

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



**Porovnání regionalizačních přístupů fyzikální podobnosti
a prostorové blízkosti na souboru MOPEX povodí**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

Diplomant: Bc. Aneta Staňková

2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Aneta Staňková

Voda v krajině

Název práce

Porovnání regionalizačních přístupů fyzikální podobnosti a prostorové blízkosti na souboru MOPEX povodí

Název anglicky

A comparison of regionalisation approaches based on physical similarity and spatial proximity in MOPEX catchments

Cíle práce

Provést regionalizační studii na souboru MOPEX povodí. V práci bude porovnán vliv použitého regionalizačního přístupu na simulační účinnost modelu.

Metodika

- 1) relevantní literární rešerše,
- 2) výběr souboru vstupních dat,
- 3) sestavení konceptuálního modelu,
- 4) kalibrace a validace modelu,
- 5) regionalizační studie.

Doporučený rozsah práce

50 – 80 stran

Klíčová slova

konceptuální model, regionalizace, MOPEX,

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.
- Bloschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H., 2013: Runoff prediction in ungauged basins. Synthesis across processes, places and scales. Cambridge universtity press, Cambridge, 492s, ISBN 978-1-107-02818-0.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Le Moine, M., 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 Frech catchments. *Water Resources Research*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.
- Wagener, T., Wheeler, H.S., Gupta, H.V., 2004: Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. Imperial College Press, London, 300s, ISBN 1-86094-466-3.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 7. 9. 2016

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 10. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 04. 2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Martina Heřmanovského, Ph.D. Uvedla jsem všechnu literaturu a další prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne 18. 4. 2017

.....

Aneta Staňková

Poděkování:

Děkuji Ing. Martinu Heřmanovskému, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracovávání diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině za morální a materiální podporu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá srovnáním regionalizačních metod založených na fyzikální blízkosti a prostorové podobnosti při odhadu parametrů konceptuálního modelu GR4J na nepozorovaných povodích. Ke srovnávací studii byla použita data 360 MOPEX povodí, která se nachází v USA. Pro vyhledávání deskriptorově nejpodobnějších pozorovaných povodí byla aplikována metoda RAS, v rámci níž bylo použito 10 charakteristik. Prostorová blízkost povodí byla řešena pomocí euklidovské vzdálenosti těžišť povodí ze souřadnic těžiště povodí na základě Lambertova konformního kuželového zobrazení. V rámci obou metod byl využit pouze přístup jednoho donoru. Kalibrace modelu GR4J byla provedena pomocí diferenciální evoluce. Zjištěný pokles simulační účinnosti modelu při přechodu z kalibrační fáze do verifikační nebyl příliš výrazný, a tedy použitý model se ukázal jako robustní. V analýze vztahu mezi simulační účinností bylo zjištěno, že nejvýrazněji ovlivňují simulační účinnost modelu GR4J klimatické charakteristiky spolu s průměrnou nadmořskou výškou, souřadnicemi těžiště povodí a vybranými charakteristikami vegetačního krytu. Při porovnání dvou regionalizačních přístupů bylo zjištěno, že přístup prostorové blízkosti vede k vyhledávání vhodnějších donorů, a tedy i lepší simulační účinnosti na nepozorovaných povodích než přístup fyzikální podobnosti.

Klíčová slova: konceptuální model, regionalizace, MOPEX

Abstract

This thesis deals with the comparison regionalization methods based on the spatial proximity and regionalization based on physical similarity in estimating conceptual model parameters GR4J on ungauged catchment. The comparative study used 360 MOPEX catchment located in the USA. For search descriptor observed most similar catchment was applied method RAS, within which were used 10 characteristics. The spatial proximity of the catchment was defined by Euclidean distance of the centers of gravity in the catchment coordinates of the center of gravity based on the Lambert Conformal Conic projection. In both methods was used only to access a single donor. Calibration of GR4J used optimisation algorithm based on differential evolution. The observed decrease in the efficiency of the simulation model of the transition from the calibration phase to the verification was not very significant, and therefore the use of the model proved robust. In the simulation analysis of the relationship between the efficiency, it was found that most influence the effectiveness of the simulation model GR4J were climatic characteristics together with the average altitude and coordinates of the centre of gravity catchment and selected characteristics of vegetation cover. When comparing two approaches regionalization was found that the approach leads to a spatial proximity search more suitable donors and thus better simulation efficiency ungauged catchment than accessing physical similarity.

Keywords: conceptual model, regionalization, MOPEX

OBSAH

1. ÚVOD	8
1.2 CÍL PRÁCE	9
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	10
3.1 MATEMATICKÉ MODEL Y SRÁŽKO- ODTOKOVÉHO PROCESU	10
3.2 KLASIFIKACE MATEMATICKÝCH MODELŮ	11
3.2.1 Stochastické modely	11
3.2.2 Deterministické modely	12
3.2.3 Alternativní metody dělení hydrologických modelů	14
3.3 VÝBĚR HYDROLOGICKÉHO MODEL U	16
3.4 KALIBRACE MODEL U	17
3.5 VERIFIKACE MODEL U	24
3.6 HYDROLOGICKÁ REGIONALIZACE	24
3.6.1 Rozdělení regionalizačních metod	25
4. METODIKA	31
4.1 VSTUPNÍ DATA	31
4.2 HYDROLOGICKÝ MODEL GR4J	33
4.3 KALIBRACE A VERIFIKACE PARAMETRŮ MODEL U GR4J	35
4.4 METODA PROSTOROVÉ BLÍZKOSTI	35
4.5 METODA FYZIKÁLNÍ PODOBNOSTI POVODÍ	35
5. VÝSLEDKY	36
5.1 KALIBRACE A VERIFIKACE MODEL U GR4J	36
5.2 ANALÝZA VZTAHU MEZI SIMULAČNÍ ÚČINNOSTÍ MODEL U GR4J A CHARAKTERISTIKAMI	38
5.3 REGIONALIZAČNÍ STUDIE NA SOUBORU MOPEX POVODÍ	40
5.3.1 Prostorová blízkost	41
5.3.2 Fyzikální podobnost	44
5.3.3 Porovnání metod prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti	48
6. DISKUZE	51
7. ZÁVĚR	56
8. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	57
9. PŘÍLOHY	63

1. ÚVOD

Hydrologické modelování je podstatné pro odhad koloběhu vody v zájmových oblastech. Jednou z významných úloh aplikovaného hydrologického výzkumu je predikce odtoku nebo extrémních hydrologických jevů na nepozorovaném povodí. Nepozorovaným povodí je myšleno takové povodí, na kterém buď nejsou měřeny žádné odtokové záznamy, anebo jsou příliš krátké či nekvalitní (Gupta et Sorooshian 1985).

U nepozorovaných povodí musí být použité hydrologické parametry odhadnuty z jiných zdrojů informací, tzv. informací jako jsou sousední povodí nebo informace převzaté z tabulkových hodnot v literatuře či z odborného posudku. Zpravidla tyto informace bývají chudší než u pozorovaných povodí. Výběr z pozorovaných povodí, ze kterých je informace o hydrologické povodí přenášena, je zpravidla založena na nějaké podobnosti. U povodí, která mají např. podobné fyzickogeografické vlastnosti, se předpokládá podobné hydrologické chování použitého modelu (Oudin et al. 2010). Procesu transferu informace (buď parametru modelu, nebo zjištěného vztahu mezi parametry modelu a zaznamenanými deskriptory povodí) z pozorovaných (obvykle sousedních) povodí na nepozorované zájmové povodí se obecně nazývá regionalizace. V současné době existuje celá řada regionalizačních metod, které řeší odhad parametru použitých modelů na nepozorovaných povodích, které budou v této práci představeny a porovnány mezi sebou.

1.2 CÍL PRÁCE

Cílem práce je provedení regionalizační studie na souboru MOPEX povodí. V práci budou porovnány regionalizační přístupy prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti.

Dílčí cíle práce budou:

- 1) literární rešerše zaměřená na matematickém modelování srážko- odtokového procesu na pozorovaných a nepozorovaných povodích.
- 2) výběr souboru vstupních dat
- 3) kalibrace a verifikace modelu GR4J
- 4) provedení regionalizační studie

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 Matematické modely srážko- odtokového procesu

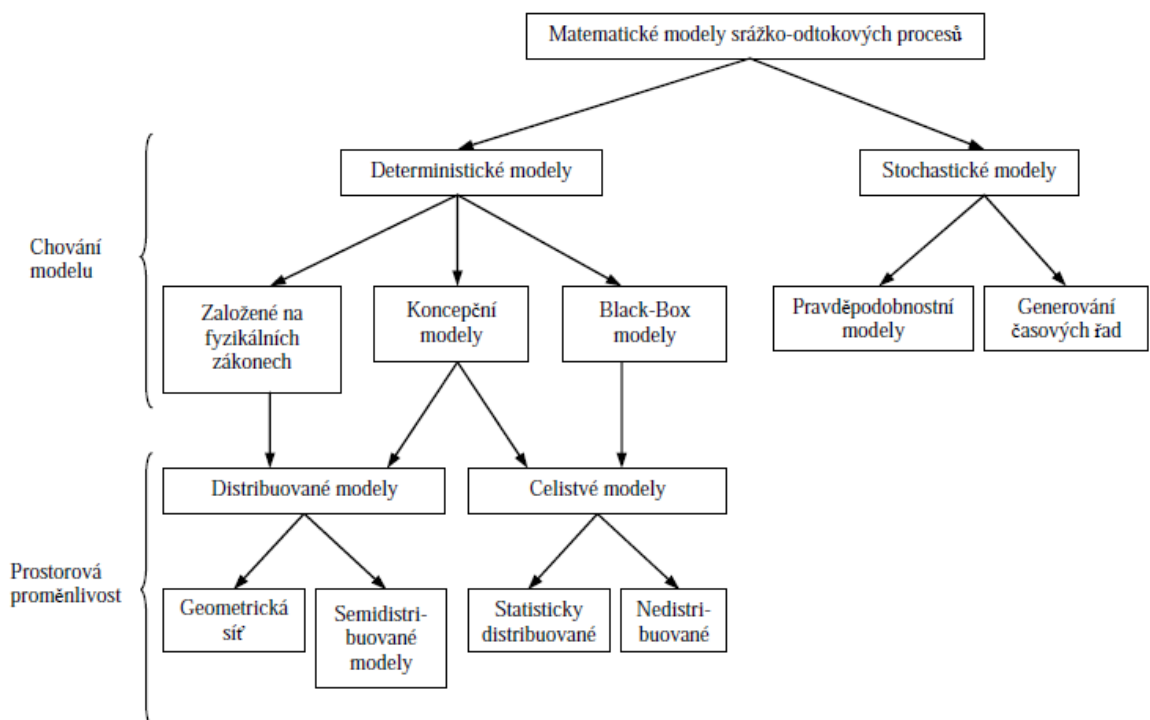
Matematické modely srážko-odtokového procesu popisují zjednodušeně kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami určitého hydrologického systému, který je definován jako systém převážně fyzikálních procesů. Tyto modely působí na vstupní proměnné a transformují je ve výstupní proměnné (Dooge, 1978, Kovář, 1990). V matematickém vyjádření tyto modely představují obecně algoritmus řešení soustavy algebraických a diferenciálních rovnic, kterými je popsána struktura, či chování modelového systému, případně obojí při fyzikálním (srážko-odtokovém) procesu (Clarke, 1973, Gabriel et al. 1982).

Počáteční vývoj matematických simulačních metod pro řešení povrchového odtoku v podstatě začal s vzestupem využívání výpočetní techniky přibližně v 70. letech minulého století. Primární modely byly vytvářeny na analogových počítačích. Vývoj srážkoodtokových modelů směřoval od modelů empirických k modelům fyzikálně založeným, od celistvých modelů k modelům distribuovaným, od modelů výzkumných k modelům komerčně využitelným (Daňhelka et al. 2003).

Hlavním cílem matematického modelování hydrologických procesů je definování časové mnohdy i prostorové závislosti určitých veličin, charakterizujících hydrologický režim modelovaného objektu, tj. povodí, nebo jeho části (Hrádek et Kuřík, 2008). Metody matematického modelování pomáhají nejen simulovat skutečný hydrologický proces, ale navíc umožňují aproximativně určovat i chování modelovaného prototypu v různých extrémních situacích pro predikční nebo návrhové účely (Kovář, 1990).

3.2 Klasifikace matematických modelů

Hydrologických modelů byla vyvinuta celá řada, modely se od sebe liší různými přístupy k jednotlivým komponentám srážko-odtokového procesu nebo ke struktuře zkoumaného povodí, za jakým účelem a pro jakou oblast byl model vyvíjen (Jeníček, 2005). Rozdělení hydrologických modelů proto není vždy jednoduché ani jednoznačné. Mezi základní rozdělení matematických modelů patří hledisko dle stupně kauzality, která je vyjádřena vztahem mezi příčinou a důsledkem. Mezi tyto modely se řadí deterministické a stochastické (nahodilé) modely (Kulhavý et Kovář, 2000) (Obr. 1).



Obr. 1 Rozdělení matematických modelů (Kulhavý et Kovář, 2000)

3.2.1 Stochastické modely

Stochastické modely se vyznačují tím, že alespoň jedna proměnná, konstanta či funkce v modelu je náhodná veličina nebo náhodná funkce (Hřebíček, 2006). Stochastické modely představují skupinu modelů, které jsou charakteristické tím, že neobsahují vazbu mezi příčinou a důsledkem hydrologického jevu. Tyto modely lze rozdělit do dvou základních kategorií (WMO, 2009):

- modely pravděpodobnostní,

- modely pro generování časových řad.

Modely pravděpodobnostní

Modely pravděpodobnostní (Stochastic Probabilistic models) jsou takové modely, u kterých jsou jednotlivé hydrologické parametry (např. minimální průtoky, kulminační průtoky vodní stavy, retenční objemy aj.) charakterizovány určitým pravděpodobnostním rozdělením (např. dle extrémů). Tyto funkce jsou obvykle vyjádřeny základními statistickými charakteristikami, jako je aritmetický průměr, směrodatná odchylka, součinitel variace aj. (Becker et Serban, 1990).

Modely pro generování časových řad

Modely pro generování časových řad (Stochastic Time series generation) jsou modely, které se využívají především pro extrapolaci časových řad hydrologických parametrů při zachování základních statických charakteristik. Extrapolací (předpovědí) se rozumí odhad členů posloupnosti mimo interval pozorovaných hodnot. U extrapolace je podstatná spolehlivost odhadu, která formuluje míru shody mezi budoucí a skutečnou hodnotou a její prognózou (Daňhelka et al. 2003).

3.2.2 Deterministické modely

Deterministické modely jsou charakteristické tím, že všechny proměnné, konstanty a funkce v modelu jsou nenáhodné (deterministické) veličiny nebo funkce (Hřebíček, 2006). Deterministické modely lze vyjádřit vztahem nezávislých proměnných x - vstupní stavové veličiny a závislých proměnných - y (výstupní veličiny) (Liu et al. 2007; Daňhelka et al. 2003):

$$y = f(x, a) \tag{3.1}$$

kde a jsou parametry popisující chování systému

Deterministických modelů existuje mnoho. Liší se od sebe fyzikálním přístupem, strukturou či například diskretizací času a prostoru.

Deterministické modely lze klasifikovat na tři základní kategorie (Singh, 1988):

- empirické modely (Black box),
- konceptuální modely (Grey box),
- fyzikálně založené modely (White box).

Empirické modely

Empirické modely jsou označovány jako “černá skříňka“ zanedbávají explicitně řídicí rovnice formou fyzikálních zákonů a zohledňují pouze vztahy, které popisují empirickým způsobem příčiny a důsledky (WMO, 2009). Hodnoty parametrů, které do systému vstupují a vystupují, nepostihují vztahy a hydrologické parametry uvnitř systému. Vztahy mezi vstupními a výstupními hodnotami jsou většinou velmi obecné a plně empirické, vyžadující opakovanou kalibraci (Daňhelka et al. 2003). Konkrétní podoby empirických modelů jsou často používány v některých komponentách rozsáhlejších modelů jako např. umělé neuronové sítě nebo v modelech jednotkového hydrogramu (Máca, 2010).

Konceptuální modely

Konceptuální modely patří mezi simulační modely, popisující matematickými vztahy jednotlivé části hydrologického cyklu nebo cyklus jako celek (Kulhavý et Kovář, 2000). Obecně platí, že konceptuální modely jsou založeny na popisu dějů na základě fyzikálních zákonů ve zjednodušené (koncepční) podobě a obsahují i určité množství empiricky odvozených vztahů (Xu, 2002). Konceptuální modely slouží k simulování různých hydrologických režimů v povodí a podle účelu volíme i délku časového kroku Δt . Pro účely modelování hydrologické bilance se obvykle volí $\Delta t \geq 1$ den, pro účely modelování jednotlivých krátkodobých hydrologických procesů (ve vzájemné vazbě) je voleno Δt kratší dle charakteru simulovaného děje (Kovář, 1990). Konceptuální modely matematicky popisují hlavní procesy hydrologického cyklu (Hrádek et Kuřík, 2008):

- **povrchové procesy:** evapotranspirace, intercepce, povrchová retence a akumulace v mikrodepresích či makrodepresích, erozní procesy, formování povrchového odtoku, tání sněhu apod.,
- **podpovrchové procesy:** infiltrace, půdní odtok, sycení a vyčerpání aktivní zóny půdního profilu, tvorba základního odtoku aj.,
- **korytové procesy:** transformace odtoku v údolnici, vytváření soustředěného odtoku, apod.

Řadu konceptuálních modelů lze rozdělit podle různých kritérií. Základní hledisko při jejich rozdělení je délka časového kroku Δt . Jak již bylo zmíněno, s delším časovým krokem jsou uplatňovány modely bilanční (kontinuální), s kratší

časovou dobou modely epizodní (diskrétní), simulující hydrologický proces, (např. srážko- odtokový) (Kovář, 1990). Mezi nejznámější konceptuální modely se řadí například SAC-SMA (Daňhelka et al. 2003).

Fyzikálně založené modely

Fyzikálně založené modely, nebo také v literatuře označovány jako hydrodynamické modely jsou koncipované především na základě hydrodynamických zákonů, případně mohou být doplněny i o poznatky obecné fyziky, termodynamiky chemie a biologie (Daňhelka et al. 2003). Skutečná podstata systému je formulována pomocí diferenciálních rovnic. Praktickou stránkou fyzikálně založeného modelu je algoritmus řešení těchto rovnic, převedených do soustavy diferenčních rovnic. Zatímco struktura systému je u konceptuálních hydrologických modelů součástí modelů, u fyzikálně založených modelů je vložena přímo do základní rovnice. Pro sestavení a uplatnění fyzikálně založeného modelu je nutné mít k dispozici následující informace (Kovář, 1990):

- vymezené přírodní zákony, podle kterých daný přírodní proces probíhá a je formulován pomocí parciálních diferenciálních rovnic (např. rovnice kontinuity a pohybové),
- geometrický systém (např. čtvercovou nebo trojúhelníkovou síť) nutný pro diskretizaci diferenciálních rovnic do rovnic diferenčních,
- numerické schéma, které umožňují převedení výchozích rovnic do diferenčního tvaru s využitím geometrického systému uvažovaného v čase i poloze,
- potřebné hydrologické a hydraulické proměnné a parametry ve výpočtových bodech geometrické sítě,
- počáteční a okrajové podmínky.

Mezi fyzikálně založené modely se řadí například SHE model (Abbot et al. 1986b).

3.2.3 Alternativní metody dělení hydrologických modelů

Dále můžeme matematické modely klasifikovat dle časové a prostorové diskretizace.

Podle časové diskretizace jsou modely uvažovány ve vztahu k časovému kroku. Časový interval vstupních hydrometeorologických dat do modelu může být rozdílný od časového kroku výpočtu a od kroku výstupních dat. Časová diskretizace může také vycházet z časové kontinuity výpočtu, podle které se dělí na (Hrádek et Kuřík, 2008):

- kontinuální (dlouhodobé) modely,
- epizodní (krátkodobé) modely.

Kontinuální modely

Kontinuální modely simulují delší období (i několik let) a uplatňují se v povodích, kde jsou ve velké většině případů zdrojem povodní regionální deště (Hrádek et Kuřík, 2008).

Epizodní modely

U epizodních modelů probíhá simulace jen pro jednotlivou událost, jako je např. povodeň, hydrologické sucho. Uplatňují se především pro menší povodí při simulaci přívalových srážek (Hrádek et Kuřík, 2008).

Na základě prostorové diskretizace lze definovat (Clarke, 1973):

- celistvé (lumped) modely,
- semi-distribované modely,
- distribuované.

Celistvé modely

Celistvé modely jsou v literatuře často označovány jako lumped modely představující hydrologický systém (povodí) jako samostatnou a homogenní jednotku, čímž zanedbávají prostorovou variabilitu procesů, vstupních dat, okrajových podmínek a fyzikálních vlastností daného systému (Wagener et al. 2004). Mezi celistvé modely se řadí například HEC- HMS či SAC-SMA model (Daňhelka et al. 2003).

Semi-distribované modely

Semi- distribuované modely jsou kombinací celistvých a distribuovaných modelů. Rozdělují systém povodí na elementární odtokové plochy (hydrotopy), které se vyznačují homogenními prostorovými parametry, například stejným půdním druhem a vegetačním pokryvem (Bergström, 1976). Mezi semi- distribuované modely se řadí například některé komerční verze modelu HBV (Bergström, 1976).

Distribované modely

Distribované modely jsou zaměřeny na detailnější reprezentaci (oproti semidistribovanému modelu) prostorové variability hydrologických procesů, vstupů, okrajových podmínek a fyzikálních vlastností daného systému (povodí). Poskytují přesněji časoprostorovou heterogenitu hydrologických procesů (oproti celistvým modelům) (Diermanse, 2001). Distribované modely rozdělují povodí na mnoho segmentů (označovány také jako subpovodí, suboblasti, jednotky čtvercové mřížky aj.) Obecně platí, že distribuované modely mají velký počet parametrů. Tyto parametry musí být stanoveny pro každý prvek modelu v souladu s předem definovanými charakteristikami povodí jako je např. topografie, půdní a vegetační třídy odpovídajícímu krajinnému prvku v průběhu kalibrační fáze (Boyle et al. 2001). Mezi distribuované modely AFFDEF model (Moretti et Montanari, 2006).

3.3 Výběr hydrologického modelu

Výběr vhodného modelu pro danou situaci je často velmi obtížné. Zásady pro výběr modelu lze shrnout do následujících bodů (Diskin et Simon, 1977, Xu, 2003):

1. Formulace problémů a jejich vzájemných vazeb k řešení
2. Definice procesů, které probíhají na povodí a jejich možný vliv na model
3. Modifikace již navržených postupů nebo navržení nového postup k řešení daného problému
4. Zvolení typu modelu, který splňuje požadované aplikace a definovat rozsah jevů, které budou modelem zastoupené
5. Definice struktury modelu a rovnice, které zastupují jednotlivé složky v modelu
6. Výběr časové řady vstupních a výstupních dat

7. Výběr objektivních funkcí, které budou použity v optimalizačním procesu
8. Kalibrace modelu s pomocí vhodného optimalizačního postupu a vybraných objektivních funkcí
9. Testování simulační účinnosti nakalibrovaného modelu s ohledem na zamýšlené použití
10. Upřesnění modelu v případě potřeby
11. Uplatnění modelu na problém, pro který byl určen a vyhodnotit získané výsledky

Kroky (5) až (10) se mohou několikrát opakovat na základě získaných výsledků v konečné fázi analýzy. Výběr objektivní funkce (7) je v podstatě subjektivním rozhodnutím, který má vliv na získané optimální hodnoty parametrů modelu (Xu, 2003; Diskin et Simon, 1977).

3.4 Kalibrace modelu

Před aplikací hydrologického modelu na vybrané povodí je nutné provést jeho kalibraci a validaci. Kalibrace hydrologického modelu je proces identifikace parametrů použitých pro výpočet za účelem zjištění skutečného chování povodí. Kalibrace modelu slouží pro stanovení takových sad parametrů modelu, které vedou k nejmenším odchylkám mezi výsledky simulace a měřenými daty, a tím k redukci nejistot (Stránský et al. 2010). Realizuje se na proběhlých událostech, kde je možnost pravdivost výpočtu ověřit porovnáním se zaznamenanými daty (Daňhelka et al. 2003).

Kalibraci lze rozdělit na manuální či automatickou.

Manuální kalibrace

Manuální kalibrace je proces upravování hodnot parametrů modelu, dokud výstupy modelu přesně neodpovídají pozorovaným údajům. Parametry se testují tzv. metodou „Pokus- Omyl“. Tato kalibrace zahrnuje velké množství subjektivních úsudků, a proto různé osoby mohou získat velmi odlišné hodnoty parametrů pro stejné povodí (Wheater, 2002 ; Xu, 2002).

Automatická kalibrace

Automatická kalibrace je objektivní strategií určenou k odhadu parametrů zvoleného modelu, eliminující subjektivní lidský úsudek obsažený v manuální kalibraci. Ve srovnání s manuální kalibrací je rychlá, přesto zcela závislá na použité objektivní funkci (Boyle et al. 2000).

Automatická kalibrace se skládá ze čtyř hlavních částí (Gupta et Sooroshian 1995; Xu, 2002):

- objektivní funkce,
- optimalizační algoritmus,
- ukončovací kritérium.

Objektivní funkce

Objektivní funkce je taková funkce, která udává velikost rozdílu mezi simulovaným výstupem a pozorovaným (naměřeným) výstupem povodí (Xu, 2002). V literatuře lze nalézt různé typy objektivních funkcí, které jsou založeny buď na matematické statistice (např. Nash- Sutcliffův koeficient, RMSE, MSE) nebo na hydrologických charakteristikách (relativní objemová chyba). Mezi často používané objektivní funkce založené na matematické statistice patří:

- **Odmocnina střední kvadratické chyby RMSE** (root mean squared error) která má rozsah od $(\infty, 0)$, přičemž při dokonalé shodě mezi Q_{sim} a Q_{mer} je RMSE rovno nule.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - Q_{sim}(i))^2}, \quad (3.2)$$

kde Q_{sim} značí simulovaný odtok v časovém kroku i [mm], Q_{mer} měřený odtok v časovém kroku i [mm] (Gupta et Sooroshian, 1995).

- **Střední kvadratická chyba reziduí MSE** (mean squared error) která má rozsah od $(\infty, 0)$, přičemž při dokonalé shodě mezi Q_{sim} a Q_{mer} je MSE rovno nule.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - Q_{sim}(i))^2, \quad (3.3)$$

kde Q_{sim} značí simulovaný odtok v časovém kroku i [mm], Q_{mer} měřený odtok v časovém kroku i [mm] (Gupta et Sorooshian, 1995).

- **Nash- Sutcliffův koeficient (NS)** umožňuje porovnávat simulační účinnost modelu na odlišných povodích. Koeficient nabývá hodnot v intervalu $(-\infty, 1)$, přičemž nejlepší shoda mezi Q_{sim} a Q_{mer} je při čísle jedna. (Nash et Sutcliffe, 1970).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - Q_{sim}(i))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - \bar{Q})^2}, \quad (3.4)$$

kde Q_{sim} značí simulovaný odtok v časovém kroku i [mm], Q_{mer} měřený odtok v časovém kroku i [mm] a \bar{Q} průměrný pozorovaný odtok [mm] (Gupta et Sorooshian, 1995). Zřejmou nevýhodou použití NS je skutečnost, že difference mezi Q_{sim} a Q_{mer} jsou počítány ve formě druhých mocnin (rovnice 3.4). Hodnota NS je pak více ovlivněna kvalitou simulací v těch částech časové řady, kde se vyskytují události s vysokou hodnotou Q_{mer} . Na druhou stranu, difference mezi Q_{sim} a Q_{mer} v částech časové řady, kde dominuje pouze základní odtok, ovlivňují hodnotu NS velmi omezeně. To v důsledku ovlivňuje optimální hodnoty parametrů získané při kalibraci modelu (Krause et al., 2005). Je-li požadována přesnější simulace nízkých odtoků při použití NS jako hodnotícího kritéria výkonu modelu, je nutné hodnoty Q_{mer} a Q_{sim} před výpočtem objektivní funkce transformovat. Oudin et al. 2010 transformovali hodnoty Q_{mer} a Q_{sim} jejich druhou mocninu nebo jejich logaritmováním. Zřejmým nedostatkem logaritmické transformace jsou nulové hodnoty měřených či simulovaných odtoků, pro které není logaritmus definován. Alternativním řešením je Box- Coxova transformace Q_{sim} a Q_{mer} , kterou použili Singh et al. 2014:

$$Q(\lambda) = \frac{Q_{(sim,mer,prum)}^\lambda - 1}{\lambda}, \quad (3.5)$$

kde λ je parametr transformace, Q_{sim} značí simulovaný odtok [mm], Q_{mer} měřený odtok [mm], Q_{prum} průměrný pozorovaný odtok [mm].

Při vhodně zvoleném transformačním parametru λ lze dosáhnout toho, že NS bude více zaměřen na nízké odtoky, kde Singh et al. 2014 ve své práci použili hodnotu $\lambda=0.4$.

- **Relativní objemová chyba (WBE)**, která má rozsah od $(-\infty, \infty)$, přičemž při dokonalé shodě mezi Q_{sim} a Q_{mer} je MSE rovno nule.

$$WBE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(i) - Q_{mer}(i))}{\sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i))}, \quad (3.6)$$

kde Q_{sim} značí simulovaný odtok v časovém kroku i [mm], Q_{mer} měřený odtok v časovém kroku i [mm] a \bar{Q} průměrný pozorovaný odtok [mm]

Optimalizační algoritmy

Optimalizační algoritmus je logický postup, který slouží k vyhledávání odezvového povrchu (plocha, která je popsána objektivní funkcí v parametrickém prostoru), omezeného přípustným rozsahem parametrů modelu, tedy hodnot parametrů, které optimalizujeme numerickou hodnotou objektivní funkce. Optimalizační algoritmus lze klasifikovat na (Gupta et Sooroshian 1995):

- lokální algoritmy,
- globální algoritmy.

Lokální algoritmy

Lokální algoritmy postupují podle těchto tří kroků (Xu, 2002):

- výběr směru pohybu v parametrickém prostoru,
- rozhodnutí, jak daleko se pohybovat v tomto směru,
- rozhodnutí o ukončení procesu, když už není možnost dalšího zlepšení.

Výhodami lokálních algoritmů je rychlost a časová nenáročnost při prohledávání parametrického prostoru (Máca, 2015). Mezi lokální algoritmy se například zařazuje Newtonova metoda neboli metoda tečen, metoda sdružených gradientů a metoda nejrychlejšího vzestupu či poklesu založená na hledání směru vhodné délky kroku v příslušném směru pro nalezení optima (Máca, 2015).

Globální algoritmy

Globální algoritmy jsou navrženy tak, aby efektivně vyhledávaly minimum případně maximum multimodální funkcí, přitom musí být schopné pracovat ve vysokodimenzionálním parametrickém prostoru a přitom musí být schopné se vyhnout zachycení v lokálních minimech či maximech na povrchu popsaném objektivní funkcí (Sooroshian et Gupta, 1995). Výhodou globálních algoritmů je efektivní prohledávání parametrického prostoru, které je často zakončeno úspěšným nalezením globálního optima. Obecně jsou globální algoritmy spojeny s vyššími nároky na výpočetní čas a výpočetní techniku (Máca, 2015).

Evoluční algoritmy

Mezi velkou skupinou globálních algoritmů jsou postupy, které se řadí do skupiny evolučních algoritmů. Evoluční algoritmy jsou ve své podstatě inspirované Darwinovou evoluční teorií vývoje druhů a především se používají pro řešení velkých komplexních optimalizačních problémů s mnoha lokálními optimy (Qin et al. 2009). Evoluční algoritmy jsou tvořeny:

- genetickými algoritmy,
- diferenciální evolucí,
- evoluční strategií,
- evolučním programováním.

Jejich cílem je prohledávání prostoru a nalezení optima prostřednictvím práce s populací modelů, které se vyvíjejí iteračním procesem. V průběhu jedné iterace dochází k tomu, že rodičovská populace modelů je díky mechanismům optimalizačního algoritmu změněna na novou populaci modelů, potomků. Jestliže mají nově generované modely, potomci, kvalitnější hodnotu dané objektivní funkce než jejich rodičovská populace, stávají se rodiči v další generaci pro další iteraci (Máca, 2015; Price et al. 2006).

Diferenciální evoluce

Diferenciální evoluce (DE) je nejvíce uplatňovaná metoda, která je převážně aplikována pro optimalizaci funkcí definovaných v oboru reálných čísel, která je nejčastěji reprezentována hledáním jejich minim. Diferenciální evoluce na počátku iterací provádí explorační prohledávání v parametrickém prostoru, v pozdější fázi iterací se zaměřuje DE na exploatační prohledávání a lokalizuje detailněji hledaná řešení. Obecný postup algoritmu diferenciální evoluce je složen (Price et al. 2005, Zelinka et al. 2008):

1. Stanovení parametrů

Před spuštěním evoluce je nutno stanovit parametry, kterými se bude evoluce řídit. Mezi parametry DE patří: CR-práh křížení v intervalu $(0,1)$, NP-počet jedinců v populaci, F- mutační konstanta v intervalu $(0,2)$, D- rozměr jedince (počet hledaných parametrů)

2. Vygenerování počáteční populace

Počáteční populace se vytvoří vygenerováním množiny jedinců (matice) podle prototypového vektoru. U každého jedince se musí počítat s jedním prvkem navíc a tím je hodnota objektivní funkce.

3. Započítí cyklu generace

Během každé generace se provádí ještě cyklus, který zabezpečuje postupně evoluční šlechtění každého jedince z populace. V tomto cyklu se postupně vybírá jeden jedinec (cílový vektor) za druhým až do konce populace a pro každého z nich je proveden následující evoluční cyklus.

4. Evoluční cyklus

V tomto cyklu je prováděna mutace a křížení jedince. Vedle cílového vektoru se náhodně zvolí tři další různé vektory (jedinci) z populace. První dva se od sebe odečtou a získá se tak tzv. diferenční vektor. Ten se vynásobí mutační konstantou (F), který se změní (zmutuje) a získá se „váhovaný diferenční vektor“. Ten je pak dále přičten k třetímu náhodně vybranému vektoru a získá se tzv. „šumový vektor“. Poté se připraví tzv „zkušební vektor“ a z cílového vektoru se bere postupně jeden prvek za druhým a pro takto vybranou každou dvojici se generuje náhodné číslo

v rozsahu $\langle 0,1 \rangle$ a porovnává s konstantou CR. Pokud je toto číslo menší než CR, pak se do příslušné pozice v tzv. „zkušebním vektoru“ umístí prvek z vektoru šumového a v opačném případě z vektoru cílového. Tak se získá zkušební vektor, jehož hodnota objektivní funkce se porovná s hodnotou objektivní funkce cílového vektoru. Na pozici cílového vektoru v nové populaci je vybrán ten vektor (jedinec), který má hodnotu objektivní funkce lepší. Tím je zajištěno, že se do nové generace dostanou jedinci s lepšími nebo stejnými vlastnostmi. Celý evoluční cyklus se opakuje až do vyčerpání populace.

5. Testování naplnění ukončovacích parametrů

DE je ukončena jedině tehdy, provede-li se uživatelem zadaný počet generací.

Ukončovací kritérium

Obecně platí, že ukončovací kritérium stanovuje, kdy je vyhledávání optimálních hodnot parametrů ukončeno. Toto kritérium je závislé na výběru počátečních hodnot parametrů.

Optimalizaci parametrů modelu lze ukončit třemi způsoby: konvergencí objektivní funkce, konvergencí parametru modelu a maximálním počtem iterací. Konvergence objektivních funkce patří mezi jednodušší cestu jak ukončit vyhledávání tak, že algoritmus je dále neschopen výrazně zlepšit hodnotu objektivní funkce jednou či více iteracemi. Konvergence parametru se aplikuje k ukončení vyhledávání, když není algoritmus schopen výrazně zlepšit hodnoty parametrů, a proto nemůže zlepšit hodnotu funkce v průběhu jedné nebo více iterací. Kritérium maximálního počtu iterací se aplikuje jako záloha, aby se zabránilo plýtvání výpočetního času, stanovením maximálního počtu iterací (Sooroshian et Gupta 1995; Xu, 2002).

• Nejistoty spojené s kalibrací

Nejistoty spojené s kalibrací jsou především (Beven, 2012; Daňhelka et al. 2003):

- náhodné nebo systematické chyby při měření vstupních dat (srážky, teplota), aplikované k určení vstupních podmínek v povodí (čas, prostor),
- chyby v důsledku hodnot nekalibrovaných parametrů,

- odlišnost v měřítku dostupných měřících technik a měřítku, ve kterém je hodnota parametru požadována. Model počítá s většími prostorovými částmi, než jaké jsme schopni změřit,
- při optimalizaci se vypočtené hodnoty porovnávají s naměřenými, která ovšem mohou obsahovat chyby,
- chyby v důsledku nekompletní struktury modelu.

Chyby, které vznikají v důsledku měření, udávají takovou míru neshody, pro kterou parametry ani zpřesnění struktury modelu nezlepší výsledky. Cílem kalibračního procesu je tedy snížení chyb, ke kterým dochází nevhodnou kalibrací modelu (Daňhelka et al. 2013).

3.5 Verifikace modelu

Verifikace modelu neboli validace je proces, který probíhá po kalibraci. Při verifikaci dochází k ověření modelu pro jiná období a zatížení systému než při kalibraci. Výpočty se provádějí s rozdílnou sadou měřených vstupních dat a kalibrovanými parametry modelu a porovnává výsledek simulace s měřenými daty, aby se našla všechna zkreslení kalibrovaných parametrů (Stránský et al. 2010).

3.6 Hydrologická regionalizace

Mezi hlavní problémy v hydrologických vědách patří predikce hydrologických veličin na nepozorovaných povodích (Sivapalan et al. 2003). Za nepozorované povodí je považováno takové povodí, které nemá dostatečné záznamy (z hlediska objemu dat a kvality) z hydrologických pozorování.

Pro nepozorované povodí musí být parametry odhadnuty jinou cestou než kalibrací, např. přenosem parametrické sady ze sousedních povodí, nebo musí být vyčteny z tabulkových hodnot či zjištěny na základě odborného posudku (Parajka et al. 2005). Procesu přenosu obecně hydrologické informace, tedy i parametrů modelu ze sousedních povodí na zájmové povodí se obecně nazývá hydrologická regionalizace (Blöschl et Sivapalan, 1995).

3.6.1 Rozdělení regionalizačních metod

Obecně jsou rozlišovány tři základní skupiny regionalizačních metod, z nichž každá má své specifické výhody a nevýhody (Oudin et al. 2008).

Regionalizace založena na prostorové (geografické) blízkosti

Regionalizace na základě prostorové blízkosti byla jedním z prvních pokusů o regionalizaci parametrů srážko- odtokového modelu na nepozorovaných povodí (Vandewiele et al. 1991; Oudin et al. 2008). Tento přístup je založen na přenosu informace o hydrologickém chování z geograficky blízkých, často sousedních povodí na nepozorované povodí. Nejjednodušší aplikací metody geografické blízkosti je přenesení celého parametrického souboru z pozorovaného sousedního či velmi blízkého povodí (donoru) na nepozorované povodí. V případě možnosti použití více donorů lze získat informace:

- průměrováním parametrů,
- průměrováním výstupů.

Při průměrování výstupů je vypočítaný regionální odtok odvozen ze simulací získaných parametrických sad donor povodí. Denní odtok (j) je vypočten jako:

$$\hat{Q}(j) = \hat{Q}\left(j, \frac{\sum_{i=1,m} X_i}{m}\right), \quad (3.7)$$

kde m je počet donorů, X_i je vektor hodnot modelových parametrů pro donor i .

Při průměrování parametrů je denní odtok (j) vypočten jako:

$$\hat{Q}(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1,m} \hat{Q}(j, X_i), \quad (3.8)$$

kde m je počet donorů, X_i představuje vektor hodnot modelových parametrů pro donor i .

Vandewiele et Elias (1994) použili ve své srovnávací studii průměrování parametrů z několika sousedních povodí metodou kriging a IDW, při které zjistili, že kriging poskytuje mnohem lepší výsledky než IDW. Parajka et al. (2005) aplikovali jako měřítko geografické blízkosti vzdálenost těžišť pozorovaných povodí a nepozorovaného povodí. Parametry získali interpolační metodou kriging. Tímto

přístupem, při porovnání s ostatními regionalizačními metodami, dosáhli nejlepších výsledků.

Regionalizace na základě regrese

Regionalizace na základě regrese je pravděpodobně nejvíce používanou metodou, která slouží ke stanovení matematického vztahu mezi charakteristikami povodí a hodnotami parametrů modelu (Young, 2006). Parametry na nepozorovaném povodí jsou pak stanovovány na základě odvozených vztahů a jejich fyzikálních a klimatických charakteristik. Tento přístup vychází ze dvou předpokladů. Prvním předpokladem je, že existuje vztah mezi pozorovanými charakteristikami povodí a parametry modelu (Oudin et al. 2008; Perrin et al. 2007). Druhým předpokladem je, že deskriptory pozorovaného povodí zvolené pro regresi poskytují informaci týkající se ohledně chování nepozorovaných povodí (Oudin et al. 2008).

Regionalizace na základě regrese lze rozdělit dle studie (He, 2011) na:

- dvoukrokovou regresi,
- sekvenční regresi,
- jednostupňovou souběžnou regresi.

Dvoukroková regrese

Dvoukroková regrese je nejrozšířenější regresní metodou. Parametry modelu jsou vyjádřeny jako lineární funkce řady charakteristik povodí (sklon povodí, plocha povodí, půdní typy aj.). Tato metoda probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je kalibrace parametrů modelu na velkém souboru pozorovaných povodí. Ve druhém kroku jsou hledány regresní vztahy mezi kalibrovanými parametry (z kroku 1) a zvolenými charakteristikami povodí. Nalezené regresní vztahy jsou pak využity při odhadu parametrů modelu na nepozorovaném povodí (He, 2011). Tato metoda se zdá být jednoduchá a efektivní při odhadování parametrů na nepozorovaných povodích, avšak následná predikce bohužel dosahuje limitovaných úspěchů (He, 2011; Hundecha et Bardóssy, 2004; Kim et Kaluarachchi, 2008).

Sekvenční regrese

Sekvenční regrese je navržena tak, aby řešila problém špatné identifikovatelnosti parametrů modelu. Tato metoda v podstatě modifikuje kalibraci parametrů modelu. Při této metodě se parametry modelu kalibrují postupně od nejcitlivějšího k nejméně citlivému parametru, místo toho, aby se kalibrovala současně celá parametrická sada. Jakmile je identifikován a kalibrován nejcitlivější parametr modelu, je nalezen regresní vztah mezi ním a zvolenou charakteristikou povodí (či více charakteristikami povodí). Nalezený regresní vztah je využit při výpočtu nové hodnoty tohoto nejcitlivějšího parametru. Poté je identifikován a kalibrován druhý nejcitlivější parametr (do kalibrace zde vstupují nové hodnoty nejcitlivějšího parametru zjištěné na základě regresní rovnice). Následně je nalezen regresní vztah mezi tímto druhým nejcitlivějším parametrem a zvolenou charakteristikou povodí (či více charakteristikami povodí). Nalezený regresní vztah je využit při výpočtu nové hodnoty tohoto (druhého nejcitlivějšího) parametru. Postup se opakuje pro zbývající parametry modelu (He, 2011). Výhodou sekvenční regrese je, že zvyšuje identifikovatelnost parametrů modelu a dle srovnávacích studií, které prezentovali Calver et al. (2005) nebo Lamb et al. (2000) dosahuje lepších výsledků než u dvoustupňové regrese.

Jednostupňová souběžná regrese

Jednostupňová souběžná regrese byla vyvinuta na základě dvoustupňové regrese. Tato metoda kombinuje oba kroky jednostupňové regrese do jednoho kroku. Při této metodě do kalibrace modelu vstupují i vybrané charakteristiky povodí a současně jsou identifikovány regresní vztahy mezi parametry modelu a těmito charakteristikami povodí. Při kalibraci modelu se tedy posuzuje jednak simulační výkon modelu (porovnáním měřených a zaznamenaných hodnot odtoku) ale také kvalita odvozených regresí. Díky této metodě lze sice najít velmi kvalitní regresní vztahy mezi parametry modelu a použitými charakteristikami povodí, ale výraznější zlepšení oproti dvoukrokové regresi nebylo zaznamenáno (He, 2011).

Regionalizace na základě fyzikální (deskriptorové) podobnosti

Regionalizace využívající fyzikální podobnosti představuje syntézu metody geografické vzdálenosti a regresní metody (Oudin et al. 2008). Tento přístup je

založen na podobnosti mezi nepozorovaným povodím a jedním nebo více pozorovaným povodím ve zvolených deskriptorech povodí (McIntyre et al. 2005). Hydrologická informace (např. parametry modelu) je přenášena mezi povodími, která jsou si nejvíce podobná podle hodnot zvolených deskriptorů povodí, ačkoliv se nemusí jednat o geograficky sousední povodí (Oudin et al. 2008). Povodí s nejvíce podobnými charakteristikami bude mít velmi podobné hydrologické chování. Pro identifikaci výhradně jednoho nejpodobnějšího pozorovaného povodí se uplatňuje metoda „single donor“. Tento přístup předpokládá stejné nebo maximálně podobné hodnoty snah hodnoty použitých charakteristik (deskriptorů) povodí na identifikovaném deskriptorově nejpodobnějším pozorovaném povodí a nepozorovaném povodí. Při identifikaci více než jednoho deskriptorově nejpodobnějšího pozorovaného povodí je metoda označována jako „multiple donor“ (Oudin et al. 2008; Parajka et al. 2005).

Existuje mnoho metod používaných v přístupu fyzikální podobnosti povodí. Například Parajka et al. (2005) ve své studii použili metodu podle které je donor povodí vybrán jako pozorované povodí s nejmenším indexem podobnosti:

$$\Phi = \sum_{i=1}^k \left(\frac{|X_i^G - X_i^U|}{\Delta X_i} \right), \quad (3.9)$$

kde Φ - index podobnosti, který je definován jako suma absolutních rozdílů z k- vybraných fyziografických deskriptorů pozorovaného povodí (X^G) a zájmového nepozorovaného povodí (X^U) vydělená normalizovaným rozsahem deskriptorů (ΔX).

Další metodou je RAS (Rank accumulated similarity method). Princip metody RAS lze shrnout do následujících kroků (Oudin et al. 2008):

- 1) Výpočet absolutních hodnot odchylek mezi charakteristikou X nepozorovaného povodí a charakteristikami X všech pozorovaných povodí
- 2) Přiřazení pořadí jednotlivým pozorovaným povodím podle velikosti odchylek (hodnota 1 je přiřazena pozorovanému povodí s nejnižší hodnotou odchylky charakteristiky, hodnota 2 je přiřazena pozorovanému povodí s druhou nejnižší hodnotou odchylky charakteristiky X). Pokud je k vyhledávání nejpodobnějších povodí použito více deskriptorů, pak je celý postup opakován pro každý deskriptor.
- 3) Nakonec je stanoveno celkové pořadí jednotlivých pozorovaných povodí jako

aritmetický průměr dílčích pořadí. Každému deskriptoru je v tomto procesu přiřazena stejná váha.

Pro vyhledávání deskriptorově nejpodobnější pozorovaných povodí využili Burn a Boorman (1993) ve své studii metodu shlukové analýzy CLA (Cluster Analysis). Tato metoda seskupuje povodí do regionů na základě fyzikální podobnosti v souladu se shlukovacím algoritmem. Burn a Boorman (1993) představili vícekrokovou metodu vyžívající shlukovou analýzu při přístupu fyzikální podobnosti povodí. Metodu lze shrnout do tří kroků:

- seskupení pozorovaných povodí,
- přiřazování nepozorovaných povodí do skupin na základě jejich deskriptorů,
- odhad parametrů modelu na základě dostupných informací, včetně pravděpodobné příslušnosti v určité skupině.

Seskupení pozorovaných povodí

Seskupení pozorovaných povodí má za cíl rozdělení celého souboru povodí do menších skupin (např. povodí s delší odezvou na příčinnou srážku a povodí s kratší odezvou na příčinnou srážku) na základě podobností ve zvolených charakteristikách povodí pomocí K-means algoritmu.

$$EC = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in I_k} \sum_{m=1}^M W_m (X_m^i - C_m^k)^2, \quad (3.10)$$

kde EC je minimalizované měřítko chyby, W_m je váha, uplatňovaná pro charakteristiku povodí m v měřítku euklidovské vzdálenosti,

X_m^i je hodnota deskriptoru povodí m a povodí i , C_m^k reprezentuje souřadnice těžiště deskriptoru povodí m shluku k a M představuje celkový počet charakteristik povodí.

Přiřazení nepozorovaných povodí

Přiřazení nepozorovaných povodí do vybraného shluku (nebo více shluků) pozorovaných povodí může být provedeno aplikací diskriminační analýzy, při které je uplatňována neparametrická technika, která je založená na přístupu nejbližších pozorovaných povodí. Tato technika zahrnuje přiřazení nepozorovaného povodí do shluku podle členství n pozorovaných povodí. Výstupem z této fáze je:

- pravděpodobnost členství každého nepozorovaného povodí v daném shluku, na základě členství n nejbližších pozorovaných povodí.
- shluk, do kterého je přiřazené povodí,
- shrnutí výkonu přiřazovacího procesu.

Diskriminační analýza přiřazuje nepozorované povodí do shluků, kam s největší pravděpodobností je zařazována:

$$p_{ik} = \frac{nn_{ik}pr_k}{\sum_{i=1}^K (nn_{ii}pr_i)}, \quad (3.11)$$

kde p_{ik} je pravděpodobnost členství nepozorovaného povodí i ve shluku k , nn_{ik} reprezentuje počet nejbližších sousedů nepozorovaného povodí i ze shluku k a pr_k představuje předchozí pravděpodobnost členství ve shluku k .

Předchozí pravděpodobnost členství nepozorovaného povodí i ve shluku k je definována:

$$pr_k = \frac{nm_k}{N}, \quad (3.12)$$

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

Odhad hydrologických parametrů

Burn a Boorman (1993) představili několik možností odhadu hydrologických charakteristik na nepozorovaném povodí:

1. Identifikace nejbližších sousedů nepozorovaného povodí ze shluku, kam nepozorované povodí bylo přiřazeno. Blízkost pozorovaného od nepozorovaného povodí je řešena jako vzdálenost v m -dimenzionálním prostoru vymezeného vybranými deskriptory povodí.
2. Stanovení N nejbližších sousedů, které je omezeno na n povodí, jejichž geografická vzdálenost je menší než vymezená prahová hodnota. Povodí geografická blízká s podobnými deskriptory by se měla tedy chovat velmi podobně.
3. Stanovení N nejbližších sousedů všech povodí ze shluků, kde má nepozorované povodí pravděpodobnost členství. U této možnosti může docházet k řadám nepřesností.

4. Stanovení regresní rovnice pro všechny parametry modelu ve všech shlucích. Parametry modelu pro nepozorované povodí jsou řešeny jako vážená kombinace jednotlivých odhadů parametrů ze všech shluků, kdy aplikované váhy vyjadřují pravděpodobnost členství v každém ze shluku.

4. METODIKA

V rámci diplomové práce byla provedena studie, ve které byl porovnán regionalizační přístup prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti z hlediska simulační účinnosti použitého hydrologického modelu GR4J. V této kapitole jsou stručně charakterizována použitá vstupní data, použitý model a konkrétní postupy obou regionalizačních metod.

4.1 Vstupní data

Pro analýzu byla použita data 360 MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment) povodích situovaných v USA. Datový soubor obsahoval časové řady pro kalibraci od 1. 1. 1970 do 31. 12. 1975, pro verifikaci od 1. 1. 1976 do 31. 12. 1980. Vstupními daty byly časové řady srážek, odtoků, průměrné denní potencionální evapotranspirace, maximální a minimální teploty, ale také rozsáhlý soubor deskriptorů (Tab. 1, Tab. 2). Hodnoty průměrné roční srážky byly vypočteny pomocí modelu PRISM (Parameter- elevation Regressions on Independent Slopes Model) (Daly et al. 1964). Hodnoty průměrné roční potencionální evapotranspirace, použité při výpočtu indexu aridity, byly odvozeny na základě NOAA Evaporation Atlas (Fansworth et al. 1982). Hydopedologické charakteristiky byly získány z databáze STATSGO- údaje poskytované Penn State Earth System Science Center. Klasifikace půdních druhů byla odvozena podle USDA (Miller et White, 1998). Relativní zastoupení vegetačního krytu vycházelo z klasifikace IGBP (International Geosphere- Biosphere Programme (Loveland et al. 2000). Morfologické charakteristiky spolu se souřadnicemi těžiště povodí X a Y byly odvozeny digitálním modelem GTOPO30 s prostorovým rozlišením 30 obloukových sekund (vyvinutý US Geological Survey).

Soubor povodí pokrýval relativně široký rozsah klimatických podmínek od aridních povodí až po humidní povodí. Na povodí převažovaly nejvíce lesní porosty.

Průměrná roční teplota spolu s průměrnou lednovou teplotou byla vypočtena na základě časové řady pro kalibrační fázi od 1. 1. 1970 do 31. 12. 1975.

Dominantní půdní druhy v profilu 0-150cm a jejich relativním zastoupením pro soubor 360 MOPEX povodí jsou zobrazeny v Tab. 2. Z půdních druhů byly nejčastěji zastoupeny hlíny, prachovité jílovité hlíny a matečná hornina se skalním podložím.

Tab. 1 Přehled vybraných charakteristik s vybranými statistickými ukazateli

Kategorie	Název	Zkratka	Jednotky	Min	Max	Medián
Klimatické deskriptory	průměrná roční srážka	Ps	mm	259.20	2686.00	1023.00
	index aridity	Ia	-	0.23	4.55	0.84
	průměrná roční teplota	PrumT	°C	0.33	22.7	10.75
	průměrná lednová teplota	PrumLT	°C	-9.23	17.87	-1.75
Vegetační kryt	lesní porosty	Lp	-	0.00	1.00	0.48
	křoviny	Kř	-	0.00	0.98	0.01
	savany	Sa	-	0.00	0.96	0.00
	mokřady	Mo	-	0.00	0.92	0.00
	urbanizované plochy	Urbp	-	0.00	1.00	0.03
	orná půda	Op	-	0.00	0.54	0.00
	trvale zaledněné oblasti	Psl	-	0.00	1.00	0.00
Morfologické deskriptory	plocha povodí	Pp	km ²	79.95	10260.00	2213.00
	průměrná nadmořská výška	Pnv	m. n. m.	34.68	3186.00	367.00
	rozpětí nadmořských výšek	Rnv	m. n. m.	24.00	3930.00	313.50
	směrodatná odchylka nadm. výšek	Sdnv	m. n. m.	5.06	795.60	58.86
	mezikvartilové rozpětí nadm. výšek	Mmnv	m. n. m.	8.00	1184.00	81.75
	součinitel asymetrie povodí	Sap	-	0.23	5.55	0.91
Hydropedologické deskriptory	pórovitost	Po	-	0.35	0.48	0.46
	bod vadnutí	Wp	-	0.03	0.25	0.16
	nasyčená hydraulická vodivost	K	m.s ⁻¹	3.59E-07	3.57E-05	2.14E-06

Tab. 2 Přehled dominantních půdních druhů v profilu 0-150cm na povodích s jejich relativním zastoupením

Kategorie	Název	Zkratka	Zastoupení v %
Půdní druhy	písek	P	2.50
	hlinitý písek	Hp	0.83
	písčítá hlína	Ph	9.44
	prachovitá hlína	PrH	12.50
	hlína	H	21.40
	písčítá jílovitá hlína	Pjh	2.50
	prachovitá jílovitá hlína	Prjh	15.83
	jílovitá hlína	Jh	4.72
	prachovitý jíl	Prj	2.78
	jíl	J	8.89
	další druhy	Dd	3.89
matečná hornina	skalní podloží	Skp	14.72

4.2 Hydrologický model GR4J

K analýze byl použit srážko-odtokový model GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier), který byl vyvinutý ve Francii. Tento model operuje v denním časovém kroku a vstupem do něj jsou časové řady srážek a potenciální evapotranspirace (Perrin et al. 2003).

Struktura modelu GR4J je prezentována na Obr. 2, model obsahuje modul půdní vlhkosti (SMA) a transformační modul. SMA modul obsahuje jednu přetékanou nádrž, která je dále vyprazdňována pomocí perkolace. Transformační modul obsahuje dva jednotkové hydrogramy (simulující rychlou a pomalou odezvu povodí) a nelineární zásobník. Model má celkem 4 kalibrovatelné parametry: X1- maximální kapacita zásobníku SMA modelu [mm], X2- koeficient výměny podzemní vody [mm], X3- maximální kapacita nelineárního transformačního zásobníku [mm], X4- časová konstanta jednotkového hydrogramu (JH) [-] (Perrin et al. 2003).

Jelikož použitý soubor povodí obsahoval i povodí výrazně zatížené sněhovou srážkou, bylo nutné k modelu GR4J přiřadit sněhový modul a rozhodovací mechanismus, zda tento modul pro dané povodí přiřadit, či nikoliv. Rozhodování zda „sněhový modul ano/ne“ byl založen na výpočtu sněhového indexu (Hall et al. 2002):

$$SI = \sum(\text{snow}) / \sum(\text{prep}), \quad (4.1)$$

kde SI je sněhový index, a $\sum(\text{snow})$ je suma sněhových srážek na povodí v kalibrační časové řadě a $\sum(\text{prep})$ je suma všech srážek na povodí v kalibrační časové řadě.

Vstupní srážka v daném časovém kroku byla považována za sněhovou, pokud průměrná denní teplota byla nižší než 0 °C. Sněhový modul byl připojován k modelu GR4J v případě, kdy hodnoty SI byly vyšší než 0,1.

Sněhový modul řeší akumulaci a tání sněhové pokrývky. Vstupem do něj jsou časové řady sněhových srážek a průměrné denní teploty. Výpočet množství sněhové srážky z celkové srážky byl řešen pomocí rovnice (Xu, 1996):

$$s_t = P_r \{ 1 - \exp[(T_p - X_5) / (X_5 - X_6)]^2 \}^+, \quad (4.2)$$

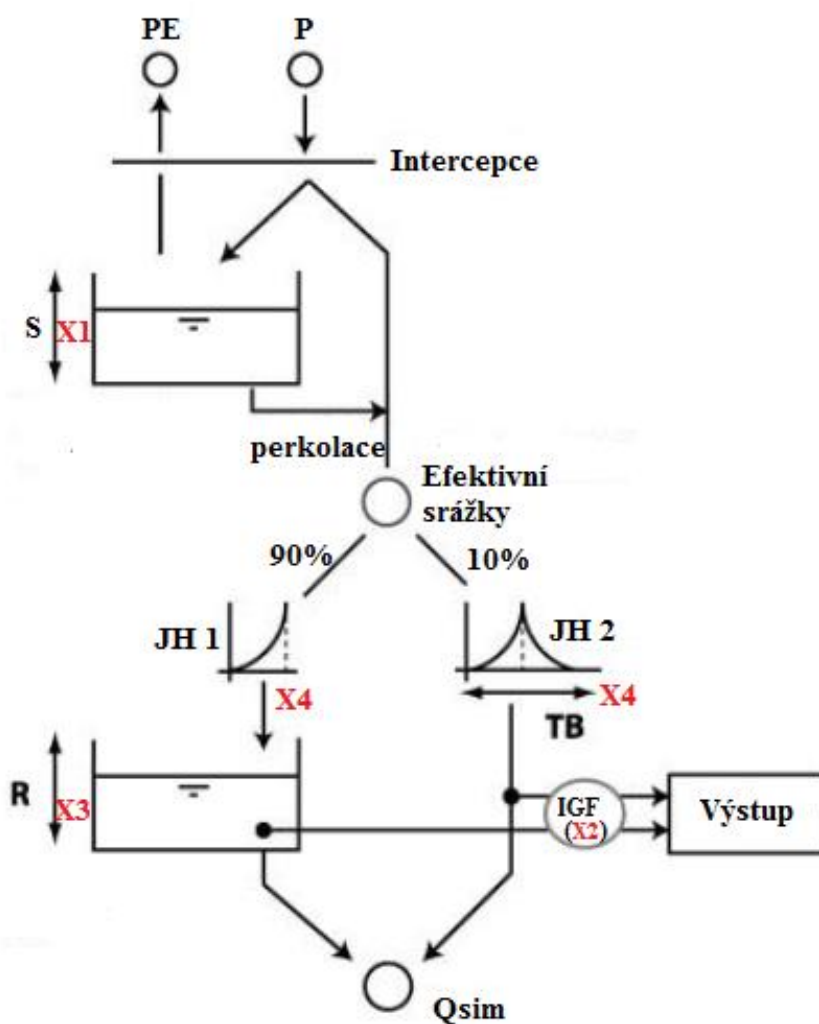
kde P_r je celková srážka na povodí [mm], s_t je sněhová srážka na povodí [mm],

T_p - průměrná denní teplota [$^{\circ}\text{C}$] a X_5 a X_6 jsou kalibrované teplotní parametry [$^{\circ}\text{C}$], x^+ značí $(\max, 0)$.

Tání sněhové pokrývky bylo řešeno metodou den stupeň (Degree-day factor) dle rovnice: (Kutláková et Jeníček, 2012)

$$M = \max.(X_7(T_p - X_5), 0), \quad (4.3)$$

kde M je velikost tání sněhu [mm], X_7 - kalibrovaný parametr DDF faktor [mm/den/ $^{\circ}\text{C}$], T_p - průměrná denní teplota [$^{\circ}\text{C}$], X_5 - kalibrovaný teplotní parametr [$^{\circ}\text{C}$] (Kutláková et Jeníček 2012).



Obr. 2 Schéma modelu GR4J (Zdroj: Perrin et al. 2003)

4.3 Kalibrace a verifikace parametrů modelu GR4J

K identifikaci optimálních sad parametrů modelu byla při kalibraci použita diferenciální evoluce s nastavením DE /best/1/bin s mutační konstantou $F=1$ a prahem křížení $CR=0,5$. Testovací populace modelu čítala sedmdesát jedinců. Ukončovacím kritériem byla konvergence použité objektivní funkce. Použitou objektivní funkcí byl agregovaný Nash-Sutcliffův koeficient (Agr NS):

$$AgrNS = 1 - ((1 - NS).(1 - Box NS)), \quad (4.4)$$

kde NS je hodnota standardního Nash- Sutcliffova koeficientu viz rovnice (3.4) a Box NS je hodnota Nash- Sutcliffova koeficientu s transformovanými vstupy (s transformačním parametrem o hodnotě 0,4). Rozsah Agr NS je stejný jako u NS (případně Box NS) od $(-\infty, 1)$, kde číslo 1 znamená nejlepší shodu mezi Q_{mer} a Q_{sim} . Kritérium Agr NS je jednoduchou formou objektivního kritéria, které se snaží cílit současně jak na nízké odtoky, tak i na vysoké.

Získané optimální sady parametrů pak byly dále použity při verifikaci modelu.

4.4 Metoda prostorové blízkosti

Přístup prostorové blízkosti povodí byl řešen výpočtem Euklidovské vzdálenosti mezi těžišti nepozorovaného povodí a pozorovaného povodí. Těžiště povodí byla vypočtena ze souřadnic rozvodnic povodí, která byla v Lambertově konformním kuželovém zobrazení. Pro přenos parametrické sady byla použita metoda jednoho donoru, tzv. parametrická sada byla přenášena z pozorovaného povodí s nejnižší hodnotou vypočtené vzdálenosti.

4.5 Metoda fyzikální podobnosti povodí

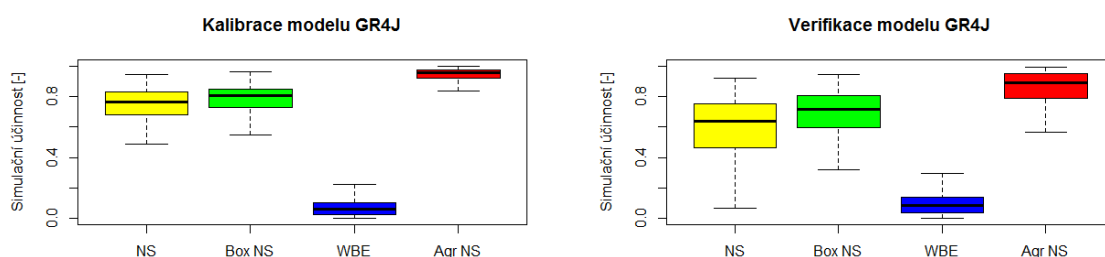
V rámci tohoto přístupu byla k vyhledávání pozorovaných povodí k nepozorovaným povodím použita metoda RAS, která je popsána v kapitole 3.6.1. Stejně jako v přístupu prostorové blízkosti, i zde byla použita metoda pouze jednoho donoru. V rámci této studie byly identifikovány optimální kombinace charakteristik povodí pro nalezení vhodných donorů. Výběr optimálních kombinací byl založen pouze na kritérium Agr NS.

5. VÝSLEDKY

5.1 Kalibrace a verifikace modelu GR4J

Celkové výsledky kalibrace a verifikace jsou prezentovány na Obr 3.

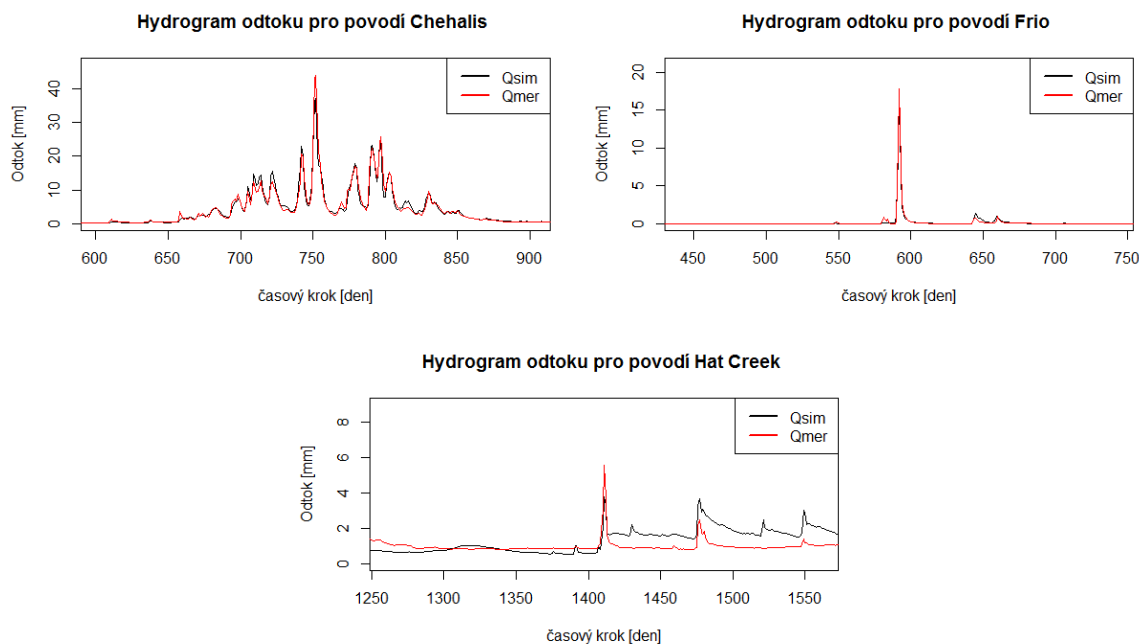
Z Obr. 3 je patrný určitý pokles simulační účinnosti při přechodu z kalibrační do verifikační fáze. Diference v mediánech příslušných objektivních funkcí jsou 0,06 pro Agr NS, 0,13 pro NS, 0,08 pro Box NS a 0,02 pro WBE.



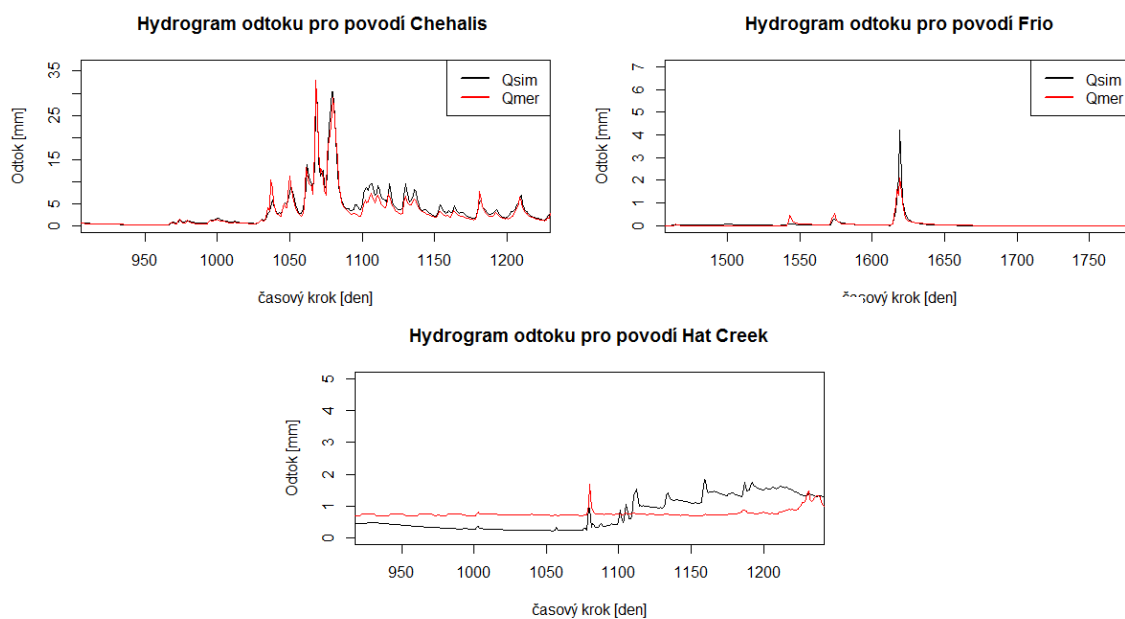
Obr. 3 Celkové výsledky kalibrace (vlevo) a verifikace (vpravo) modelu GR4J vyjádřené formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS) a jeho modifikace (Box NS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). (Box ploty zobrazují: medián, horní a dolní kvartil, vousy zobrazující 1,5 mezikvartilové rozpětí). Odlehlé hodnoty nebyly použity při tvorbě box-plotů.

Na Obr. 4 a Obr. 5 jsou prezentovány vybrané hydrogramy odtoku tří povodí: Chehalis River (nejvyšší kalibrační hodnota Agr NS zjištěná při kalibraci), Frio River (hodnota Agr NS z kalibrace odpovídá mediánu) a Hat Creek (nejnižší hodnota Agr NS zjištěná při kalibraci). Vybraná povodí se mezi sebou liší svými charakteristikami (Tab. 3). Povodí Chehalis River patří mezi nejhumidnější povodí celého souboru povodí. Naopak povodí Frio patří do skupiny silně aridních povodí. Povodí Chehalis dosahuje z těchto tří povodí nejvyšší nadmořské výšky s vysokou průměrnou roční srážkou. Na povodích dominují prachovité hlíny, prachovité jíly a písčité hlíny. Z Obr. 4 a 5. je patrné, že v případě vysokých hodnot Agr NS byl model schopen velmi dobře simulovat jak nízké, tak i vysoké odtoky a přechod z kalibrační do verifikační fáze byl spojen pouze s mírným zhoršením simulační účinnosti modelu (viz Chehalis River). Pokud se kalibrační hodnoty Agr NS pohybovaly kolem mediánu, pak model GR4J stále velmi dobře simuloval nízké hodnoty jak v kalibrační fázi, tak ve fázi verifikační. Nicméně již docházelo k podhodnocování vysokých odtoků (viz hydrogram povodí Frio River). Při nízkých

hodnotách kritéria Agr NS nebyl model schopen korektně simulovat vysoké i nízké odtoky (viz hydrogram odtoku povodí Hat Creek).



Obr. 4 Hydrogramy odtoku povodí Chehalis River, Frio River a Hat Creek, kalibrační fáze, Q_{sim} je simulovaný odtok [mm], Q_{mer} je pozorovaný odtok [mm].



Obr. 5 Hydrogramy odtoku povodí Chehalis River, Frio River, Hat Creek verifikační fáze, Q_{sim} je simulovaný odtok [mm], Q_{mer} je pozorovaný odtok [mm].

Tab. 3 Vybrané charakteristiky pro vybraná povodí (zkratky jsou vysvětleny v Tab. 1 a Tab. 2)

Název povodí	PS [mm]	Ia	PrumT [°C]	Pp [km ²]	Prnv [m.n.m.]	K [m/s]	Dominantní půdní druhy
Chehalis	1599.20	0.24	10.04	2291	1599	2.08E-06	prachovitá hlína
Frio	667.77	2.70	19.87	8950	668	1.63E-06	prachovitý jíl
Hat Creek	962.85	1.04	7.45	416	963	6.36E-06	písečná hlína

5.2 Analýza vztahu mezi simulační účinností modelu GR4J a charakteristikami

V této kapitole je analyzována závislost mezi simulační účinností modelu GR4J a charakteristikami povodí. Analýza byla provedena pomocí výsledků získaných při kalibraci modelu (hodnotící kritéria byla ta, která byla získaná při kalibraci na časové řadě od 1. 1. 1970 do 31. 12. 1975). Postup analýzy byl následující. Soubor povodí byl rozdělen na základě distribuce vybrané charakteristiky do čtyř tříd (přičemž každá třída obsahovala 25 % povodí). Pro každou třídu pak byly vypočteny statistické ukazatele (dolní kvartil, medián, horní kvartil, 1,5 násobek mezikvartilového rozpětí) pro následující hodnotící kritéria: NS, Box NS, WBE a Agr NS. Výsledky analýzy jsou uvedeny na Obr. 6- Obr. 7 a v přílohách 1 až 21.

Získané výsledky ukazují, že simulační účinnost modelu, vyjádřená kritérii Agr NS, NS, Box NS a WBE, se výrazněji měnila se změnou hodnot klimatických charakteristik. Z Obr. 6 a Obr. 7, přílohy 1 a přílohy 19 je patrné že model GR4J lépe simuloval odtok na humidních povodích (Obr. 7) a tedy na povodích s vyšší hodnotou průměrné roční srážky (příloha 1) a zároveň na povodích s vyšší hodnotou průměrné roční (příloha 17), resp. lednové (Obr. 7), teploty.

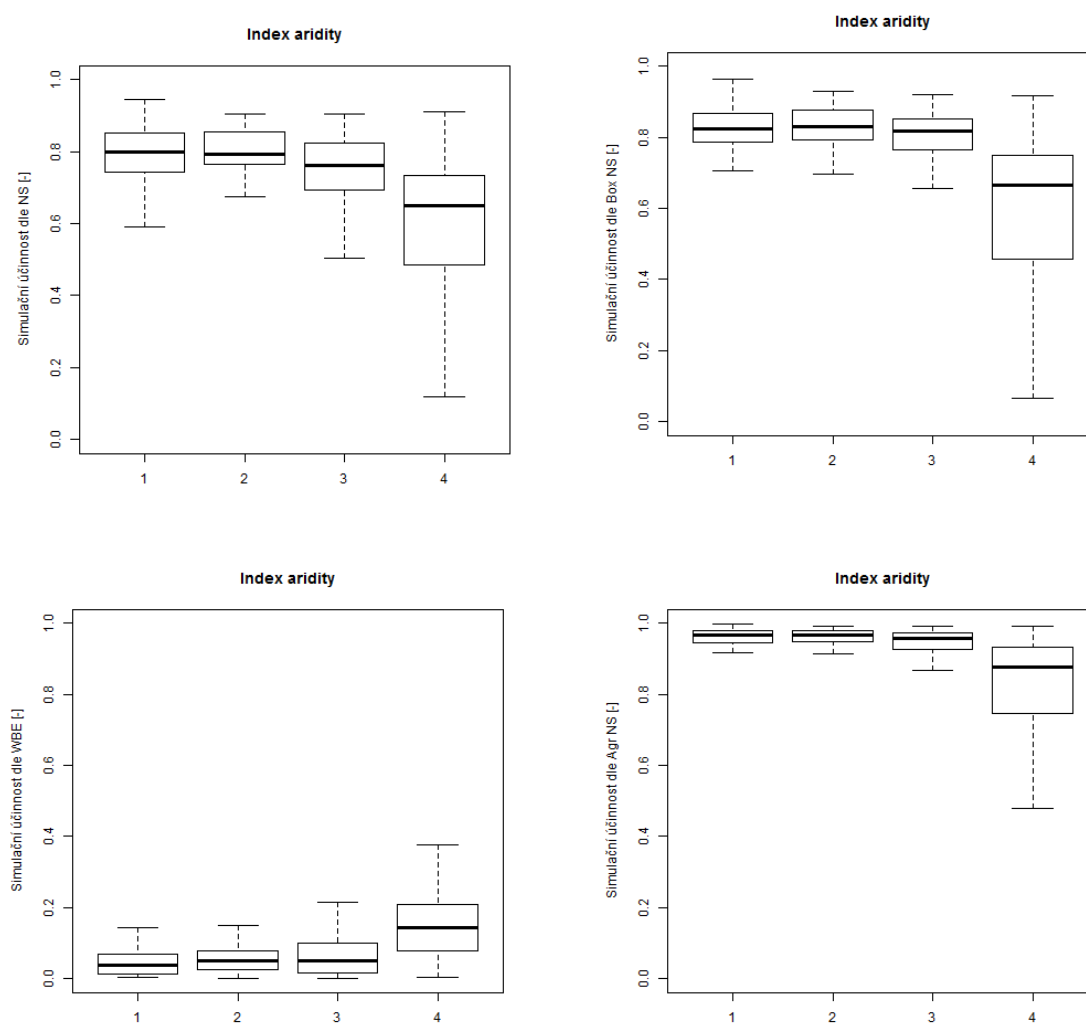
Z výsledků je dále patrné, model GR4J lépe simuluje odtok na povodích s nižší průměrnou nadmořskou výškou (viz příloha 17). U zbývajících charakteristik nebyla zaznamenána výraznější změna simulační účinnosti modelu mezi jednotlivými třídami (viz příloha 13, 14, 15, 18).

Lepší simulační účinnost modelu byla dosahována na povodích s vyšším relativním zastoupením lesních porostů (příloha 8) a nižším relativním zastoupením urbanizovaných ploch (příloha 5). U charakteristik relativní zastoupení mokřadů a savan byl zaznamenán výraznější pokles simulační účinnosti modelu mezi druhou a třetí třídou (přílohy 3 a 7) a u trvale zaledněných oblastí (příloha 4) mezi třetí a čtvrtou třídou. U zbylých charakteristik vegetačního krytu nebyla zaznamenána výraznější změna simulační účinnosti modelu mezi jednotlivými třídami (viz příloha 2 a 6).

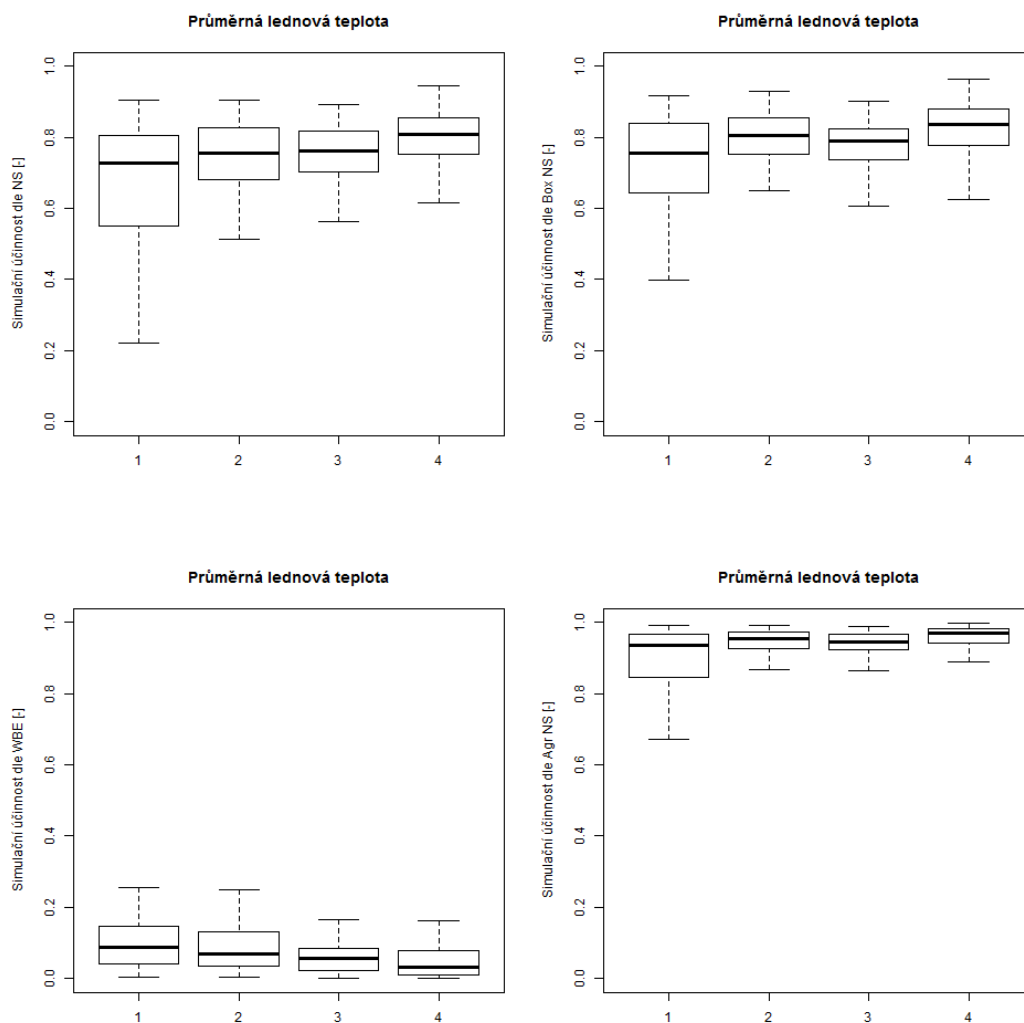
K horší simulační účinnosti modelu docházelo u souřadnic Y (příloha 13) na povodích v severní a jižní části USA. V případě souřadnic X (příloha 12) je patrná stoupající simulační účinnost modelu ve směru od západu na východ USA. U

dominantního půdního druhu hlína (příloha 18) a prachovité jílovité hlíny (příloha 8) byl zaznamenán výraznější pokles simulační účinnosti modelu mezi třetí a čtvrtou třídou. V případě hydropedologických charakteristik byla zaznamenána u nasycené hydraulické vodivosti (příloha 9) a pórovitosti (příloha 10) lepší simulační účinnost modelu, avšak u bodu vadnutí (příloha 11) docházelo k poklesu mezi třetí a čtvrtou třídou.

Charakteristiky, které nejvíce ovlivňovaly simulační účinnost modelu na povodích, byly dále použity v regionalizační metodě fyzikální podobnosti.



Obr. 6 Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na indexu aridity pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (Box NS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3



Obr. 7 Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na průměrné lednové teplotě pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.

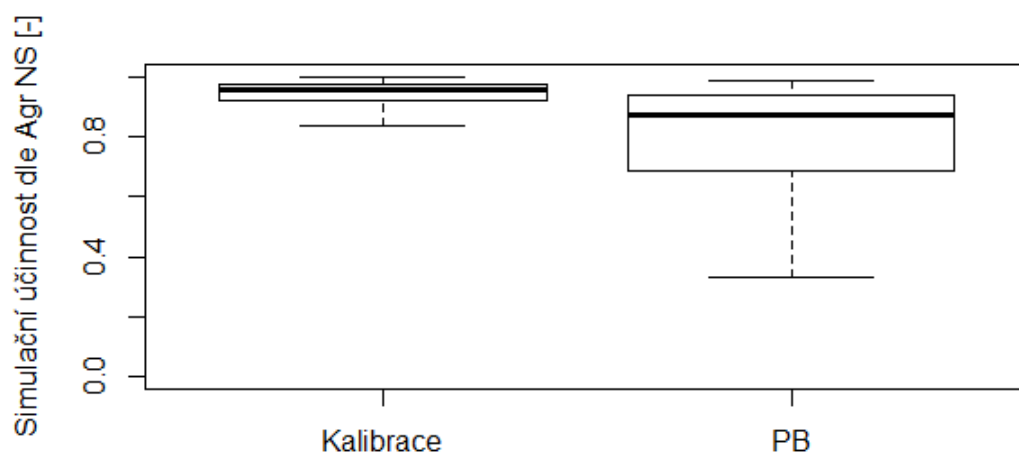
5.3 Regionalizační studie na souboru MOPEX povodí

V této kapitole jsou prezentovány výsledky regionalizační studie zaměřené na prostorovou blízkost a fyzikální podobnost.

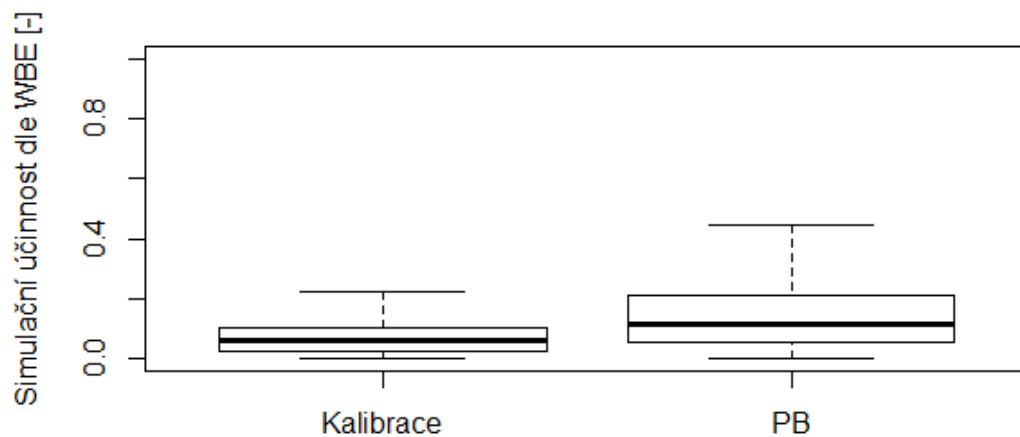
5.3.1 Prostorová blízkost

Celkové výsledky regionalizačního přístupu prostorové blízkosti s použitím jednoho donor povodí v porovnání s celkovými kalibračními výsledky jsou prezentovány na Obr. 8 až 11.

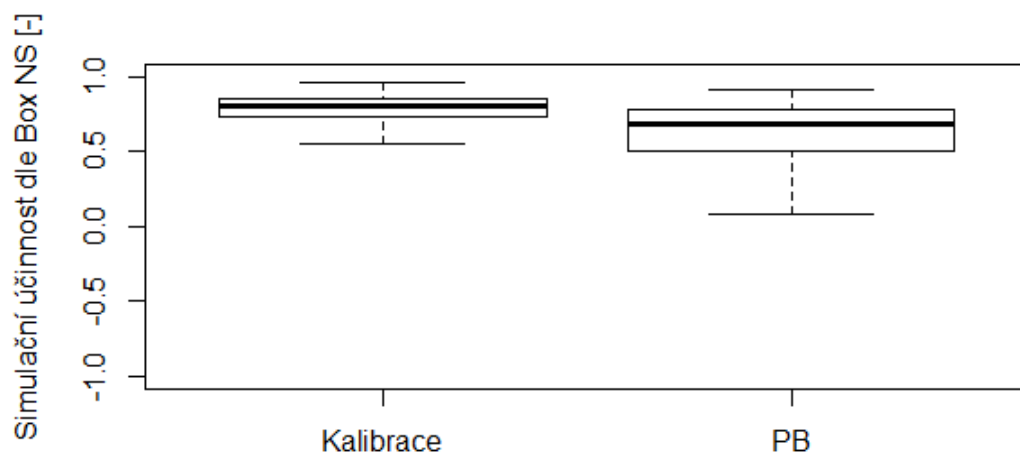
Z Obr. 8, 9 a 11 je patrný určitý pokles simulační účinnosti modelu. Diference mezi celkovými výsledky kalibrace a celkovými výsledky prostorové blízkosti mediánů příslušných objektivních funkcí jsou 0.08 pro Agr NS, 0.1Box NS, 0,15 NS a WBE o 0.05.



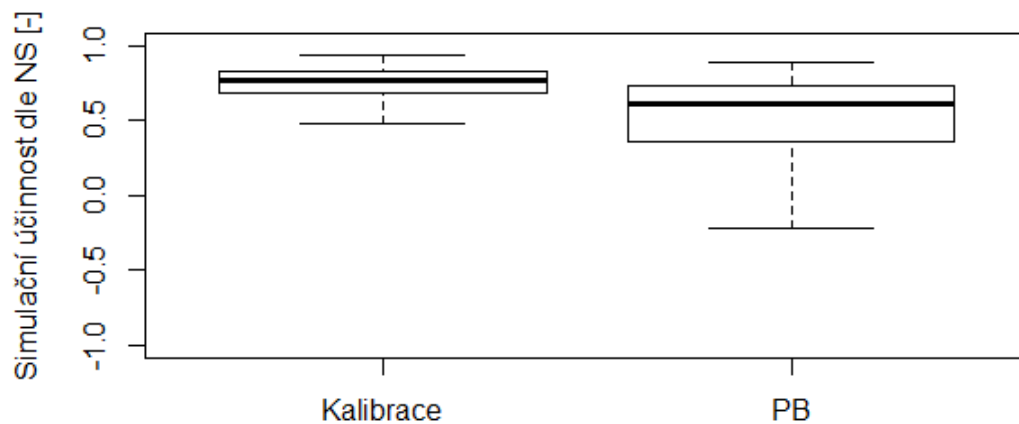
Obr. 8 Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J pro soubor 360 povodí na základě celkových výsledků kalibrace, s přístupem single donoru prostorové blízkosti (PB) a hodnotícího kritéria Agr NS (popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3)



Obr. 9 Porovnání simulační účinnosti modelu Gr4J pro soubor 360 povodí na základě celkových výsledků kalibrace, s přístupem single donoru prostorové blízkosti (PB) a hodnotícího kritéria WBE (popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3)

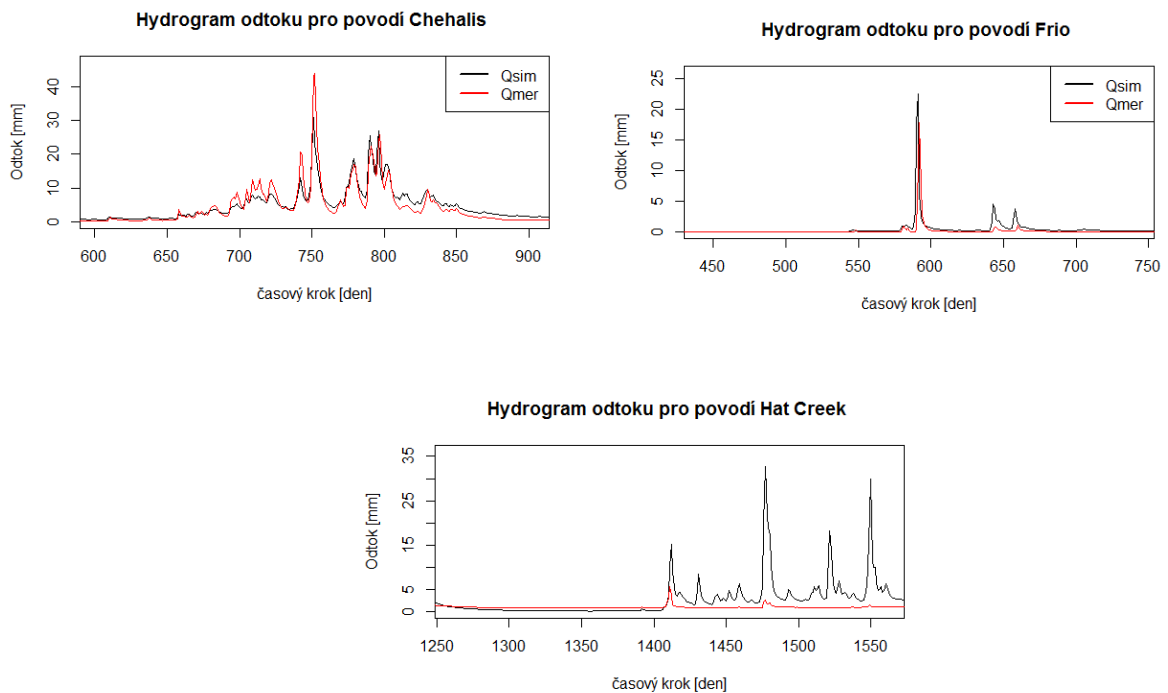


Obr. 10 Porovnání simulační účinnosti modelu Gr4J pro soubor 360 povodí na základě celkových výsledků kalibrace, s přístupem single donoru prostorové blízkosti (PB) a hodnotícího kritéria Box NS (popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3)



Obr. 11 Porovnání simulační účinnosti modelu Gr4J pro soubor 360 povodí na základě celkových výsledků kalibrace, s přístupem single donoru prostorové blízkosti (PB) a hodnotícího kritéria NS (popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3)

Na Obr. 12 a jsou prezentovány hydrogramy tří povodí pro regionalizační přístup prostorové blízkosti s použitím jednoho donoru dle výsledných hodnot Agr NS. Z Obr. 12 je patrné, tak jako u kalibrace a verifikace, že v případě vysokých hodnot Agr NS byl model GR4J schopen velmi dobře simulovat nízké, tak i vysoké odtoky. Pokud se hodnoty Agr NS pohybovaly kolem mediánu, pak model GR4J také stále velmi dobře simuloval odtoky. Při nízkých hodnotách kritéria Agr NS nebyl model schopen stejně jak u kalibrace a verifikace korektně simulovat vysoké i nízké odtoky (viz hydrogram odtoku povodí Hat Creek).



Obr. 12 Hydrogramy odtoku povodí Chehalis River, Frio River, Hat Creek, regionalizační přístup prostorové blízkosti s použitím jednoho donor povodí, Q_{sim} je simulovaný odtok [mm], Q_{mer} je pozorovaný odtok [mm].

5.3.2 Fyzikální podobnost

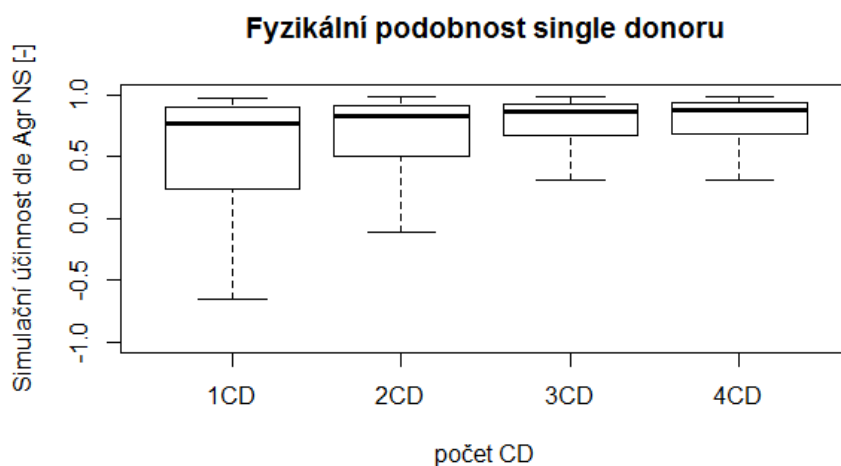
Regionalizační přístup fyzikální podobnosti byl řešen s 10 vybranými charakteristikami povodí dle nejlepší simulační účinnosti modelu na povodích. Vybranými charakteristikami byly: průměrná roční srážka na povodí, index aridity, bod vadnutí, nasycená hydraulická vodivost, relativní zastoupení lesních porostů a urbanizovaných ploch, plocha povodí, (která měla minimální vliv, ale v případě fyzikální podobnosti byl očekáván vliv na model), průměrná nadmořská výška, součinitel asymetrie povodí a průměrná lednová teplota. Výsledky analýzy jsou uvedeny v Tab. 4 a na Obr. 13 až 16.

Z Tab. 4 je zřejmé, že nejlepší složení optimální kombinace s dvěma a více charakteristikami pro přístup fyzikální podobnosti, které byly identifikované na základě mediánu Agr NS obsahovaly: klimatické charakteristiky povodí (index aridity, průměrná lednová teplota), morfologické charakteristiky (průměrná nadmořská výška) a půdní charakteristiky (bod vadnutí).

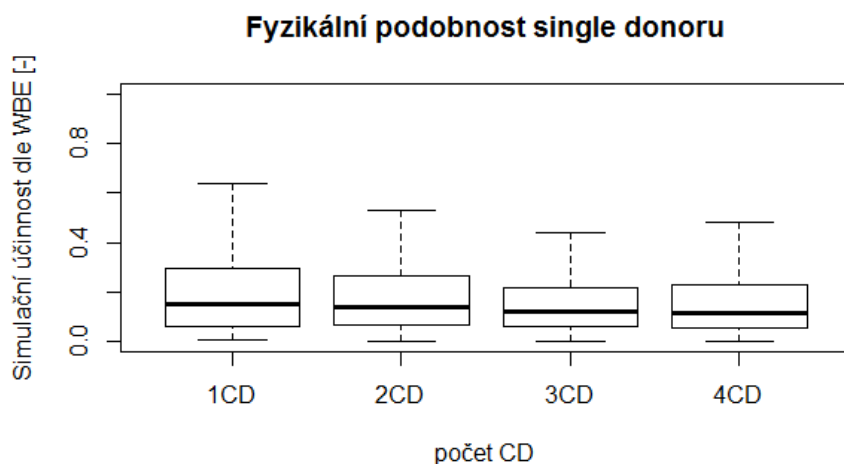
Tab. 4 Identifikované optimální kombinace pro přístup fyzikální podobnosti povodí, kombinace byly identifikovány na základě mediánu Agr NS (použité zkratky jsou uvedeny v Tab. 1).

Počet charakteristik v kombinaci	Počet testovaných kombinací	Složení optimální kombinace
1	10	UrbP
2	45	Pnv, PrumLT
3	120	Ia, Pnv, PrumLT
4	210	Ia, Wp, Pnv, PrumLT

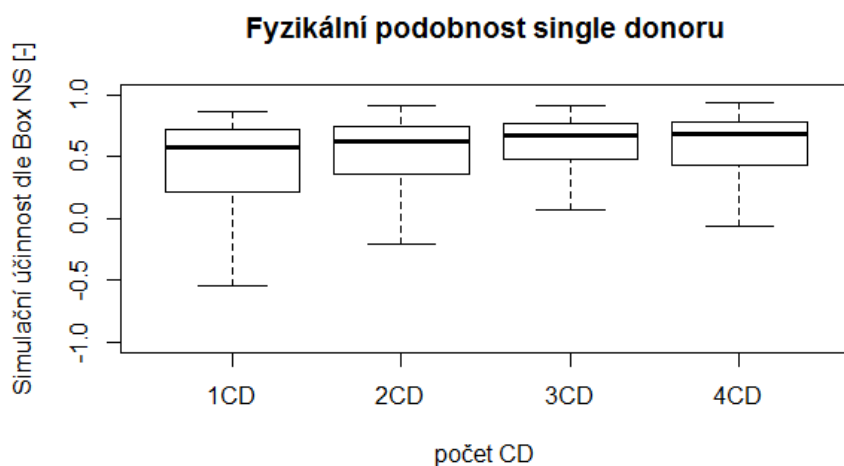
Výsledky prezentované na Obr. 13 až 16 ukazují zvyšování simulační účinnosti modelu GR4J podle hodnotících kritérií Agr NS, NS, Box NS a WBE tak jak se zvyšovala fyzikální podobnost mezi donorem parametrické sady (pozorovaným povodím) a jeho akceptorem (nepozorovaným povodím). Můžeme si všimnout, pro všechna kritéria, že nejvýraznějšího zvýšení simulační účinnosti bylo dosahováno při přechodu od optimální kombinace s jednou charakteristikou k optimální kombinaci se dvěma charakteristikami (zvýšení mediánu Agr NS, NS a Box NS o 0,06, a poklesu mediánu WBE o 0,01. Dále si lze všimnout, že přidání čtvrté charakteristiky již nevedlo ke zvyšování simulační účinnosti modelu.



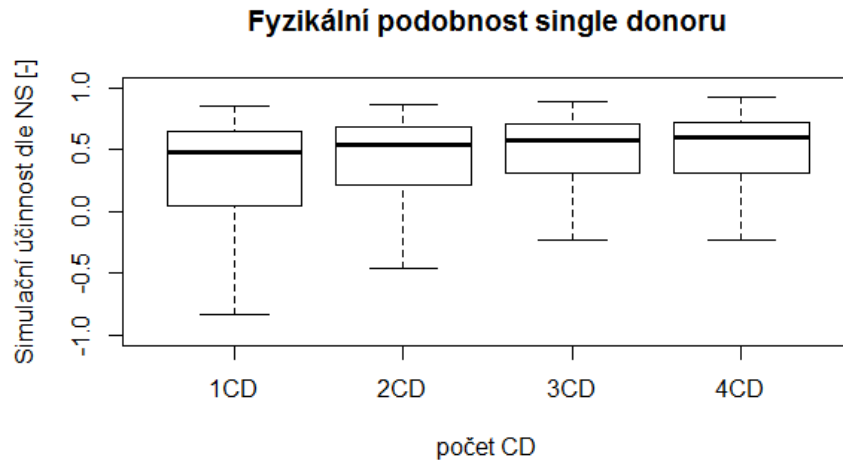
Obr. 13 Vliv počtu charakteristik v optimální kombinaci charakteristik povodí v optimální kombinaci na simulační účinnost modelu GR4J na souboru 360 povodí při použití single donor přístupu a hodnotící kritérium Agr NS (popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3).



Obr. 14 Vliv počtu charakteristik v optimální kombinaci charakteristik povodí v optimální kombinaci na simulační účinnost modelu GR4J na souboru 360 povodí při použití single donor přístupu a hodnotící kritérium WBE (popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3).

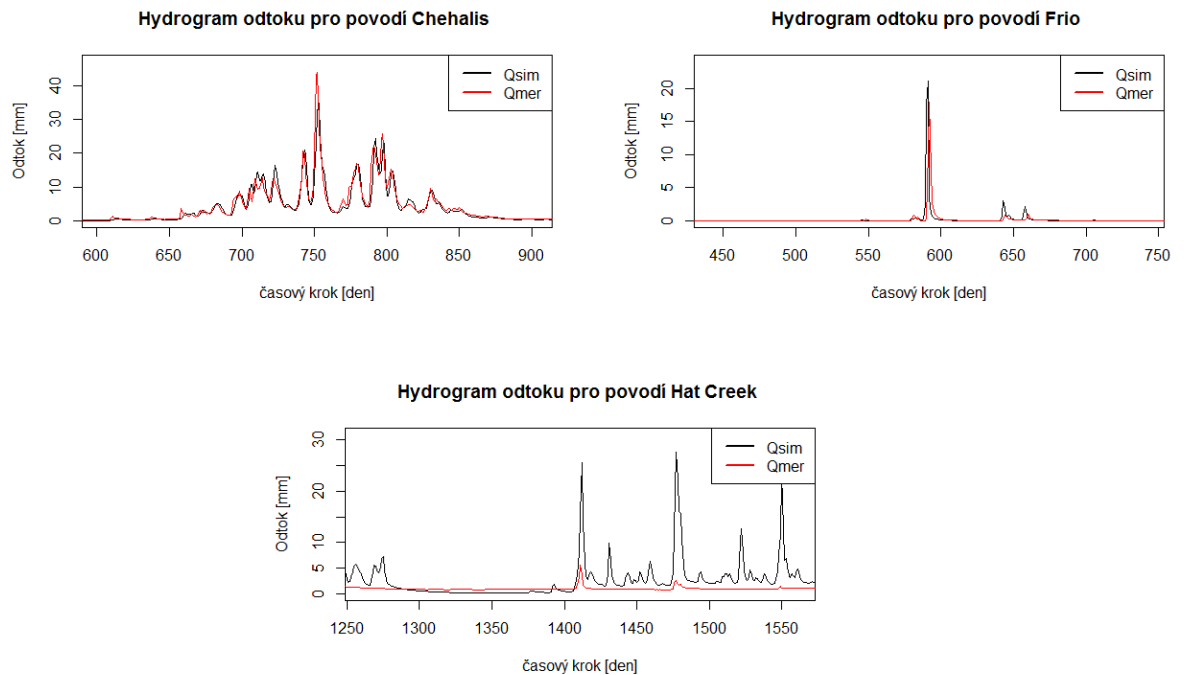


Obr. 15 Vliv počtu charakteristik v optimální kombinaci charakteristik povodí v optimální kombinaci na simulační účinnost modelu GR4J na souboru 360 povodí při použití single donor přístupu a hodnotící kritérium Box NS (popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3).



Obr. 16 Vliv počtu charakteristik v optimální kombinaci charakteristik povodí v optimální kombinaci na simulační účinnost modelu GR4J na souboru 360 povodí při použití single donor přístupu a hodnotící kritérium NS (popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3).

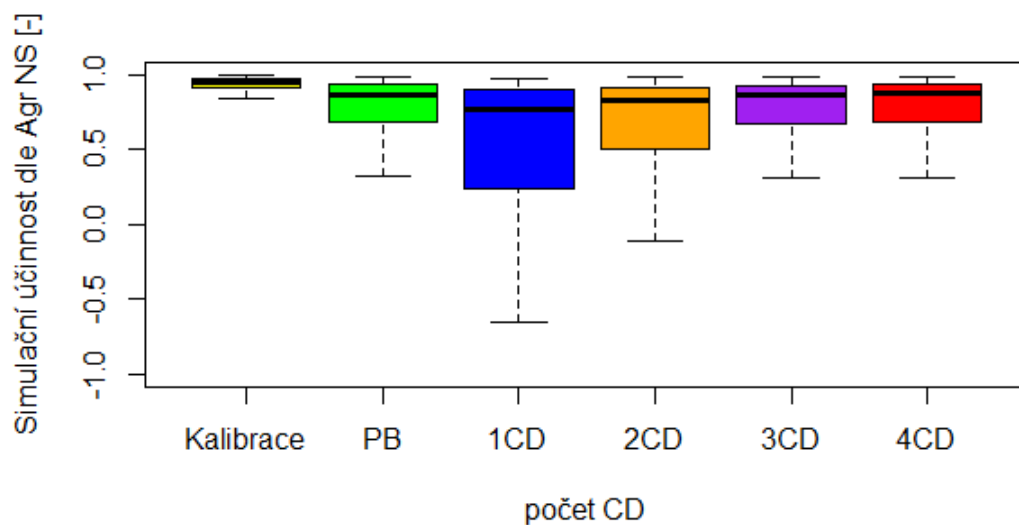
Na Obr. 17 jsou prezentovány hydrogramy tří povodí pro regionalizační přístup fyzikální podobnosti s použitím jednoho donoru dle výsledných hodnot Agr NS. Z Obr. 17 je patrné tak jako u prostorové blízkosti, že v případě vysokých hodnot Agr NS byl model GR4J schopen velmi dobře simulovat nízké, tak i vysoké odtoky. Pokud se hodnoty Agr NS pohybovaly kolem mediánu, pak model GR4J také stále velmi dobře simuloval odtoky. Při nízkých hodnotách kritéria Agr NS nebyl model schopen stejně jak u prostorové blízkosti korektně simulovat vysoké i nízké odtoky (viz hydrogram odtoku povodí Hat Creek).



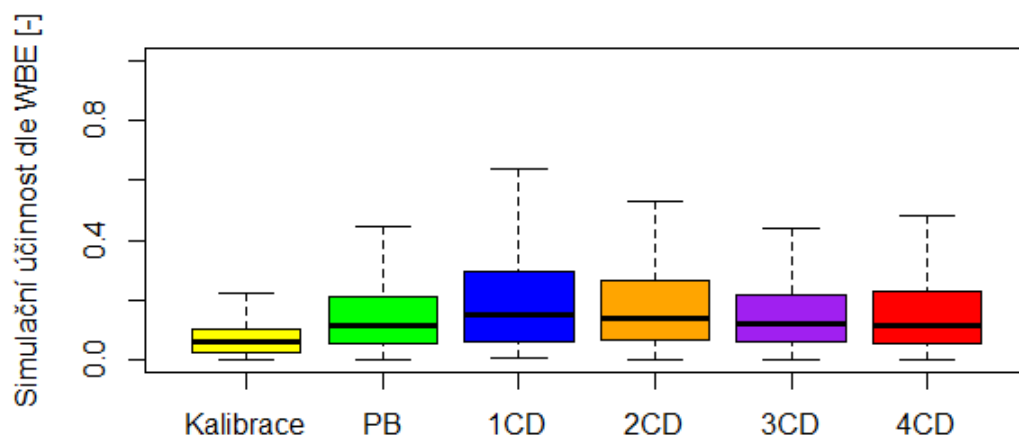
Obr. 17 Hydrogramy odtoku povodí Chehalis River, Frio River, Hat Creek, regionalizační přístup fyzikální podobnosti s použitím jednoho donor povodí, donor povodí nalezen na základě optimální kombinace 4 charakteristik povodí uvedených v Tab. 4, Q_{sim} je simulovaný odtok [mm], Q_{mer} je pozorovaný odtok [mm].

5.3.3 Porovnání metod prostorové blízkosti a fyzikální podobnosti

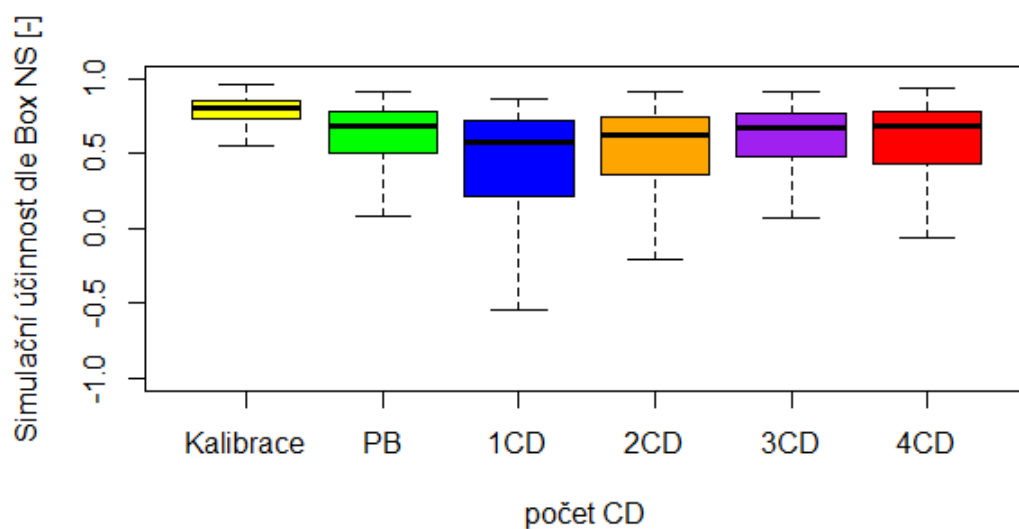
Srovnáme-li výsledky obou regionalizačních přístupů (Obr. 18- Obr. 21), pak si lze všimnout, že použití prostorové blízkosti vede k lepším simulačním účinnostem, než použití fyzikální podobnosti (viz Obr. 18, 19, 21). Nejvýraznější diference byla při použití 1 optimální charakteristiky, kdy pokles mediánů Agr NS byl 0,1 (Obr. 18), 0,11Box NS (Obr. 20), a 0,14 NS (Obr. 21) a zvýšení mediánu WBE o 0,04 viz Obr. 19. Z Obr. 18- 21. je dále patrné, že se zvyšující se fyzikální podobností mezi donorem parametrické sady a jeho akceptorem (tj. nepozorovaným povodím) se rozdíl v simulačních účinnostech mezi prostorovou blízkostí a fyzikální podobností snižuje. Při použití optimální kombinace se 4 charakteristikami povodí je rozdíl v mediánech jen 0,0001Agr NS, 0,01 NS, 0,0064Box NS a 0,001WBE.



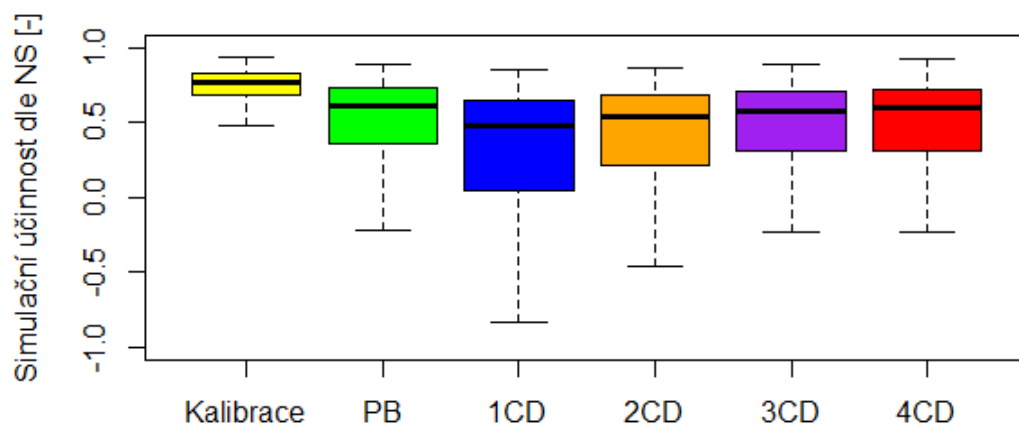
Obr. 18 Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J pro soubor 360 povodí na základě celkových výsledků kalibrace, s přístupem single donoru prostorové blízkosti (PB) a fyzikální podobnosti deskriptorů pro kombinaci od 1 do 4 dle hodnotící funkce Agr NS. Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



Obr. 19 Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J pro soubor 360 povodí na základě celkových výsledků kalibrace, s přístupem single donoru prostorové blízkosti (PB) a fyzikální podobnosti deskriptorů pro kombinaci od 1 do 4 dle hodnotící funkce WBE. Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



Obr. 20 Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J pro soubor 360 povodí na základě celkových výsledků kalibrace, s přístupem single donoru prostorové blízkosti (PB) a fyzikální podobnosti deskriptorů pro kombinaci od 1 do 4 dle hodnotící funkce Box NS. Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



Obr. 21 Porovnání simulační účinnosti modelu GR4J pro soubor 360 povodí na základě celkových výsledků kalibrace, s přístupem single donoru prostorové blízkosti (PB) a fyzikální podobnosti deskriptorů pro kombinaci od 1 do 4 dle hodnotící funkce NS. Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.

6. DISKUZE

Kalibrace a verifikace modelu

Z výsledků kalibrace a validace modelu GR4J je patrné, že tento model nejlépe simuloval nízké a střední hodnoty odtoku. To může jednak ukazovat na jisté strukturální problémy modelu. Na druhou stranu, toto může být také způsobeno hodnotícím kritériem použitým při kalibraci modelu (Agr NS). Použité kritérium cílí jak na vysoké odtoky (díky přítomnosti kritéria NS), tak i na nízké a střední odtoky (díky přítomnosti kritéria Box NS). Vyšší zastoupení nízkých a středních odtoků v použitých časových řadách než zastoupení vysokých odtoků způsobovalo, že se kritérium Agr NS chovalo spíše jako kritérium Box NS, než jako kombinace obou dílčích kritérií. Pravděpodobně proto model GR4J více cílil na nízké a střední odtoky i přesto, že byla jeho kalibrace řešena formou jednoduchého multiobjektivního kritéria. Porovnáme-li simulační výsledky kalibrace a verifikace, pak nebyl zjištěn výraznější pokles simulační účinnosti modelu. To ukazuje na určitou robustnost použité modelové struktury a dostatečnou délku kalibračních řad (stejnou délku časových řad použili Parajka et al. (2005) a Oudin et al. (2008)).

Analýza vztahu mezi simulační účinností modelu GR4J a charakteristikami

Výsledky prezentované v kapitole 5.2 ukazují velké rozdíly v simulační účinnosti modelu GR4J v závislosti na charakteristikách povodí. Lepší simulační účinnost modelu na humidních povodích lze spojit s vyšší linearitou srážko-odtokového procesu na těchto povodích. Naopak, aridní povodí jsou více prostorově heterogenní a srážko-odtokový proces je více nelineární (Parajka et al., 2005, Sawicz et al., 2014). Z tohoto důvodu se zdá být struktura modelu GR4J na těchto povodích méně efektivní. Lepší simulační účinnost modelu GR4J na povodích s vyšší průměrnou roční teplotou (nebo průměrnou lednovou teplotou) ukazuje, za předpokladu vyšší humidity těchto povodí, na lepší predikční schopnost modelu na povodích bez sněhového režimu. Pro připojený jednoduchý sněhový modul mohlo být náročné korektně simulovat dynamiku akumulace a tání sněhové pokrývky, což se muselo promítnout i do celkových simulačních účinností na těchto povodích.

Vliv průměrné nadmořské výšky povodí je více komplikovaný a závisí na regionu, kde se nachází povodí z použitého souboru a také na ostatních významných charakteristikách povodí (zejména klimatických). Z výsledků prezentovaných v příloze 17 je zřejmé, že model GR4J hůře simuloval odtok na povodích s vyšší průměrnou nadmořskou výškou. Tento výsledek lze spojit se dvěma faktory: aridita těchto povodí, anebo sněhový režim na těchto povodích. Parajka et al. (2013) prezentovali zvyšování aridity povodí situovaných v USA s rostoucí průměrnou nadmořskou výškou. Lze očekávat, že pro část povodí s vyšší průměrnou nadmořskou výškou byl charakteristický sněhový režim. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.2, sněhový režim na povodí vyžadoval připojení sněhového modulu.

Použitý sněhový modul však nemusel korektně simulovat dynamiku akumulace a tání sněhové pokrývky a mohl tedy přispět k horším simulačním účinnostem modelu na těchto povodích.

Vliv deskriptorů vegetačního krytu, zejména relativního zastoupení lesních porostů, lze spojit s tím, že tento deskriptor koreluje s klimatickými deskriptory (konkrétně s průměrnou roční srážkou a indexem aridity). Lze tedy očekávat, že povodí s vyšším zastoupením lesních porostů budou více humidní a tedy jejich chování lépe popsatelné použitou modelovou strukturou. Výsledky prezentované v přílohách 3 a 7, ukazují pokles simulační účinnosti na povodích s vyšším zastoupením savan a mokřadů. Tento výsledek lze spojit s variabilitou těchto charakteristik. Nejvyšších simulačních účinností bylo dosaženo na povodích s nízkým relativním zastoupením těchto charakteristik, což na druhou stranu znamená, že na těchto povodích jsou dominantním vegetačním krytem lesní porosty. Nízké simulační účinnosti na povodích s vyšším zastoupením urbanizovaných ploch lze spojit s vlivem lidské činnosti na hydrologický režim těchto povodí. Chování takových povodí je pak hůře popsatelné jednoduchou modelovou strukturou.

Na rozdíl od výsledků, které prezentovali Merz et al. (2009) nebo Parajka et al. (2013), nebyl zjištěn žádný výraznější vliv plochy povodí na simulační účinnost. Merz et al. (2009) i Parajka et al. (2013) ukázali, že se zvyšující se plochou povodí dochází k průměrování hydrologických veličin, např. celkového odtoku, a tedy dochází k částečnému vyhlazení jeho variability. Použitá modelová struktura pak může lépe tyto vyhlazené odtoky simulovat. Výsledky prezentované na Obr. 18 částečně naznačují opačný trend, než jaký byl očekáván. Toto je pravděpodobně

důsledkem výběru použitých povodí. Velká část povodí spadajících do 3. a 4. třídy v příloze 18 patřila mezi aridní až semihumidní povodí, pro které použitá modelová struktura nebyla příliš vhodná.

Z výsledků prezentovaných v přílohách 12 a 13 je patrné, že poloha povodí měla také výrazný vliv na simulační účinnost modelu. Tento výsledek lze spojit se změnou klimatických charakteristik (zejména indexu aridity a průměrných teplot) a průměrné nadmořské výšky ve směru sever-jih a východ-západ (Sawicz et al., 2014). Z přílohy 12 je patrný vliv posunu těžiště povodí ze západu na východ na simulační účinnosti. V tomto směru obecně přecházela aridní povodí v povodí humidní. Z přílohy 13 je patrné, že hydrologické chování nejseverněji a nejjižněji situovaných povodí bylo simulováno hůře. Důvodem jsou pro nejsevernější povodí strukturální problémy spojené se sněhovým modulem a pro nejjižnější povodí jejich vysoká aridita.

Přístup prostorové blízkosti

Z výsledků prezentovaných v kapitole 5.3.1 je patrný nepříliš výrazný pokles simulační účinnosti modelu, pokud jsou parametrické sady přenášeny z geograficky nejbližších povodí. Tento výsledek naznačuje, že prostorová blízkost mezi donorem a akceptorem parametrické může být uspokojivým měřítkem podobnosti povodí (tzn. velmi blízká, nebo i sousední povodí mohou mít velmi podobné hydrologické chování). Pravděpodobným vysvětlením je skutečnost, že malé geografické regiony vymezené kolem nepozorovaných povodí mohou být relativně homogenní z hlediska významných charakteristik povodí (klimatické deskriptory, půdní vlastnosti, nebo vegetační kryt). Pokud donor parametrické sady spadá do tohoto regionu, pak lze očekávat i podobné hydrologické chování mezi ním a akceptorem parametrické sady. Podobné výsledky prezentovali i Parajka et al. (2005), Oudin et al. (2008) a Sawicz et al. (2014).

Přístup fyzikální podobnosti

Výsledky prezentované na Obr. 13 až 16 ukazují, že simulační účinnost modelu se na nepozorovaných povodích zvyšuje s tím, jak se zvyšuje počet charakteristik povodí v identifikovaných optimálních kombinacích použitých k vyhledávání vhodných donorů. Tuto skutečnost můžeme spojit s faktem, že se

zvyšující se fyzikální podobností mezi donorem a akceptorem stoupá i jejich hydrologická podobnost. Podobné výsledky prezentovali i Oudin et al. (2008).

Z Obr. 13 až 16 je také patrné, že nejvýraznější zvýšení simulační účinnosti modelu bylo dosaženo při přechodu od optimální kombinace s jednou charakteristikou k optimální kombinaci se dvěma charakteristikami. Další přidání charakteristiky měly pouze marginální vliv na změnu simulační účinnosti modelu. Podobné výsledky uvádí i Oudin et al. (2008). Toto lze vysvětlit tak, že v počáteční fázi analýzy byly identifikovány charakteristiky povodí s vysokým informačním obsahem (konkrétně průměrná lednová teplota a průměrná nadmořská výška). Obě tyto charakteristiky zde fungovaly jako účinné filtry při výběru vhodných donorů. Průměrná lednová teplota filtrovala jednak povodí se sněhovým režimem od povodí bez sněhového režimu (tento způsob filtrování povodí byl přítomen ve všech optimálních kombinacích s dvěma a více charakteristikami), ale také částečně aridní povodí od humidních. Podobným způsobem filtrovala povodí i průměrná nadmořská výška povodí.

Zaměříme-li se na složení identifikovaných optimálních kombinací, pak můžeme vidět, že tyto obsahují klimatické charakteristiky povodí (index aridity, průměrná lednová teplota), morfologické charakteristiky (průměrná nadmořská výška) a půdní charakteristiky (bod vadnutí). Tyto výsledky jsou podobné těm, které publikovali Parajka et al. (2005), Oudin et al. (2008) a Singh et al. (2014). Tento výsledek můžeme spojit s výrazným vlivem morfologických a klimatických charakteristik na hydrologické chování povodí (Price et al., 2011; Sawicz et al., 2014).

Porovnáme-li výsledky prezentované v kapitole 5.2 (vztah mezi simulační účinností modelu na povodí a jeho charakteristikami) s výsledky prezentovanými v kapitole 5.3.2 (konkrétně s výsledky v Tab. 4), pak si můžeme všimnout, že charakteristiky obsažené v optimálních kombinacích patří mezi charakteristiky mající nejvýraznější vliv na simulační účinnost modelu. Tento výsledek je očekávatelný, neboť charakteristiky, které nejvíce ovlivňují simulační účinnost modelu, by měly patřit mezi skupinu charakteristik mající největší vliv na výsledné měřítko podobnosti mezi povodími.

Výsledky prezentované v kapitole 5.3.3 ukazují, že přístup prostorové blízkosti vede k lepším simulačním účinnostem než přístup fyzikální podobnosti. Tento výsledek je

konzistentní s výsledky studií, které prezentovali Parajka et al. (2005), Oudin et al. (2008) nebo Zhang et Chiew (2009). Přesto si lze všimnout, že při zvyšující se fyzikální podobnosti mezi donorem a akceptorem se simulační účinnost při přístupu fyzikální podobnosti velmi blíží přístupu prostorové blízkosti (viz Obr. 18). Toto lze jednak spojit se základním předpokladem přístupu fyzikální podobnosti (tj. čím podobnější významné charakteristiky, tím podobnější hydrologické chování), ale také s tím, že takto přísně vybírané donory byly zároveň geograficky velmi blízká akceptorům.

7. ZÁVĚR

V této diplomové práci byla provedena regionalizační studie založená na přístupu fyzikální (deskriptorové) podobnosti a prostorové blízkosti povodí při odhadu parametrů modelu GR4J na nepozorovaných povodích. Ke srovnávací studii byly použity data 360 MOPEX povodí. Prostorová blízkost povodí byla řešena na základě Euklidovských vzdáleností mezi těžišti povodí. Při přístupu fyzikální podobnosti povodí byla k vyhledávání vhodných donorů použita metoda RAS. V rámci obou regionalizačních přístupů byla přenášena parametrická sada pouze z nejbližšího (resp. nejpodobnějšího) donoru.

Kalibrační i verifikační výsledky ukazují na robustnost použité modelové struktury. Určité strukturální nedostatky lze spojit zejména s připojeným sněhovým modulem.

Na základě výsledků analýzy vlivu charakteristik povodí na simulační účinnost modelu GR4J byly identifikovány vlastnosti povodí, které výrazně ovlivňují schopnost modelové struktury efektivně simulovat celkový odtok z povodí. Dále bylo zjištěno, že existuje určitá provázanost mezi těmito významnými charakteristikami (klimatické charakteristiky, vegetační kryt, některé morfologické charakteristiky).

V rámci regionalizační studie byly testovány dva přístupy: prostorová blízkost povodí a fyzikální podobnost povodí. Výsledky ukazují, že přístup prostorové blízkosti vede k vyhledávání vhodnějších donorů, a tedy i lepší simulační účinnosti na nepozorovaných povodích než přístup fyzikální podobnosti (zejména při použití nepříliš přísného měřítka podobnosti). Nicméně, při použití přísnějšího měřítka podobnosti (zde konkrétně optimální kombinace se čtyřmi charakteristikami) poskytoval přístup fyzikální podobnosti povodí srovnatelné výsledky s přístupem prostorové blízkosti.

8. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

ABOTT M. B., BATHURST J. C., CUNGE J. A., O'CONNELL P. E. et RASMUSSEN J., 1986b: An introduction to the European hydrological systém- Système Hylogique Européen "SHE". 2: Structure of a physically based distributed modelling systém. J. Hydrology.V. 87: 61-77.

BECKER A. et SERBAN, P., 1990: Hydrological Models for Water Resources Systems Design and Operation. Operational Hydrology Report No. 34. World Meteorology Organisation. Geneva.

BERGSTRÖM S., 1976: Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchment. SMHI RHO 7. Norköping. 134.

BEVEN K. J. 2012: Rainfall- Runoff Modelling.the primer. 2nd ed. 450s.

BOYLE D., GUPTA H. et SOROOSHIAN S., 2000: Toward improved calibration of hydrologic models: Combinig the strengths of manual and automatic methods. Water Resources Research. V. 36: 3663-3674.

BURN D. H. et BOORMAN D. B., 1993: Estimation of hydrological parameters at ungauged catchment. Journal of hydrology. V. 143.: 429-454.

CALVER A. CROOKS S., JONES D., KAY A., KJELDSSEN T. et REYNARD N., 2005: National river catchment flood frequency method using continous simulation. Joint Defra/EA Flood and Coastal Erosion Risk Managment 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, V. 19: 1-20.

DALY C., NEILSON R. P. et PHILLIPS D. L., 1964: A statistical- topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. Journal of Applied Meteorology 33(2), 140-158.

DAŇHELKA J., KREJČÍ J., ŠÁLEK M., ŠERCL P. et ZEZULÁK J., 2003: Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. Praha.

DIERMANSE F. L. M., 2001: Physically based modelling of rainfall-runoff processes. PhD Thesis, Delft university press. 234.

DISKIN M. H. et SIMON E., 1977: A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. Journal of hydrology. V. 34: 129-149.

DOOGE, J. C. I. 1978: Mathematical models in surface hydrology. IBM Pisa Sci. Cent. Italy.

FARNSWORTH R.K., THOMPSON E. S., PECK E. L. et SERVICE U.S.N.W., 1982: Evaporation Atlas for the Contiguous 48 United States. NOAA technical report NWS. U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service.

GABRIEL, P., KRATOCHVÍL J., et ŠEREK, M., 1982: Výpočetní technika pro obor vodní hospodářství a vodní stavby. SNTL Praha.

GUPTA V. K. et SOHOORIAN S., 1985a: The automatic Calibration of conceptual catchment models using derivative – based optimization algorithmus. Water resources research, V. 21: 473-485.

HALL D. K., RIGGS G. A., SALOMONSON V.V., DEGIROLAMO N. E., BAYR K. J. et JIN J. M., 2002: MODIS Snow- Cover products. Remote Sensing of Environment. 83: 181-194.

HE Y., BÁRDOSSY A. et ZEHE E., 2011: A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. Hydrology and Earth System Sciences. V.15: 3539- 3553.

HRÁDEK F. et KUŘÍK P., 2008: Hydrologie. Česká zemědělská univerzita, Praha.

HŘEBÍČEK J., et ŠKRDLA M., 2006: Úvod do matematického modelování, online: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Bi3101/um/skripta.pdf>, cit. 15. 2. 2017.

HUNDECHA Y. et BARDÓSSY A., 2004: Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed mode. *Journal of Hydrology*. 292: 281-295.

JENÍČEK M., 2016: Klasifikace hydrologických modelů, online: <http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/download.php?akce=dokumenty&cislo=7>, cit. 12. 2. 2017.

KIM, U. et 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: 39-56.

KOVÁŘ P., 1990: Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. Česká zemědělská univerzita, Praha.

KRAUSE P., BOYLE D. P. et BÄSE F., 2005: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. online: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00296842>, cit. 10. 4. 2017.

KULHAVÝ, Z. et KOVÁŘ P., 2000: Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha.

KUTLÁKOVÁ, L., JENÍČEK, M.: (2012): Modelování akumulace a tání sněhu v povodí Bystřice v Krušných horách. *Geografie*. 117. č. 1: 110–125.

LAMB R., CREWETT J. et KAY A. L., 2000: Progress in the spatial generalisation of “continuous simulation“ flood frequency modeling. In: *River Flood Defence*. vol. 1. edited by: TOENSMANN F. et KOCH M., Kassel Rep. *Hydraul. Eng.* 9/2000. D117-D125.

LIU Y., et GUPTA H. V., 2007: Uncertainty in hydrological modeling: towards an integrated data assimilation Framework. *Water Resour. Res.* 43. W07401.

LOVELAND T. R., REED B. C., BROWN J. F., OHLEN D. O., ZHU Z., YANG L., et MECHANT 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 (6-7): 1303-1330.

MÁČA P., 2010: Jednotkový hydrogram. Česká zemědělská univerzita v Praze ve výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, Praha.

MÁČA P., 2015: Hydrologické modely a automatická optimalizace parametrů: neuronové sítě, konceptuální modely, globální optimalizační algoritmy. Habilitační práce. Praha.

MCINTERE N., LEE H. et WHEATER H., 2005: Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resources Research*. 41. W12434.

MERZ, R., PARAJKA, J., BLÖSCHL, G., 2009: Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resour. Res.* 45 (9): 1–15.

MILLER D. A. et WHITE R. A., 1998: A conterminous united states multi layer soil characteristics data set for regional climate and hydrology modeling. *Earth Interactions* 2 (2): 1-26.

MORRETI G. et MONTANARI A., 2006: AFFDEF: A spatially distributed grid based rainfall- runoff model continuous time simulations of river discharge.

NASH, J. E., SUTCLIFFE J. V., 1970: River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282-290.

LOUDIN L., ANDRÉASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., et LE MOINE M., 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approach based on 913 French catchments. *Water resources research*. V. 44. W03413.

LOUDIN L., KAY A., ANDRÉASSIAN V. et PERRIN CH., 2010: Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar?. *Water Resources Research*. V. 46. W11558.

PARAJKA J., MERZ R., et BLÖSCHL G., 2005: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*. V. 9: 157–171.

PARAJKA, J., VIGLIONE, A., ROGGER, M., SALINAS, J. L., SIVAPALAN, M. et BLÖSCHL G., 2013: Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: runoff- hydrograph studies. *Hydrology and Earth System Sciences*. V. 17 (5): 1783–1795.

PERRIN C., MICHEL C. et ADREASSIAN V., 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*. V. 279. Issues 1-4.

PRICE K. V., STORN R. M. et LAMPINEN J. A., 2005: *Differential Evolution. A practical approach to global optimization*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg.

PRICE, K., 2011: Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review. *Prog. Phys. Geogr.* 35 (4), 465–492.

QIN A. K., HUANG V. L. et SUGANTHAN P. N., 2009: Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization. *IEEE Transactions on evolutionary computation*. V. 13. No. 2: 398-417.

SAWICZ K. A, KELLEHER C., WAGENER T., TROCH P., SIVAPALAN M. et CARRILLO G., 2014: Characterizing hydrologic change through catchment classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, online: <http://www.hydrology-earth-syst-sci.net/18/273/2014/hess-18-273-2014.pdf>, cit. 8. 4. 2017.

SINGH R., ARCHFIELD S. A. et WAGENER T., 2014: Identifying dominant controls on hydrologic parameter transfer from gauged to ungauged catchments- A comparative hydrology approach. *Journal of Hydrology* 517: 985-996.

SINGH V. P., 1988: *Hydrological Systems*. Prentice Hall. 480s.

SOROOSHIAN S. et GUPTA V. K., 1995: Model calibration. in Singh. V.P. Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publication.

STRÁNSKÝ D., HAVLÍK V., KABELKOVÁ I., METELKA T., SÝKORA P., DOLEJŠ M., HALOUN R., MUCHA A., et PRYL K., 2010: Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí. Vodní hospodářství. 11: 298-320.

VANDENWIELE G. L. et ELIAS A., 1995: Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. Journal of hydrology, V. 170: 277-291.

WAGENER T. WHEATER H. S. et GUPTA H.V., 2004: Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. Imperial college press, London, 2004. No. 300.

WHEATER H. S., 2002: Progress in and prospects for fluvial flood modelling. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences.

WMO, 2009: Guide to hydrological practices. World Meteorological Organization. WMO (Series).168.

XU, C-Y., 2002: Hydrologic Models. Uppsala University. Department of Earth Sciences.

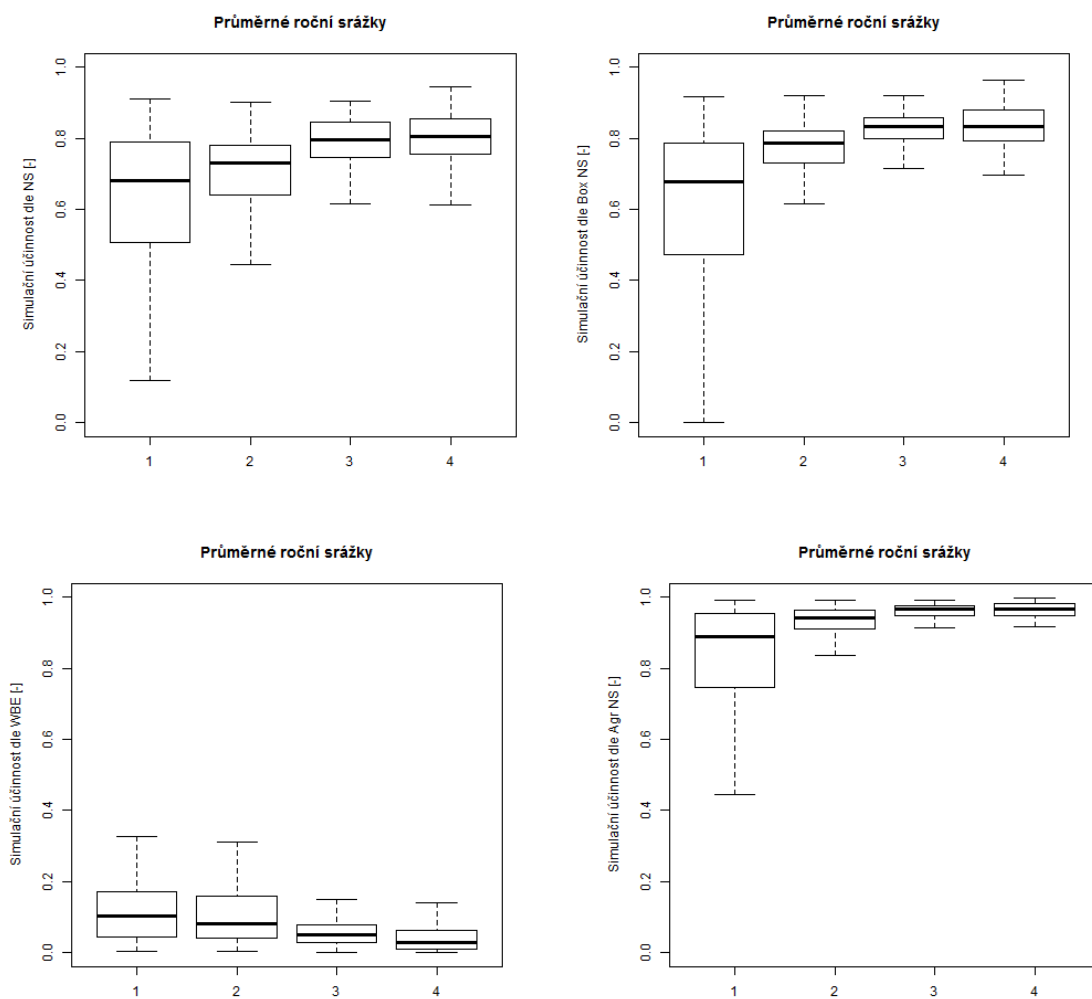
XU, C.-Y., SEIBERT J., et HALLDIN S., 1996: Regional water balance modelling in the NOPEX are: development and application of monthly water balance models. Journal of hydrology.V. 180: 211-236.

YOUNG A. R., 2006: Stream flow simulation within UK ungauged catchment using adaily rainfall-runoff model. Journal of Hydrology. 320: 155-172.

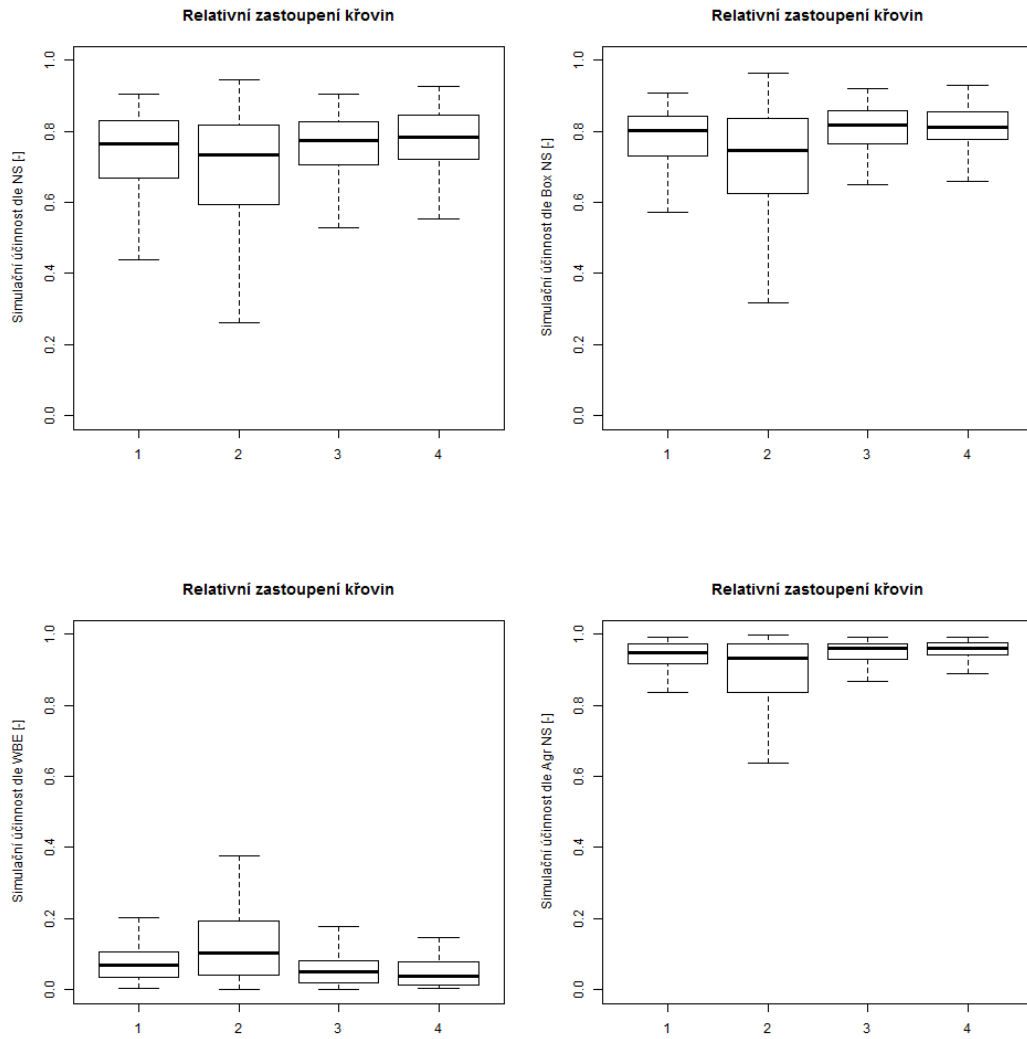
ZELINKA I., OPLÁTKOVÁ Z., M. ŠEDÁ, P. OŠMERA et VČELAŘ F., 2008: Evoluční výpočetní techniky. Principy a aplikace. BEN. Praha.

ZHANG, Y., CHIEW, F. H. S., 2009: Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments. Water Resour. Res. 45 (7).

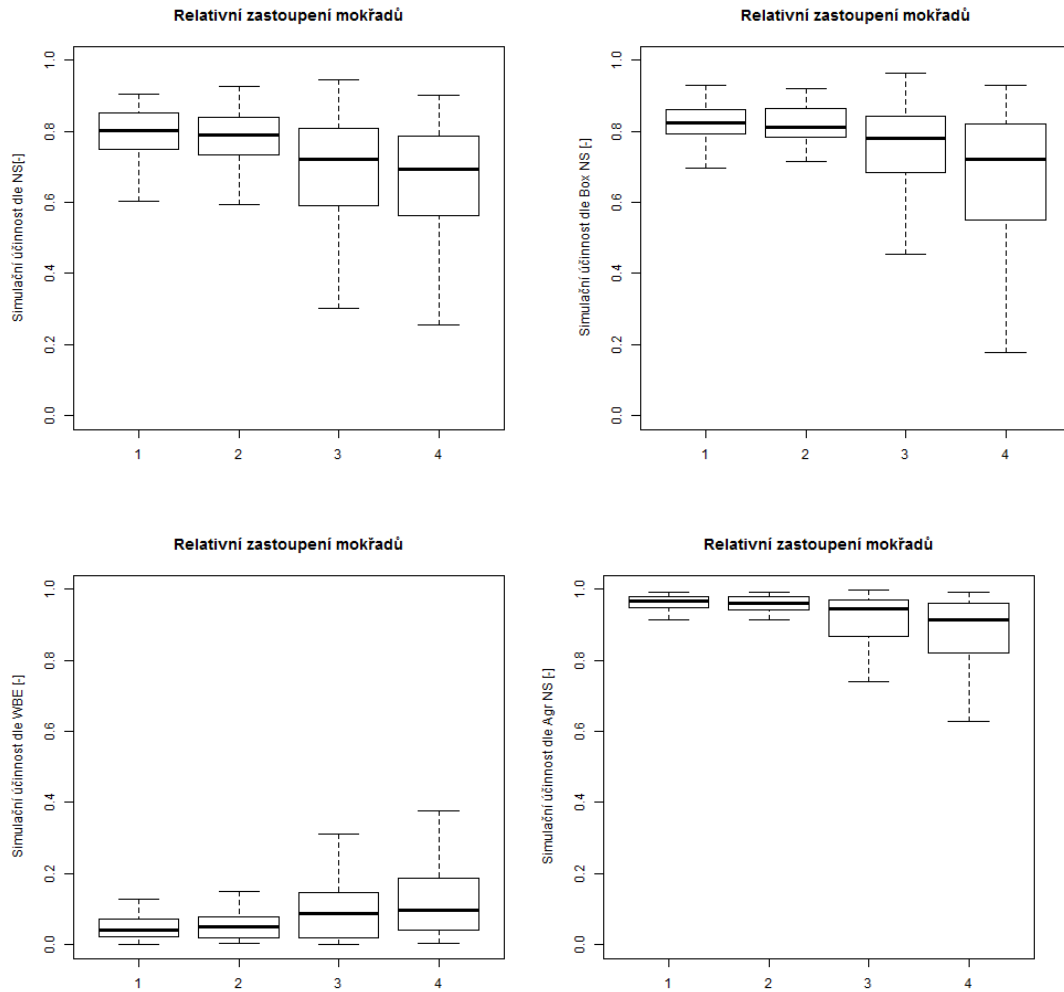
9. PŘÍLOHY



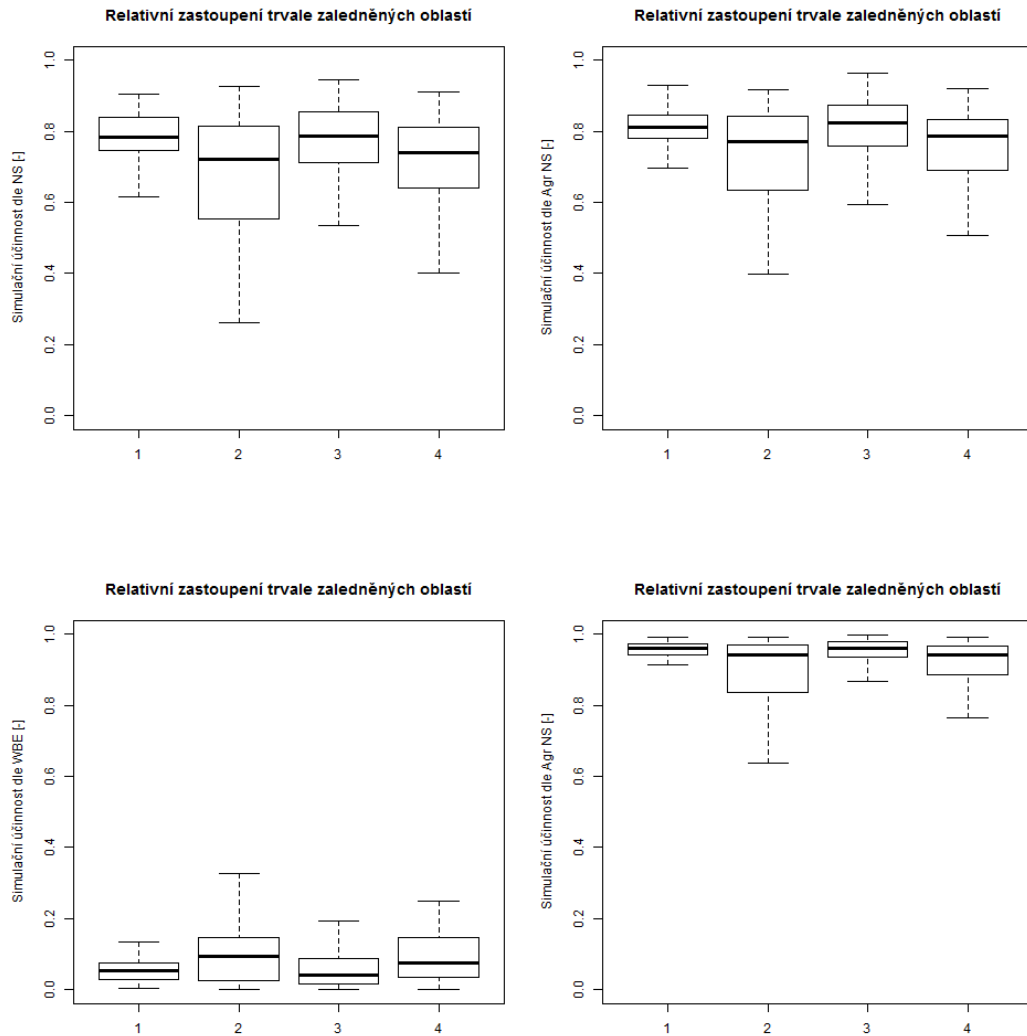
Příloha 1: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na průměrné roční srážce pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



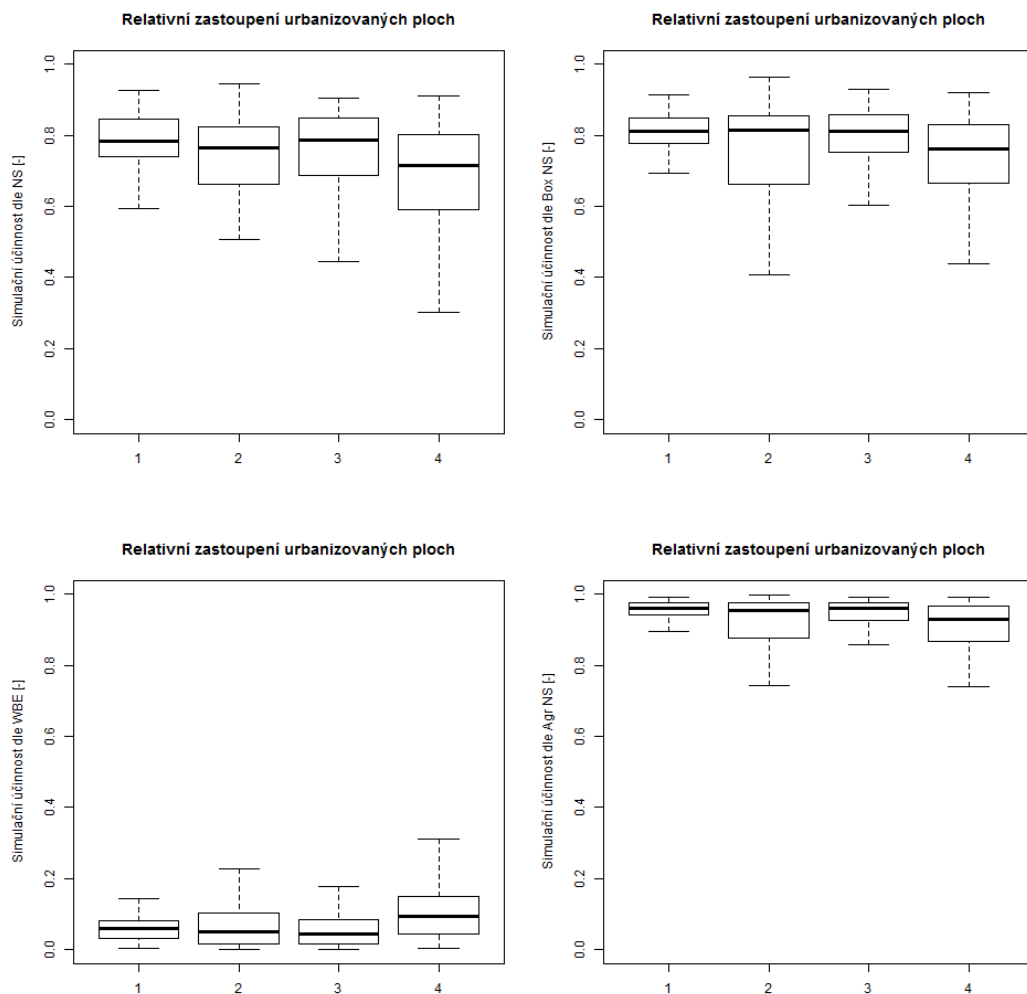
Příloha 2: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na relativním zastoupení křovin pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



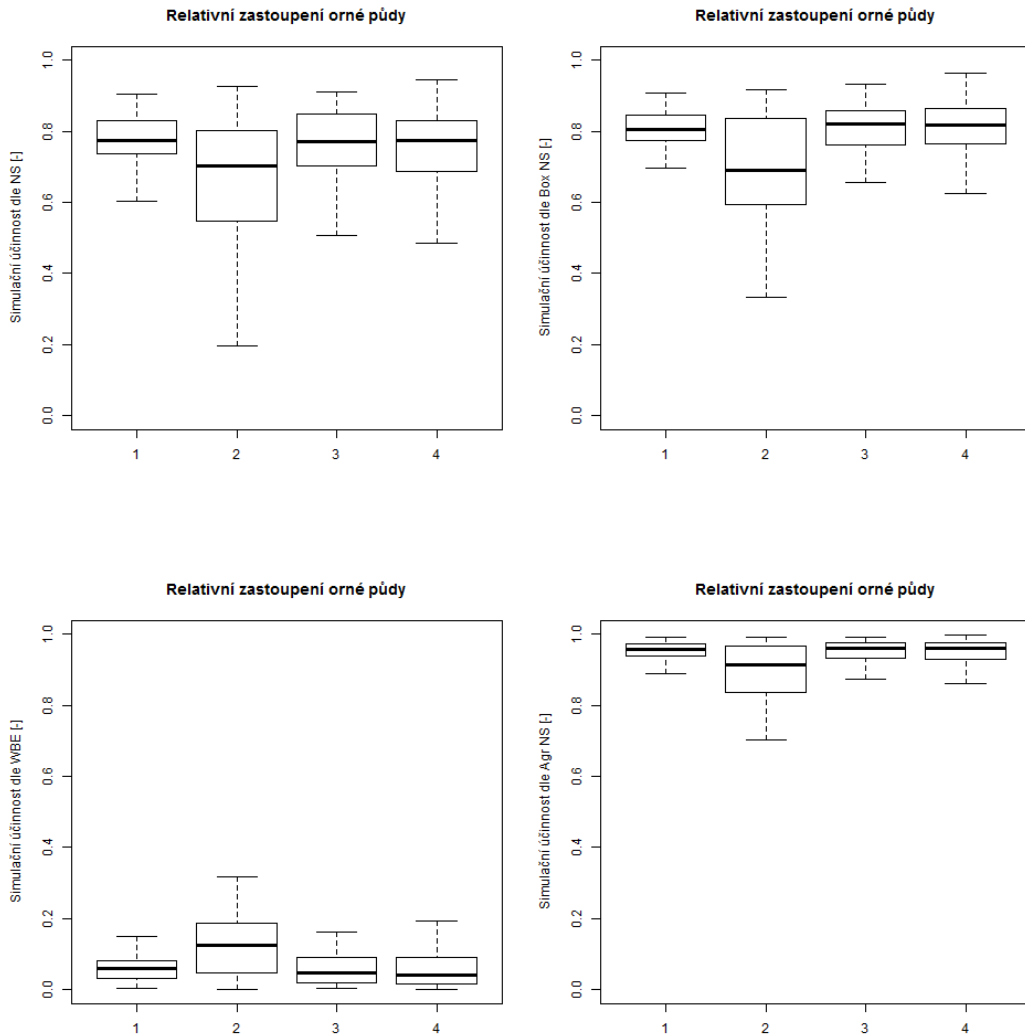
Příloha 3: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na relativním zastoupení mokřadů pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



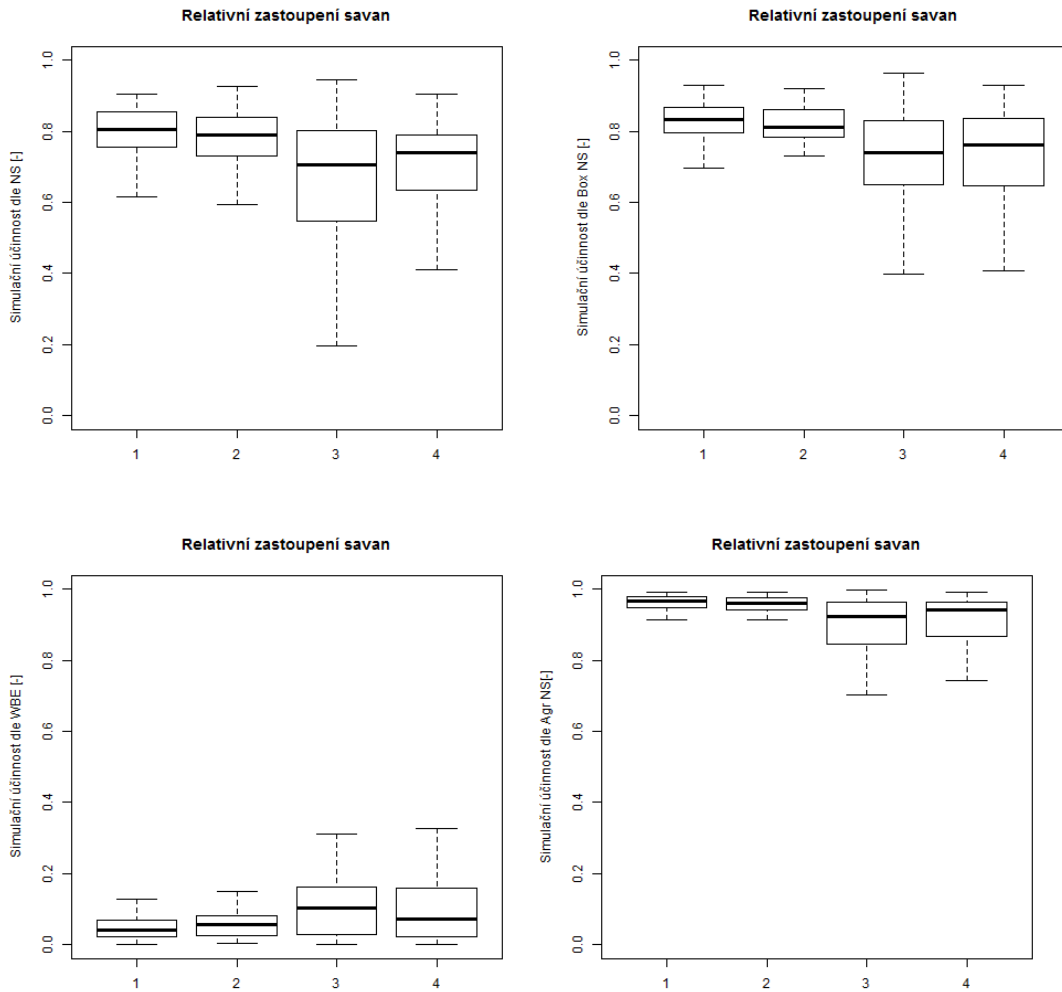
Příloha 4: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na relativním zastoupení trvalých travních porostů pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



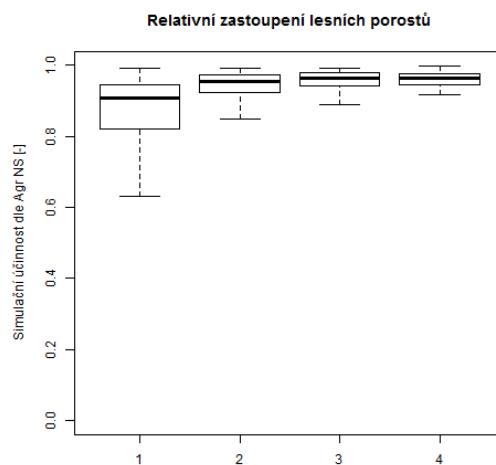
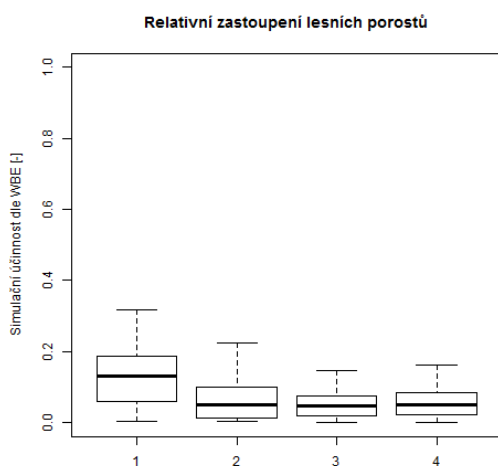
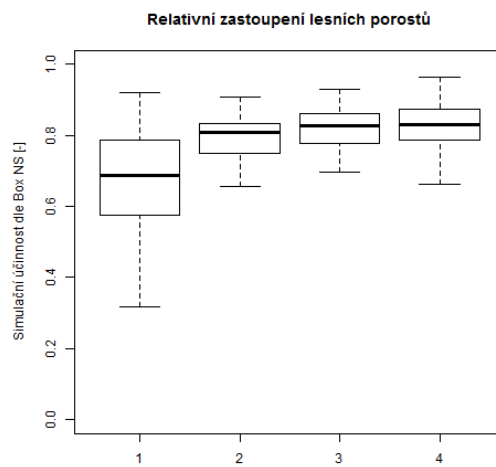
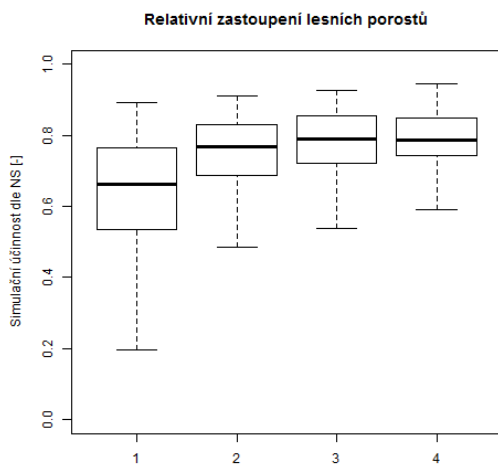
Příloha 5: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti relativním zastoupení urbanizovaných ploch pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



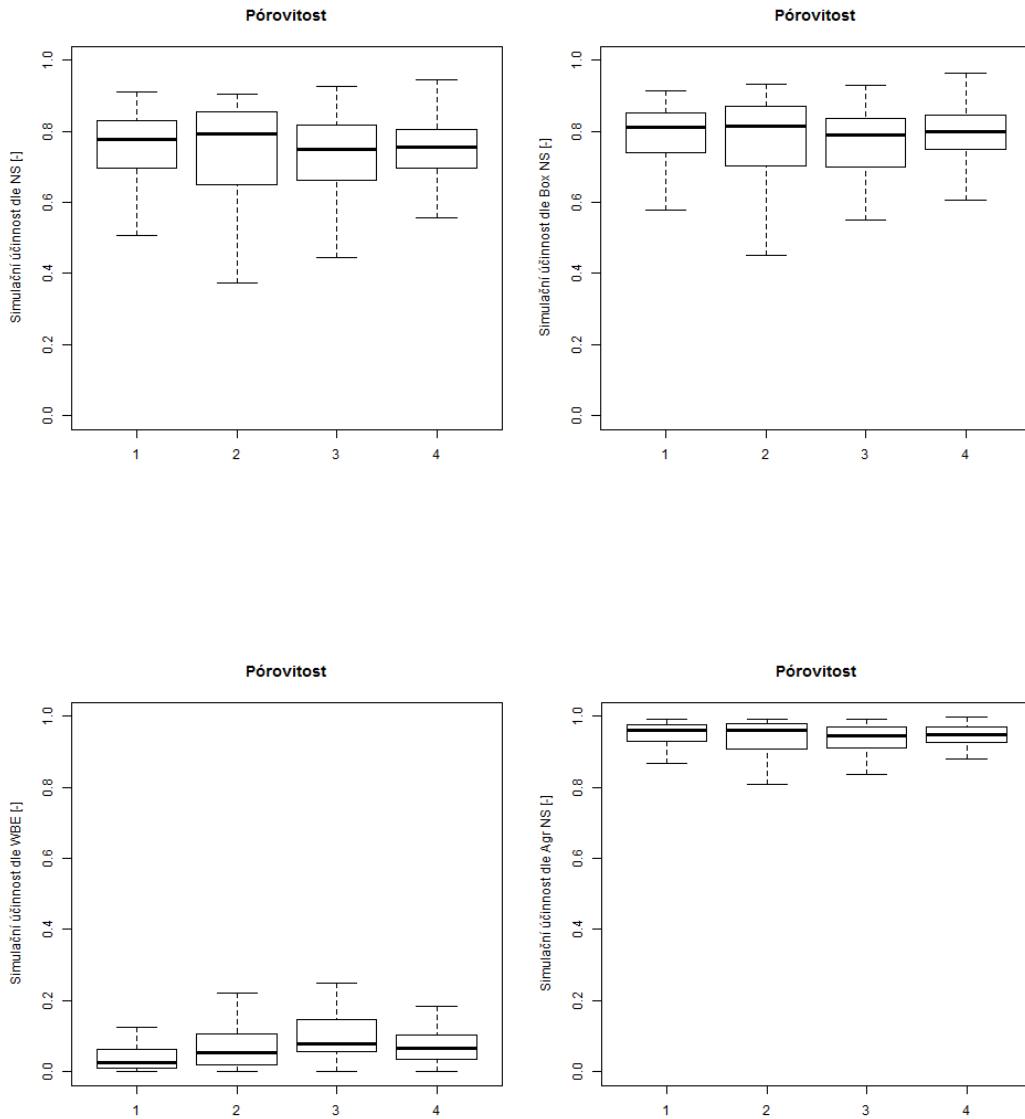
Příloha 6: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti relativním zastoupení orné půdy pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



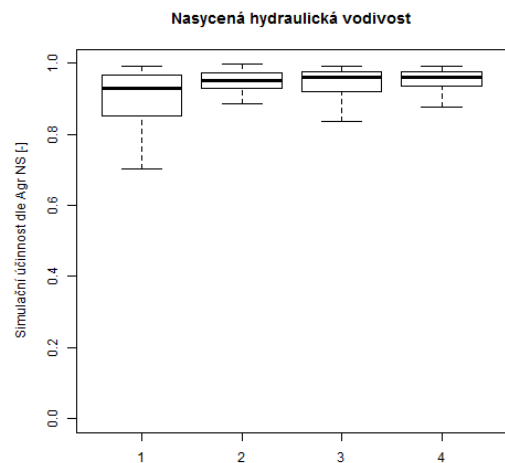
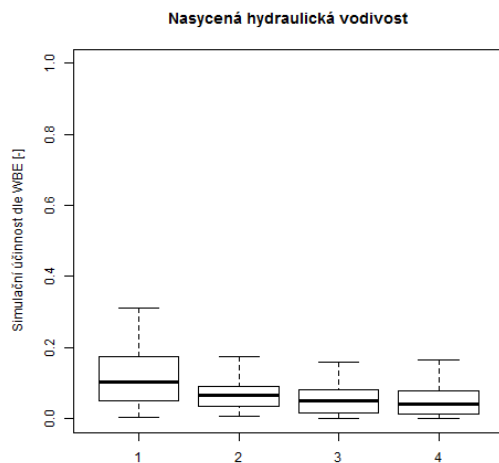
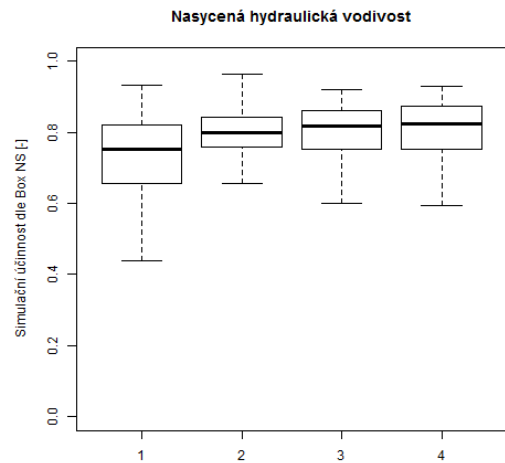
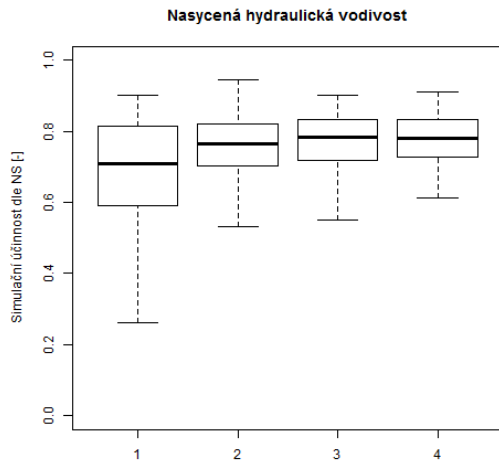
Příloha 7: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti relativním zastoupení savan pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



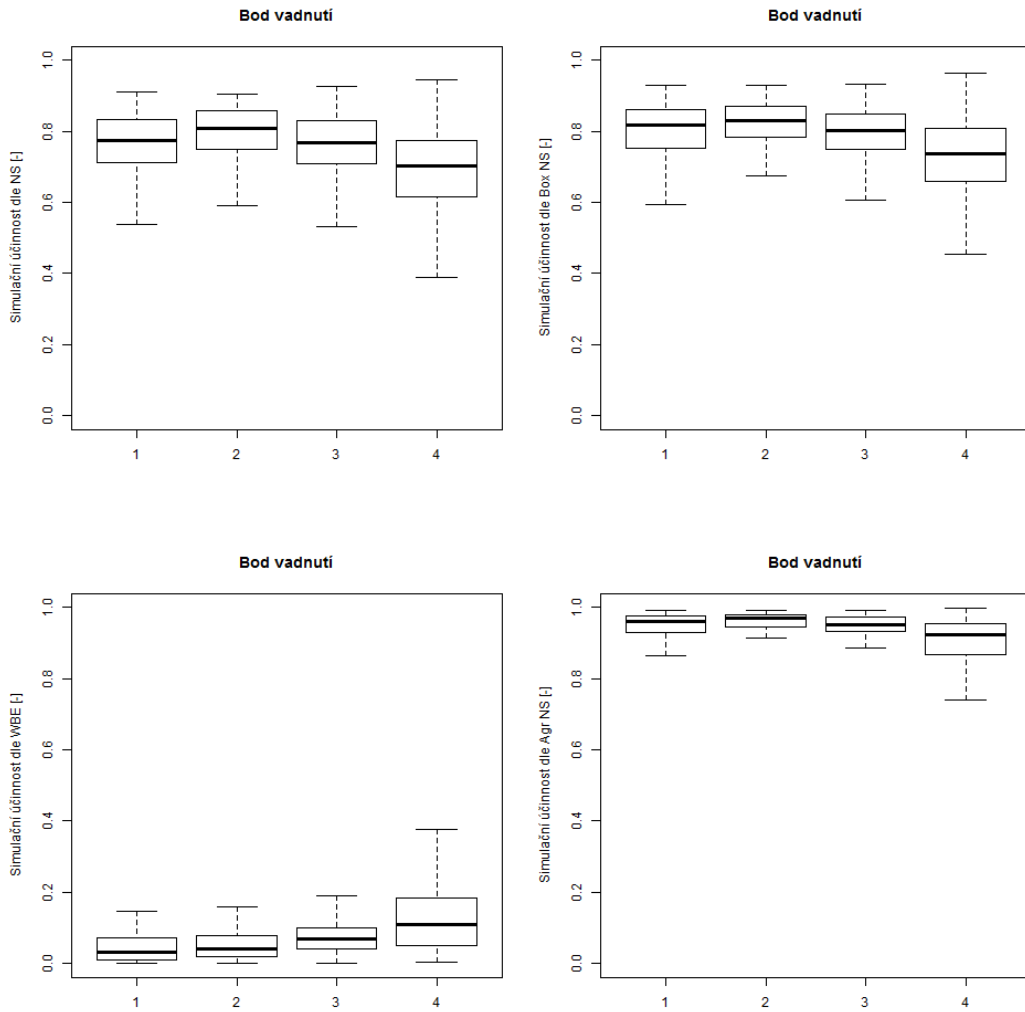
Příloha 8: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na relativním zastoupení lesních porostů pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



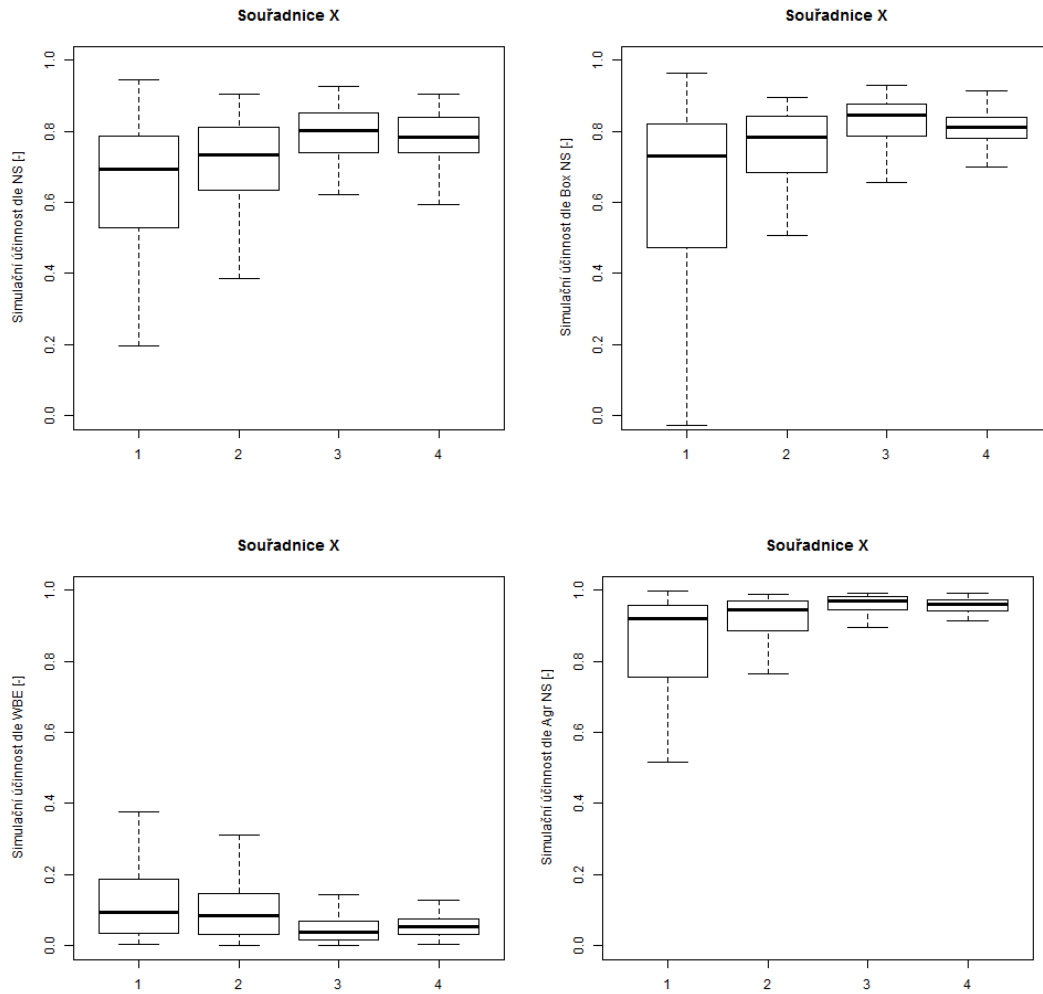
Příloha 9: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na pórovitosti pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



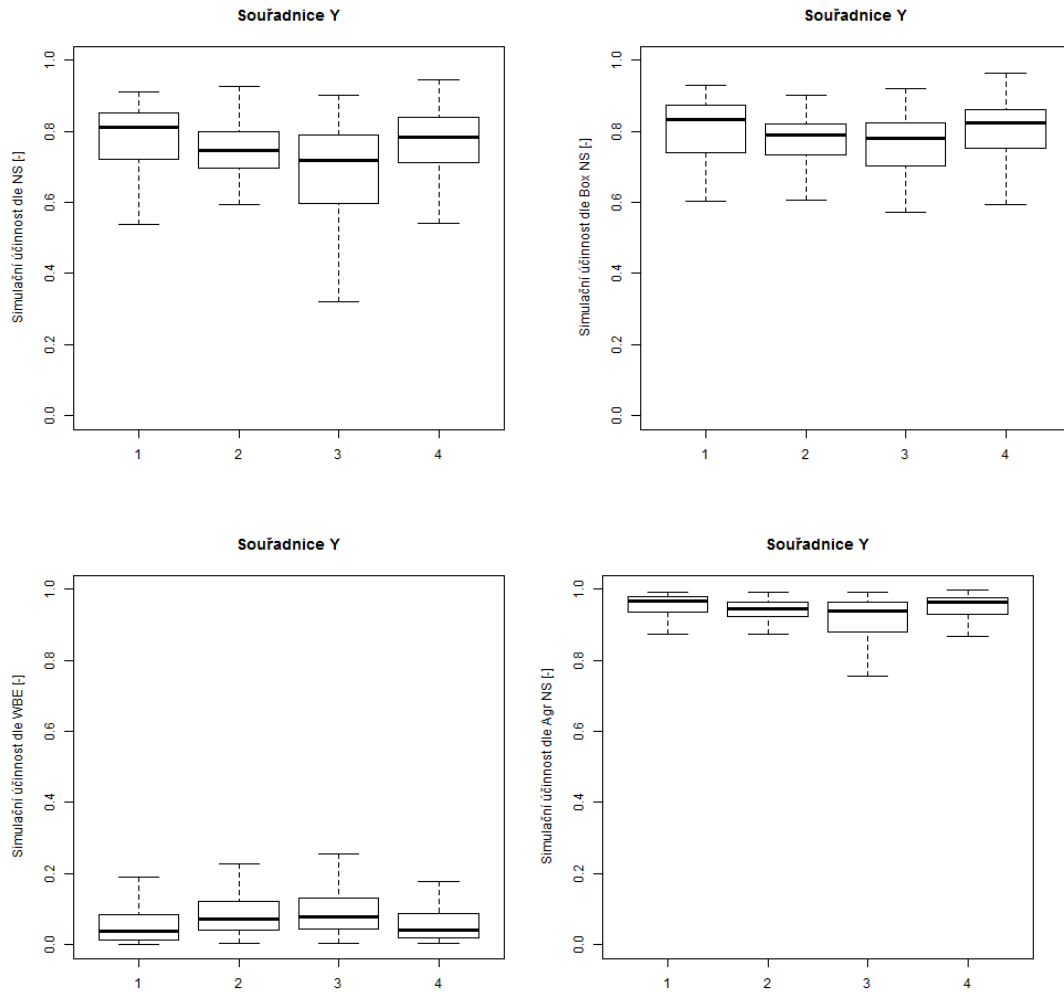
Příloha 10: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na nasyčené hydraulické vodivosti pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



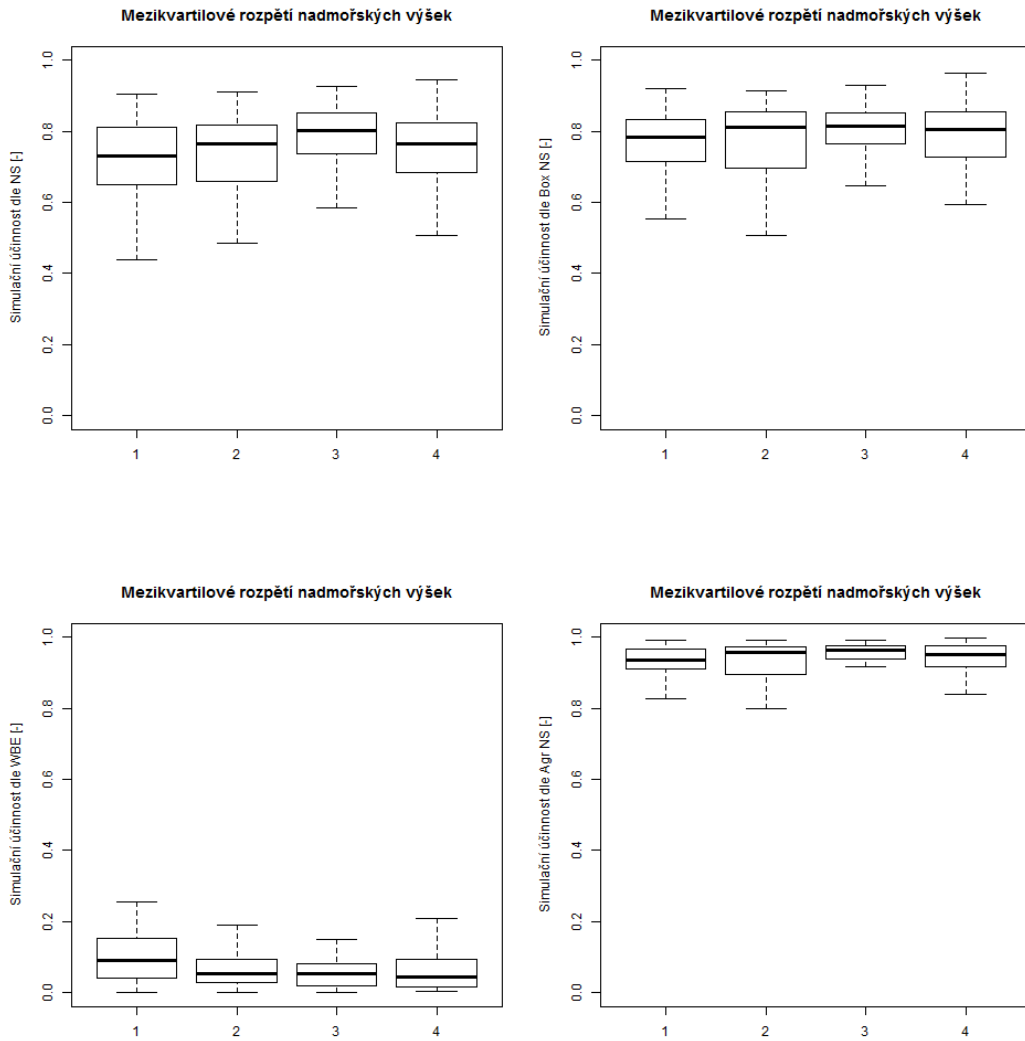
Příloha 11: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na bodu vadnutí pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



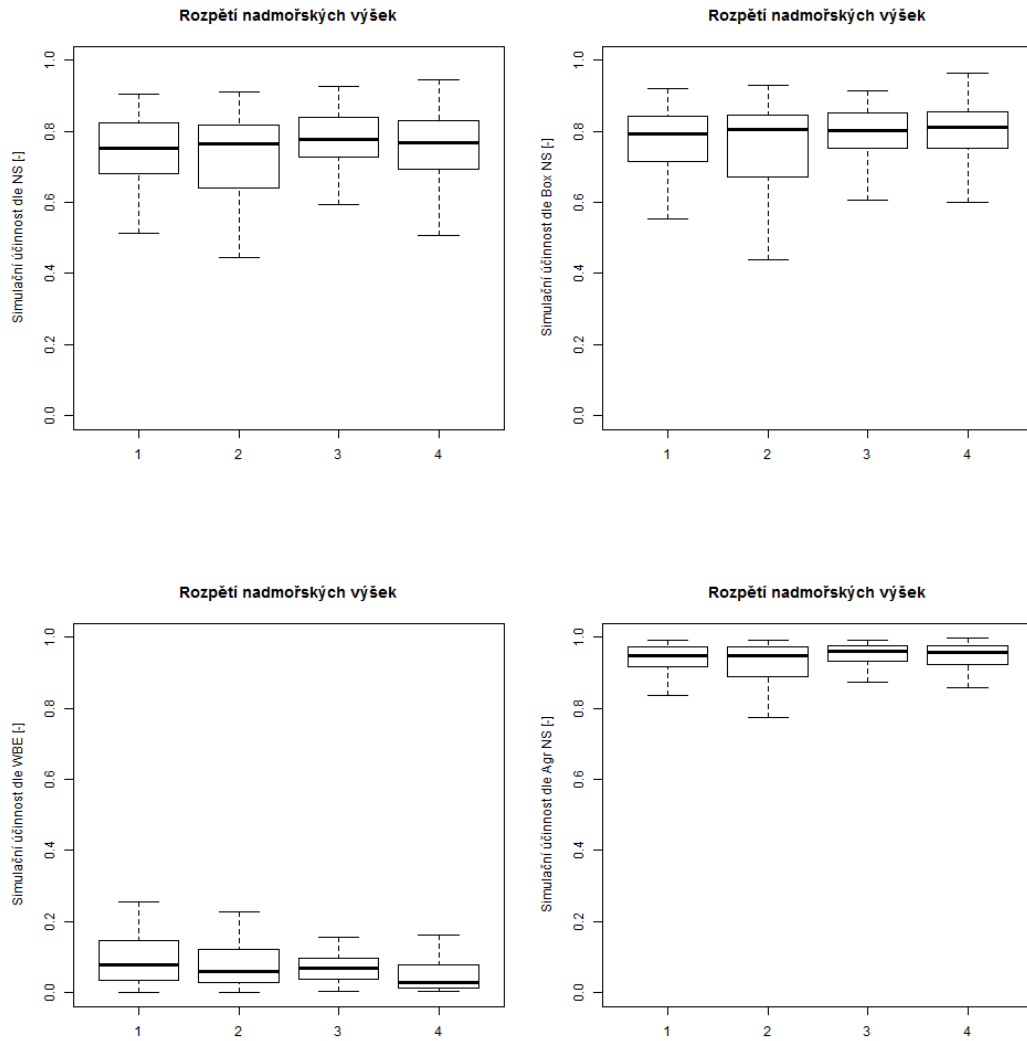
Příloha 12: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na souřadnicích X pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



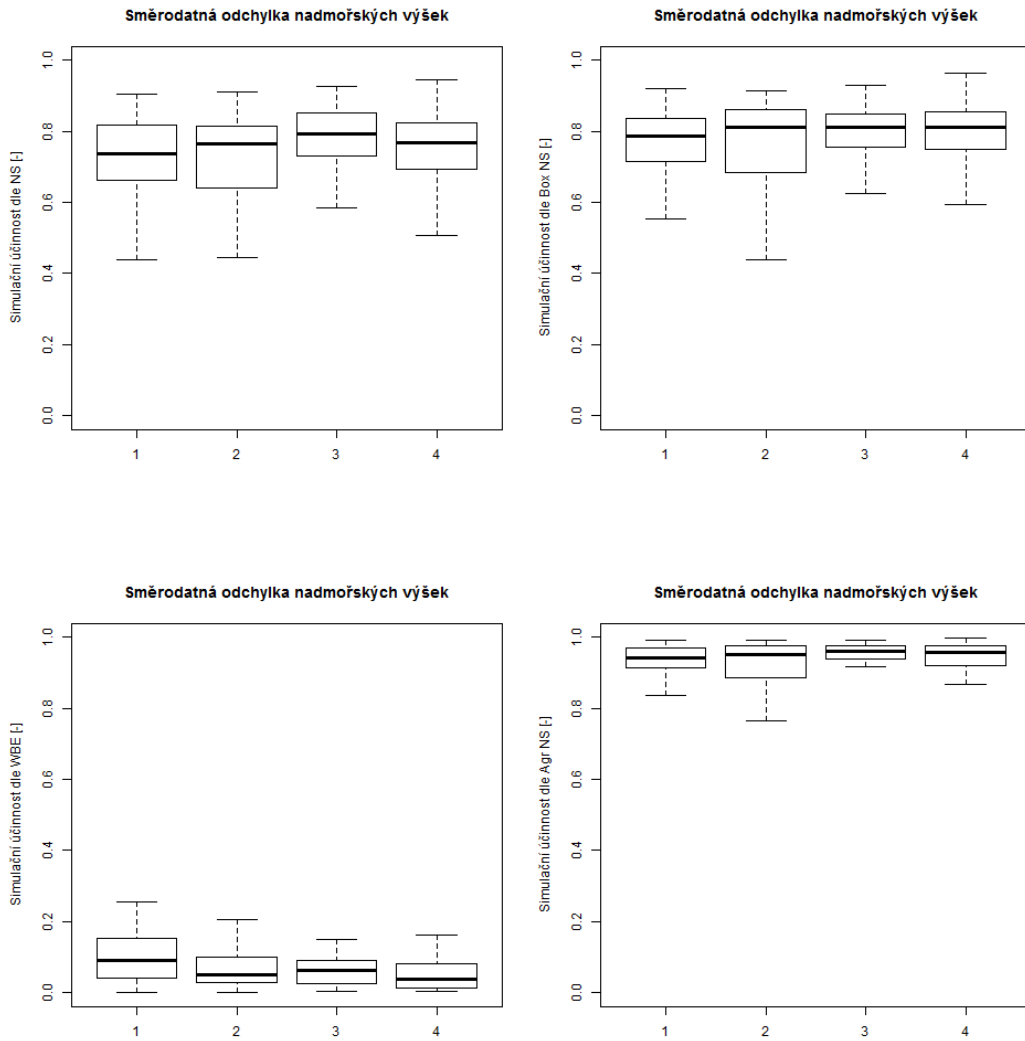
Příloha 13: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na souřadnicích Y pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



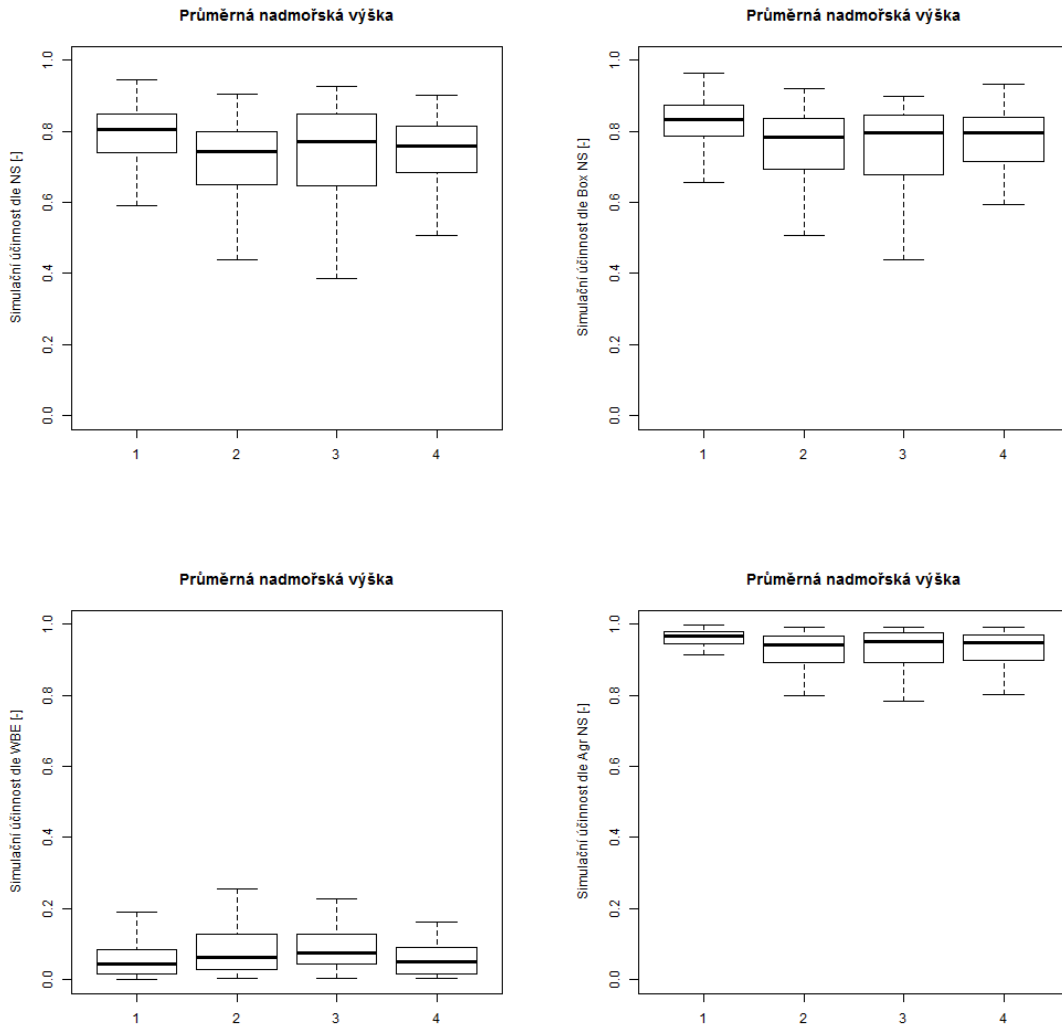
Příloha 14: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na mezikvartilovém rozpětí nadmořských výšek pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



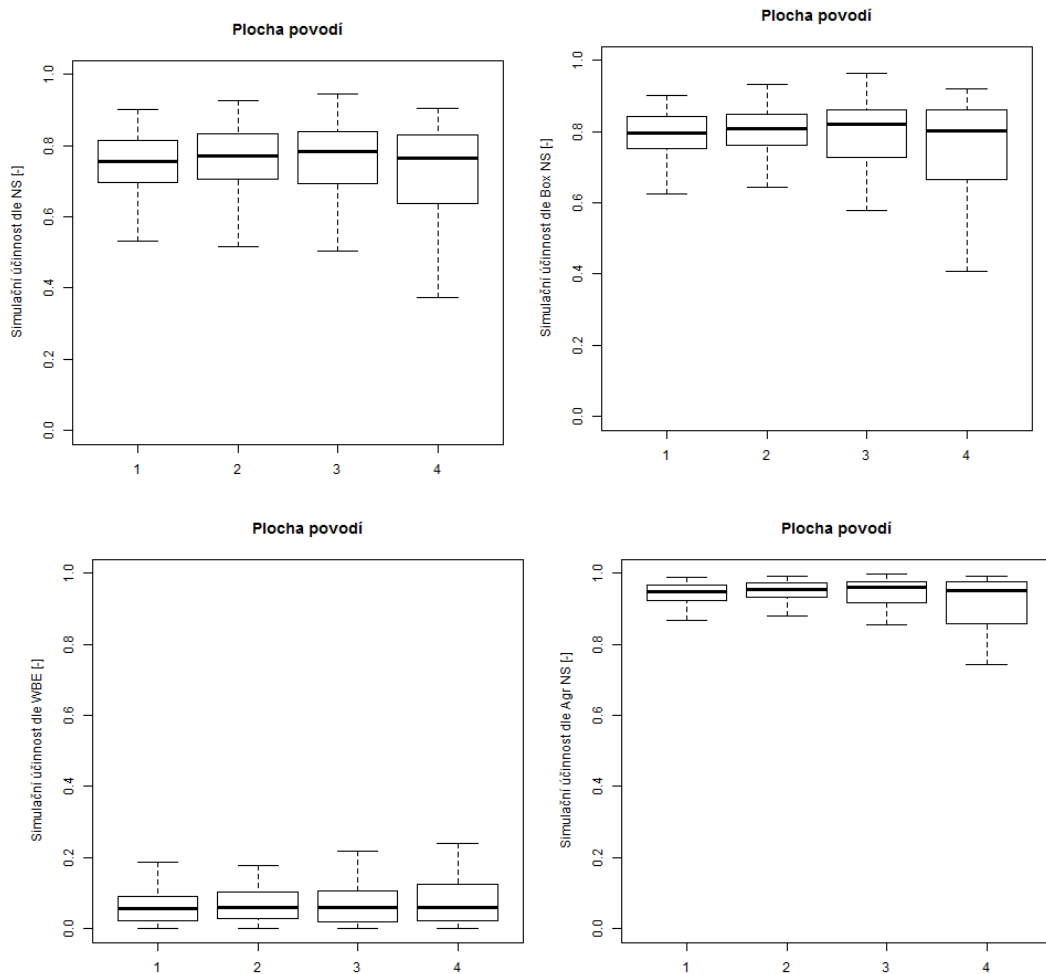
Příloha 15: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na rozpětí nadmořských výšek pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



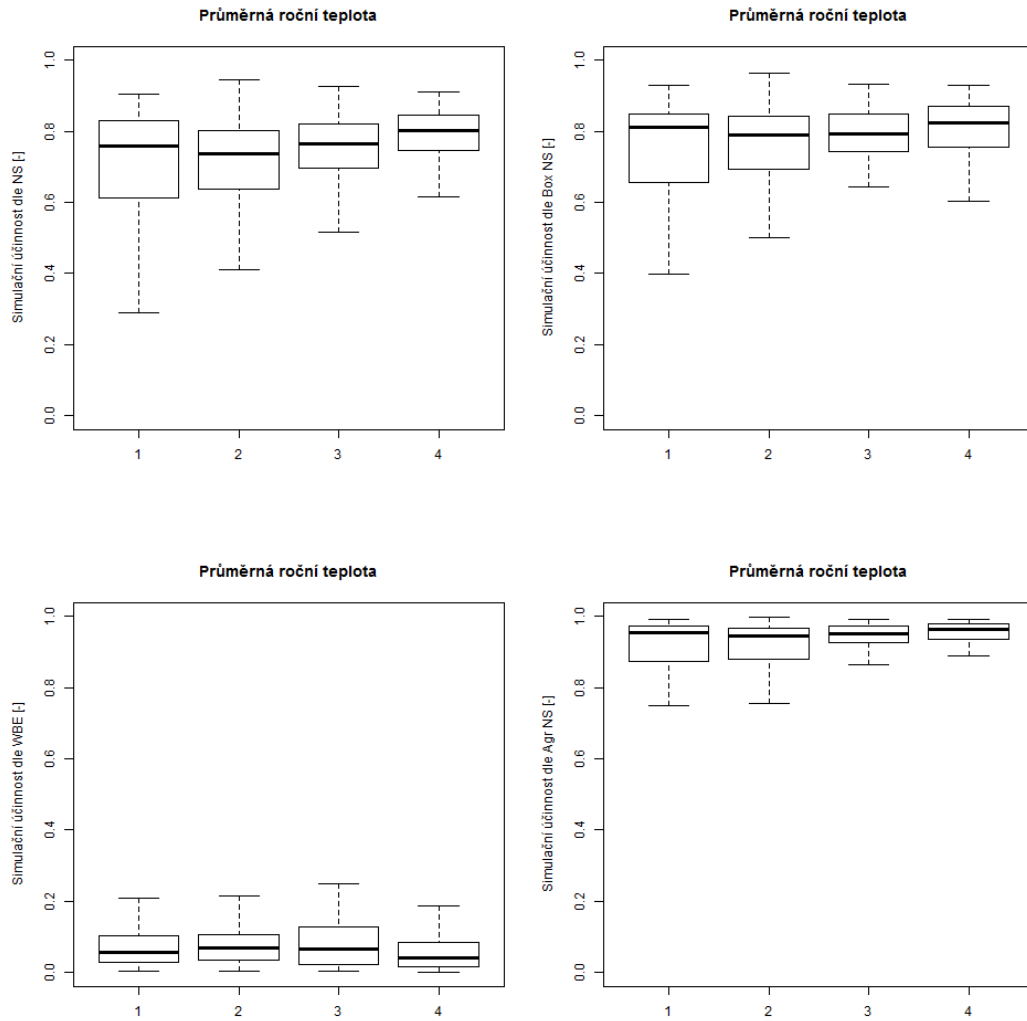
Příloha 16: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na směrodatné odchylce nadmořských výšek pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



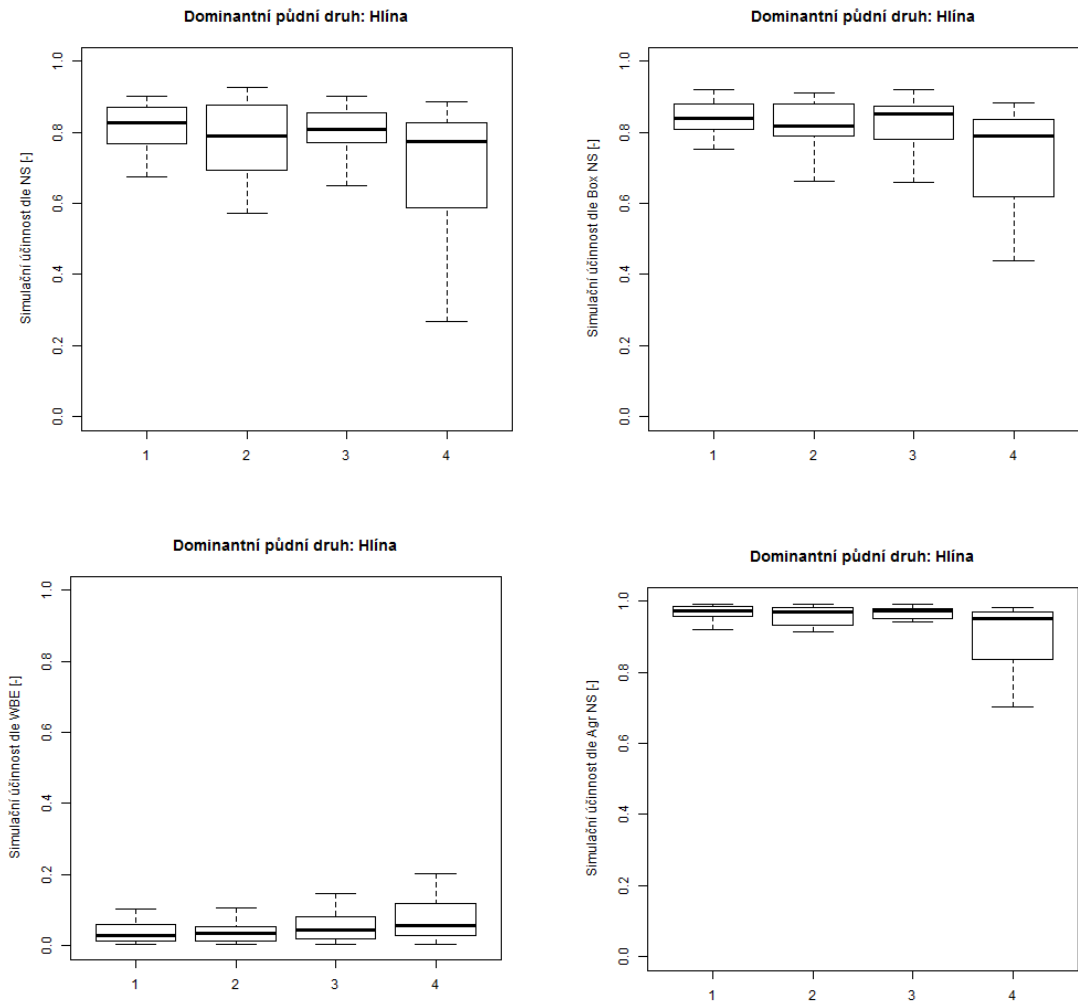
Příloha 17: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na průměrné nadmořské výšce pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



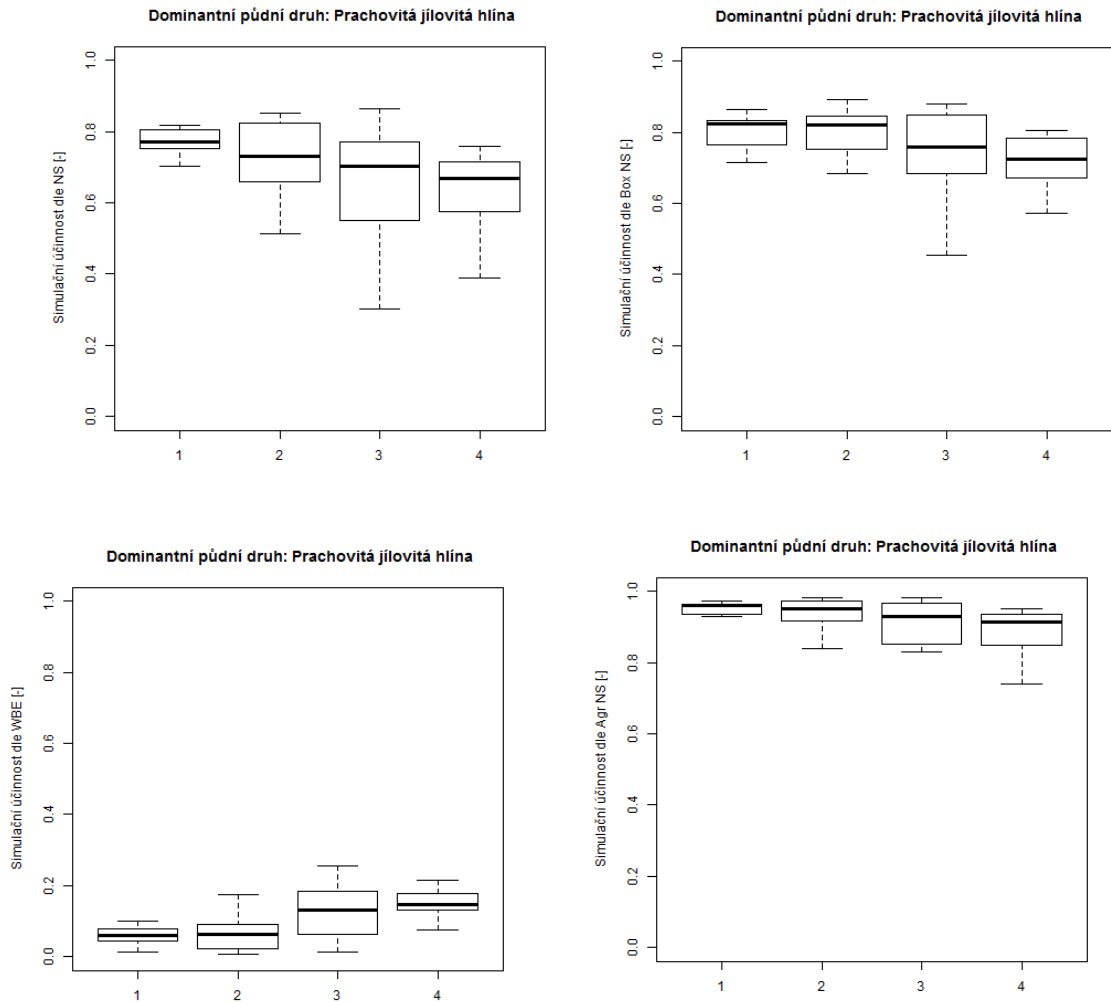
Příloha 18: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na ploše povodí pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (Box NS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3



Příloha 19: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na průměrné roční teplotě pro soubor 360 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (BoxNS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.



Příloha 20: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na zastoupení hlíny jakožto dominantního půdního druhu pro soubor 77 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (Box NS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3



Příloha 21: Simulační účinnost modelu GR4J v závislosti na zastoupení prachovité jílovité hlíny jakožto dominantního půdního druhu pro soubor 57 povodí vyjádřená formou objektivních funkcí: Nash- Sutcliffova koeficientu (NS), jeho modifikace (Box NS), relativní objemové chyby (WBE) a agregovaného Nash- Sutcliffova koeficientu (Agr NS). Popis prezentovaných statistických ukazatelů je shodný s Obr. 3.