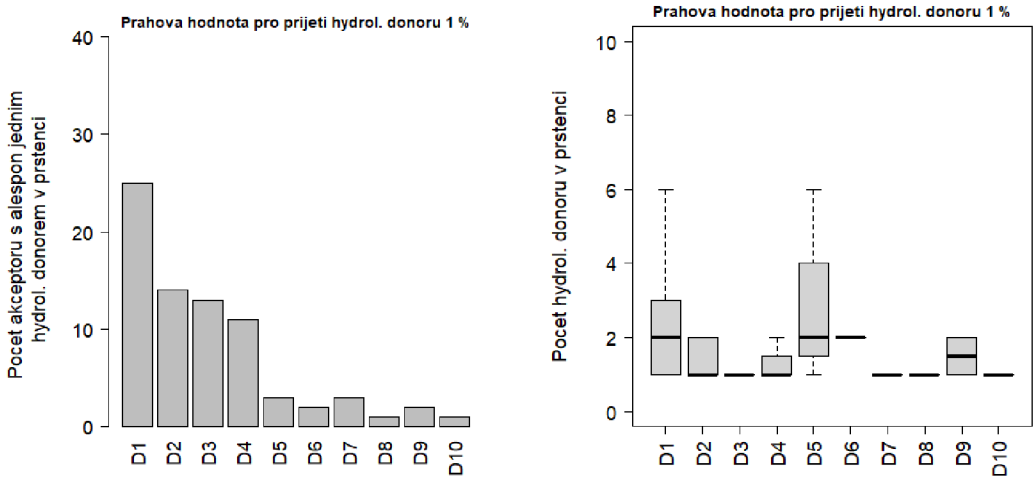
Obr. 9 vlevo: počet potenciálních hydrologických donorů v prstencích vymezených kolem každého akceptoru (popis krabicového grafu je stejný jako u obr. 2), vpravo: počet akceptorů, které mají nejlepší hydrologický donor lokalizovaný v jednom z deseti prstenců vymezených kolem akceptoru.

Pro podrobnější analýzu pozice hydrologických donorů od akceptorů byla postupně pro každý akceptor definována soustava 10 prstenců, v jejímž středu byl lokalizován řešený akceptor. Šířka každého prstence byla 10 % vzdálenosti akceptor-nejvzdálenější potenciální donor. Nejprve byla řešena „hustota“ potenciálních donorů (tj. počet potenciálních donorů) v každém prstenci, která je prezentována na

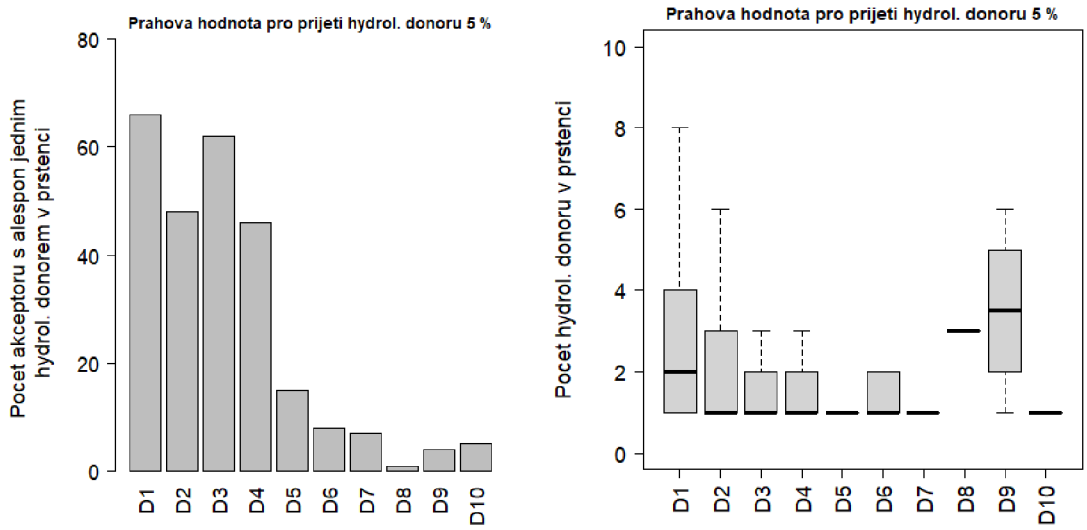
obr. 9 vlevo. Z obr. 9 vlevo je patrné, že akceptory měly nejvíce potenciálních donorů v prvním až čtvrtém prstenci (v mediánu 20 až 40 potenciálních donorů), přičemž nejvíce potenciálních donorů bylo lokalizováno ve druhém prstenci. Počet potenciálních donorů v prstenci klesal postupně od druhého do devátého prstence. Na obr. 9 vpravo je prezentován počet akceptorů, které měly nejlepší hydrologický donor lokalizovaný v prvním až desátém prstenci. Z obr. 9 vpravo je patrné, že nejvíce akceptorů mělo nejlepší hydrologický donor lokalizovaný v prvním prstenci (celkem 56 akceptorů z 200). Pro přibližně 30 akceptorů byl nejlepší hydrologický donor lokalizován v druhém až čtvrtém prstenci. Počet akceptorů, které měly nejlepší hydrologický donor lokalizovaný v pátém až desátém prstenci, se postupně snižoval s tím, jak se zvyšovala vzdálenost prstence od akceptoru.

Obrázky 10 až 14 vlevo představují počet akceptorů majících alespoň jeden hydrologický donor lokalizovaný v jednom z deseti prstenců vymezených kolem akceptoru a počet hydrologických donorů v těchto prstencích při prahových hodnotách 1 %, 5 %, 10 %, 15 % a 20 %. Na obr. 10 vlevo je patrné, že při prahové hodnotě 1 % se v prvním prstenci nachází výrazně vyšší počet akceptorů s alespoň jedním hydrologickým donorem než v ostatních devíti prstencích. Při této prahové hodnotě má v prvním prstenci alespoň jeden hydrologický donor 25 akceptorů. Počet akceptorů (majících alespoň jeden hydrologický donor) ve druhém, třetím a čtvrtém prstenci je téměř vyrovnaný a to 14, 13 a 11 (počet se snižuje se zvyšující se vzdáleností od akceptoru). Následuje výrazný propad v počtu akceptorů v prstencích 5 až 10. Nejnižší počet akceptorů s alespoň jedním hydrologickým donorem je v prstenci 8 a 10 (pouze 1 akceptor). Při zvýšení prahové hodnoty pro přijetí hydrologického donoru na 5 % (obr. 11 vlevo) výrazně stoupá počet akceptorů (majících alespoň jeden hydrologický donor) v prvním až čtvrtém prstenci. V prvním prstenci má alespoň jeden hydrologický donor 65 akceptorů. Následuje propad v počtu akceptorů v pátém až desátém prstenci. Nejnižší počet akceptorů je v osmém prstenci (1 akceptor). Při zvýšení prahové hodnoty na 10 % (obr. 12 vlevo) dále stoupá počet akceptorů.

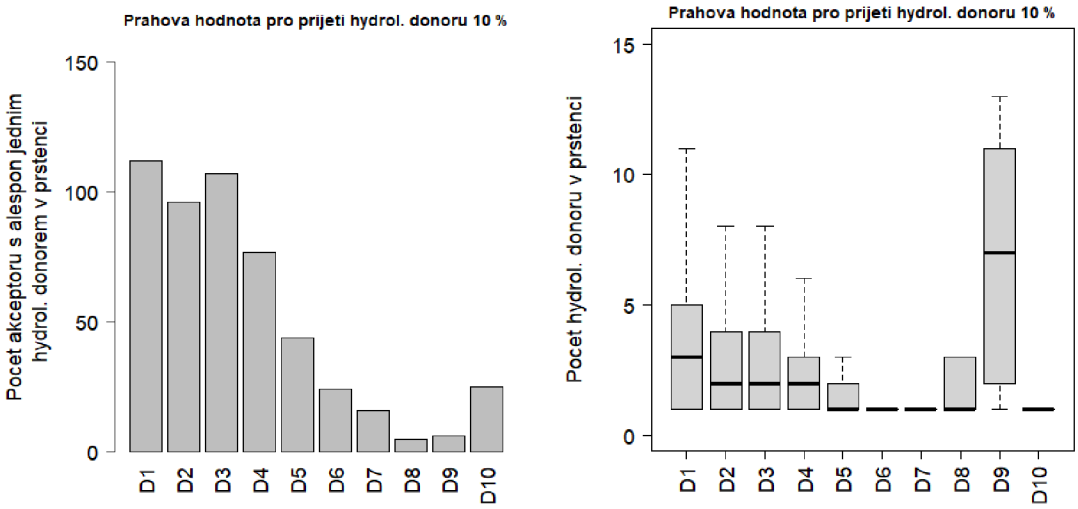
Nejvíce akceptorů majících alespoň jeden hydrologický donor je lokalizováno v prvním až třetím prstenci (115, 90 a 110) poté se jejich počet postupně snižuje až do osmého prstence a dochází ke zvýšení počtu akceptorů v devátém až desátém prstenci. Při zvýšení prahové hodnoty na 15 % (obr. 13 vlevo) již nedochází k tak výraznému zvýšení počtu akceptorů. Jejich počet v prstencích 1 až 3 již téměř vyrovnaný, dále se ovšem zvyšuje počet akceptorů lokalizovaných v desátém prstenci. Při zvýšení prahové hodnoty na 20 % (obr. 14 vlevo) je již ve druhém a třetím prstenci lokalizováno více akceptorů s alespoň jedním hydrologickým donorem než v prvním. V prstencích 1 až 3 už má alespoň jeden hydrologický donor téměř 150 akceptorů. Nejnižší počet akceptorů je v prstencích 8 a 9, počet akceptorů v desátém prstenci se dále zvyšuje. Celkově se zvyšující se prahovou hodnotou dochází k nárůstu počtu akceptorů majících alespoň jeden hydrologický donor lokalizovaný v libovolném prstenci. Počet akceptorů s alespoň jedním hydrologickým donorem v daném prstenci klesal s tím, jak se zvyšovala geografická vzdálenost mezi akceptorem a prstencem. Výjimkou byl desátý prstenec, kde byl patrný výrazný nárůst počtu akceptorů, které mají hydrologický donor v tomto posledním prstenci (pro prahové hodnoty 15 % a 20 %).



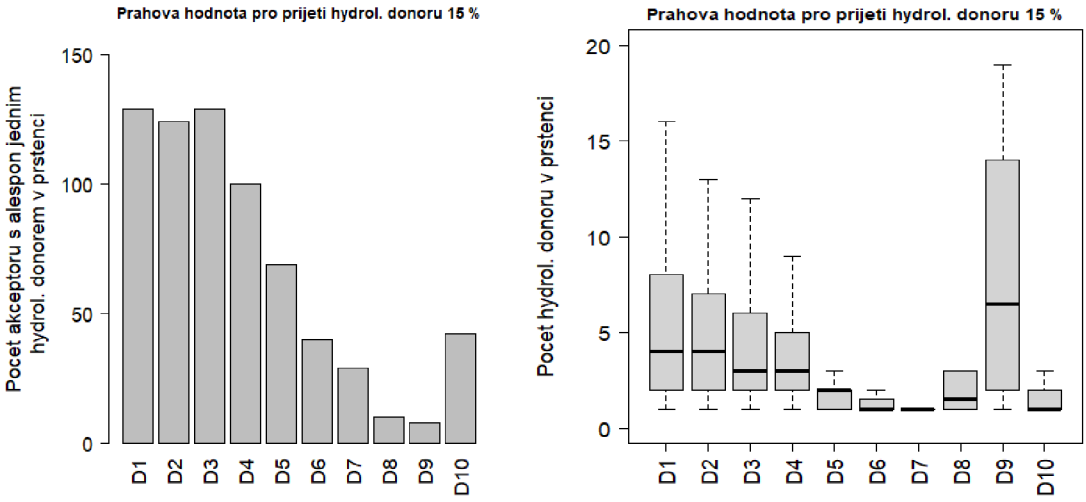
Obr. 10 vlevo: počet akceptorů, které mají alespoň jeden hydrologický donor lokalizovaný v jednom z deseti prstenců vymezených kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 1 %, vpravo počet hydrologických donorů v prstencích kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 1 % (popis krabicového grafu je stejný jako u obr. 2).



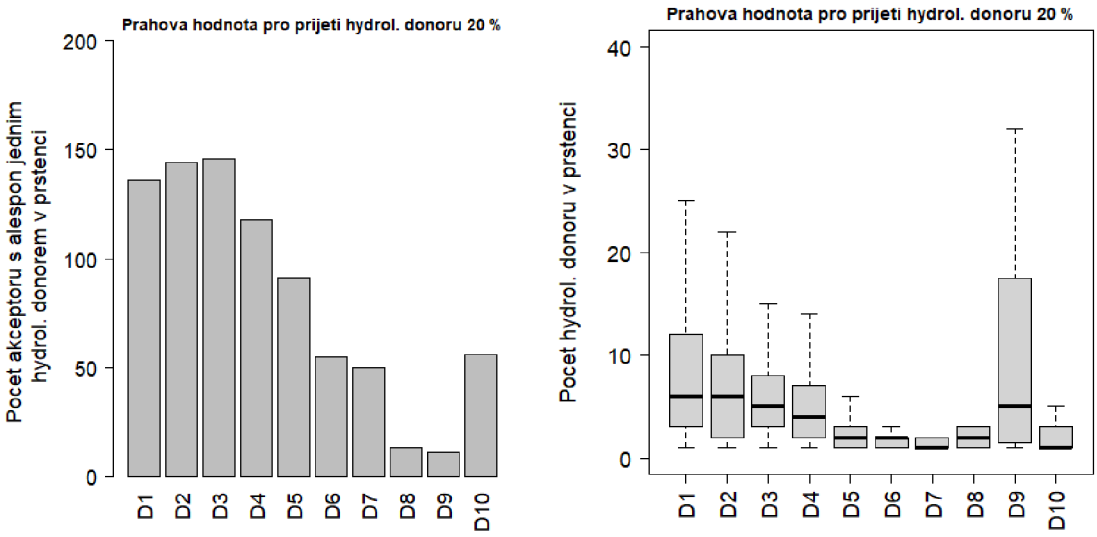
Obr. 11 vlevo: počet akceptorů, které mají alespoň jeden hydrologický donor lokalizovaný v jednom z deseti prstenců vymezených kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 5 %, vpravo počet hydrologických donorů v prstencích kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 5 % (popis krabicového grafu je stejný jako u obr. 2).



Obr. 12 vlevo: počet akceptorů, které mají alespoň jeden hydrologický donor lokalizovaný v jednom z deseti prstenců vymezených kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 10 %, vpravo počet hydrologických donorů v prstencích kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 10 % (popis krabicového grafu je stejný jako u obr. 2).



Obr. 13 vlevo: počet akceptorů, které mají alespoň jeden hydrologický donor lokalizovaný v jednom z deseti prstenců vymezených kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 15 %, vpravo počet hydrologických donorů v prstencích kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 15 % (popis krabicového grafu je stejný jako u obr. 2).

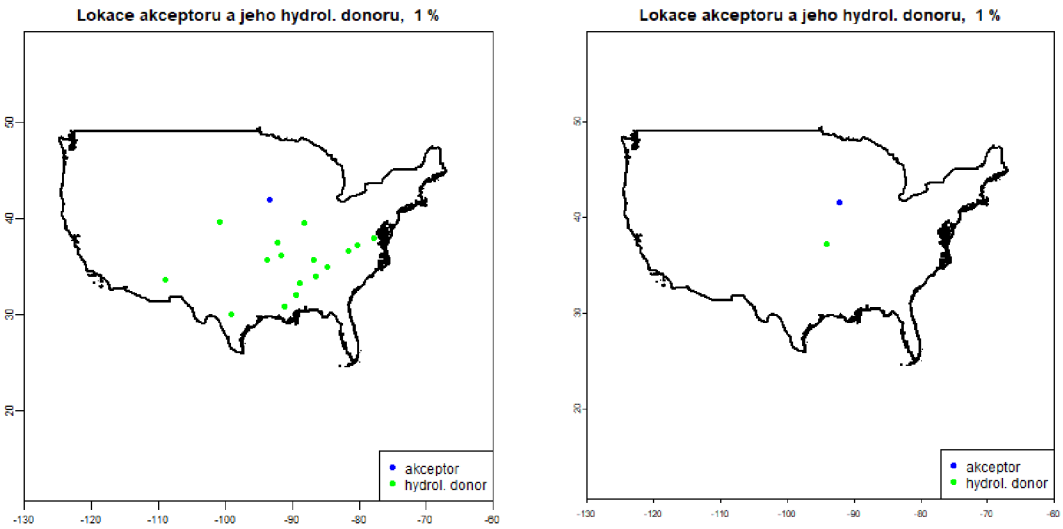


Obr. 14 vlevo: počet akceptorů, které mají alespoň jeden hydrologický donor lokalizovaný v jednom z deseti prstenců vymezených kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 20 %, vpravo počet hydrologických donorů v prstencích kolem akceptoru při prahové hodnotě pro přijetí hydrologického donoru 20 % (popis krabicového grafu je stejný jako u obr. 2).

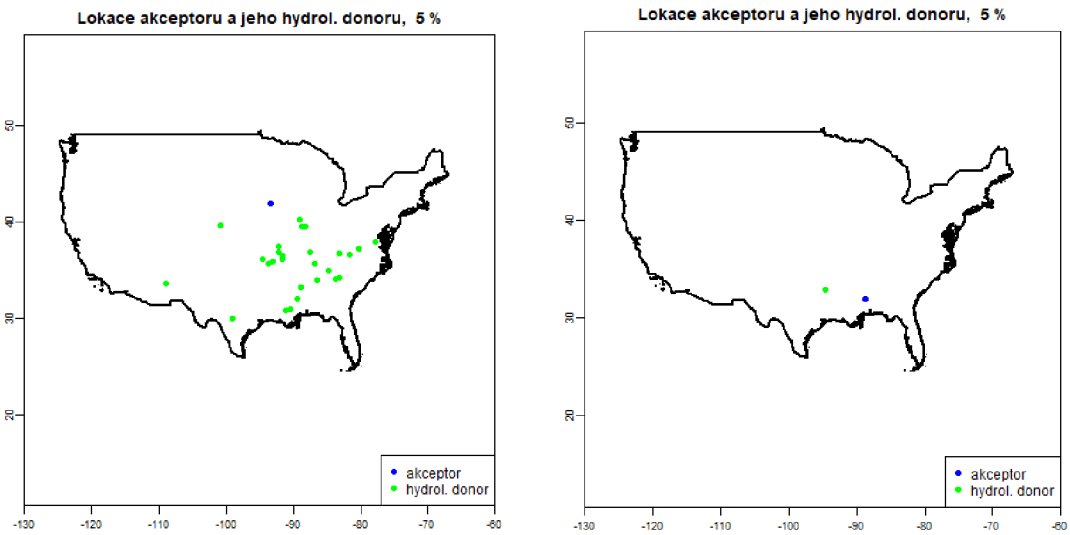
Na obrázcích 10 až 14 vpravo je znázorněn počet hydrologických donorů v prstencích kolem akceptoru formou krabicových grafů při prahových hodnotách 1 %, 5 %, 10 %, 15 % a 20 %. Při prahové hodnotě 1 % (obr. 10 vpravo) byl nejvyšší počet hydrologických donorů v prvním, pátém a šestém prstenci (v mediánu má každý akceptor dva hydrologické donory). Nejvíce hydrologických donorů měly akceptory v pátém prstenci. Při prahové hodnotě 5 % (obr. 11 vpravo) dochází ke zvýšení počtu hydrologických donorů v prvním, osmém a devátém prstenci (v mediánu jsou v prvním prstenci dva hydrologické donory, v osmém 3 a v devátém více než 3 donory). Při zvýšení prahové hodnoty na 10 % (obr. 12 vpravo) velmi výrazně stoupl počet hydrologických donorů v devátém prstenci (50 % akceptorů má 7 hydrologických donorů), zvyšuje se také počet hydrologických donorů v prvním až čtvrtém prstenci. V prstenci 5, 6, 7, 8 a 10 je i při této prahové hodnotě v mediánu pouze

jeden hydrologický donor. Při prahové hodnotě 15 % dochází k dalšímu zvýšení počtu hydrologických donorů v prvním až čtvrtém a v devátém prstenci. Při prahové hodnotě 20 % má 50 % akceptorů v prvním a druhém prstenci 5 hydrologických donorů. Nejméně hydrologických donorů mají akceptory i při této hodnotě v prstenci 5, 6, 7, 8 a 10. Nejvíce hydrologických donorů je v devátém prstenci, ale medián je již nižší než v prvním a druhém prstenci (50 % akceptorů má přibližně 4 hydrologické donory).

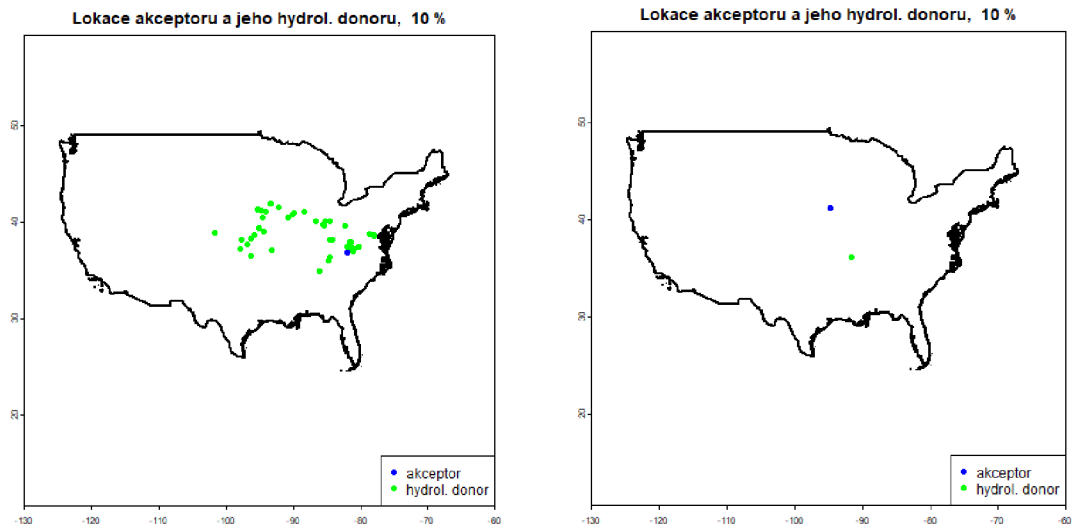
Na obrázcích 15 až 19 je zobrazena lokace akceptorů a jejich hydrologických donorů v rámci USA opět při zvolených prahových hodnotách 1 %, 5 %, 10 %, 15 % a 20 %. Na obrázcích vlevo jsou vybrány akceptory s maximálním počtem hydrologických donorů, na obrázcích vpravo jsou náhodně vybrány akceptory, mající pouze jeden hydrologický donor při zvolených prahových hodnotách.



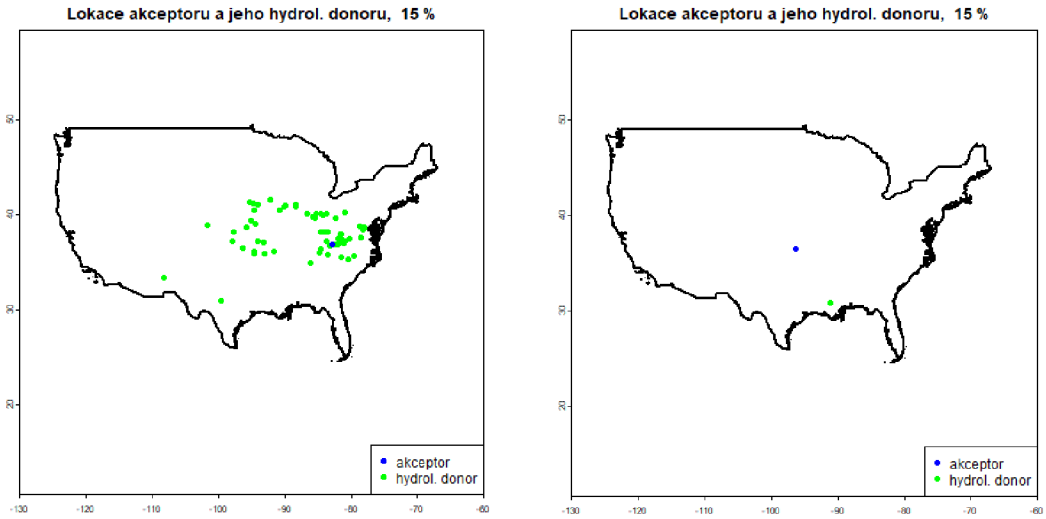
Obr. 15: Lokace akceptoru a jeho hydrologických donorů při prahové hodnotě 1 %. Akceptor s maximálním počtem parametrických donorů (vlevo) a akceptor s pouze jedním hydrologickým donorem (vpravo).



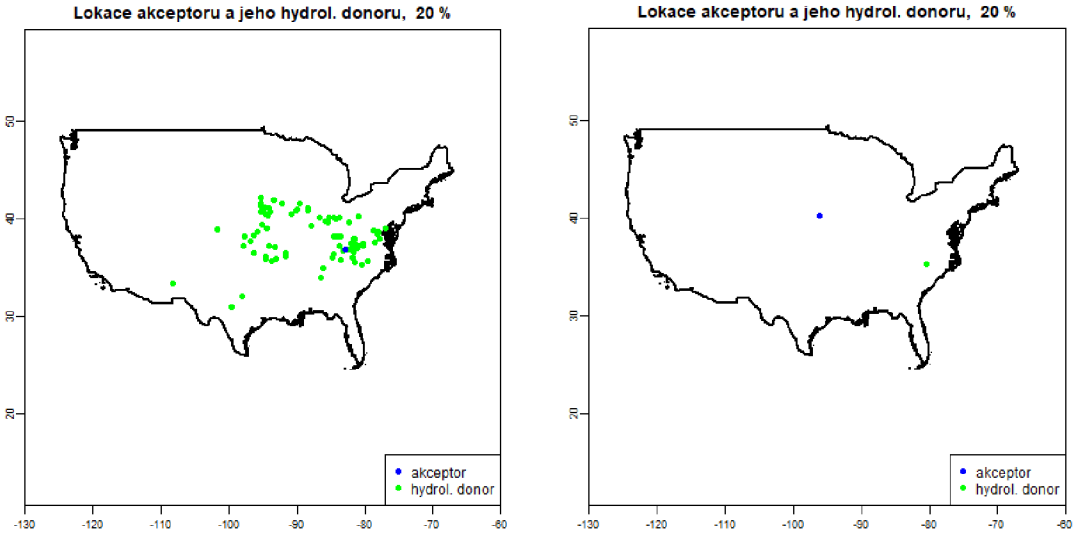
Obr. 16: Lokace akceptoru a jeho hydrologických donorů při prahové hodnotě 5 %. Akceptor s maximálním počtem parametrických donorů (vlevo) a akceptor s pouze jedním hydrologickým donorem (vpravo).



Obr. 17: Lokace akceptoru a jeho hydrologických donorů při prahové hodnotě 10 %. Akceptor s maximálním počtem parametrických donorů (vlevo) a akceptor s pouze jedním hydrologickým donorem (vpravo).



Obr. 18: Lokace akceptoru a jeho hydrologických donorů při prahové hodnotě 15 %. Akceptor s maximálním počtem parametrických donorů (vlevo) a akceptor s pouze jedním hydrologickým donorem (vpravo).



Obr. 19: Lokace akceptoru a jeho hydrologických donorů při prahové hodnotě 20 %. Akceptor s maximálním počtem parametrických donorů (vlevo) a akceptor s pouze jedním hydrologickým donorem (vpravo).

Z obrázků vlevo je patrné, že se vzrůstající prahovou hodnotou se zvyšuje počet hydrologických donorů pro zvolený akceptor. Dále je zřejmé, že akceptory, které se nacházejí v oblastech s vyšší hustotou sítě pozorovaných povodí (např. oblast Apalačských hor viz obr. 3) mají více hydrologických donorů, které jsou geograficky velmi blízko (obr. 17 až 19 vlevo). V případě nižší hustoty sítě pozorovaných povodí jsou geografické vzdálenosti mezi akceptorem a jeho hydrologickými donory výrazně vyšší (viz obr. 15 a 16 vlevo a obr. 15 až 19 vpravo).

3.5 Diskuze výsledků

Z výsledků kalibrace a validace je patrné, že nejlepší simulační účinnost byla dosažena na povodích ve vlhkých horských oblastech situovaných zejména na západním pobřeží v Apalačských horách a na východním pobřeží v oblasti Kaskádového pohoří (viz obr. 3), kde se ve státě Washington nachází také povodí s nejlepší simulační účinností (s hodnotou KGE v kalibrační fázi 0,969) Chehalis River. Povodí s nejhorší simulační účinností Conchas River (s hodnotou KGE v kalibrační fázi 0,148) se nachází ve státě Nové Mexiko a reprezentuje charakter a umístění nejhůře modelovaných povodí nacházejících se v centrálním USA, v oblasti Velkých plání v malé nadmořské výšce a suchým klimatem. Existují tedy geografické oblasti mající podobný charakter, ve kterých model GR4J simuluje obdobně. Jedním z faktorů, který simulační účinnost modelu GR4J ovlivňují nejvíce, je index aridity. Model GR4J simuluje odtok za všech okolností lépe na humidních než na aridních povodích. Srážko-odtokový proces je na humidních povodích více lineární a méně komplexnější než na aridních povodích (Parajka et al., 2013). V humidních povodích je navíc zajištěn pravidelnější přísun srážek, odtok z nich je konzistentnější a má tedy tendence být předvídatelnější. Oproti tomu srážky v aridních povodích se mohou vyskytovat jen během určitých období, odtok v nich je zpravidla velmi proměnlivý, což činí tato povodí méně předvídatelnými. Dle studie Patila a Stieglitze (2012), kteří se

ve své studii zabývali také povodími na území USA, hraje velkou roli také zalesněnost, nadmořská výška, respektive sklon povodí.

Skutečnost, že na některých povodích je simulační účinnost lepší než na jiných, může významně ovlivnit výskyt potenciálních hydrologických donorů. Studie Oudina et al. (2010) ukázala, že pokud je simulační účinnost modelu na povodí vysoká, tak je velmi pravděpodobné, že takové povodí bude mít vyšší počet hydrologických donorů, tj. špatně modelovaná povodí mají nižší počet hydrologických donorů, protože tato povodí mohou mít specifický hydrologický režim, který použitá modelová struktura není schopná simulovat, a proto je pro takové povodí obtížné najít hydrologický donor. Tento předpoklad je patrný např. na obr. 17 až 19 vlevo, na kterých jsou znázorněny akceptory s maximálním počtem potenciálních donorů, nacházející se v oblastech, ve kterých byla dle obr. 3 dosažena nejlepší simulační účinnost modelu GR4J.

Jsou nebo nejsou tedy geograficky nejbližší povodí hydrologickými donory? Při prahové hodnotě 1 % platí základní předpoklad přístupu prostorové blízkosti (tj. že geograficky nejbližší povodí vykazují nejpodobnější hydrologické chování) pouze pro 17,4 % povodí. Nicméně, prahová hodnota 1 % je v této případové studii nejpřísnější měřítko pro přijetí hydrologického donoru. Při prahové hodnotě 20 % (tedy při 20 % poklesu simulační účinnosti) ovšem platí přístup prostorové blízkosti pouze pro 35,8 % povodí. Tyto výsledky platnost regionalizačního přístupu prostorové blízkosti příliš nepodporují, což je patrné i z obr. 8 vpravo, kdy vzdálenost akceptor - nejlepší hydrologický donor je více než desetinásobná v porovnání se vzdáleností akceptor – nejbližší potenciální donor. To, že pro většinu z povodí není geograficky nejbližší povodí jejich hydrologickým donorem, má pravděpodobně dva důvody:

- hustota sítě potenciálních donorů (viz také Oudin et al. (2008)),
- předpoklad, že geografická vzdálenost je vhodným měřítkem podobnosti.

Nedostatečná hustota sítě potenciálních donorů limituje tento regionalizační přístup při vyhledávání hydrologických donorů zásadním způsobem. Z obr. 9 vlevo je patrné, že největší hustota potenciálních donorů byla rámci této studie v druhém až čtvrtém prstenci kolem akceptoru. Pokud by byla hustota donorů v prvním prstenci vyšší, existovala by větší pravděpodobnost nalezení hydrologického donoru v tomto prstenci, což by pak následně mohlo pozitivně ovlivnit výsledky analýzy. Zvýšení hustoty potenciálních donorů, zejména v prvním prstenci, lze dosáhnout zvýšením celkového počtu povodí v soboru, které však může mít celou řadu omezení. Např. v rámci této studie byla uvažována pouze pozorovaná povodí bez sněhového režimu, jejichž počet je omezen. Hustotu sítě potenciálních donorů, kromě počtu použitých povodí, mohl v této studii ovlivnit způsob vymezování prstenců kolem akceptorů, protože jejich šířka byla závislá na vzdálenosti akceptor – nejvzdálenější potenciální donor. V případě, že byl řešený akceptor lokalizován v centru USA (např. oblast Velkých planin – viz obr. 3), pak byla vzdálenost akceptor – nejvzdálenější donor výrazně nižší, než v případě lokace akceptoru blíže západnímu či východnímu pobřeží. Menší vzdálenost akceptor – nejvzdálenější donor vedla k menší šířce jednotlivých prstenců a následně k nižšímu počtu potenciálních donorů v těchto prstencích. Extrémní případ nedostateční sítě povodí je patrný z obr. 11 až 14 vpravo, kde dochází až extrémnímu zvýšení počtu hydrologických donorů v prstenci č. 9, který jde proti očekávanému klesajícímu trendu. Tento výsledek souvisí s lokací malého počtu povodí na západním pobřeží USA (oblast Kaskádového pohoří), která mají hydrologické donory ve velké vzdálenosti (v oblasti Appalačského pohoří na východě USA).

Druhým důvodem, který je v literatuře často uváděn (viz Acreman a Sinclair (1986), nebo He et al. (2011)), je skutečnost, že geografická vzdálenost mezi povodími nemusí být dostatečným měřítkem hydrologické podobnosti povodí. Povodí, která jsou lokalizována geograficky blízko u sebe, mohou být podobná v některých klíčových charakteristikách povodí, které ovlivňují dynamiku celkového odtoku z povodí (např. klimatické charakteristiky povodí a dále charakteristiky, které klima

ovlivňuje – např. přirozený vegetační kryt), avšak mohou se výrazně lišit v geomorfologických charakteristikách (např. sklonové poměry na povodí, plocha povodí), které také ovlivňují odtok z povodí. Nicméně výsledky prezentované na obr. 10 až 14, spolu s výsledky prezentovanými na obr. 9 vpravo ukazují, že nejvíce povodí mělo hydrologické donory lokalizovány v nejbližších prstencích (1 až 4) a zároveň nejvíce povodí mělo v jednom z těchto prstenců nejlepší hydrologický donor (nejvíce povodí mělo nejlepší hydrologický donor v prvním prstenci). To ukazuje, že geografická vzdálenost může být jistým měřítkem podobnosti hydrologického chování, neboť takto blízká povodí mohou vykazovat jistou míru podobnosti zejména v klimatických charakteristikách a dále v charakteristikách povodí, které klima zásadním způsobem ovlivňuje (He et al., 2011; Li et al., 2014).

Výsledky studie jsou dále ovlivněny tím, že pro simulaci odtoku na nepozorovaných povodích byl využit přístup jednoho donoru. Tento přístup vede obecně k horším výsledkům než přístup více donorů (viz např. studie Oudina et al. (2008) a Zhanga a Chiewa (2009)), neboť je výrazně citlivější na hydrologickou podobnost jednoho vybraného geograficky nejbližšího donoru (tj. v případě že geograficky nejbližší povodí není hydrologickým donorem, vede simulace na základě parametrické sady tohoto donoru na akceptoru ke špatným výsledkům). Naproti tomu, přístup více donorů kombinuje informaci o hydrologickém chování několika nejbližších donorů a je tedy vyšší pravděpodobnost, že některý z nich bude patřit mezi hydrologické donory daného akceptoru a tak může simulační účinnost na akceptoru zlepšit.

4 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá ověřením platnosti základního předpokladu regionalizačního přístupu geografické blízkosti povodí při predikci odtoku na nepozorovaných povodích.

V rešeršní části je nejprve vysvětlen pojem regionalizace, následuje popis jednotlivých regionalizačních metod a popsáno několik srovnávacích studí, ve kterých byly jednotlivé metody použity.

V případové studii je pomocí dat z 200 povodí z projektu MOPEX situovaných v USA testována platnost přístupu prostorové blízkosti. Srážko-odtokový model GR4J byl nakalibrován na všech 200 povodích, následně bylo provedeno testování přenosu optimálních parametrických sad z donorů na akceptory a spočítány poklesy simulační účinnosti v kalibrační i validační periodě. Simulační účinnost modelu GR4J byla vždy hodnocena na základě kritéria KGE. Byly stanoveny 4 prahové hodnoty pro přijetí hydrologického donoru 1 %, 5 %, 10 %, 15 % a 20 %. V případě nejpřísnější prahové hodnoty 1 % byl přístup prostorové blízkosti platný pro 17,4 % povodí. Při prahové hodnotě 20 % platil přístup prostorové blízkosti pro 35,8 % povodí. S rostoucí prahovou hodnotou stoupal počet hydrologických donorů, zároveň s rostoucí vzdáleností od akceptoru jejich počet klesal. Platnost přístupu prostorové blízkosti se tedy sice obecně potvrdila, byla ovšem použitelná pouze pro malý počet povodí. To, že pro většinu z povodí není geograficky nejbližší povodí jejich hydrologickým donorem, bylo zásadně ovlivněno nízkou hustotou sítě potenciálních donorů v blízkosti akceptoru.

5 Seznam použité literatury

ACREMAN, M.C. a C.D. SINCLAIR, 1986: *Classification of drainage basins according to their physical characteristics; an application for flood frequency analysis in Scotland* [online]. [cit. 2022-11-07]. ISSN edsair. Dostupné z: doi:10.1016/0022-1694(86)90134-4

BÁRDOSSY, A., 2007: Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 11(2), 703-710 [cit. 2022-10-21]. ISSN 10275606.

BERGSTRÖM, Sten, 1976: Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. *Dept. of Water Resour. Engineering, Lund Inst of Technol./Univ. of Lund, Bull. Ser. A,* [online]. (52) [cit. 2023-02-19]. ISSN edsair.

BEVEN, K.J. a M.J. KIRKBY, 1979: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* [online]. 24(1), 43 - 69 [cit. 2023-02-19]. ISSN 03036936. Dostupné z: doi:10.1080/02626667909491834

BLOSCHL, G. a M. SIVAPALAN, 1995: Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes (United Kingdom)* [online]. 9(3-4), 251-290 [cit. 2022-11-17]. ISSN edsagr.

BLÖSCHL, Günter, Murugesu SIVAPLAN, Thorsten WAGENER, Alberto VIGLIONE a Hubert SAVENIJE, 2013: *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales*. In: . United States of America by Cambridge University Press, New York: Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-02818-0. ISSN edsair. Dostupné z: doi:10.1017/cbo9781139235761

BUDYKO, M.I., 1975: Climate and Life. *Journal of Range Management* [online]. 28(2), 160-160 [cit. 2023-02-07]. ISSN 0022409X. Dostupné z: doi:10.2307/3897455

BURIAN, Jaroslav, 2008: Vyznáte se v interpolacích. *GeoBusiness, Springwinter, s. r. o.* 6+7, 40-41.

COSBY, B. J., G. M. HORNBERGER, R. B. CLAPP a T. R. GINN, 1984: *A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils* [online]. [cit. 2023-03-02]. ISSN edsair. Dostupné z: doi:10.1029/wr020i006p00682

DALY, Christopher, Ronald P. NEILSON a Donald L. PHILLIPS, 1994: A Statistical–Topographic Model for Mapping Climatological Precipitation over Mountainous Terrain. *Journal of Applied Meteorology (1988-2005)* [online]. 33(2), 140 [cit. 2023-02-05]. ISSN 08948763.

DUAN, Q., J. SCHAAKE, V. ANDRÉASSIAN, et al., 2006: Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology* [online]. 320(1), 3-17 [cit. 2023-03-01]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.031

FARNSWORTH, R. K., E. S. THOMPSON a E. L. PECK, 1982: Evaporation Atlas for the contiguous 48 United States. *NOAA Technical Report*. NWS 33, Washington, DC, 1982, 26p.

GUPTA, Hoshin V., Harald KLING, Koray K. YILMAZ a Guillermo F. MARTINEZ, 2009: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* [online]. 377(1), 80-91 [cit. 2023-03-04]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

HE, Y., A. BÁRDOSSY a E. ZEHE, 2011: A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 15(11), 3539-3553 [cit. 2022-10-21]. ISSN 10275606. Dostupné z: doi:10.5194/hess-15-3539-2011

HORNBERGER, George M. a Roger B. CLAPP, 1978: Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties. *Water Resources Research* [online]. 14(4), 601-601 [cit. 2023-03-02]. ISSN 00431397. Dostupné z: http://eds.a.ebscohost.com

CHIEW, FHS F.H.S., M.C. PEEL a A.W. WEATERS, 2002: Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*. Water Resources Publications, 335-367.

CHUNG, Sang Yong, S. VENKATRAMANAN, Hussam Eldin ELZAIN, S. SELVAM a M.V. PRASANNA, 2019: *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. 33-41. ISBN 9780128154137. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-815413-7.00004-3

JENSEN, M. E. a H. R. HAISE, 1963: Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division* [online]. ASCE 89, 15-41 [cit. 2023-03-07]. ISSN 26903296.

KIM, Kue Bum, Hyun-han KWON a Dawei HAN, 2018: Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 556, 194 - 210. ISSN edsair.

LEBECHEREL, Laure, Vazken ANDRÉASSIAN a Charles PERRIN, 2016: On evaluating the robustness of spatial-proximity-based regionalization methods. *Journal of Hydrology* [online]. 539, 196-203 [cit. 2022-10-15]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2016.05.031

LI, Fapeng, Yongqiang ZHANG, Zongxue XU, Changming LIU, Yanchun ZHOU a Wenfeng LIU, 2014: Runoff predictions in ungauged catchments in southeast Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology* [online]. 511, 28-38 [cit. 2022-10-24]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2014.01.014

LINDSTRÖM, G., B. JOHANSSON, M. PERSSON, M. GARDELIN a S. BERGSTRÖM, 1997: Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology* [online]. 201(1-4), 272-288 [cit. 2023-02-19]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-1694(97)00041-3

LOVELAND, T. R., B. C. REED, J. F. BROWN, D. O. OHLEN, Z. ZHU, L. YANG a J. W. MERCHANT, 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 21(6/7), 1303-1330 [cit. 2023-03-02]. ISSN 01431161. Dostupné z: doi:10.1080/014311600210191

MCGUINNESS, J. L. a Erich F. BORONE, 1972: A Comparison of Lysimeter-Derived Potential Evapotranspiration With Computed Values. *Technical Bulletins* [online]. [cit. 2023-03-07]. ISSN edsrep.

MCINTYRE, N., H. LEE, H. WHEATER, A. YOUNG a T. WAGENER, 2005: Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water resources research* [online]. 41(12) [cit. 2022-10-25]. ISSN 00431397.

MERZ, R. a G. BLÖSCHL, 2004: Flood frequency regionalisation—spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology* [online]. 302(1), 283-306 [cit. 2022-11-18]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2004.07.018

MICHEL, C., C. PERRIN a V. ANDREASSIAN, 2003: The exponential store: A correct formulation for rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal* [online]. 48(1), 109 - 124 [cit. 2023-02-19]. ISSN 02626667. Dostupné z: doi:10.1623/hysj.48.1.109.43484

MILLER, D. A. a R. A. WHITE, 1999: A Conterminous United States multi-layer soil characteristics data set for regional climate and hydrology modeling. *Earth Interactions*. 2.

MOORE, R., 1985: The probability-distributed principle and runoff prediction at point and basin scales. *Hydrol. Sci. Bull*. (30(2), 273– 297.

NASH, J.E. a J.V. SUTCLIFFE, 1970: River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* [online]. 10(3), 282-290 [cit. 2022-12-28]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6

OUDIN, L., Vazken ANDRÉASSIAN, C. PERRIN, C. MICHEL, N. LE MOINE 2008: a du génie rural CENTRE NATIONAL DU MACHINISME AGRICOLE, *Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments* [online]. [cit. 2022-10-18]. ISSN 00431397.

OUDIN, L., A. KAY, V. ANDRÁASSIAN a C. PERRIN, 2010: Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar?. *Water Resources Research* [online]. 46(11) [cit. 2023-03-05]. ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1029/2009WR008887

OUDIN, Ludovic, Frédéric HERVIEU, Claude MICHEL, Charles PERRIN, Vazken ANDRÉASSIAN, François ANCTIL a Cécile LOUMAGNE, 2005: Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology* [online]. 303(1), 290-306 [cit. 2023-03-07]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

OUDIN, Ludovic, Claude MICHEL a François ANCTIL, 2005: Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 1—Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs?. *Journal of Hydrology* [online].

303(1), 275-289 [cit. 2023-03-07]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.025

PARAJKA, J., R. MERZ a G. BLÖSCHL, 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 9(3), 157-171 [cit. 2022-11-20]. ISSN 10275606.

PARAJKA, J., A. VIGLIONE, M. ROGGER, M. SIVAPALAN a G. BLÖSCHL, 2013: Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: Runoff-hydrograph studies. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 17(5), 1783-1795 [cit. 2023-03-29]. ISSN 10275606. Dostupné z: doi:10.5194/hess-17-1783-2013

PARAMASIVAM, C.R. a S. VENKATRAMANAN, 2019: *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. 23-30. ISBN 9780128154137. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-815413-7.00003-1

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 [cit. 2023-02-01]. ISSN 10275606. Dostupné z: doi:10.5194/hess-16-551-2012

PERRIN, Charles, Claude MICHEL a Vazken ANDRÉASSIAN, 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* [online]. 279(1), 275-289 [cit. 2023-03-03]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7

SIVAPALAN, M., K. TAKEUCHI, S. W. FRANKS, et al., 2003: *IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences* [online]. [cit. 2022-10-20]. ISSN 02626667.

VANDEWIELE, G.L. a A. ELIAS, 1995: Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology* [online]. 170(1-4), 277 - 291 [cit. 2023-02-01]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/0022-1694(95)02681-E

YANG, Xue, Jan MAGNUSSON, Jonathan RIZZI a Chong-yu XU, 2018: Runoff prediction in ungauged catchments in Norway: comparison of regionalization approaches. *HYDROLOGY RESEARCH* [online]. 49(2), 487-505 [cit. 2022-12-29]. ISSN 00291277. Dostupné z: doi:10.2166/nh.2017.071

ZHANG, Yongqiang a Francis H. S. CHIEW, 2009: *Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments* [online]. [cit. 2022-10-27]. ISSN edsair. Dostupné z: doi:10.1029/2008wr007504

ZHAO, Ren-jun, 1992: The Xinanjiang model applied in China. *Journal of Hydrology* [online]. 135(1-4), 371 - 381 [cit. 2023-02-28]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/0022-1694(92)90096-E

Schéma modelu GR4J. In: *Https://wiki.ewater.org.au/* [online]. [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: https://wiki.ewater.org.au/display/SD45/GR4J+-+SRG#app-switcher