

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**



**Odhad a priori parametrů modelu SAC-SMA na nepozorovaných
povodích**

**Estimation of a priori SAC-SMA model parameters on ungauged
catchments**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce:

Ing. Martin Heřmanovský Ph.D.

Autor práce:

Bc. Marcela Zemanová

2014

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Zemanová Marcela

Regionální environmentální správa - kombinované Litvínov

Název práce

Odhad a priori parametrů modelu SAC-SMA na nepozorovaných povodích

Anglický název

Estimation of a priori SAC-SMA model parameters on ungauged catchments

Cíle práce

Zpracování literární rešerše na téma modelování srážko-odtokového procesu na nepozorovaných povodích. Odhad a priori parametrů modelu SAC-SMA na nepozorovaných povodích s využitím přístupu fyzikální podobnosti povodí.

Metodika

Provedení hutné literární rešerše na téma modelování srážko-odtokového procesu na nepozorovaných povodích se zaměřením na přístup fyzikální podobnosti povodí. Odhad a priori parametrů modelu SAC-SMA na nepozorovaných povodích přístupy single donor a multiple donor. Dále bude provedeno srovnání přístupu odhadu celé parametrické sady a odhadu jednotlivých parametrů modelu samostatně.

Harmonogram zpracování

31.12.2012 odevzdání literární rešerše

30.4.2013 odevzdání práce

Rozsah textové části

max. 80 stran

Klíčová slova

SAC-SMA, a priori parametry, nepozorované povodí, fyzikální podobnost povodí,

Doporučené zdroje informací

- Acreman, A. C., Sinclayr, C. D., 1986: Classification of drainage basins according to their physical characteristics; an application for flood frequency analysis in Scotland. *Journal of Hydrology*, 84, 365s-380s.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Le Moine, M., 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.
- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrological Earth Syst. Sci.*, 9, 157s-171s.
- Singh, V. P., 1995: Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications*, 1130s, ISBN 0-918334-91-8.
- Wagener, T., Wheater, H. S., Gupta, H. V., 2004: *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. Imperial College Press, London, 300s, ISBN 1-86094-466-3.
- Zhang, Y., Chiew, H. S. F., 2009: Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments. *Water Resources Research*, 45, W07412, doi:10.1029/2008WR007504.

Vedoucí práce

Heřmanovský Martin, Ing.

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.
Vedoucí katedry



V Praze dne 19.6.2012

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.
Děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Odhad a priori parametrů modelu SAC-SMA na nepozorovaných povodích“ vypracovala samostatně. V přehledu literatury a použitých zdrojů jsem uvedla všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ústí nad Labem dne 23. dubna 2014

.....

Marcela Zemanová

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Martinu Heřmanovskému Ph.D., za zadání diplomové práce, ochotu a odbornou pomoc při jejím vedení. Za podporu po celou dobu studia děkuji mé rodině.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá odhadem a priori parametrů modelu SAC-SMA na nepozorovaných povodích s využitím přístupu fyzikální podobnosti povodí. V první části je prezentována literární rešerše zaměřená na modelování srážko-odtokového procesu na nepozorovaných povodích a používané metody regionalizace. Druhá část se zabývá regionalizací parametrů modelu SAC-SMA na základě fyzikální podobnosti povodí. Odhad a priori parametrů použitého modelu na nepozorovaných povodích byl proveden přístupy single donor i multiple donor. Dále bylo provedeno srovnání přístupu odhadu celé parametrické řady a odhadu jednotlivých zvolených parametrů modelu samostatně.

Druhá část diplomové práce obsahuje dvě případové studie. První studie byla zaměřena na identifikaci optimálních kombinací deskriptorů povodí, které povedou k nejpřesnějšímu odhadu všech parametrů modelu. Druhá studie byla zaměřena na identifikaci optimálních kombinací deskriptorů povodí vhodných k nejpřesnějšímu odhadu jednotlivých zvolených deskriptorů. Výsledky ukazují pozitivní vliv na přesnost odhadu parametrů modelu se zvyšujícím se počtem deskriptorů v identifikovatelné optimální kombinaci. Rozdíly v přesnosti odhadu mezi oběma studiemi byly zanedbatelné. Ukázalo se také, že při odhadu celé parametrické sady vedl k nejlepším výsledkům multiple donor přístup.

Klíčová slova:

Regionalizace, SAC-SMA, nepozorované povodí, a priori parametry, fyzikální podobnost povodí.

Abstract

This thesis deals with the estimation of a priori SAC-SMA model parameters on ungauged catchments using approach based on physical similarity basin. The first section presents a literature research focused on modeling the rainfall-runoff process on ungauged catchments and the methods of regionalization. The second part deals with the regionalization of model SAC-SMA parameters based on physical similarity basin. Estimation of a priori model SAC-SMA parameters on ungauged catchments was performed single donor and multiple donor approaches. Furthermore, a comparison was made to estimate the approach entire parameter set and to estimate selected individual model parameters separately.

The second part of the thesis contains two cases studies. The first study was aimed to identify the optimal combinations of descriptors basin, which will lead to the most accurate estimate of the all model parameters. The second study was focused on identifying the optimal combinations of descriptors basin suitable for the most accurate estimate of each selected descriptors. The results showed a positive effect on the accuracy of the estimation of the models parameters with the increasing number of descriptors in identifiable optimal combination. Differences in the accuracy of estimates between the two studies were insignificant. It was also show that hen estimating the entire parameter set led to the best results multiple donor approach.

Key words:

Regionalization, SAC-SMA, ungauged catchment, a priori parameter, physical similarity catchments.

Obsah

1. Úvod	10
1.1. Námět diplomové práce	11
1.2. Cíl diplomové práce.....	11
2. Modelování srážko-odtokového procesu	12
2.1. Hydrologický model	12
2.2. Klasifikace hydrologických modelů	13
2.2.1. Klasifikace matematických modelů.....	14
2.3. Kalibrace modelu.....	15
2.3.1. Manuální kalibrace	16
2.3.2. Automatická kalibrace	16
2.4. Nejistoty v hydrologickém modelování.....	18
3. Regionalizace	19
3.1. Přístupy k hydrologické regionalizaci.....	22
3.1.1. Regresní přístup.....	22
3.1.2. Přístup prostorové (geografické) blízkosti	24
3.1.3. Přístup fyzikální podobnosti povodí.....	26
4. Projekt MOPEX a a priori parametry modelu	29
4.1. Projekt MOPEX	29
4.2. Odhad a priori parametry modelu	29
5. Vstupní data a programové vybavení	31
5.1. Popis modelu SAC-SMA	31
5.2. Vstupní data	33

5.2.1. Analýza vstupních dat.....	34
6. Regionalizace a priori parametrů modelu SAC-SMA	37
6.1. Porovnání přístupu single donor a multiple donor	38
6.2. Vliv počtu a typu deskriptorů na odhad celé sady parametrů modelu	42
6.3. Vliv počtu a typu deskriptorů na odhad jednotlivých parametrů modelu samostatně	45
7. Diskuze.....	51
8. Závěr.....	54
Seznam literatury	56
Přílohy	62

1. Úvod

Vodní zdroje a vodní prostředí po celém světě jsou v ohrožení jako nikdy předtím. Přirozené hydrologické a ekologické systémy jsou narušovány lidskou činností na povodích celého světa. Vodní zdroje nejsou bezpečné pro miliardy lidí, zvyšuje se riziko povodní, biodiverzita neustále klesá z důvodu pokračujícího ničení pobřežních ekosystémů. Voda je nezbytná pro náš život, zdraví a vývoj, na druhou stranu ale představuje hrozbu v podobě přírodních katastrof. Výzvou pro hydrologické společenství je identifikace vhodných odpovědí na tyto hrozby. V průběhu let, vyvinuli hydrologové řadu prediktivních nástrojů např. empirické modely, celistvé modely, distribuované modely, které poskytují objektivní a kvantitativní rozhodování s ohledem na vodní zdroje, hospodaření s vodou, stejně tak jako hodnocení živelných nebezpečí. V mnoha částech světa existují nepozorovaná povodí tzn. povodí s nedostatečnými záznamy jak z hlediska množství a kvality dat, tak z hlediska hydrologického zkoumání. Problém je prohlouben vlivem antropogenních změn na zemském povrchu a klimatem, které se vyskytují v místním, regionálním a celosvětovém měřítku. Za těchto podmínek jsou predikce nepozorovaných nebo nedostatečně změřených povodí vysoce nespolehlivé. K dosažení významných pokroků v oblasti předpovědí na nepozorovaných povodí zahájila Mezinárodní asociace hydrologických věd (IHAS) vědecký program Prediction in Ungauged Basins (PUB), jejímž hlavním tématem je snížení nejistot v odhadu hydrologických předpovědí (Sivapalan et al., 2010).

Pro nepozorovaná povodí musí být parametry použitého modelu převzaty z dalších povodí, které jsou schopny poskytnout dostatečné odtokové údaje (pozorovaná povodí). Proces přenosu parametrů pozorovaných povodí na povodí nepozorovaná je obecně nazýván hydrologická regionalizace (Merz & Blöschl, 2004). Existují tři běžně používané metody regionalizace. Regresní přístup, přístup prostorové (geografické) blízkosti a přístup fyzikální podobnosti povodí (Oudin et al., 2008). V současné době existuje řada regionalizačních studií, tyto studie ale stále vedou k velmi rozdílným výsledkům. Této problematice je proto třeba se nadále věnovat a provádět další výzkum těchto metod.

1.1. Námět diplomové práce

Tato diplomová práce se zabývá odhadem parametrů modelu na nepozorovaných povodích s využitím přístupu fyzikální podobnosti povodí. Při odhadu parametrů modelu budou testovány single donor přístup a multiple donor přístup. Nakonec bude provedeno srovnání přístupu odhadu celé parametrické sady a odhadu jednotlivých parametrů modelu samostatně.

1.2. Cíl diplomové práce

Cílem diplomové práce je regionalizační studie zaměřená na odhad a priori parametrů modelu SAC-SMA na nepozorovaných povodích. Diplomová práce se skládá ze dvou hlavních částí.

První část tvoří zpracování literární rešerše, která by měla poskytnout obecné shrnutí modelování srážko-odtokového procesu. Literární rešerše je zaměřená na klasifikaci hydrologických modelů, kalibraci modelu a metody hydrologické regionalizace.

Druhá část je zaměřená na odhad a priori parametrů použitého modelu na nepozorovaných povodích s využitím přístupu fyzikální podobnosti povodí. Odhad parametrů modelu SAC-SMA byl nejdříve proveden přístupem odhadu celé parametrické sady a dále odhadem jednotlivých zvolených parametrů modelu samostatně. Součástí je prezentace porovnání výsledků použitých přístupů single donor a multiple donor. Dále byl zjišťován vliv počtu deskriptorů na odhad parametrů modelu jak pro celou parametrickou sadu, tak pro jednotlivé parametry modelu samostatně. Nakonec je uvedena diskuze získaných výsledků a závěrečné shrnutí výsledků.

2. Modelování srážko-odtokového procesu

Srážko-odtokové modely jsou v současné době běžně používané nástroje v hydrologickém výzkumu (Wagener et al., 2004). Snahy matematicky reprezentovat vybrané části srážko-odtokového procesu mají dlouhou historii (viz racionální metoda odhadu kulminačního průtoku odvozená Mulvaneyem roku 1851, práce Shermana z roku 1932), avšak výraznější pokrok na tomto poli byl dosažen až s vývojem výpočetních technologií v 60. letech minulého století (Beven, 2000).

2.1. Hydrologický model

Dooge (1986) popisuje matematický model jako zjednodušenou reprezentaci části přírodního nebo antropogenního světa, který může simulovat některé, ale ne všechny z jeho charakteristik. Podstatným znakem simulačního modelu je, že vytváří výstup nebo sérii výstupů v reakci na vstup nebo sérii vstupů (Dingman, 2002).

V současné době existuje celá řada matematických modelů používaných v hydrologii, proto je vhodné jeho výběru věnovat čas a prostor. Základním pravidlem pro výběr hydrologického modelu je volba nejjednodušší reprezentace, která je kompatibilní s úkolem, pro který byla vybrána. Vývoj hydrologického modelu pro zvolený soubor podmínek a požadavků není jednoduchým úkolem. Diskin & Simon (1977), Diskin et al. (1973) a Dingman (2002) prezentovali postup pro sestavení a testování hydrologického modelu, který shrnuli do následujících kroků:

1. Definice problému řešeného modelem a vymezení rozsahu použití modelu.
2. Stanovení procesů probíhajících na povodí a jejich případného vlivu na model.
3. Úprava již existujících postupů nebo návrh nového postupu k řešení definovaného problému.
4. Výběr typu modelu ke splnění požadovaných aplikací a definování rozsahu jevů, které mají být zastoupeny modelem.
5. Definice struktury modelu a řídicích rovnic.
6. Výběr časového kroku vstupních a výstupních dat.
7. Výběr hodnotícího kritéria, které má být použito v optimalizačním procesu.
8. Kalibrace modelu pomocí pozorovaných dat pomocí vhodného optimalizačního postupu a zvolené objektivní funkce.

9. Otestovat simulační účinnost modelu s ohledem na jeho zamýšlené použití.
10. Úprava modelu, pokud je to nutné (zahrnuje změny ve struktuře a změnu časového kroku).
11. Aplikace modelu na problém, pro který byl určen a vyhodnocení zjištěných výsledků.

Kroky 5 až 10 se mohou na základě získaných výsledků v závěrečné fázi analýzy několikrát zopakovat. Je třeba poznamenat, že v této fázi je výběr zvolené objektivní funkce pro optimalizační postup v podstatě subjektivní rozhodnutí, které má vliv na optimální hodnoty parametrů. Tedy, optimální sada parametrů je optimální pouze v souvislosti výběru objektivní funkce.

2.2. Klasifikace hydrologických modelů

Např. Clarke (1973) a Dingman (2002) rozdělují modely na tři základní skupiny:

- fyzikální modely
- analogové modely
- matematické modely

Fyzikální modely jsou skutečné pojetí reprezentace části přírodního prostředí. Pokud jsou sestaveny ve větším nebo menším měřítku, než je přírodní systém, pak je použito formální pravidlo vycházející ze vztahu modelu k reálnému světu (Dingman, 2002).

Analogové modely využívají pozorování jednoho procesu k simulaci fyzikálně obdobného přírodního procesu. Např. jak uvádí Ohmův zákon, proudění elektřiny je analogem Darcyho zákona proudění vody v porézním prostředí (Dingman, 2002).

Matematické modely představují soubor rovnic, numerických a logických kroků, které konvertují vstupní hodnoty na hodnoty výstupní. Podstatou matematického modelu jsou rovnice, jejichž forma reprezentuje kvalitativní chování modelu a parametry, tedy číselné konstanty v těchto rovnicích, které určují kvantitativní chování modelu. Vzhledem k dostupnosti výkonnější počítačové techniky a počítačových programů je využití fyzikálních a analogových modelů v hydrologii nahrazováno matematickými modely, které jsou levnější a více flexibilnější (Dingman, 2002).

2.2.1. Klasifikace matematických modelů

Clarke (1973) klasifikuje matematické modely do čtyř základních skupin:

- Stochastické – Konceptuální modely (SC)
- Stochastické – Empirické modely (SE)
- Deterministické – Konceptuální modely (DC)
- Deterministické – Empirické modely (DE)

Pokud uvažujeme parametry modelu jako náhodné proměnné s určitým pravděpodobnostním rozdělením, pak je možné model považovat za stochastický. Na druhou stranu, pokud jsou parametry modelu považovány za nezávislé (pro žádný parametr nelze vysledovat pravděpodobnostní rozdělení), pak je tento model považován za deterministický (Clarke, 1973).

Stochastické modely lze rozdělit do dvou základních skupin (Jeníček, 2007):

- SP (Stochastic Probabilistic) – pravděpodobnostní modely. Jednotlivé hydrologické parametry (např. maximální či minimální průtok nebo podzemní odtok) těchto modelů jsou charakterizovány určitým pravděpodobnostním rozdělením.
- ST (Stochastic Time series generation) – modely generování časových řad. Tyto modely je možné použít při extrapolaci časových řad pozorovaných parametrů, přičemž se zachovávají jejich statistické charakteristiky.

Deterministické modely se od sebe odlišují svojí strukturou, fyzikálním přístupem, nebo časovou a prostorovou diskretizací (Jeníček, 2007):

- DL (Deterministic Hydrodynamic Laws) – modely založené na fyzikálním popisu srážko-odtokového procesu, které usilují o respektování zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie. Tyto modely lze také označit jako „white box“ modely.
- DC (Deterministic, Conceptual) – tento přístup odráží fyzikální zákony ve zjednodušené, čili koncepční formě, obsahující i určitou dávku empiricky odvozených vztahů. Tyto modely se řeší pomocí obyčejných diferenciálních rovnic. Spojením fyzikálního a empirického spojení je tato skupina modelů označována jako „grey box“ modely.
- DB (Deterministic, Black-box) – modely využívající pouze empiricky odvozený vztah mezi vstupními a výstupními veličinami. Veškeré procesy

zůstávají skryty a probíhají uvnitř systému, proto se také označují „black box“ modely. Použití těchto modelů je výhodnější spíše pro malá povodí.

Další možností klasifikace matematických modelů je podle prostorové variability (Clarke, 1973):

- Celistvé modely
- Distribuované modely
- Semi-distribuované modely

Celistvé modely uvažují povodí jako samostatnou homogenní jednotku, čímž ignorují prostorovou variabilitu vstupních dat (srážky, teplota, potenciální evaporace a jiné), okrajových podmínek a procesů (Clarke, 1973, Dingmann, 2002, Wagener et. al., 2004). Parametry modelu pak lze považovat za „průměrné hodnoty“ pro celé povodí (Wagener et. al., 2004).

Distribuované modely poskytují detailní reprezentaci prostorové variability hydrologických procesů, vstupů, okrajových podmínek a fyzikálních vlastností povodí. Tím poskytují mnohem realističtější popis prostorové heterogenity hydrologických procesů v porovnání s celistvými modely. Tyto modely rozdělují povodí na mnoho segmentů (soustava mřížky, suboblasti, subpovodí atd.) (Dingmann, 2002).

Semi-distribuované modely rozdělují povodí jako síť oblastních segmentů (subpovodí). Každý segment je reprezentován celistvým srážko-odtokovým modelem. Odtok z každého segmentu je směřován do uzavírajícího profilu a pak k výpočtu celkového odtoku. Prostorová variabilita hydrologických procesů uvnitř povodí je reprezentována počtem a polohou segmentů, které určují míru prostorového rozdělení vstupů do modelu, struktury a parametrů modelu (Boyle et. al., 2001).

2.3. Kalibrace modelu

Hydrologické modely obsahují velmi často parametry, jejichž hodnoty nelze určit přímo z polních měření nebo mapových podkladů a proto musejí být odhadnuty využitím kalibračního procesu. Prostřednictvím kalibračního procesu jsou parametry modelu upravovány tak dlouho, dokud povodí a chování modelu neukazují

přijatelnou úroveň shody (Wagener et al., 2001). Podobnost je obvykle posuzována podle jedné nebo více objektivních funkcí, doprovázené vizuální kontrolou zaznamenaných a vypočtených hydrogramů (Wagener & Wheeler, 2006). Model, tedy kombinace modelové struktury a sady parametrů, který nejlépe simuluje chování zkoumaného systému je považován za jeho vhodnou reprezentaci (Wagener et al., 2001).

Kalibrační proces modelu má dvě fáze. V první fázi dochází ke specifikaci parametrů využitím dřívějších znalostí o chování a vlastnostech modelu ke specifikaci počátečních odhadů parametrů modelu (Sorooshian & Gupta, 1995). Ve druhé fázi dochází k odhadu optimálních hodnot parametrů využívající různých metod ke snížení nejistoty spojené s parametry (Boyle et al., 2000).

2.3.1. Manuální kalibrace

Manuální kalibrace je nejrozšířenějším přístupem pro kalibraci hydrologických modelů. Jde především o úpravy hodnot parametrů prostřednictvím procesu „pokus - omyl“. Většinou není přesný počet a charakter těchto kroků jasně specifikován. Přestože je hodnocení výkonu modelu a úprava hodnot parametrů obvykle ovlivněno zavedenými zásadami vycházejícími z předchozích zkušeností, přesto se posloupnosti úpravy parametrů liší od uživatele k uživateli a to na základě jejich zkušeností, odborné přípravy a pochopení modelové struktury (Boyle et al., 2000).

2.3.2. Automatická kalibrace

Cílem automatické kalibrace je vytvoření objektivní strategie k odhadu parametru, která eliminuje subjektivitu posuzování zahrnutou v manuální kalibraci. V automatickém přístupu je vyhodnocení výkonu modelu a postupu nastavení hodnoty parametru objektivní v tom smyslu, že se stanovují jasná pravidla, podle kterých se vytváří skutečná posloupnost úpravy parametru. Postup musí být navržen tak, aby vyjadřoval faktory důležité pro zdařilou kalibraci a také zjištění, které faktory to jsou. Obecně tedy platí, že automatická kalibrace vyžaduje od uživatele zadat přesné určení oblasti parametrického prostoru, o kterém uvažujeme, že pravděpodobně obsahuje hodnoty optimalizovaného parametru (Boyle et al., 2000).

Sorooshian & Gupta (1995) popisují čtyři prvky automatické kalibrace, tj. objektivní funkce, optimalizační algoritmus, kalibrační data a ukončovací kritéria.

Objektivní funkce je funkce udávající rozdíl mezi simulovaným výstupem modelu a zaznamenanou odezvou povodí. Výběr vhodné objektivní funkce je v podstatě subjektivní, jelikož ke kalibraci lze použít jednu nebo více objektivních funkcí (Diskin & Simon, 1977). Mezi nejčastěji používané objektivní funkce patří Nash-Sutcliffeův koeficient shody (Nash-Sutcliffe Efficiency – NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970) – objektivní funkce odvozená na základě výsledků matematické statistiky, nebo ETV (relativní objemová chyba) – objektivní funkce založená na hydrologických ukazatelích.

Optimalizační algoritmus je logický postup, který se využívá k vyhledání odezvového povrchu (plocha popsaná objektivní funkcí v parametrickém prostoru), který je omezen přípustným rozsahem parametrů, tedy hodnot parametrů, které optimalizujeme numerickou hodnotou objektivní funkce. Optimalizační algoritmus lze klasifikovat na lokální nebo globální metody vyhledávání. Lokální vyhledávací metody jsou navrženy k hledání funkcí s jedním maximem. Globální vyhledávací metody jsou navrženy tak, aby vyhledaly minimum nebo maximum multimodálních funkcí (Sorooshian & Gupta, 1995).

Kalibrační data mohou podstatně ovlivnit kvalitu kalibrační procedury. Zásadní problém tvoří, jaké množství dat je nezbytné pro kalibraci modelu a jaký druh dat může poskytnout nejlepší výsledky (Sorooshian & Gupta, 1995).

Ukončovací kritérium určuje, kdy je vyhledávání optimálních hodnot parametrů zastaveno. Ukončovací kritérium je velmi závislé na výběru počátečních hodnot parametrů (Sorooshian & Gupta, 1983). Sorooshian & Gupta (1995) uvádějí tři hlavní kritéria: konvergence objektivní funkce, konvergence parametru a maximální počet iterací. Konvergence objektivní funkce ukončí vyhledávání tak, že algoritmus není dále schopen výrazně zlepšit hodnotu objektivní funkce jednou další nebo více iteracemi. Konvergence parametrů ukončuje vyhledávání, když algoritmus není dále schopen měnit hodnotu parametru a zlepšovat funkční hodnotu jednou nebo více iteracemi. Kritérium maximálního počtu iterací se používá pro čistě náhodné vyhledávací metod.

2.4. Nejistoty v hydrologickém modelování

V hydrologickém modelování obecně existuje velké množství nejistot. Je proto nutné tyto nejistoty kvantifikovat, neboť mají zásadní vliv na spolehlivost simulací odtoku zvolenými modelovými strukturami. Nejistoty v procesu modelování nemají svou příčinu pouze v odhadech parametrů, ale vychází také z chyb spojených se vstupy a výstupy a z chybné struktury modelu, která vychází z pochopení reálných procesů implementovaných do matematických modelů (Vrugt et al., 2005).

V procesu modelování rozeznáváme čtyři hlavní zdroje nejistot (Melching, 1995; Wagener et al., 2004):

- **Nejistota vstupních dat** – souvisí s chybami způsobenými samotným měřením, s nepřiměřenou hustotou měrných stanic a s chybami spojenými s úpravou a přenosem vstupních dat. Tento typ nejistoty ovlivňuje identifikaci optimálních sad parametrů (zvyšuje nejistotu spojenou s parametry modelu) (Kuczera, 1983).
- **Nejistota struktury modelu** – souvisí se zjednodušením nebo nedostatečným popisem reálných procesů. Nevyhnutelné nedostatky ve struktuře modelu jsou často výsledkem problému, že různé sady parametrů dosahují uspokojivých kalibračních výsledků.
- **Nejistota parametrů modelu** – souvisí s neschopností konvergovat k jednomu nejlepšímu souboru parametrů modelu s použitím informace obsažené ve vstupních datech. Tato nejistota vyplývá především z nejistot dat a modelové struktury. Proces kalibrace šíří nejistotu spojenou se vstupními daty do hodnot parametrů modelu, což vede k tomu, že i „špatné“ sady parametrů vedou k podobným simulačním výsledkům jako „dobré“ sady parametrů (termínem „špatné“ sady zde musíme rozumět např. sady s nereálnými hodnotami parametrů).
- **Nejistota počátečních podmínek** – souvisí s neznalostí počátečních hodnot vnitřních stavových veličin v modelu na začátku kalibrační nebo verifikační časové řady. Tato nejistota může být minimalizována kalibrací počátečních podmínek nebo pomocí cvičné časové řady, což umožní přizpůsobit se vnitřním stavům.

3. Regionalizace

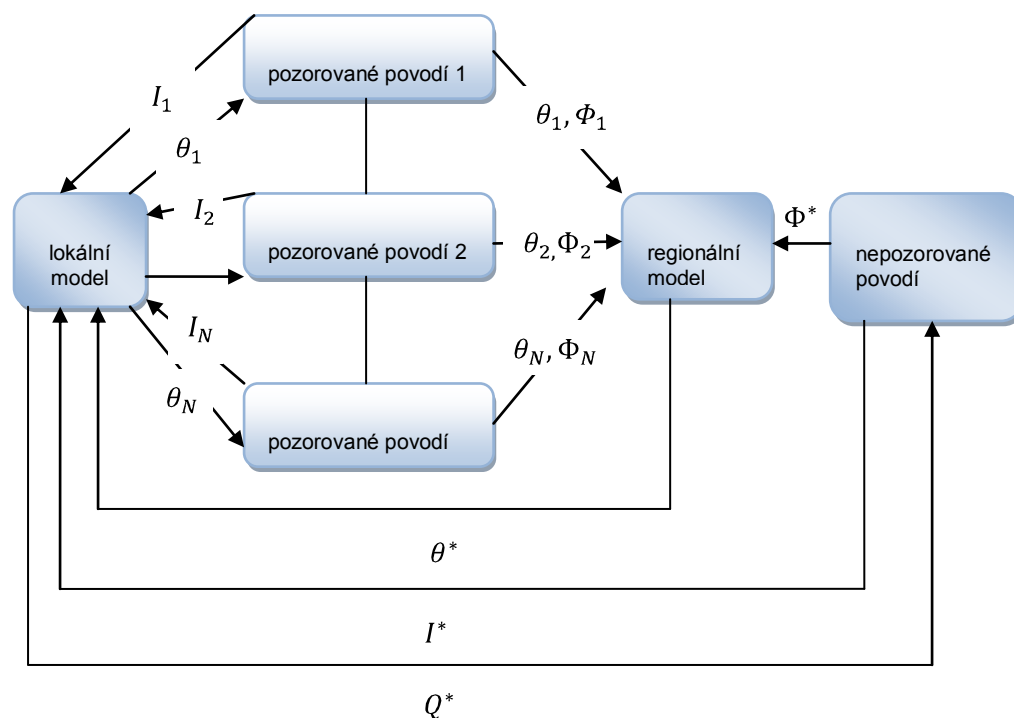
Výzkum v oblasti hydrologických regionalizací je stále potřebný z důvodu odhadu zájmových hydrologických charakteristik (např. N-letých průtoků, celkového odtoku z povodí atd.) na nepozorovaných povodích. Termínem nepozorované povodí rozumíme každé povodí, na kterém není možné provést kalibraci parametrů hydrologického modelu z důvodu absence časových řad měřeného odtoku, který slouží k vyhodnocení jeho simulační účinnosti (Wagener et al., 2004). Problém spojený s aplikací hydrologických modelů na nepozorovaných povodích řeší hydrologická regionalizace.

První pokusy o hydrologickou regionalizaci jednoduše využívaly hodnoty parametrů modelu přenesené ze sousedních povodí. Nutnou podmínkou však bylo, aby na těchto sousedních povodích byly k dispozici časové řady odtoků, proti kterým byl model kalibrován. Tento přístup, který se později začal nazývat přístup geografické blízkosti (Vandewiele & Elias, 1995), se může jevit jako nedostatečný, jelikož i sousední povodí mohou být s ohledem na jejich hydrologické chování velmi odlišná (Acreman & Sinclayr, 1986, Post et al., 1998). Další alternativou je odhad parametrů přímo z měřitelných charakteristik povodí jako je pórovitost a polní vodní kapacita, vegetační kryt, nebo hydraulická vodivost a drsnost koryta pomocí vhodné zvoleného matematického vztahu (Duan et al., 2001).

Měření charakteristik povodí, zejména půdních, jsou většinou prováděna v malém (laboratorním) měřítku. Tento přístup předpokládá možnost odvození skutečných hodnot těchto charakteristik pro celé povodí pomocí jednoduchých agregačních pravidel. To ale nebere v úvahu heterogenitu ve větším měřítku. Předpokládá se tedy, že reálné hodnoty půdních charakteristik jsou ekvivalentní parametrům konceptuálního modelu, neboť jeho parametry charakterizují reakci celistvého povodí obvykle agregací této heterogenity. Je nepravděpodobné, aby parametry modelu mohly být snadno odvozeny z půdních vlastností, které neovlivňují celkový odtok z povodí (Wagener et al., 2004).

Asi nejčastější přístup odhadu parametrů pomocí měřitelných charakteristik využívá statistických metod, ale pouze za předpokladu, že jedinečnost každého povodí může být zachycena v jedinečné kombinaci charakteristik povodí. Základní metodiku představuje kalibrace konkrétní modelové struktury (lokální modelové struktury), na velkém počtu pozorovaných povodí, kvůli možnosti odvození statistických vztahů mezi parametry modelu a charakteristikami povodí. Tyto

statistické vztahy a měřitelné charakteristiky nepozorovaného povodí pak mohou být využity k odvození odhadů lokálních parametrů modelu. Tento postup je obvykle označován jako regionalizace (Wagener & Wheater, 2006). Na obr. č. 1 je znázorněno obecné schéma regionalizace.



Obr. č. 1: Obecné schéma regionalizace (zdroj: Wagener et al., 2004)

Cílem modelování srážko-odtokového procesu je výpočet celkového odtoku z povodí jako reakce na příčinnou srážku a další meteorologické proměnné jako je teplota a relativní vlhkost. To můžeme matematicky vyjádřit (Wagener et al., 2004):

$$Q = M_L(\theta_L I) + \varepsilon_L \quad (1)$$

kde Q je hodnota simulovaného odtoku, I je matice vstupních proměnných např. srážky a teplota, M_L reprezentuje lokální modelovou strukturou, θ_L je vektor parametrů pro tuto strukturu a ε_L je chyba.

Parametry modelu jsou obvykle odhadnuty prostřednictvím kalibrace, ale pouze v případech, kdy jsou k dispozici měřené časové řady odtoků po dostatečně dlouhou dobu. Požadovaná délka časové řady mimo jiné závisí na složitosti použité modelové struktury a informačním obsahu vstupních dat. V případě, že časové řady měřeného odtoku nejsou dostupné pro konkrétní povodí, pak musíme provést kalibraci zvolené modelové struktury na velkém počtu pozorovaných povodí a dále

nalézt funkční vztah mezi kalibrovanými parametry modelu a zvolenými charakteristikami, tj. nalezneme regionální model (Wagener et al., 2004):

$$\hat{\theta}_L = M_R(\cdot)(\theta_R|\Phi) + \varepsilon_R \quad (2)$$

kde $\hat{\theta}_L$ je odhadnutý parametr modelu na nepozorovaném povodí, $M_R(\cdot)$ je funkční vztah nalezený mezi $\hat{\theta}_L$ a fyzicko-geografickými a klimatickými charakteristikami povodí Φ pro soubor pozorovaných povodí, θ_R je sada parametrů regionálního modelu (nejčastěji regresní koeficienty) a ε_R je chyba.

Základní popis postupu regionalizace (Wagener et al., 2004):

1. Rozhodnutí, jaký typ modelové struktury M_L může nejlépe popsat zvolený soubor povodí a jaký typ regionálního modelu (např. lineární nebo nelineární regrese) popíše vztah mezi parametry modelu a charakteristikami. Povodí, která jsou příliš odlišná svým chováním, a nelze je proto dobře popsat zvoleným lokálním modelem, je nutné odstranit ze souboru povodí.
2. Shromáždění řady charakteristik povodí Φ , o kterých lze předpokládat, že souvisejí s hydrologickou odezvou vybraných povodí (např. hustota říční sítě, využití půdy a vegetační kryt, půdní charakteristiky).
3. Aplikace lokálního modelu M_L a odhad optimální sady parametrů θ_L na každém pozorovaném povodí souboru.
4. Odvození vztahu mezi hodnotami parametrů θ_{Li} a charakteristikami povodí Φ souboru pozorovaných povodí. Tím je získán regionální model. Lze očekávat, že pro každý parametr modelu bude odvozen samostatný regionální model (tj. jednotlivé regionální modely se mohou lišit typem vybraných nezávislých proměnných).
5. Aplikace regionálních modelů $M_{Ri}(\theta_{Ri}|\Phi)$ k odhadu každého parametru $\hat{\theta}_{Li}$ pro nepozorované povodí.
6. Predikce odtoku na nepozorovaném povodí použitím sady parametrů $\hat{\theta}_L$.

Každý z výše uvedených kroků bohužel obsahuje nejistoty, které se nevyhnutelně přenášejí do výsledku regionalizace. Hlavní zdroje nejistot jsou spojeny s (Wagener et al., 2004):

- výběrem charakteristik povodí vhodných k popisu jejich hydrologické odezvy povodí,

- výběrem modelové struktury,
- identifikací sad parametrů lokálního modelu,
- výběrem regionální modelové struktury a identifikací jejich parametrů,
- výběrem regionalizační metody.

3.1. Přístupy k hydrologické regionalizaci

Termín hydrologická regionalizace má základy v metodách klasifikace a seskupování povodí, později byl rozšířen o přenos parametrů ze sousedních pozorovaných povodí (nazývaných také dárcovská povodí, nebo donory) na nepozorovaná povodí. V současné době zahrnuje pojem regionalizace všechny metody zaměřené na odhad parametrů modelu na kterékoli nepozorované povodí (Oudin et al., 2008).

Oudin et al. (2008) rozdělují regionalizační přístupy na tyto tři skupiny:

- Regresní přístup
- Přístup prostorové (geografické) blízkosti
- Přístup fyzikální podobnosti povodí

3.1.1. Regresní přístup

Regresní přístup spočívá v nalezení matematického vztahu mezi fyzikálními a klimatickými charakteristikami povodí a hodnotami parametru modelu na pozorovaných povodích. Tyto zjištěné vztahy jsou pak použity spolu s fyzikálními a klimatickými charakteristikami nepozorovaného povodí k odhadu hodnot parametrů na něm. Základem tohoto přístupu je předpoklad, že skutečně existuje fungující vztah mezi charakteristikami pozorovaného povodí a parametry modelu. Bohužel u mnoha modelů byla prokázána existence více optimálních sad parametrů související se specifickými podmínkami kalibrace (např. délkou kalibračního souboru) a chybami ve vstupních datech. Z tohoto důvodu je nalezení matematického vztahu mezi parametry modelu a charakteristikami povodí obtížné (Yapo et al., 1996; Perrin et al., 2007).

Druhým předpokladem tohoto přístupu je, že deskriptory pozorovaného povodí vybrané pro regresi poskytují významné informace pro chování

nepozorovaného povodí. U tohoto předpokladu je hlavním problémem prostorová variabilita charakteristik (Oudin et al., 2008).

He et al. (2011) popisují tři varianty metody regionalizace založených na regresi:

1. Dvoustupňová regrese
2. Sekvenční regrese
3. Jednostupňová (simultánní) regrese

Dvoustupňová regrese je nejrozšířenější metodou regionalizace. Lze jí shrnout do následujících kroků (He et al., 2011):

1. Identifikace optimálních sad parametrů modelu pro soubor pozorovaných povodí.
2. Odvození vztahu mezi kalibrovanými hodnotami parametrů modelu a charakteristikami pozorovaných povodí.
3. Odhad parametrů modelu na nepozorovaném povodí pomocí vztahu z kroku 2 a charakteristik nepozorovaného povodí.

Lze si všimnout, že tyto tři kroky odpovídají obecnému postupu regionalizace, jak ho prezentovali Wagener et al. (2004). Využití dvoustupňové regrese můžeme nalézt v Nash (1960), James (1972), Parajka et al. (2005), Oudin et al. (2008) a mnoha dalších. Při odhadu parametrů modelu nepozorovaného povodí se tato metoda zdá efektivní, ale nalezené vztahy mezi parametry modelu a charakteristikami povodí jsou často nedostatečné a predikce dosahují omezeného úspěchu (Fernandez et al., 2000; Hundecha & Bárdossy, 2004; Kim & Kaluarachchi, 2008).

Sekvenční regrese je určena k vyřešení konkrétního problému špatné identifikovatelnosti parametrů modelu. Tato metoda v podstatě modifikuje kalibrační proces. Místo kalibrace všech parametrů modelu najednou, je proces proveden sekvenčně od nejlépe identifikovatelného parametru k nejméně identifikovatelnému parametru. V každé části kalibrace mohou být použity různé objektivní funkce k pokrytí určitých aspektů hydrologické odezvy povodí, která je většinou reprezentováno konkrétním parametrem. Regresní funkce je pak v průběhu každé části kalibrace použita k nalezení vztahu mezi nejlépe identifikovatelným parametrem modelu a vybranými deskriptory povodí. Výsledek hodnoty parametru se získá z vhodné regrese a je neměnný v další kalibrační sérii. Kalibrace a regrese pokračuje do kalibrace posledního parametru a získání regresní funkce. Výhodou

této metody je, že se zlepšuje identifikovatelnost parametru modelu. Wagener & Wheeler (2006) ve své studii ukázali zlepšení identifikovatelnosti parametru po každé části kalibrace, přesto ale metoda nevedla k nalezení vhodnějších vztahů mezi parametry modelu a deskriptory povodí.

Obecně platí, že sekvenční regrese dosahuje lepších výsledků, než dvoustupňová regrese (např. Lamb & Kay, 2002, 2004; Calver et al., 2005). Naproti tomu Wagener & Wheeler (2006) uvádějí horší výsledky sekvenční regrese ve srovnání s dvoustupňovou regresí, pravděpodobně kvůli jediné objektivní funkci, která se používá v sekvenční kalibraci.

Jednostupňová (simultánní) regrese byla vyvinuta na základě regrese dvoustupňové. Tato metoda kombinuje obě fáze dvoustupňové regrese do jedné. Z tohoto důvodu je tato metoda také označována jako simultánní regrese. Fernandez et al. (2000) ve své studii vyzkoušel jednostupňovou metodu, kde na rozdíl od dvoustupňové metody model nebyl kalibrován nezávisle na deskriptorech povodí, ale pomocí objektivních funkcí. K optimalizaci proměnných využil zjednodušený gradient algoritmu. Výsledky však neukázaly žádné zlepšení oproti tradičnímu dvoustupňovému přístupu. Hundecha & Bárdossy (2004) ve své studii tuto metodu převzali s cílem maximalizovat výkon modelu. Místo kalibrace parametrů modelu byly kalibrovány lineární koeficienty rovnic spojujících parametry modelu a deskriptory povodí. K nalezení optimálního řešení použili celkový zredukovaný gradient algoritmu. Tímto způsobem může být regionální studie provedena v jedné fázi (He, 2011).

3.1.2. Přístup prostorové (geografické) blízkosti

Přístup prostorové blízkosti spočívá v přenosu parametrů ze sousedních povodí na nepozorovaná povodí (Oudin et al., 2008). Důvodem je, že fyzikální a klimatické charakteristiky jsou v rámci oblasti relativně homogenní. Prostorová blízkost může být dostatečným ukazatelem podobnosti povodí (Blöschl, 2005). He (2011) uvádí pro výpočet geografické vzdálenosti mezi dvojicí povodí Euklidovu vzdálenost d :

$$d_{t,d} = \sqrt{(X_t - X_d)^2 + (Y_t - Y_d)^2} \quad (3)$$

kde X_t, Y_t a X_d, Y_d jsou geografické souřadnice těžiště cílového (tj. akceptoru) a dárcovského povodí (tj. donoru). Celá sada parametrů srážko-odtokového modelu pak může být přenesena z geograficky nejbližšího donoru nebo je vypočtena na základě parametrických sad zvoleného počtu nejbližších donorů.

Oudin et al. (2008) ve své studii uvádí dvě možnosti kombinace informací donorů:

1. Průměrování parametrů

Parametry modelu pro nepozorované povodí jsou vypočítány jako průměr parametrů zvoleného počtu donorů. Celkový odtok v časovém kroku j na nepozorovaném povodí je pak vypočten:

$$\hat{Q}(j) = \hat{Q} \left(j, \frac{\sum_{i=1,m} X_i}{m} \right) \quad (4)$$

kde m je počet donorů a X_i je vektor hodnot parametrů modelu donoru i .

2. Průměrování výstupů

Celkový odtok na nepozorovaném povodí je vypočten jako průměr simulací provedených na základě srážky nepozorovaného povodí a parametrických sad zvoleného počtu donorů. Celkový odtok j je vypočítán:

$$\hat{Q}(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1,m} \hat{Q}(j, X_i) \quad (5)$$

kde m je počet donorů a X_i je vektor parametrů donoru i . Obě výše uvedené metody lze provést buď s jedním geograficky nejbližším povodím (single donor přístup) nebo s vyšším počtem geograficky nejbližších donorů (multiple donor přístup).

Komplikovanější postup odhadu parametrů na nepozorovaném povodí pomocí parametrických sad geograficky nejbližších donorů je geo-statistická metoda „kriging“. Používá se k interpolaci hodnot parametrů v geografickém prostoru (např. Vandewiele & Elias, 1995; Merz & Blöschl, 2004; Parajka et al., 2005). Vandewiele & Elias (1994) použili kriging ve své studii k odhadu hodnot parametrů na nepozorovaném povodí průměrováním hodnot parametrů povodí v bezprostřední blízkosti nepozorovaného povodí a povodí v širším okolí (regionu). Přístup průměrování širšího okolí se ukázal jako výrazně lepší.

3.1.3. Přístup fyzikální podobnosti povodí

Přístup fyzikální podobnosti povodí lze chápat jako syntézu přístupu geografické blízkosti a regresním přístupem. Regionalizace je založená na podobnosti mezi jedním nebo více donory a nepozorovaným povodím (Burn & Boorman, 1993). V podstatě se jedná o přenos informace (např. sady parametrů) mezi povodími, která jsou podobná z hlediska rozpoznatelných charakteristik povodí a nemusí být geograficky sousední. Povodí s podobnými charakteristikami by se měly chovat podobně (Oudin et al., 2008).

K odhadu parametrů modelu či odhadu simulovaného odtoku na nepozorovaném povodím lze využít buď průměrování parametrů nebo průměrování výstupů pomocí jednoho nebo více donorů (single donor přístup nebo multiple donor přístup) (Oudin et al., 2008; Parajka et al., 2005; Zhang & Chiew, 2009).

V přístupu fyzikální podobnosti povodí je možné využít několik metod nalezení donorů. Oudin et al. (2008) použili ve své studii metodu RAS (Rank-accumulated similarity method). V této metodě je jednotlivým pozorovaným povodím přidělováno pořadí na základě podobnosti s nepozorovaným povodím. Podobnost je vyjádřena formou absolutní hodnoty odchylky testovaného deskriptoru pozorovaného a nepozorovaného povodí. Pozorovanému povodím s nejnižší absolutní hodnotou odchylky je pro daný deskriptor přiřazeno pořadí 1 (pozorovanému povodím s druhou nejmenší absolutní hodnotou odchylky pro daný deskriptor povodím je přiřazeno pořadí 2 atd.). Tento postup je opakován pro všechny ostatní deskriptory povodí v testované kombinaci. Za deskriptorově nejpodobnější povodím je pak považováno pozorované povodím s nejnižším průměrným pořadím vypočítaným jako aritmetický průměr dílčích pořadí. Burn & Boorman (1993) použili ve své studii k nalezení deskriptorově nejpodobnějších pozorovaných povodí metodu shlukové analýzy dat (Cluster Analysis – CLA). Tato metoda seskupuje povodí do regionů vhodně zvoleným shlukovacím algoritmem podle jejich podobnosti v hodnotách testovaných deskriptorů povodí.

Burn & Boorman (1993) prezentovali postup při regionalizaci parametrů zvoleného modelu s využitím shlukové analýzy dat:

1. Seskupení pozorovaných povodí na základě jejich hydrologické podobnosti.
2. Přiřazení nepozorovaných povodí do regionů (shluků) identifikovaných v kroku 1 na základě jejich podobnosti.

3. Odhad parametrů modelu podle dostupných informací, včetně pravděpodobného členství ve skupině.

Účelem **seskupení pozorovaných povodí** je rozdělení celého (a často velmi heterogenního) souboru povodí do menších skupin. Např. povodí, která mají rychlou odtokovou odezvu odtoku, by měla být odlišena od těch s pomalejší odtokovou odezvou. Burn & Boorman (1993) použili při seskupování pozorovaných povodí K-m-C algoritmus (K-means clustering algorithm), který rozděluje celý soubor povodí do regionů na základě hodnot M deskriptorů povodí. Proces shlukování má za úkol minimalizovat měřítko chyby EC (Burn & Boorman, 1993):

$$EC = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in I_k} \sum_{m=1}^M W_m (X_m^i - C_m^k)^2 \quad (6)$$

kde W_m je váha aplikovaná na deskriptor m v měřítku Euklidovské vzdálenosti, X_m^i je hodnota deskriptoru m povodí i , C_m^k je souřadnice těžiště deskriptoru m shluku k , K je počet shluků, I_k je soubor povodí v shluku k a M je celkový počet deskriptorů.

Přřazení nepozorovaných povodí do jednotlivých shluků uvedených v první části lze provést využitím diskriminační analýzy. Nicméně, v diskriminaci mezi shluky nelze použít všechny proměnné popisující fyzikální vlastnosti povodí. Preferované proměnné použité v procesu diskriminace se mohou měnit v závislosti na počtu regionů, na které byl rozdělen původní soubor povodí. Prvním krokem v diskriminační analýze je tedy přřazení nepozorovaných povodí do shluku, který byl identifikován jako vhodný na základě použitých deskriptorů povodí. Burn & Boorman (1993) k tomu použili neparametrickou diskriminační analýzu, založenou na přřstupu sousedního povodí. Tato technika je založena na přřazení nepozorovaného povodí do shluku podle počtu jeho členů shluku n (tj. pozorovaných povodí), která jsou nepozorovanému povodí nejpodobnější.

V této diskriminační analýze je povodí přřazeno do shluku podle nejvyšší pravděpodobnosti členství. Pravděpodobnost je dána (Burn & Boorman, 1993):

$$p_{ik} = \frac{nn_{ik}pr_k}{\sum_{i=1}^K (nn_{il}pr_l)} \quad (7)$$

kde p_{ik} je pravděpodobnost, že nepozorované povodí i je členem shluku K , nm_{ik} je počet nejpodobnějších sousedních povodí k nepozorovanému povodí i , která jsou ze shluku k , pr_k je předběžná pravděpodobnost členství nepozorovaného povodí i ve shluku k a součet je ukončen všemi shluky. Předběžná pravděpodobnost členství nepozorovaného povodí i ve shluku je definována:

$$pr_k = \frac{nm_k}{N} \quad (8)$$

kde nm_k je počet povodí ve shluku k a N je celkový počet povodí.

Pro **odhad hydrologických parametrů** modelu na nepozorovaném povodí navrhli (Burn & Boorman, 1993) několik alternativ:

1. Odhad parametrů modelu metodou váženého průměru na základě parametrických sad n deskriptorově nejpodobnějších pozorovaných povodí v regionu, kam bylo nepozorované povodí. Podobnost (resp. blízkost) povodí lze řešit např. Euklidovou vzdáleností mezi body (z nichž jeden reprezentuje nepozorované povodí a druhý pozorované povodí) v deskriptorovém prostoru.
2. Tato alternativa vychází z bodu 1, ale je, kromě deskriptorové podobnosti, navíc omezena geografickou blízkostí nepozorovaného a pozorovaného povodí.
3. Odhad parametrů modelu metodou váženého průměru na základě parametrických sad n deskriptorově nejpodobnějších pozorovaných povodí ze všech regionů (tato alternativa uvažuje fakt, že nepozorované povodí mohlo být přiřazeno do nevhodného regionu).
4. Odhad parametrů modelu je proveden pomocí regresní rovnice odvozené pomocí parametrů modelu a deskriptorů povodí všech pozorovaných povodí z regionu, do kterého bylo přiřazeno nepozorované povodí.

4. Projekt MOPEX a a priori parametry modelu

4.1. Projekt MOPEX

Projekt MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment) je mezinárodní projekt zaměřený na rozvoj zkvalitnění metod odhadu a priori parametrů hydrologických modelů. Tento projekt byl zahájen v roce 1996 a je financován NOAA (Oceanic and Atmospheric Administration).

Strategií projektu MOPEX je shromáždit velké množství vysoce kvalitních hydrometeorologických dat. Základní požadované údaje projektu tvoří denní srážky, denní maximální a minimální teploty, denní odtokové data, potenciální klimatické evaporační data, teplota a vlhkost vzduchu, rychlost větru atd. Pro odhad parametrů modelu je pak nejdůležitější kvalita srážkových dat. Ke zjištění různých hydrologických událostí reprezentovaných v hydrometeorologických datech je požadovaná délka pozorování minimálně 10 let, ideální délka dat je 20 let a více (Duan et al., 2006).

Strategii projektu tvoří tři hlavní kroky (Shaake et al., 2006):

1. Rozvíjet potřebné datové soubory.
2. Využít tyto datové soubory k rozvoji metod odhadu a priori parametrů modelu.
3. Prokázat, že nové metody jsou lepší než ty současné.

Pro rozvoj „zlepšení“ metod odhadu a priori parametrů poskytuje projekt MOPEX komplexní datové soubory povodí USA a dalších zemí a umožňuje tak porovnání různých výsledků hydrologického modelování (Ao et al., 2006).

4.2. Odhad a priori parametry modelu

Metoda odhadu a priori parametrů využívá předem stanovených kvantitativních vztahů mezi parametry modelu a skutečnými fyzikálními vlastnostmi povodí k získání reálných podob hodnot parametrů a omezení nejistoty spojené s parametry modelu. I když tyto metody nejsou dokonalé, je jim ze strany hydrologů věnována stále se zvyšující pozornost. Významnost rozvoje metod odhadu a priori parametrů je uznávána Mezinárodní asociací hydrologických věd IHAS, která přijala

tuto problematiku jako jednu z hlavních komponentů projektu PUB (Sivapalan et al., 2003).

Odhad a priori parametrů může být použit:

- k minimalizaci počtu parametrů, které jsou kalibrované
- k získání hodnot parametrů, kde není možná kalibrace
- k omezení počátečního rozsahu parametrů pro optimalizaci/kalibraci
- k přenosu parametrů na nepozorovaná povodí

V současných metodách a priori odhadu parametrů jsou pravděpodobně nejistoty způsobené z různých příčin a nedostatku správných fyzikálních principů. Proto byly poslední výzkumy zaměřené na „zlepšení“ fyzikálně založených metod odhadu a priori parametrů. Specifikace hodnot parametrů modelu využitím fyzikálních vlastností povodí se zdá být jediným způsobem, jak překonat nedostatky kalibrace a současně odhadu a priori parametrů. Přestože mohou být hodnoty parametrů takto fyzikálně založených odhadů a priori parametrů předmětem značné nejistoty, je tento typ „zlepšené“ metody odhadu a priori parametrů nezbytný k regionalizaci a to zejména pro nepozorovaná povodí (Beven, 1989). K dosažení tohoto cíle je třeba zvážit tyto aspekty (Ao et al., 2006):

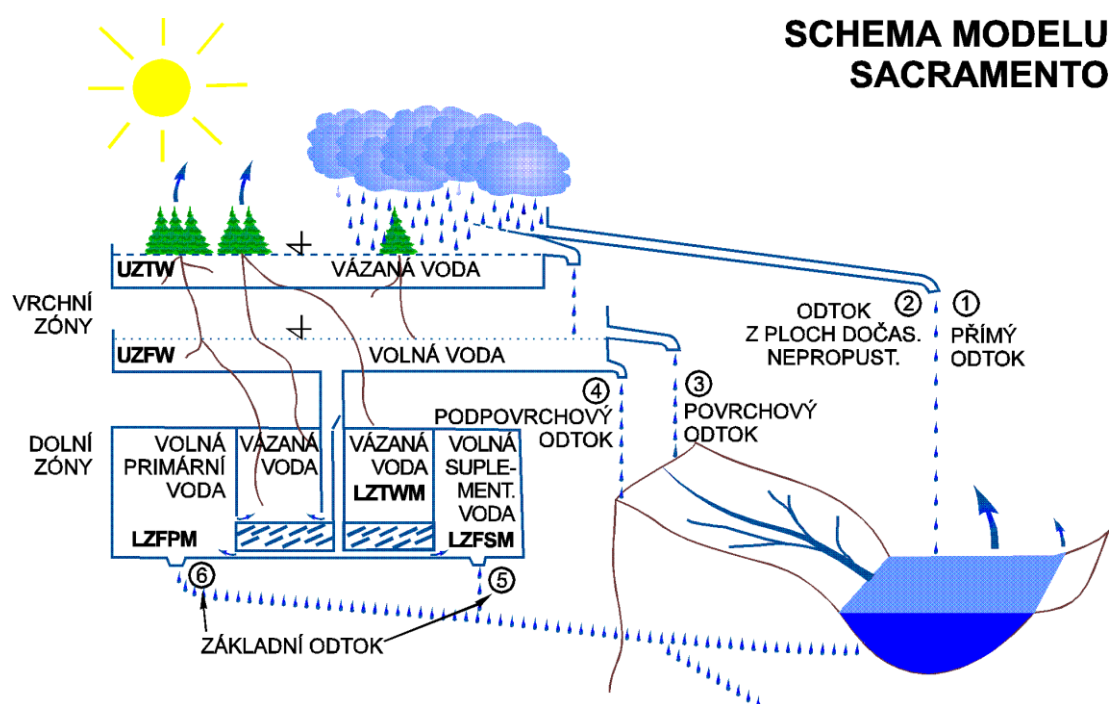
1. Parametry modelu by měly mít přesný fyzikální význam nebo alespoň přibližnou fyzikální interpretaci.
2. Ke správnému popisu fyzikálních vlastností povodí je zapotřebí velké množství prostorové informace.
3. Stanovit kvantitativní vztahy nebo přenos mezi fyzikálními vlastnostmi povodí a hodnotami parametrů. V současné době existují pouze omezené parametry s přesným fyzikálním významem, u kterých jsou k dispozici jejich naměřené hodnoty. Tento problém lze řešit pomocí regresní analýzy, využitím optimalizovaných hodnot parametrů, vybraných z úspěšných modelových aplikací.
4. Ke stanovení kvantitativní funkce přenosu parametr – povodí by měly být použity povodí s různými hydro-klimatickými charakteristikami.

V současné době jsou postupy této metody k dispozici pouze u některých modelů a nepodávají vhodné hodnoty parametrů, což má za následek omezený úspěch (Koren et al., 2002).

5. Vstupní data a programové vybavení

5.1. Popis modelu SAC-SMA

Srážko-odtokový model Sacramento (Sacramento – Soil Moisture Accounting) patří mezi nejznámější a nejrozšířenější modely. Lze ho charakterizovat jako konceptuální model výpočtu půdní vlhkosti, založený na principech pohybu vody. Je součástí knihovny modelovacích technik systému NWSRFS (National Weather Service River Forecast System), který je vyvíjen od 70. let národní meteorologickou službou (NWS) v USA (Burnash, 1995).



Obr.č. 2: Schéma modelu SAC-SMA (zdroj: Burnash,1995)

Burnash (1995) a shodně také Smith et al. (2000) dělí povodí na několik zón, které jsou propojeny do systému nádrží. Hlavními komponenty modelu jsou:

- Evapotranspirace
- Vázaná (kapilárně vázaná) voda (Tension Water)
- Volná voda (Free water)
- Povrchový odtok (Surface Flow)

- Horizontální odtok (Lateral Drainage)
- Vertikální odtok – perkolace (Vertical Drainage)

Model využívá soustavu vzájemně spojených hypotetických nádrží a představuje povodí jako soustavu vertikálně a horizontálně uspořádaných zón, resp. nádrží. Voda vstupující do systému je v jednotlivých zónách buď zadržována, odčerpávána vegetací nebo infiltruje do níže položených zón. Hlavním vstupem do modelu jsou srážky. V případě srážek na propustnou plochu je nejprve plněna horní zóna vázané vody (půdní vlhkost). K tvorbě přímého odtoku může docházet i na jinak propustných vrstvách a to v případě, že srážky překročí infiltrační kapacitu. Po saturaci horní zóny vázané vody je voda přechodně shromažďována v horní zóně volné vody a z té dále infiltruje do nižších zón, nebo je transportována ven ze systému v podobě podpovrchového odtoku. V případě, že je překročena kapacita perkolace a odtoku podpovrchovým odtokem z horní zóny volné vody je také vytvářen odtok povrchový (Burnash, 1995).

Spodní zóna vázané vody s vodou dostupnou pro evapotranspiraci a zóny volné vody primární a suplementární jsou plněny perkolací společně. Odvodňují se nezávisle rozdílnou rychlostí produkující základní odtok. Rychlost infiltrace z horních do spodních zón je závislá na saturaci zón spodních, tzn. v období sucha je nejvyšší. Evapotranspirace je závislá na vegetačním pokryvu povodí a dostupnosti vody na ni spotřebovávané, čím je delší doba od poslední srážky, tím se evapotranspirace snižuje (Burnash, 1995).

Model SAC-SMA často bývá součástí větších předpovědních systémů. V České republice je součástí hydrologického předpovědního systému AQUALOG, který pokrývá většinu povodí Labe. Celý systém je navázán na další komponenty (sněhový model SNOW17, korytový model TDR a řízení nádrží MAN) a na celou řadu programových prostředků (Jeníček, 2007).

Na obr. č. 2 je znázorněno schéma modelu SAC-SMA, kde jsou uvedeny parametry UZTWM horní zóna vázané vody (max. kapacita), UZFWM horní zóna volné vody (max. kapacita), LZTWM dolní zóna vázané vody (max. kapacita), LZFPM dolní zóna volné primární podzemní vody (max. kapacita) a LZFSM dolní zóna volné suplementární (sezónní) podzemní vody (max. kapacita).

5.2. Vstupní data

K analýze byla využita data 437 povodí projektu MOPEX situovaná v USA. Použitý soubor dat obsahoval deskriptory povodí různých kategorií (klimatické, půdní charakteristiky, vegetační kryt a morfologické) a také sadu jedenácti parametrů upravené verze modelu Sacramento. V tab.č. 1 jsou uvedeny všechny parametry modelu i s jejich jednotkami.

zkratka	popis	jednotky
UZTWM	horní zóna vázané vody (max. kapacita)	(mm)
UZFWM	horní zóna volné vody (max. kapacita)	(mm)
LZTWM	dolní zóna vázané vody (max. kapacita)	(mm)
LZFPM	dolní zóna volné primární podzemní vody (max. kapacita)	(mm)
LZFSM	dolní zóna volné suplementární podzemní vody (max. kapacita)	(mm)
UZK	výtokový koeficient horní zóny	(-)
LZPK	výtokový koeficient dolní primární zóny	(-)
LZSK	výtokový koeficient dolní suplementární zóny	(-)
ZPERC	koeficient maximální míry perkolace	(-)
REXP	exponent tvaru infiltrační křivky	(-)
PFREE	část vody převáděné do LZFPM i před nasycením LZTWM	(%)

Tab. č. 1: Označení, popis a jednotky parametrů upravené verze modelu SAC-SMA.

V tabulce č. 2 jsou uvedeny všechny deskriptory povodí, jejich označení a jednotky použité při analýze. Hodnoty deskriptoru Paa byly vypočteny na základě modelu PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) pro období 1961 až 1990 (Daly et al., 1994). Hodnoty deskriptoru Ea a PEaa byly vypočteny pomocí NOAA Freewater Evaporation Atlas (Farnsworth et al., 1982). Deskriptory Po, Wp a SHC byly odvozeny na základě databáze STATSGO (Miller & White, 1999). Základem deskriptorů SS, LS, a CS byla klasifikace USDA. Deskriptory vegetačního krytu byly zjištěny na základě klasifikace IGBN (Loveland et al., 2000). Hodnoty deskriptory Gf odvodil Gutman & Ignatov (1998) pro každý měsíc. V této studii byly použity hodnoty Gf mimo vegetační sezónu (únor) kvůli možnosti rozlišení lesních porostů podrobněji na opadavé a stálezelené lesní porosty.

číslo kategorie DP	typ kategorie DP	název deskriptorů	označení DP	jednotky
1	klimatické DP	průměrná roční srážka	Paa	(mm)
		průměrná roční potenciální evaporace	Peaa	(mm)
		podíl průměrné roční srážky a průměrné roční potenciální evaporace	Paa/PEaa	(-)
		podíl roční evaporace a průměrné roční potenciální evaporace	Eaa/PEaa	(-)
2	půdní hydraulické vlastnosti a půdní druhy	písčité půdy	SS	(-)
		hlinité půdy	LS	(-)
		jílovité půdy	CS	(-)
		pórovitost	Po	(-)
		bod vadnutí	Wp	(-)
		nasycená hydraulická vodivost	SHC	m. s ⁻¹
3	vegetační kryt a pokryvnost povodí	lesní porost	Fo	(-)
		orná půda	Cr	(-)
		trvalý travní porost	Gr	(-)
		urbanizované plochy	Ur	(-)
		pokryvnost povodí	Gf	(-)
4	morfologické DP	plocha povodí	Ac	km ²

Tab. č. 2: Kategorie deskriptorů povodí se všemi deskriptory povodí.

5.2.1. Analýza vstupních dat

Na testovaných povodích byla zjišťována lineární závislosti mezi a priori parametrů modelu SAC-SMA a deskriptory povodí. Hodnoty korelačního koeficientu (*CC*) byly nejprve vypočteny mezi samotnými deskriptory povodí, ale také mezi samotnými parametry modelu a nakonec mezi deskriptory povodí a parametry modelu.

V tab. č. 3 jsou uvedeny vypočtené hodnoty korelačního koeficientu mezi deskriptory povodí. Hodnoty korelačního koeficientu (*CC* >0.7) jsou zvýrazněny červeně. V tomto případě jsou jasně patrné vysoké hodnoty korelačního koeficientu mezi základními a odvozenými klimatickými deskriptory a dále vysoké hodnoty korelačního koeficientu mezi deskriptorem Po, Wp a SHC. Silné korelace byly zaznamenány také mezi dvojicemi deskriptorů LS – CS a SS – SHC.

	PEaa	Paa/PEaa	Eaa/PEaa	SS	LS	CS	Po	Wp	SHC	Fo	Cr	Gr	Ur	Gf	Ac
Paa	-0.414	0.799	0.768	0.048	0.227	-0.168	-0.099	-0.289	0.122	0.580	-0.331	-0.011	-0.250	0.513	-0.238
PEaa		-0.702	-0.797	0.040	-0.539	0.402	-0.172	0.104	0.134	-0.511	0.342	-0.047	0.116	0.135	0.305
Paa/PEaa			0.881	-0.019	0.430	-0.342	-0.015	-0.242	0.006	0.617	-0.312	-0.014	-0.287	0.314	-0.263
Eaa/PEaa				-0.024	0.430	-0.283	0.048	-0.220	0.004	0.639	-0.462	0.036	-0.189	0.248	-0.296
SS					-0.211	-0.257	-0.665	-0.578	0.868	-0.133	-0.023	0.139	0.029	0.020	0.088
LS						-0.793	0.174	-0.112	-0.186	0.515	-0.167	-0.079	-0.344	-0.077	-0.229
CS							0.240	0.436	-0.254	-0.442	-0.029	0.057	0.449	0.003	0.156
Po								0.822	-0.807	-0.068	-0.153	-0.010	0.145	-0.332	-0.110
Wp									-0.748	-0.344	-0.091	-0.064	0.349	-0.375	-0.005
SHC										-0.027	0.043	0.068	-0.069	0.244	0.109
Fo											-0.199	-0.116	-0.697	0.483	-0.243
Cr												-0.060	-0.198	0.035	0.065
Gr													-0.004	-0.044	-0.089
Ur														-0.425	0.110
Gf															-0.039

Tab. č. 3: Vypočtené hodnoty (CC) mezi deskriptory povodí.

V tab. č. 4 jsou uvedeny vypočtené hodnoty korelačního koeficientu mezi parametry modelu Sacramento. Hodnoty korelačního koeficientu (CC >0.7) jsou zvýrazněny červeně. Nejvyšší hodnota korelačního koeficientu byla nalezena u dvojice parametrů REXP a PFREE, UZK a LZSK. Dále jsou patrné silné korelace mezi parametrem UZK a parametry LZFPM, LZPK, LZSK, ZPERC, REXP a také mezi parametrem LZFPM a LZPK, REXP a PFREE.

	UZFWM	LZTWM	LZFPM	LZFSM	UZK	LZPK	LZSK	ZPERC	REXP	PFREE
UZTWM	0.546	0.050	-0.163	-0.227	-0.398	-0.190	-0.433	0.514	0.044	-0.030
UZFWM		-0.035	0.493	-0.480	0.486	0.455	0.440	-0.263	-0.620	-0.602
LZTWM			0.384	0.578	-0.025	0.137	-0.023	-0.087	-0.620	-0.063
LZFPM				-0.194	0.730	0.780	0.673	-0.605	-0.860	-0.809
LZFSM					-0.268	-0.245	-0.194	-0.057	0.590	0.555
UZK						0.716	0.991	-0.842	-0.736	-0.657
LZPK							0.694	-0.723	-0.676	-0.550
LZSK								-0.860	-0.646	-0.559
ZPERC									0.462	0.341
REXP										0.975

Tab. č. 4: Vypočtené hodnoty (CC) mezi parametry modelu Sacramento.

V tab. č. 5 jsou uvedeny vypočtené hodnoty korelačního koeficientu mezi deskriptory povodí a parametry modelu Sacramento. Hodnoty korelačního koeficientu (CC >0.7) jsou zvýrazněny červeně. Silné korelace byly zaznamenány

mezi parametry UZK, LZPK, LZSK, ZPERC, REXP a PFREE a deskriptory povodí související s půdními vlastnostmi SS, CS, Po, Wp a SHC.

	Paa	PEaa	Paa/PEaa	Eaa/PEaa	SS	LS	CS	Po	Wp	SHC	Fo	Cr	Gr	Ur	Gf	Ac
UZWWM	0.013	-0.200	0.059	0.084	-0.201	0.268	-0.047	0.455	0.383	-0.273	-0.058	-0.202	-0.054	0.235	-0.287	-0.067
UZFWWM	0.195	-0.242	0.224	0.191	0.440	0.353	-0.502	-0.319	-0.429	0.404	0.137	-0.127	-0.021	-0.037	-0.036	-0.051
LZWWM	0.011	0.014	-0.038	0.026	0.016	0.055	0.168	0.119	0.043	-0.007	-0.237	-0.253	0.105	0.301	-0.281	0.106
LZFPM	0.161	-0.162	0.158	0.152	0.691	0.237	-0.519	-0.607	-0.614	0.634	0.024	-0.105	0.091	0.002	-0.087	0.028
LZFSM	-0.085	0.288	-0.214	-0.146	-0.295	-0.403	0.698	0.205	0.225	-0.249	-0.282	-0.125	0.094	0.316	0.004	0.163
UZK	0.252	-0.096	0.215	0.198	0.697	0.126	-0.499	-0.834	-0.938	0.797	0.264	0.037	0.066	-0.277	0.302	0.014
LZPK	0.198	-0.117	0.134	0.138	0.770	-0.076	-0.292	-0.665	-0.658	0.703	0.071	-0.029	0.134	-0.111	0.049	0.022
LZSK	0.241	-0.042	0.179	0.169	0.701	0.043	-0.411	-0.840	-0.933	0.815	0.236	0.043	0.074	-0.264	0.336	0.040
ZPERC	-0.260	0.022	-0.156	-0.152	-0.549	0.094	0.202	0.708	0.832	-0.621	-0.215	-0.092	-0.118	0.289	-0.306	-0.049
REXP	-0.194	0.304	-0.270	-0.236	-0.580	-0.464	0.785	0.573	0.643	-0.557	-0.227	0.032	-0.016	0.175	0.022	0.087
PFREE	-0.189	0.346	-0.293	-0.265	-0.451	-0.563	0.801	0.463	0.569	-0.442	-0.238	0.075	0.000	0.133	0.049	0.106

Tab. č. 5: Vypočtené hodnoty (CC) mezi deskriptory povodí a parametry modelu Sacramento.

Analýzou vstupních dat bylo zjištěno, že deskriptor SHC (nasycená hydraulická vodivost) silně koreluje s deskriptory povodí SS, Po a Wp. Na základě tohoto zjištění byl deskriptor SHC odstraněn ze souboru deskriptorů jako zdroj redundantní informace.

6. Regionalizace a priori parametrů modelu SAC-SMA

V této kapitole jsou prezentovány výsledky studie zaměřené na regionalizaci parametrů modelu SAC-SMA na souboru 437 povodí. K regionalizaci byl použit přístup fyzikální podobnosti povodí. K vyhledávání donorů byla použita metoda RAS. V rámci analýzy byl řešen přístup single donor a multiple donor (maximálně bylo uvažováno 20 donorů). Studie se zabývala nalezením optimální kombinace deskriptorů povodí (dále jen DP) pro vyhledávání donorů a také nalezením optimálního počtu donorů k odhadu parametrů modelu na nepozorovaném povodí. Vyhledávání optimální kombinace DP bylo provedeno pro celou sadu parametrů, kvůli zjištění, zda existuje kombinace DP, která vede k co nejpřesnějšímu odhadu celé sady parametrů. Následně bylo vybráno několik parametrů, pro které byly také hledány optimální kombinace DP. Tyto pak byly porovnány s kombinacemi DP pro celý soubor parametrů kvůli zjištění, zda existuje univerzální kombinace DP vhodná jak pro celý soubor parametrů, tak i pro jednotlivé parametry.

V rámci analýzy bylo každé povodí souboru uvažováno jako nepozorované. Testování kombinací DP vycházelo z přístupu „trial-and-error“ avšak oproti němu bylo zkráceno. Tento postup lze shrnout do následujících kroků:

1. Sestavení všech kombinací DP o dvou členech.
2. Testování a výběr nejlepší dvojice DP.
3. Sestavení všech kombinací DP o třech členech složených z optimální dvojice DP a zbývajících DP.
4. Testování všech sestavených trojic DP a výběr optimální trojice DP.
5. Sestavení všech kombinací DP o čtyřech členech složených z optimální trojice DP a zbývajících DP.
6. Opakování postupu pro kombinace s pěti a více členy.

Testování kombinací DP o daném počtu členů lze shrnout do následujících kroků:

1. Zvolit počet donorů.
2. Vybrat kombinaci DP o daném počtu členů.
3. Určit první povodí souboru jako nepozorované.

4. Na základě zvolené kombinace DP a zvoleného počtu donorů nalézt donor (nebo donory) k nepozorovanému povodí.
5. Odhadnout sadu parametrů pro nepozorované povodí na základě parametrické sady donoru (nebo donorů) metodou váženého průměru (váhou byla volena převrácená hodnota průměrného pořadí donoru).
6. Vypočítat odchylky odhadnutých parametrů od optimálních hodnot (a priori parametry) na nepozorovaném povodí.
7. Opakovat kroky 3 až 6 pro zbývající povodí souboru.

Tento postup byl opakován pro všechny sestavené kombinace DP o zvoleném počtu členů v rámci daného počtu donorů a pro 1 až 20 donorů.

Při daném počtu donorů byla optimální kombinace DP o zvoleném počtu členů identifikována pomocí vypočtených odchylek odhadnutých parametrů od jejich optimálních hodnot. Předpokládalo se, že optimální kombinace DP povede při daném počtu donorů k co nejpřesnějším hodnotám parametrů modelu na nepozorovaných povodích a tím i k co nejmenším hodnotám vypočtených odchylek. V rámci daného počtu donorů byl pro každou testovanou kombinaci DP zjištěn medián odchylek pro každý z 11 parametrů modelu Sacramento na základě výsledků všech 437 povodí. Následně byla spočítána suma z jedenácti vypočtených mediánů odchylek. Za optimální kombinaci DP pro testovaný počet donorů byla považována ta, která vedla k nejmenší hodnotě sumy mediánů odchylek.

Očekávalo se, že pro každý testovaný počet donorů bude identifikována jiná optimální sada DP. Na základě všech 20 identifikovaných optimálních kombinací DP byla zvolena jako skutečně optimální ta sada DP, která byla identifikována nejčastěji při testování 1 až 20 donorů. Tato skutečně optimální sada pak tvořila základ sady DP s vyšším počtem DP.

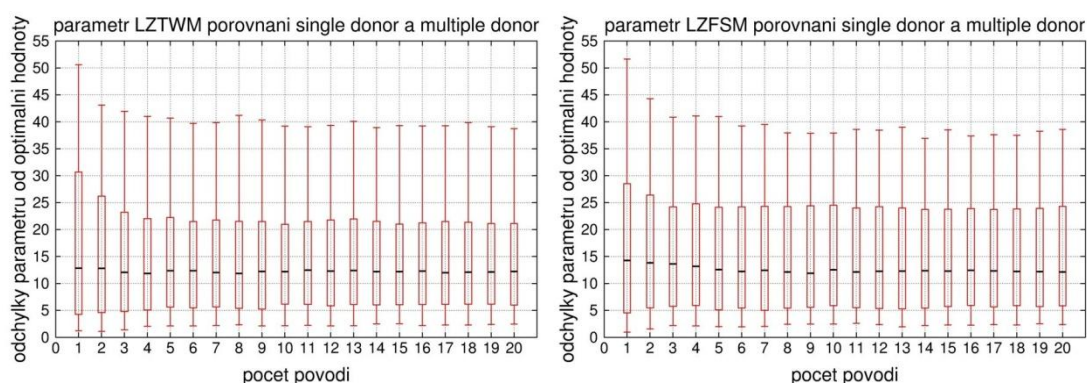
Tento výše uvedený postup byl také použit v přístupu odhadu a priori parametrů modelu SAC-SMA pro vybrané jednotlivé parametry samostatně.

6.1. Porovnání přístupu single donor a multiple donor

Tato analýza byla provedena kvůli zjištění, kolik donorů je nejvhodnějších k co nejpřesnějšímu odhadu celé sady parametrů na nepozorovaném povodí. Výsledky

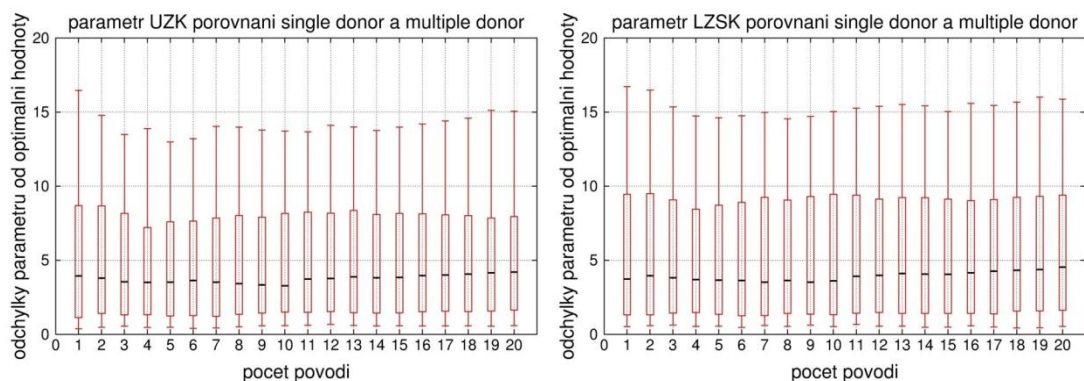
ukazují, že multiple donor přístup vedl obecně k lepším výsledkům než single donor přístup bez ohledu na řešený parametr nebo kombinaci DP o zvoleném počtu členů.

Při testování dvojic DP byl zjištěn nevýrazný pozitivní vliv zvyšování počtu donorů na přesnost odhadu parametrů modelu (viz obr. č. 3 pro parametry LZTWM a LZFSM). U čtyř parametrů modelu (UZTWM, UZFWM, LZFSM a LZPK) bylo 9 donorů identifikováno jako optimální počet donorů. Zvyšování počtu donorů nemělo od 4 až 10 donorů jakýkoliv vliv na přesnost odhadu parametrů (viz obr. č. 3 a přílohy č. 1 a 2). Využití jednoho donoru vedlo u všech parametrů modelu k nepatrně vyšším hodnotám odchylek než multiple donor přístup.



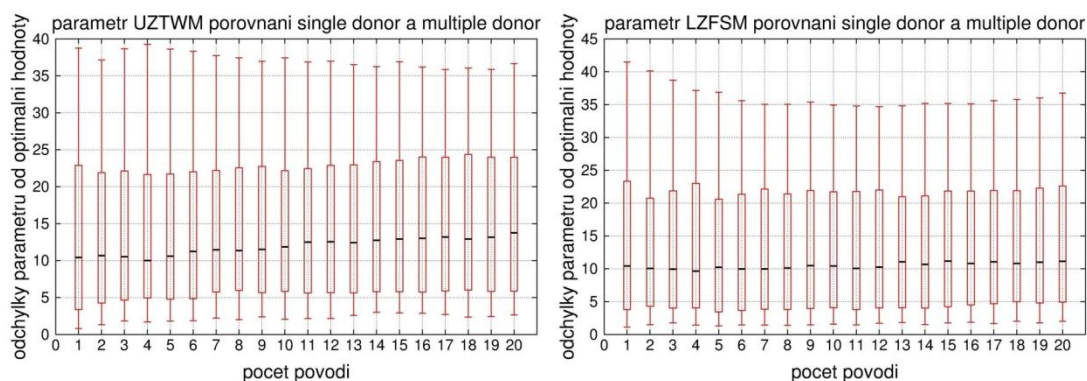
Obr. č. 3: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů LZTWM (vlevo) a LZFSM (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS a Po. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

Při testování trojic DP byl pro čtyři parametry (UZTWM viz příloha č. 3 vlevo, UZFWM, LZTW a LZFPM) identifikován jako nejvhodnější single donor přístup, pro zbývající parametry modelu byl vhodnější multiple donor přístup se 4 donory. Z obr. č. 4 je zřejmé, že odchylky odhadovaných parametrů od jejich optimálních hodnot neukazují výrazné změny mezi přístupy single donor a multiple donor. Dále si lze všimnout, že se vypočtené odchylky mezi odhadovanými parametry a jejich optimálními hodnotami mírně zvyšovaly s přibývajícím počtem donorů (viz parametr UZTWM viz příloha č. 3 vlevo).



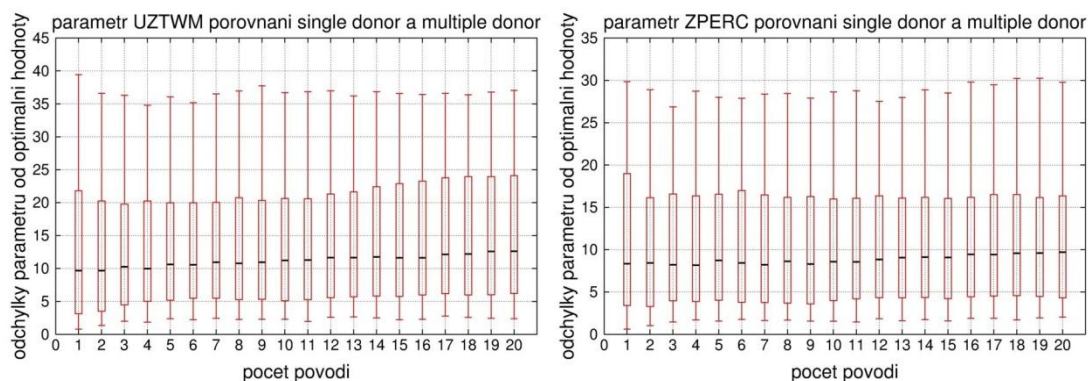
Obr. č. 4: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů UZK (vlevo) a LZSK (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po a Eaa/PEaa. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

Při testování skupin DP se čtyřmi členy bylo zjištěno, že k nejlepším výsledkům vedl multiple donor se 4 donory (viz obr. č 5 pro parametry UZTWM a LZFSM). I zde byl zjištěn nevýrazný vzestup hodnot vypočtených odchylek se zvyšujícím se počtem použitých donorů od 4 donorů výše. Přístup single donor byl vyhodnocen jako nevhodnější pouze u parametru LZPK a LZSK viz příloha č. 4.



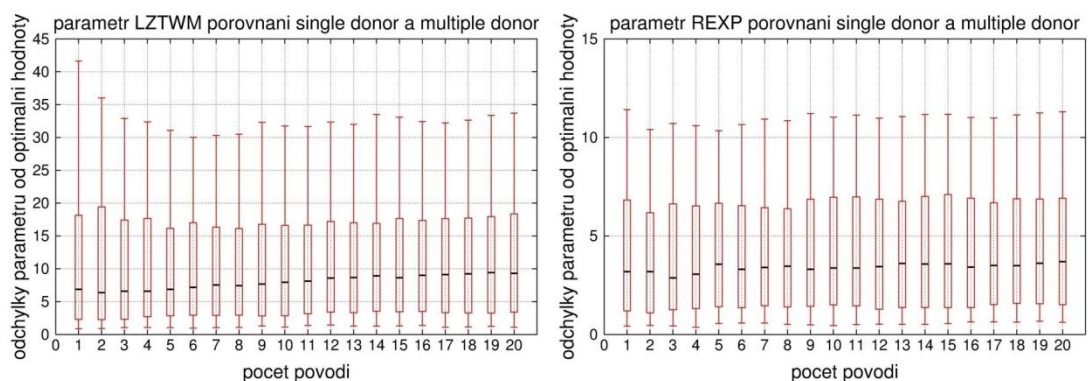
Obr. č. 5: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů UZTWM (vlevo) a LZFSM (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po, Eaa/PEaa a Ur. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

Při testování skupin DP s pěti členy bylo zjištěno, že single donor a multiple donor přístupy vedly k velmi podobným odchylkám v odhadech parametrů modelu (viz obr. č. 6 nebo příloha č. 5 pro parametr LZSK). Přesto je na obr. č. 6 znatelné nepatrné zvyšování hodnoty odchylek pro parametr UZTWM se zvyšujícím se počtem použitých donorů. Podobný trend je patrný i u parametru LZTWM (viz příloha č. 5 vlevo).

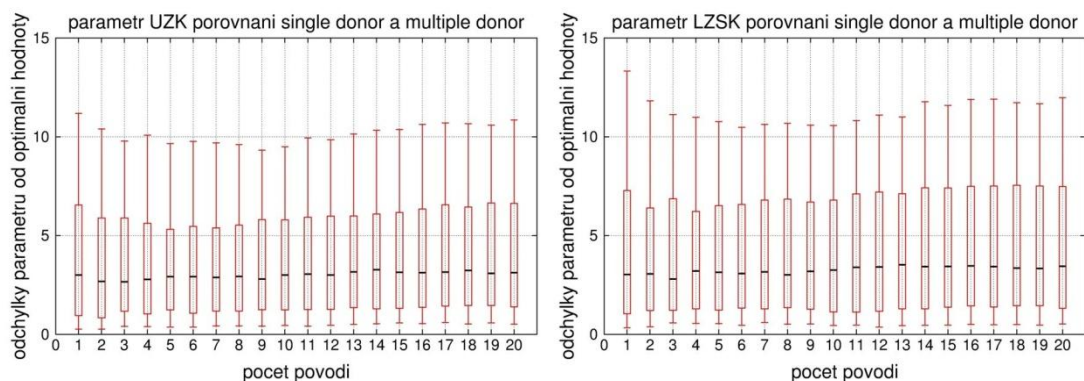


Obr. č. 6: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů UZTWM (vlevo) a ZPERC (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po, Eaa/PEaa, Ur a Wp. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

Pro testované skupiny DP se šesti až osmi členy bylo patrné, že nejlepších výsledků bylo dosahováno při multiple donor přístupu s 2 až 4 donory (viz obr. č. 7 a 8 pro parametry LTWM, REXP, UZK a LZSK). U parametrů UZTWM, UZFWM, LZTWM, LZFPM, LZFSM se vypočtené odchylky mírně zvyšují s přibývajícím počtem donorů. Pro parametry LZPK a ZPERC bylo zjištěno, že single donor přístup vedl k přesnějším odhadům těchto parametrů než multiple donor přístup (viz příloha č. 6).



Obr. č. 7: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů LZTWM (vlevo) a REXP (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp a SS. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



Obr. č. 8: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů UZK (vlevo) a LZSK (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS a LS. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

Shrneme-li výsledky této analýzy, pak můžeme konstatovat, že multiple donor přístup je vhodnější metodou k odhadu parametrů modelu než single donor přístup.

Tento výsledek je konzistentní s výsledky, které prezentovali ve svých studiích Oudin et al. (2008) a Zhang & Chiew (2009). Výsledky dále ukazují, že se zvyšujícím se počtem DP použitých k vyhledávání donorů se snižuje hodnota optimálního počtu donorů, který je nutný k nejpřesnějšímu odhadu parametrické sady. Z prezentovaných výsledků je také patrné, že rozdíl mezi použitím single donor přístupu a multiple donor přístupu není z hlediska přesnosti odhadu parametrů modelu jakkoliv výrazný.

6.2. Vliv počtu a typu deskriptorů na odhad celé sady parametrů modelu

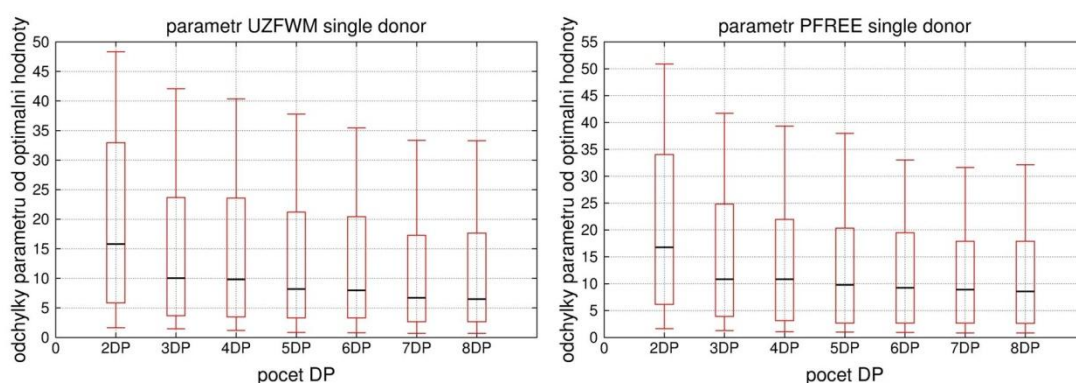
Tato část provedené regionalizací studie byla zaměřena na vliv identifikovaných optimálních DP na přesnost odhadu celé sady parametrů modelu. Postup identifikace optimálních DP byl popsán v kapitole 6. Vliv počtu DP byl sledován jak při použití single donor přístupu, tak i při multiple donor přístupu. Za optimální kombinaci DP byla považována ta kombinace, která vedla k co nejpřesnějším odhadům celé sady parametrů nejčastěji při testování 1 až 20 donorů.

Identifikované optimální kombinace DP jsou spolu s celkovým počtem kombinací DP, které byly testovány v rámci daného počtu prvků v kombinaci, uvedeny v tab. č. 6.

počet členů v testovaných kombinacích	optimální kombinace DP	celkový počet testovaných kombinací DP o daném počtu členů
2	CS, Po	105
3	CS, Po, Eaa/PEaa	13
4	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur	12
5	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp	11
6	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS	10
7	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS, LS	9
8	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS, LS, Cr	8

Tab. č. 6: Složení identifikované optimální sady DP a celkový počet kombinací DP, které byly testovány v rámci daného počtu prvků v kombinaci.

Výsledky pro single donor přístup ukazují zpřesňování odhadu parametrů modelu se zvyšujícím se počtem použitých DP v optimální kombinaci. Zpřesňování odhadu parametrů bylo výraznější až do přiřazení třetího až pátého DP do optimální kombinace DP (viz obr. č. 9 pro parametry UZFWM a PFREE a parametry UZK a LZSK viz příloha č. 7). Další zvyšování počtu DP v optimální kombinaci mělo pouze marginální vliv na zvyšování přesnosti odhadu parametrů modelu (viz obr. č. 9 pro parametry UZFWM a PFREE).

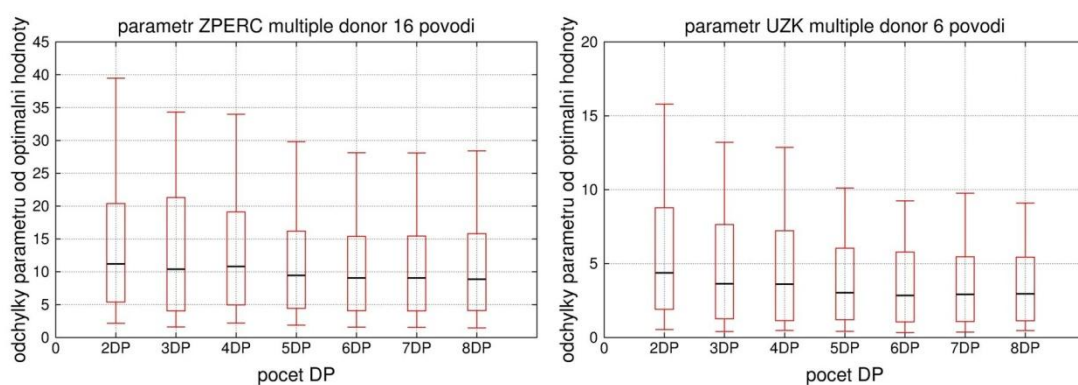


Obr. č. 9: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovanými parametry UZFWM (vlevo) a PFREE (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro single donor přístup. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

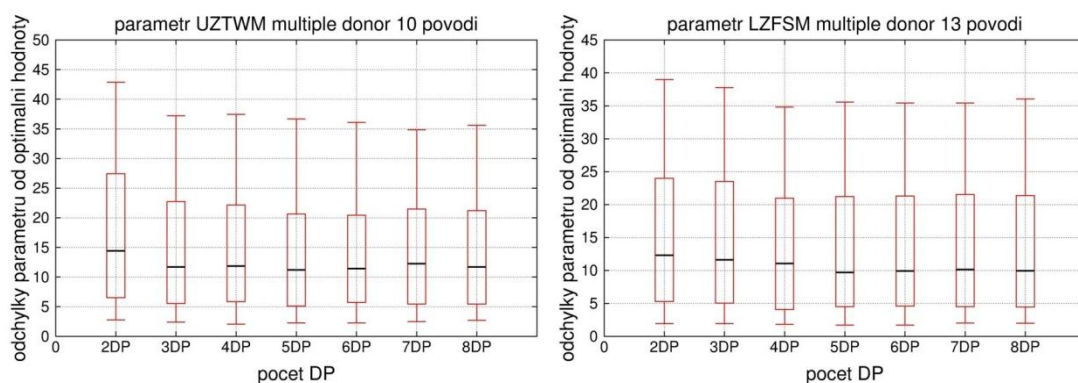
U některých parametrů modelu (např. UZK a LZSK viz příloha č. 7) byl zaznamenán vzestup hodnot vypočtených odchylek po zařazení sedmého a osmého DP do optimální kombinace DP. U parametru LZPK byl patrný pokles vypočtených odchylek do zařazení čtvrtého DP do optimální kombinace, avšak

identifikovaný pátý DP vedl ke zvýšení vypočtených odchylek. Přidáním šestého, až osmého DP se odchylky pro tento parametr opět snižovaly.

Při multiple donor přístupu byly zaznamenány podobné výsledky jako při single donor přístupu, tj. byl zaznamenán pokles ve vypočtených odchylkách při zvyšujícím se počtu DP v optimální kombinaci. Nejvýraznější zpřesnění odhadu parametrů bylo dosahováno do zařazení třetího až šestého DP do optimální kombinace (viz obr. č. 10 a 11 pro parametry ZPERC, UZK a LZFSM). Zařazení sedmého až osmého DP do optimální kombinace vedlo pouze velmi nevýrazným změnám v přesnosti odhadu parametrů modelu.



Obr. č. 10: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovanými parametry ZPERC (vlevo) a UZK (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro multiple donor přístup s 16 donory (vlevo) a 6 donory (vpravo). Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



Obr. č. 11: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovanými parametry UZTWM (vlevo) a LZFSM (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro multiple donor přístup s 10 donory (vlevo) a 13 donory (vpravo). Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

Z obr. č. 11 vlevo je patrné zvyšování hodnot odchylek vypočtených pro parametr UZTWM po zařazení šestého a sedmého DP do optimální kombinace DP. Podobné chování je prezentováno i v příloze č. 9 pro parametry LZFFM a PFFREE.

Shrneme-li výsledky této analýzy, pak lze konstatovat, že zvyšování počtu DP v optimální kombinaci DP má pozitivní vliv na přesnost odhadu všech parametrů modelu Sacramento. Tento vliv se však snižuje se zvyšujícím se počtem již nalezených DP v optimální kombinaci. Z výsledků je dále patrná podobnost změny přesnosti odhadu parametrů při přechodu ze single donor přístupu k multiple donor přístupu. Lze si také všimnout, že nezávisle na počtu použitých donorů byly některé parametry modelu odhadovány přesněji než jiné. Toto je patrné např. u parametru UZK při single donor přístupu (příloha č. 7) a při multiple donor přístupu se 6 donory (obr. č. 10).

Za nejmenší počet DP v kombinaci pro spolehlivý odhad parametrů modelu můžeme pro single donor přístup i multiple donor přístup označit pět DP v optimální kombinaci. Vyšší počet DP sice vedl u některých parametrů ke zlepšení přesnosti odhadu, ale většinou další přidané DP (šestý až osmý DP) v optimální kombinaci vedly pouze k marginálním změnám v hodnotách vypočtených odchylek.

6.3. Vliv počtu a typu deskriptorů na odhad jednotlivých parametrů modelu samostatně

Tato případová studie byla zaměřena na identifikaci optimální kombinace DP a vlivu zvyšování DP v kombinaci na přesnost odhadu jednotlivých parametrů modelu. Analýza byla provedena kvůli otázce, zda se liší identifikované optimální kombinace určené pro jednotlivé parametry od optimální kombinace určené pro celou sadu parametrů modelu. Pro analýzu byly vybrány parametry LZSK, REXP a LZFSM. Odhad těchto parametrů byl proveden při použití single donor přístupu a multiple donor přístupu se čtyřmi povodími (tento počet donorů vedl k nejlepším výsledkům při vyšším počtu DP v optimální kombinaci).

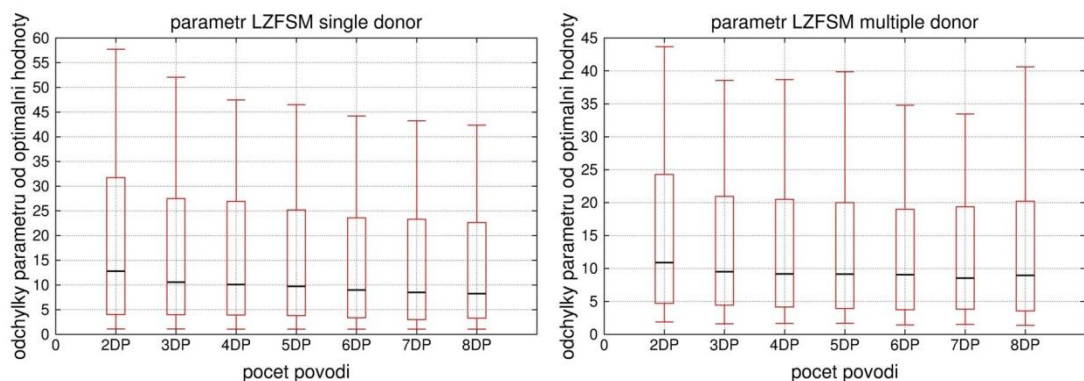
Výsledky pro vybrané parametry uvedeny v tab. č. 7 až 9. Tab. č. 7 ukazuje složení identifikovaných optimálních kombinací DP pro parametr LZFSM při použití single donor přístupu a multiple donor přístupu v porovnání s optimálními kombinacemi, které byly určeny pro celou sadu parametrů. V tab. č. 7 si můžeme všimnout odlišného složení identifikovaných optimálních kombinací pro parametr

LZFSM při nižším počtu členů v testovaných kombinacích (dvou až čtyřčlenné kombinace) při single donor přístupu a multiple donor přístupu se 4 donory v porovnání s optimálními kombinacemi DP určenými pro celou sadu parametrů. Podobnost zde můžeme nalézt pouze u optimálních kombinací určených přímo pro parametr LZFSM, avšak při srovnání těchto kombinací s optimálními kombinacemi DP pro celou sadu parametrů nebyla patrná žádná výraznější podobnost. Při vyšším počtu DP v kombinaci je patrná jistá podobnost ve složení optimálních kombinací jak pro parametr LZFSM tak i pro celou sadu parametrů. Optimální kombinace zde shodně obsahovaly deskriptory Wp, SS, CS, Ur.

počet členů v testovaných kombinacích	optimální kombinace pro parametr LZFSM		optimální kombinace DP pro celou sadu parametrů
	single donor	4 donory	
2	PEaa, Gf	PEaa, CS	CS, Po
3	PEaa, Gf, SS	PEaa, CS, Wp	CS, Po, Eaa/PEaa
4	PEaa, Gf, SS, Wp	PEaa, CS, Wp, Ur	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur
5	PEaa, Gf, SS, Wp, Po	PEaa, CS, Wp, Ur, SS	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp
6	PEaa, Gf, SS, Wp, Po, CS	PEaa, CS, Wp, Ur, SS, Paa/PEaa	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS
7	PEaa, Gf, SS, Wp, Po, CS, Fo	PEaa, CS, Wp, Ur, SS, Paa/PEaa, LS	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS, LS
8	PEaa, Gf, SS, Wp, Po, CS, Fo, Ur	PEaa, CS, Wp, Ur, SS, Paa/PEaa, LS, Gf	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS, LS, Cr

Tab. č. 7: Výsledky identifikace optimálních kombinací DP pro parametr LZFSM při použití single donor přístupu a multiple donor přístupu se 4 donory v porovnání s optimálními kombinacemi DP určenými pro celou sadu parametrů modelu.

Na obr. č. 12 je prezentován pokles hodnot vypočtených odchylek pro parametr LZFSM při zvyšujícím se počtu členů v identifikované optimální kombinaci DP. Z obrázku je patrný při single donor přístupu pozitivní vliv zvyšování DP v optimální kombinaci na přesnost odhadu tohoto parametru. Při multiple donor přístupu nebyl zaznamenán jakýkoliv pozitivní vliv zvyšujícího se počtu DP v optimální kombinaci na přesnost odhadu parametru LZFSM (viz obr. č. 12 vpravo).



Obr. č. 12: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovaným parametrem LZFSM a jeho optimální hodnotou pro soubor 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro single donor (vlevo) a multiple donor přístup se 4 donory (vpravo). Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

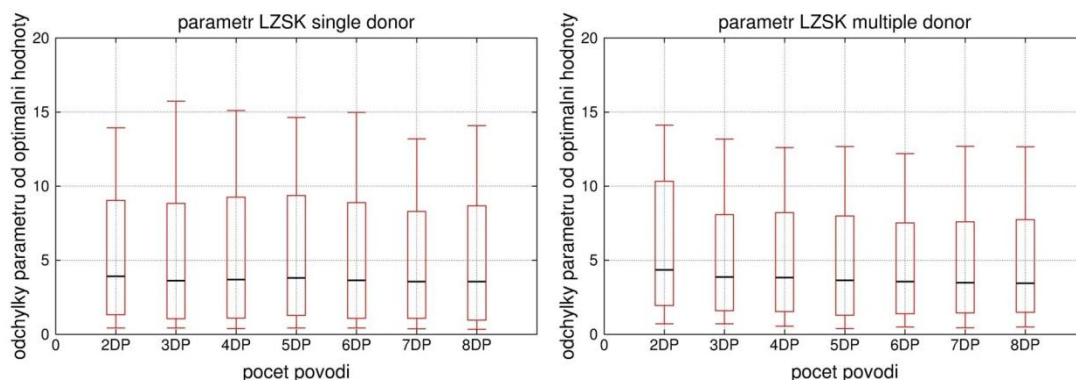
V tab. č. 8 je uvedeno složení identifikovaných optimálních kombinací DP pro parametr LZSK při použití single donor přístupu a multiple donor přístupu v porovnání s optimálními kombinacemi, které byly určeny pro celou sadu parametrů.

počet členů v testovaných kombinacích	optimální kombinace pro parametr LZSK		optimální kombinace DP pro celou sadu parametrů
	single donor	4 donory	
2	LS, Wp	LS, Wp	CS, Po
3	LS, Wp, Paa/PEaa	LS, Wp, PEaa	CS, Po, Eaa/PEaa
4	LS, Wp, Paa/PEaa, PEaa	LS, Wp, PEaa, Paa/PEaa	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur
5	LS, Wp, Paa/PEaa, PEaa, Fo	LS, Wp, PEaa, Paa/PEaa, Ur	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp
6	LS, Wp, Paa/PEaa, PEaa, Fo, CS	LS, Wp, PEaa, Paa/PEaa, Ur, SS	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS
7	LS, Wp, Paa/PEaa, PEaa, Fo, CS, Po	LS, Wp, PEaa, Paa/PEaa, Ur, SS, Fo	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS, LS
8	LS, Wp, Paa/PEaa, PEaa, Fo, CS, Po, Ur	LS, Wp, PEaa, Paa/PEaa, Ur, SS, Fo, Eaa/PEaa	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS, LS, Cr

Tab. č. 8: Výsledky identifikace optimálních kombinací DP pro parametr LZSK při použití single donor přístupu a multiple donor přístupu se 4 donory v porovnání s optimálními kombinacemi DP určenými pro celou sadu parametrů modelu.

Z tab. č. 8 je patrná výrazná podobnost z hlediska DP obsažených v optimální kombinaci mezi přístupem single donor a multiple donor se 4 členy nezávisle na tom, kolik členů bylo testováno v kombinaci. Naopak, mezi optimálními kombinacemi DP určenou pro celou sadu parametrů a optimálními kombinacemi pro parametr LZSK je patrná nepříliš výrazná podobnost až při vyšším počtu členů v optimální kombinaci. Optimální kombinace zde shodně obsahovaly shodně pouze deskriptory Wp a Ur.

Na obr. č. 13 je prezentován pokles hodnot vypočtených odchylek pro parametr LZSK při zvyšujícím se počtu členů v identifikované optimální kombinaci DP. Z obrázku je patrné, že jak při single donor přístupu, tak i při multiple donor přístupu nemělo zvyšování počtu DP v optimální kombinaci vliv na změnu přesnosti odhadu tohoto parametru.



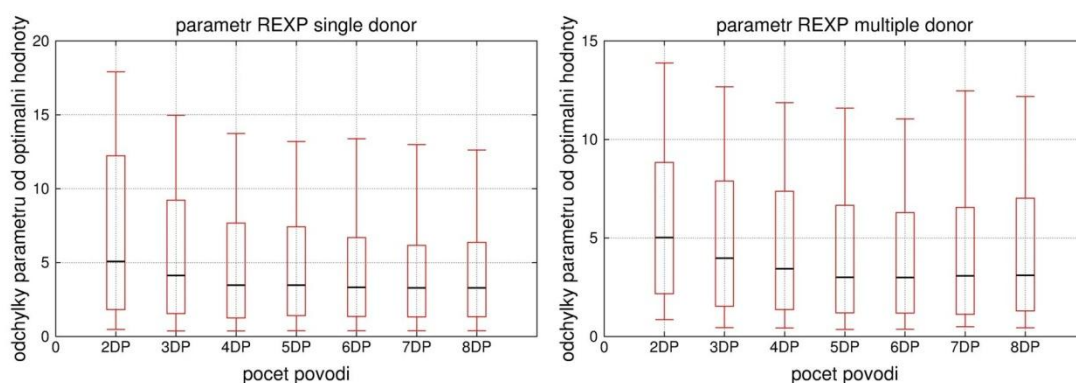
Obr. č. 13: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovaným parametrem LZSK a jeho optimální hodnotou pro soubor 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro single donor (vlevo) a multiple donor přístup se 4 donory (vpravo). Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

V tab. č. 9 je uvedeno složení identifikovaných optimálních kombinací DP pro parametr REXP při použití single donor přístupu a multiple donor přístupu v porovnání s optimálními kombinacemi, které byly určeny pro celou sadu parametrů. Z tabulky je patrná podobnost ve složení optimálních kombinací PD mezi přístupem single donor a multiple donor se 4 členy nezávisle na tom, kolik členů bylo testováno v kombinaci. Podobnost ve složení kombinací DP je dále patrná i mezi optimálními kombinacemi DP pro celou sadu parametrů a optimálními kombinacemi DP pro parametr REXP. Optimální kombinace při vyšším počtu členů zde shodně obsahovaly shodně pouze deskriptory CS, Po, Wp, SS a Ur.

počet členů v testovaných kombinacích	optimální kombinace pro parametr REXP		optimální kombinace DP pro celou sadu parametrů
	single donor	4 donory	
2	CS, Wp	CS, Po	CS, Po
3	CS, Wp, PEaa	CS, Po, Eaa/PEaa	CS, Po, Eaa/PEaa
4	CS, Wp, PEaa, Ur	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur
5	CS, Wp, PEaa, Ur, Paa/PEaa	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, LS	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp
6	CS, Wp, PEaa, Ur, Paa/PEaa, Fo	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, LS, SS	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS
7	CS, Wp, PEaa, Ur, Paa/PEaa, Fo, SS	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, LS, SS, PEaa	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS, LS
8	CS, Wp, PEaa, Ur, Paa/PEaa, Fo, SS, Po	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, LS, SS, PEaa, Wp	CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS, LS, Cr

Tab. č. 9: Výsledky identifikace optimálních kombinací DP pro parametr REXP při použití single donor přístupu a multiple donor přístupu se 4 donory v porovnání s optimálními kombinacemi DP určenými pro celou sadu parametrů modelu.

Na obr. č. 14 je prezentován pokles hodnot vypočtených odchylek pro parametr REXP při zvyšujícím se počtu členů v identifikované optimální kombinaci DP. Z obrázku je patrné, že jak při single donor přístupu, tak i při multiple donor přístupu mělo zvyšování počtu DP v optimální kombinaci nevýrazný vliv na změnu přesnosti odhadu tohoto parametru až do testování skupin DP o pěti členech. Optimální kombinace s vyšším počtem členů vedly k nepatrnému zvyšování vypočtených odchylek.



Obr. č. 14: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovaným parametrem REXP a jeho optimální hodnotou pro soubor 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro single donor (vlevo) a multiple donor přístup se 4 donory (vpravo). Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.

Shrňme-li výsledky této studie, pak můžeme konstatovat, že rozdíl v identifikovaných optimálních kombinacích existuje, pokud tyto hledáme pro jednotlivé parametry modelu nebo pro celou sadu parametrů. Můžeme také očekávat, že i při různém počtu použitých donorů můžeme pro jeden testovaný parametr identifikovat odlišné optimální kombinace DP. Na druhou stranu,

podobnost mezi těmito kombinacemi bude stále vyšší, než podobnost optimálních kombinací DP identifikovaných pro celou sadu parametrů a optimálních kombinací identifikovaných pro jednotlivé parametry (přestože i zde byla pro určité parametry modelu jistá podobnost zaznamenána). Srovnáme-li dále vypočtené hodnoty odchylek, pak si můžeme všimnout, že kombinace určené primárně pro daný parametr vedou často k podobným hodnotám jako použití kombinací pro celou sadu parametrů.

7. Diskuze

Prezentované výsledky spojené s analýzou vstupních dat ukazují silné korelace mezi některými deskriptory povodí. Tyto korelace jsou pochopitelné a vycházejí z toho, jak byly hodnoty těchto deskriptorů odvozeny. Korelace mezi základními (Paa, PEaa) a odvozenými (Paa/PEaa, Eaa/PEaa) klimatickými deskriptory můžeme spojit s tím, že hodnoty odvozených klimatických deskriptorů byly získány na základě informací obsažených v základních klimatických deskriptorech. V případě půdních charakteristik můžeme vzájemné silné korelace spojit se dvěma příčinami. První souvisí s metodou jejich odvození. Hodnoty deskriptorů W_p , P_o a SHC byly odvozeny na základě empirických vztahů založených na půdní textuře. Druhá příčina silné pozitivní korelace mezi deskriptory P_o a W_p souvisí pravděpodobně také s obsahem půdních částic v půdě. Hodnoty deskriptoru P_o se zvyšují současně s hodnotami deskriptoru W_p v závislosti na zvyšování obsahu jílovitých částic (Hillel, 1998; Kutílek & Nielsen, 1994). Tento efekt pravděpodobně souvisí s vyšším obsahem jemných kapilárních pórů, které mají vysokou retenční kapacitu. Stejný argument může být použit i pro silnou negativní korelaci mezi hodnotami deskriptoru SHC a P_o .

Silné korelace mezi parametry modelu (např. výtokové koeficienty dolní zóny, parametry perkolací rovnice, parametr PFREE) a některými půdními charakteristikami (SS, CS, P_o , W_p , SHC) vycházejí ze vztahů použitých k odvození a priori parametrů modelu, ve kterých tyto půdní charakteristiky často vystupují. Lze tedy očekávat, že právě tyto půdní charakteristiky budou klíčové pro co nejpřesnější odhad parametrů modelu. Lze tedy očekávat, že při použití metody „pokus-omyl“ při vyhledávání optimálních kombinací DP budou tyto deskriptory obsaženy v optimální kombinaci se dvěma členy. Při vyšším počtu členů v optimální kombinaci by pak měla být přítomnost těchto deskriptorů samozřejmá.

První prezentovaná studie byla spojena s odhadem všech parametrů modelu. V této studii byl řešen jednak vliv počtu použitých donorů na přesnost odhadu celé sady parametrů, ale také vliv složení optimální kombinace DP a vliv zvyšování počtu členů v ní na přesnost odhadu celé parametrické sady. Získané výsledky, z hlediska počtu použitých donorů, se shodují s tím, co prezentovali ve svých studiích Oudin et al. (2008) a Zhang & Chiew (2009), tj. multiple donor přístup vede obecně k lepším výsledkům (zde tedy přesnějším odhadům parametrů modelu) než single donor přístup. Tento výsledek můžeme spojit s tím, že multiple donor přístup poskytuje více informací k odhadu daného parametru. Protože hodnota parametru je při

multiple donor přístupu vypočtena jako vážený průměr hodnot tohoto parametru z několika deskriptorově nejpodobnějších povodí, je větší pravděpodobnost, že dojde k „vyhlazení“ konečné hodnoty parametru na nepozorovaném povodí, což povede k hodnotě vypočtené odchylky blíže nule (a tedy přesnějšímu odhadu). V případě single donor přístupu k „vyhlazení“ nedojde. Pokud je navíc nalezené deskriptorově nejpodobnější povodí hydrologicky odlišné, musí dojít k tomu, že přenesená hodnota parametru bude velmi odlišná od jeho optimální hodnoty (vypočtená odchylka tak bude vyšší).

Pozitivní vliv počtu DP v optimální kombinaci na přesnost odhadu parametrů modelu můžeme spojit se zvyšováním deskriptorové podobnosti mezi nepozorovaným povodím a donorem či donory. Pokud platí, že vyšší deskriptorová podobnost vede k vyšší hydrologické podobnosti povodí, pak musí platit i zvyšování podobnosti v hodnotách parametrů mezi donorem a akceptorem parametrické sady. Z výsledků je dále patrné, že optimální kombinace DP s nižším počtem členů obsahovaly převážně půdní charakteristiky. Tento výsledek můžeme pravděpodobně spojit jednak s tím, jak jsou a priori parametry odvozeny, ale také s předpokladem, že tyto deskriptory mohou být hlavní řídicí veličiny určující hodnoty parametrů modelu na povodí. Navíc, jako další DP byly v optimální kombinaci zjištěny postupně klimatický deskriptor a deskriptor vegetačního krytu. Tento výsledek se dá spojit s postupným zpřísňováním výběru donorů na základě přidané informace o klimatu a vegetačním krytu.

Z výsledků je patrné, že odhady některých parametrů (UZK viz obr. č. 10 vpravo a příloha č. 7 vlevo, LZSK viz příloha č. 7 vpravo a REXP viz příloha č. 8 vpravo) byly velmi přesné již při použití optimálních kombinací DP se dvěma členy. Čím si lze tento výsledek vysvětlit? První možné vysvětlení můžeme spojit s tím, že DP v identifikované optimální kombinaci (půdní charakteristiky CS a Po) nejvíce ovlivňují hodnoty těchto parametrů na povodí. Proto tedy zařazení těchto DP povede k velmi přesným odhadům těchto parametrů. Druhé vysvětlení můžeme spojit se silnými korelacemi mezi těmito parametry a uvedenými půdními charakteristikami (viz tab. č. 5). Tyto korelace pak musí odhad těchto parametrů také pozitivně ovlivnit.

Druhá studie byla zaměřena na identifikaci optimálních kombinací DP pro jednotlivé parametry modelu. Srovnáme-li optimální sady DP určené pro celou sadu parametrů modelu a pro jednotlivé zvolené parametry, můžeme si všimnout, že složení optimálních kombinací DP s nižším počtem členů se liší v typu deskriptorů,

ale odpovídají si často kategorií (kombinace s nižším počtem členů nejčastěji obsahovali půdní charakteristiky). Toto opět ukazuje, že půdní charakteristiky jsou v tomto případě klíčové deskriptory. Specifický je v tomto ohledu pouze parametr LZFSM, neboť v jeho případě obsahovala optimální kombinace se dvěma členy deskriptor PEaa a Gf. Zde můžeme předpokládat, že informace spojená s klimatickým deskriptorem a deskriptorem vegetačního krytu může nahradit informaci spojenou s půdními charakteristikami, neboť jak klima, tak vegetační kryt mohou ovlivňovat půdní charakteristiky.

8. Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na odhad parametrů modelu SAC-SMA na nepozorovaných povodích přístupem single donor multiple donor. Regionalizační studie byla provedena na souboru 437 povodí projektu MOPEX.

Odhad parametrů modelu na nepozorovaných povodích byl proveden na základě parametrických sad pozorovaných povodí identifikovaných metodou RAS (Oudin et al., 2008). Tato metoda spadá do kategorie regionalizačních metod využívajících fyzikální podobnosti povodí. V práci jsou prezentovány výsledky dvou studií. První byla zaměřena na identifikaci optimálních kombinací deskriptorů povodí vhodných k co nejpřesnějšímu odhadu všech parametrů modelu. Druhá studie byla zaměřena na identifikaci optimálních kombinací deskriptorů povodí vhodných k co nejpřesnějšímu odhadu všech jednotlivých zvolených parametrů modelu.

Výsledky analýzy spojené s testováním single donor přístupu a multiple donor při odhadu celé parametrické sady ukázaly přednosti multiple donor přístupu. Tyto výsledky jsou podobné těm, které publikovali Oudin et al. (2008). Stejně jako Oudin et al. (2008), můžeme výhodu multiple donor přístupu spojit s vyhlazením chyby v hodnotě odhadovaného parametru díky informaci z více zdrojů.

Získané výsledky ukazují pozitivní vliv zvyšování počtu deskriptorů v identifikované optimální kombinaci na přesnost odhadu parametrů modelu. Rozdíly v přesnosti odhadu mezi oběma studii byly zanedbatelné. Tento výsledek můžeme přisoudit zejména podobnosti identifikovaných optimálních kombinací v několika deskriptorech. Tyto deskriptory lze proto považovat za klíčové z hlediska přesnosti odhadu parametrů modelu Sacramento. Není překvapivé, že se jedná o půdní charakteristiky, neboť a priori parametry modelu Sacramento jsou s nimi velmi provázány.

Identifikované optimální kombinace deskriptorů povodí jsou skutečně optimální pouze pro případ této studie. Ale i zde můžeme o optimálnosti nalezených kombinací pochybovat a to ze dvou důvodů. První důvod souvisí s tím, že k identifikaci optimální kombinace nebyla v případě kombinací se třemi a více členy použita standardní metoda „pokus-omyl“, ale její zkrácená verze, která využívá informaci o optimální kombinaci z předešlého cyklu (tj. základem k sestavení kombinací o n členech je optimální kombinace deskriptorů povodí o $n-1$ členech). Druhý důvod souvisí se souborem použitých deskriptorů povodí. Zde použitý soubor

deskriptorů povodí obsahoval pouze 15 deskriptorů povodí. Můžeme předpokládat, že tento soubor deskriptorů povodí nemusí dostatečně obsáhnout variabilitu chování povodí a proto i zde použité deskriptory povodí nemusí být skutečně klíčové.

Z této práce je zřejmé, že další výzkum může výrazně zlepšit přesnost odhadu parametrů modelu na nepozorovaných povodích. Je tedy nadále nutné věnovat pozornost dalšímu výzkumu s cílem zdokonalit metody používané v regionalizaci a zlepšit tak predikci odtoku na nepozorovaných povodích.

Seznam literatury

Acreman, A.C., Sinclayr, C.D., 1986: Classification of drainage basins according to their physical characteristics; an application for flood frequency analysis in Scotland, *Journal of Hydrology*, 84, 365s-380s.

Ao, T., Ishidaira, H., Takeuchi, K., Kiem, A.S., Yoshitari, J., Fukami, K., Magome, J., 2006: Relating BTOPMC model parameters to physical features of MOPEX basins, *Journal of Hydrology*, 320, 84s-102s.

Beven, K., 1989: Changing ideas in hydrology-the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105, 157s-172s.

Beven, K., 2000: *Rainfall-Runoff Modelling*, John Wiley and Sons, 360s, ISBN 0 - 471-98553-8.

Blöschl, G., 2005: *Rainfall-Runoff Modeling of Ungauged Catchments*, edited by: Anderson, M.G., *Encyclopedia of Hydrological Sciences*.

Boyle, D.P., Gupta, H.V., Sorooshian, S., 2000: Toward improved Calibration of hydrologic models: Combining the strenghts of manual and automatic methods, *Water resources research*, V.36, pp. 3663-3674.

Boyle, D.P., Gupta, H.V., Sorooshian, S., Koren, V., Zhang, Z., Smith, M., 2001: Toward improved streamflow forecasts: Value of semidistributed modeling, *Water Resources Research*, 37, 2749s-2759s.

Burn, D.H., Boorman, D.B., 1993: Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments, *Journal od Hydrology*, 143, 429s-454s.

Burnnash, R.J.C., 1995: The NWS River Forecast System – catchment modeling. In: Singh, V.P.(ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resource Publications, Highland Rauch, 311s-366s.

Calver, A., Crooks, S., Jones, D., Kay, A., Kjeldsen, T., Reynard, N., 2005: National river catchment flood frequency method using continuous simulation, Joint Defra/EAFlood and Coastal Erosion Risk Management R&D Programme, R&D Technical Report FD2106/TR.

Clarke, R.T., 1973: A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use, *Journal of Hydrology*, 19, 1s-20s.

Daly C., Neilson R.P., Phillips D.L., 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 140s–158s.

Dingman, L.S., 2002: *Physical hydrology*, Prentice Hall, 646s, ISBN 0-13-099695-5.

Diskin, M.H, Simon, E., 1977: A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models, *Journal of Hydrology*, 34, 129s-149s.

Dooge, J.C.I., 1986: Looking for hydrologic laws, *Water Resources Research*, 22, 46s-58s.

Duan, Q., Schaake, J., Koren, V., 2001: A priori estimation of land surface model parameters. In: Lakshmi, V., Albertson, J., Schaake, J., (ed.). *Land surface hydrology, meteorology, and climate: Observation and modelling*, American Geophysical Union, *Water Science and Application*, vol. 3, 77s-94s.

Duan, Q., Schaake, J., Andréassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H.V., Gusev, Y.M., Habets, F., Hall, A., Hay, A., Hogue, T., Huang, M., Leavesley, G., Liang, X., Nasonova, O.N., Noilhan, J., Oudin, L., Sorooshian, S., Wagener, T., Wood, E.F., 2006: Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops, *Journal of Hydrology*, 320, 3s-17s.

Farnsworth R.K., Thompson E.S., Peck E.L., 1982: *Evaporation Atlas for the Contiguous 48 United States*. NOAA Technical Report, NWS 33, Washington, DC.

Fernandez, W., Vogel, R.M., Sankarasubramanian, A., 2000: Regional calibration of a watershed model, *Hydrological Sciences Journal*, 45, 689s-707s.

Gupta, H.V., Beven, K.J., Wagener, T., 2004: Model calibration and uncertainty estimation. In: Andersen, M., (ed.). *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, In Press.

Gutman, G., Ignatov, A., 1998: The derivation of the green vegetation fraction from noaa/avhrr data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1533s-1543s.

He, Y., Bárdossy, A., Zehe, E., 2011: A review of regionalisation for continuous streamflow simulation, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3539s-3553s.

Hillel, D., 1998: Environmental Soil Physics. Elsevier, San Diego, USA, ISBN 978-0-12-348525-0, 771 pp.

Hundecha, Y.H., Bárdossy, A., 2004: Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model, *Journal of Hydrology*, 292, 281s-295s.

James, L.D., 1972: Hydrologic modeling, parameter estimation, and watershed characteristics, *Journal of Hydrology*, 17, 283s-307s.

Kim, U., Kaluarachchi, J.J., 2008: Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia, *Journal of Hydrology*, 362, 39s-56s.

Koren, V., Smith, M., Duan, Q., 2002: Use of a priori parameter estimates in the derivation of spatially consistent parameter sets of rainfall-runoff models. In: Duan, Q., Sorooshian, s., Gupta, H., Rosseau, A., Turcotte, R. (Eds.), *Calibration of Watershed Models, Water Science and Application 6*. AGU, Washington DC, USA, 239s-254s.

Kutílek, M., Nielsen, D. R., 1994: Soil hydrology. Catena-Verl., Cremlingen-Destedt, Germany, ISBN 3-923381-26-3, 370pp.

Kuzcera, G., 1983: Improved parameter inference in catchment models 1. Evaluating parameter uncertainty, *Water Resources Research*, 19, 1151s-1162s.

Lamb, R., Kay, A.L., 2002: Continuous simulation as a basis for national flood frequency estimation. In: *Continuous river flow simulation: methods, applications and uncertainties*, BHS National Meeting, CEH Wallingford, edited by: Littlewood, I., BHS Occasional Paper No. 13, 67s-75s.

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

Loveland, T.R., Reed, B.C., Brown, J.F., Ohlen, D.O., Zhu, J., Yang, L., Merchant, J.W., 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1303s–1330s.

Melching, C.S., 1995: Reliability estimation. In: Singh, V.P. (ed.) Computer models of watershed hydrology, Water Resources Publishers, USA, 69s-118s.

Merz, R., Blöschl, G., 2004: Regionalisation of catchment model parameters, *Journal of Hydrology*, 287, 95s-123s.

Miller, D.A., White, R.A., 1999: A Conterminous United States multi layer soil characteristics data set for regional climate and hydrology modeling. *Earth Interactions*, 2 (available at <http://EarthInteractions.org>).

Nash, J.E., 1960: A unit hydrograf study with particular reference to British catchments, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 17, 249s-282s.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282s-290s.

Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters, *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 157s-171s.

Perrin, C., Oudin, L., Andréassian, V., Rojas-Serna, C., Michel, C., Mathevet, T., 2007: Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff model, *Hydrological Sciences Journal*, 52, 131s-151s.

Post, D.A., Jones, J.A., Grant, G.E., 1998: An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments, *Environmental Modelling & Software*, 13, 395s-403s.

Schaake, J., Cong, S., Duan, Q., 2006: U.S. Mopex data set. Office of hydrologic development, IAHS Publication Serie, 2006.

Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDONNELL, J.J., Mendiondo, E.M., O'Connell, P.E., Oki, T., Pomeroy, J.W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., Zehe, E., 2003: IAHS Decade on Prediction in UngaugedBasins (PUB) 2003-2012: Shapinganexciting futurefor thehydrological science, *Hydrological Sciences Journal*, 857s-880s.

Smith, M.B., Koren, V.I., Wells, E., Wang, D., Zhang, Z., 2000: Evaluation of the advantages of the continuous SAC-SMA model over an event API model, In 15 th Conference on Hydrology 9.1 – 4.1. 2000, Long Beach, CA

Sorooshian, S., Gupta, V.K., 1983: Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness, *Water Resources Research*, 16, 430s-442s.

Sorooshian, S., Gupta, V.K., 1995: Model calibration, in Singh, V.P. (Ed.), *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publication, 23s-68s.

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

Vrugt, J.A., Diks, C.G.H., Gupta, H.V., Bouten, W., Verstraten, J.M., 2005: Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation, *Water Resources Research*, 41, W01017, doi:10.1029/2004WR003059.

Wagener, T., Boyle, D.P., Lees, M.J., Wheater, H.S., Gupta, H.V., Sorooshian, S., 2001: A framework for development and application of hydrological models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 13s-26s.

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

Wagener, T., Wheater, H.S., Gupta, H.V., 2004: *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*, Imperial College Press, London, 300s, ISBN 1-86094-466-3.

Yapo, P.O., Gupta, H.V., Sorooshian S., 1996: Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Sensitivity to calibration data, *Journal of Hydrology*, 181, 23s-48s.

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

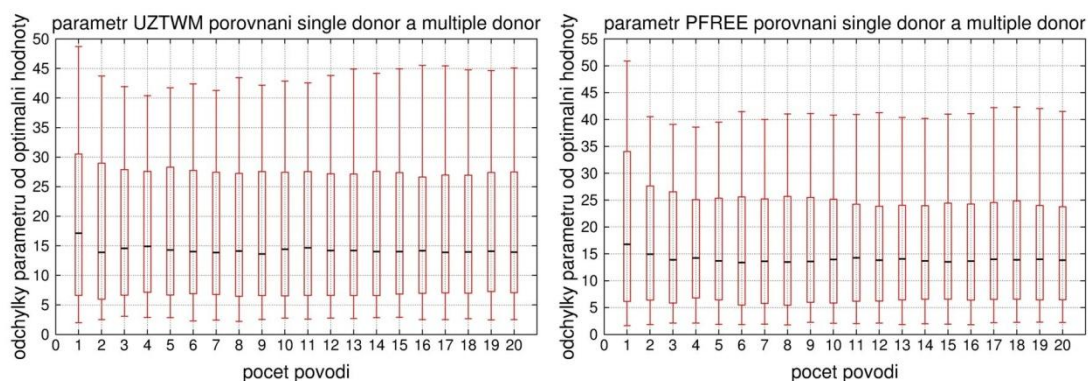
Další zdroje:

Jeníček, M., 2007: Klasifikace hydrologických modelů. Online: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=dokumenty&cislo=7> staženo 19.8.2013.

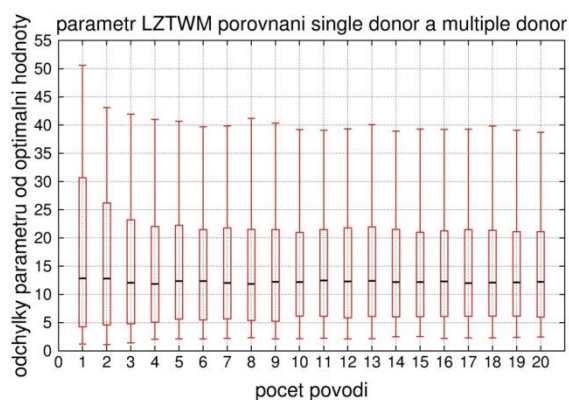
Jeníček, M., 2007: Přehled srážko-odtokových modelů. Online: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=dokumenty&cislo=54> staženo 19.8.2013

Zhang, Y.Q., Chiew, F.H.S., 2009: Evaluation of regionalisation methods for predicting runoff in ungauged catchments in southeast Australia. Online: https://mssanz.org.au/modsim09/I7/zhang_yq.pdf staženo 12.3.2014

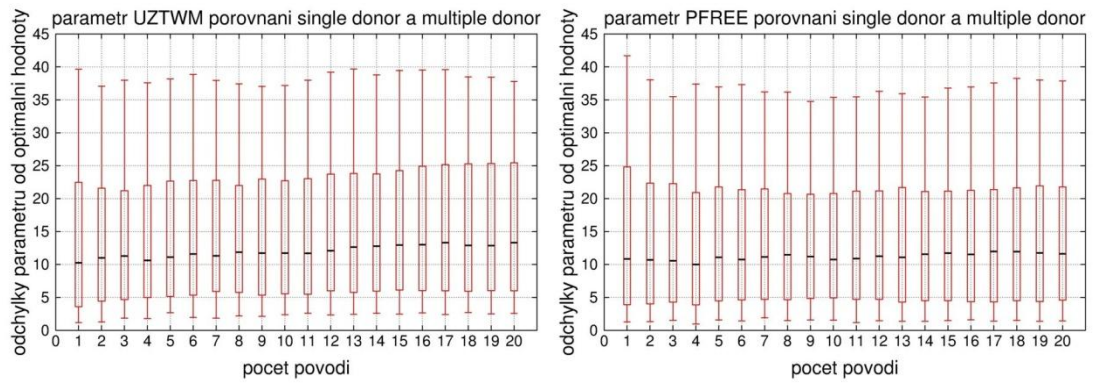
Přílohy



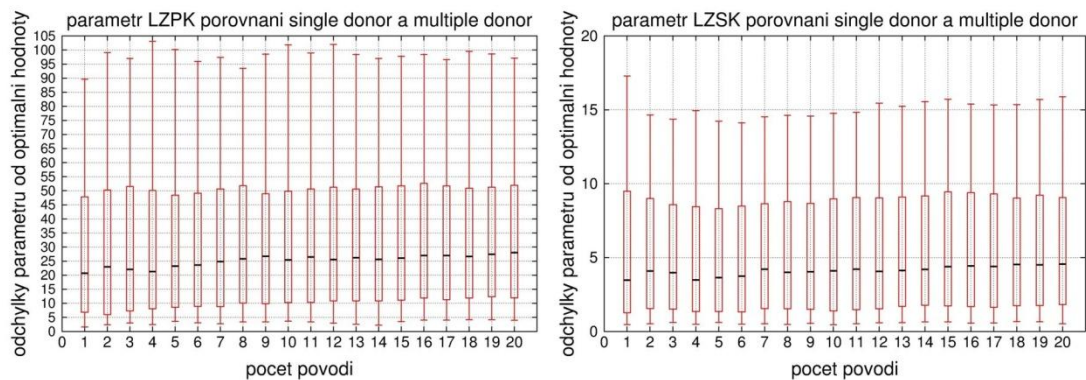
Příloha č. 1: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů UZTWM (vlevo) a PFREE (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS a Po. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



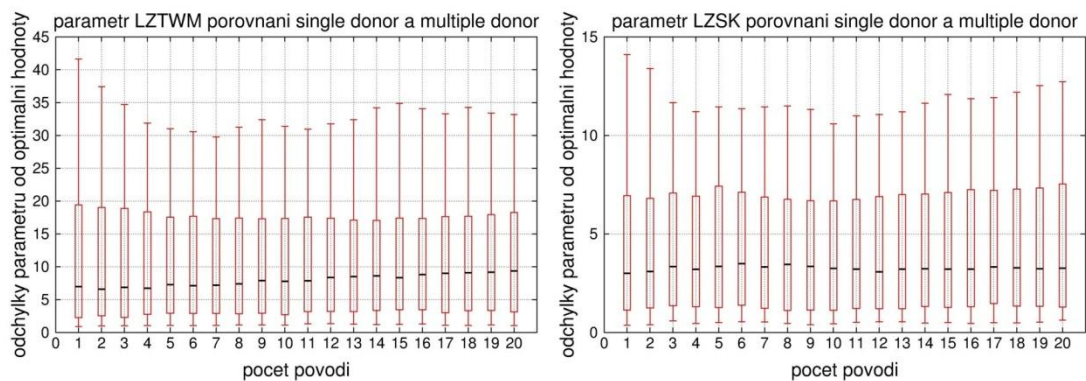
Příloha č. 2: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametru LZTWM a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS a Po. Obrázek ukazuje 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



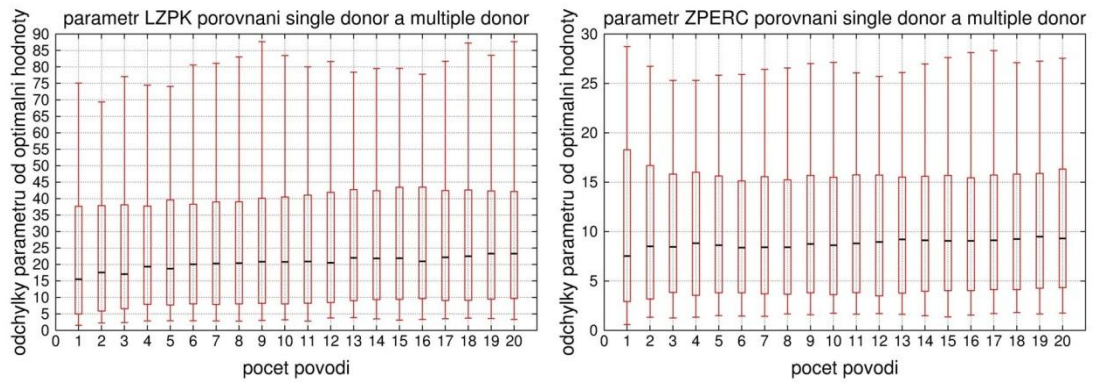
Příloha č. 3: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů UZTWM (vlevo) a PFREE (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po a Eaa/PEaa. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



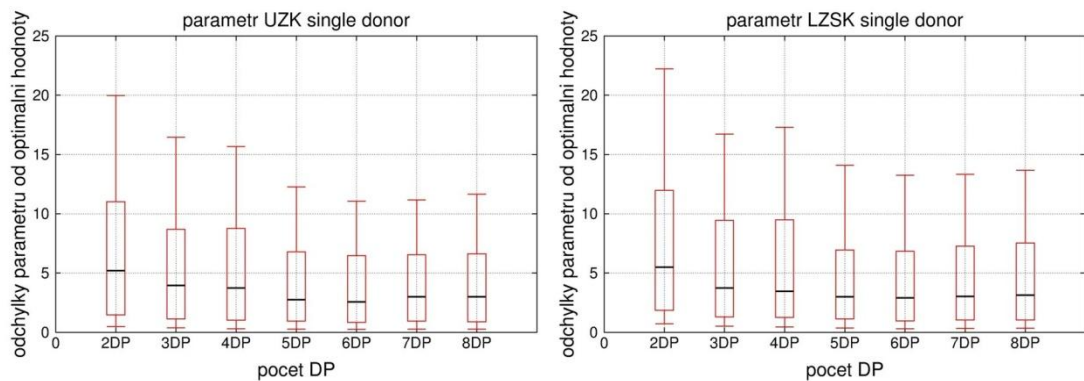
Příloha č. 4: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů LZPK (vlevo) a LZSK (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po, Eaa/PEaa a Ur. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



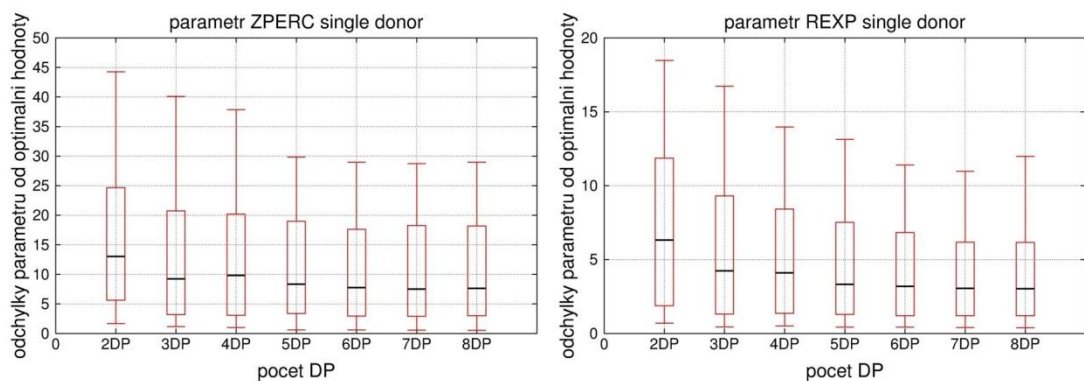
Příloha č. 5: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů LZTWM (vlevo) a LZSK (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po, Eaa/PEaa, Ur a Wp. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



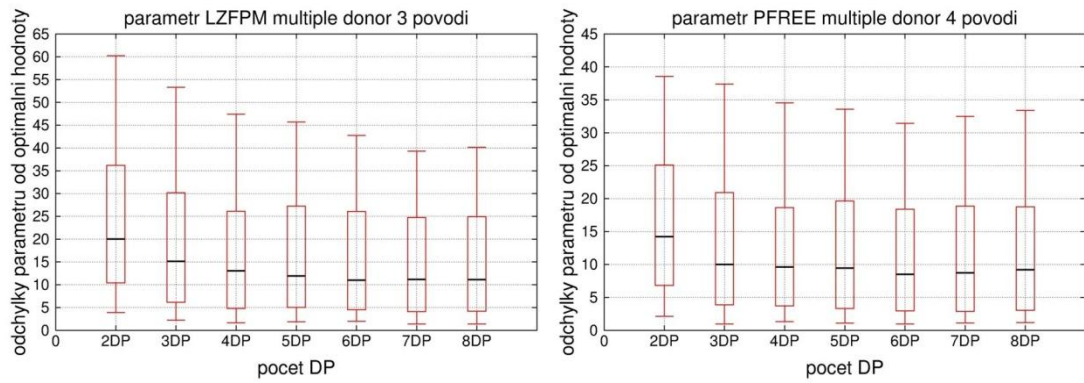
Příloha č. 6: Porovnání hodnot vypočtených odchylek (v %) mezi odhadnutými hodnotami parametrů LZPK (vlevo) a ZPERC (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí při testování 1 až 20 donorů (na obr. uvedených jako počet povodí) při použití kombinace deskriptorů CS, Po, Eaa/PEaa, Ur, Wp, SS a LS. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



Příloha č. 7: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovanými parametry UZK (vlevo) a LZSK (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro single donor přístup. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



Příloha č. 8: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovanými parametry ZPERC (vlevo) a REXP (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro single donor přístup. Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.



Příloha č. 9: Změna vypočtených odchylek mezi odhadovanými parametry LZFPM (vlevo) a PFREE (vpravo) a jejich optimálními hodnotami pro 437 povodí v závislosti na zvyšujícím se počtu použitých optimálních DP pro multiple donor přístup s 3 donory (vlevo) a 4 donory (vpravo). Obrázky ukazují 10% percentil, 25% percentil, 50% percentil, 75% percentil a 90% percentil.