

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra vodního hospodářství
a environmentálního modelování

**Implementace optimalizační metody
DEgrbest do modelu BILAN**

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.
Diplomant: František Pešek

2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

František Pešek

Environmentální modelování

Název práce

Implementace optimalizační metody DEgrbest do modelu BILAN

Název anglicky

Implementation of optimisation method DEgrbest into the BILAn model

Cíle práce

Cílem práce je doplnění stávajícího optimalizačního algoritmu SCDE do modelu Bilan o adaptivní variantu distribuované verze diferenciální evoluce. Součástí práce je test nově vytvořeného adaptivního algoritmu na vybraném souboru povodí.

Metodika

1. Provedte rozšíření stávajícího optimalizačního algoritmu SCDE modelu Bilan o jeho adaptivní variantu.
2. Provedte simulační test na vybraných povodích.
3. Vzájemně porovnejte výkonnost vybraných optimalizačních algoritmů při stanovení parametrů modelu Bilan.

Doporučený rozsah práce

standardní

Klíčová slova

bilan, diferenciální evoluce, optimalizace parametrů hydrologického modelu

Doporučené zdroje informací

S. M. Islam, S. Das, S. Ghosh, S. Roy, P. N. Suganthan, An Adaptive Differential Evolution Algorithm With Novel Mutation and Crossover Strategies for Global Numerical Optimization, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS MAN AND CYBERNETICS PART B-CYBERNETICS 42 (2, SI) (2012) 482-500.
doi:10.1109/TSMCB.2011.2167966.

Předběžný termín obhajoby

2015/06 (červen)

Vedoucí práce

Ing. Petr Máca, Ph.D.

Konzultant

Adam Vizina

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2015

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2015

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Děkan

V Praze dne 19. 04. 2015

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Máci, Ph.D., a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Praze, 17.04.2015

.....

František Pešek

Poděkování

Touto cestou bych velmi rád poděkoval Petrovi za jeho obětavost, užitečné rady, připomínky, motivaci a moře věnovaného času při konzultacích.

V Praze, 17.04.2015

.....

František Pešek

Abstrakt

Cílem této práce je implementace nové optimalizační metody Diferenciální evoluce do modelu BILAN a její porovnání s již vloženými optimalizacemi Diferenciální evoluce. BILAN je koncepční hydrologický předpovědní bilanční model, který pracuje v denním či měsíčním časovém kroku. Algoritmy Diferenciální evoluce patří do třídy evolučních algoritmů a do modelu BILAN byly v minulosti zakomponovány 3 její distribuované varianty. Výkonnost optimalizací byla testována na sadě dat 50 povodí České republiky. Testovány byly různé typy nastavení optimalizačního algoritmu. Výsledky byly shrnuty statistickými metodami na dvou případových studiích.

Klíčová slova: SCDE, BILAN, MDE- p BX, hydrologický model, optimalizace, hydrologická bilance

Abstract

The aim of this thesis is an implementation of a new Differential evolution optimisation method to a BILAN model and its comparison with Differential evolution optimisations, which has been already implemented to BILAN. BILAN is a conceptual water balance model, which can be processed in a daily or monthly time step. Algorithms of Differential evolution belongs to a group of evolutionary algorithms and three distributed variations of Dif.evolution has been implemented to BILAN model in the past. Efficiency of optimisations was tested on a set of 50 basins located in Czech republic. Several settings of optimisation algorithms were tested as well. Evaluation was summarized by statistical methods on two case studies.

Keywords: SCDE, BILAN, MDE_pBX, hydrological model, optimisation, water balance

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíle práce	10
3	Materiál a metody	11
3.1	Hydrologická bilance	11
3.2	Hydrologický cyklus	11
3.3	Povodí	13
3.4	Základní bilanční rovnice	14
3.5	Rozdělení hydrologických modelů	16
3.5.1	Materiálové	16
3.5.2	Symbolické	16
3.6	Model BILAN	17
3.6.1	Popis	17
3.6.2	Data	18
3.6.3	Výpočet potenciální evapotranspirace	20
3.6.4	Určení počáteční zásoby podzemní vody	21
3.6.5	Parametry modelu BILAN	21
3.6.6	Optimalizace parametrů - popis SCDE	24
3.6.6.1	Optimalizace hydrologického modelu	24
3.6.6.2	Klasické schéma SCDE	24
3.6.6.3	Značení použitých modelů SCDE	28
3.6.6.4	DE/current-to-gr_best	28
3.6.6.5	DE/best/1/bin	33
3.6.6.6	DE/current-to-best/1/bin	33
3.6.6.7	DE/rand/2/bin	34
3.6.7	Kalibrace parametrů	34
3.6.8	Výsledky	36
4	Účelové funkce, hydrologická kritéria	39
4.1	Použité objektivní funkce	39
4.1.1	MAE	39
4.1.2	MSE	39
4.1.3	MRE	40
4.1.4	MAPE	40

4.1.5	NS	40
4.1.6	LNNS	40
5	Vyhodnocení	41
5.1	Metodika	41
5.2	Data	41
5.3	Nastavení optimalizace pro výpočet	41
5.4	Statistické metody vyhodnocení	42
5.4.1	Vyhodnocování testování hypotéz	42
5.4.2	Wilcoxonův test	43
5.4.3	Hladina významnosti	45
5.5	Výsledky - 50 povodí	46
5.5.1	Porovnání algoritmů Diferenciální evoluce	47
5.6	Výsledky - případová studie 0310 Častolovice	55
6	Závěr	60
	Literatura	62
A	Příloha Nastavení modelů SCDE	67
B	Příloha Grafy výsledků	72
B.1	Porovnání optimalizačních algoritmů - krabicové grafy	72
B.1.1	1set	72
B.1.2	2set	74
B.1.3	3set	77
B.1.4	4set	79
B.2	Porovnání optimalizačních algoritmů - grafy kvantilů	82
B.2.1	1set	82
B.2.2	2set	84
B.2.3	3set	86
B.2.4	4set	88
C	Příloha Výsledky residuí (koeficientů) a statistiky	90
C.1	NS	90
C.2	MAE	96
C.3	MSE	102
C.4	MAPE	108
C.5	MRE	114

1 Úvod

Tato práce nepřímo navazuje na moji Bakalářskou práci (Pešek, 2012), ve které jsem se zabýval vybranými optimalizačními algoritmy.

Podstatou hydrologického modelování je zjednodušená reprezentace hydrologického cyklu vybraných hydrologických procesů sloužících k jejich předpovědi a porozumění. Hydrologické modelování dává do relace vstupní a výstupní hodnoty (Daňhelka et al., 2003; Singh et. Frevert, 2006). Matematická reprezentace modelu nám umožňuje lépe a rychleji předpovídat a modelovat různé extrémní stavy na povodí. Výsledky modelů pomáhají k zajištění ochranných opatření na toku, ať už před suchem či povodní, a k zamezení škod na majetku či ztrátách na životech zvířat i lidí.

Mezi tyto modely patří koncepční hydrologický model BILAN (Kašpárek et. Novický, 1997), který simuluje prvky hydrologické bilance na povodí. Singh et. Frevert (2006) dělí hydrologické modely na materiálové a symbolické. Materiálové jsou děleny na analogové a laboratorní modely. Symbolické se dělí na empirické (black-boxové), teoretické (white-boxové) a koncepční (grey-boxové). Koncepční modely slouží k popisu hydrologického systému na základě popsání toku a vyjádření změn zásob vody v povodí (Kulhavý et. Kovář, 2002; Singh et. Frevert, 2006).

K tomu, aby mohly být veličiny nasimulovány, musí se po vstupu do modelu nakalibrovat. Kalibrace je souborem úloh, které hledají optimální hodnoty vstupních veličin. Podstatou kalibrace je, aby se výstupní veličiny blížily hodnotám měřených veličin (Gupta et al., 1998). Veličiny modelu BILAN se v této práci kalibrovaly pomocí optimalizačních metod SCDE (Shuffled Complex Differential Evolution). Tyto metody jsou specifické tím, že kombinují algoritmy Diferenciální evoluce s procesy komplexního promíchávání (shufflování) populací modelů (Máca, 2012).

Po kalibraci následuje odhad parametrů modelu. Parametry se odhadují na základě shody průběhu modelovaných veličin dle optimalizačních kritérií a měřených veličin. Po této operaci se již může přistoupit k vyhodnocení modelu.

2 Cíle práce

Tato Diplomová práce byla zaměřena na implementaci optimalizační metody MDE_{pBX} (Islam et. al., 2012) do modelu BILAN, následném vyhodnocení výsledků optimalizace a porovnání měřených a simulovaných dat odtoků z 50 povodí na území České republiky. V úvodu je shrnuta hydrologická bilance a popsán model BILAN. Následně jsou popsány optimalizační metody SCDE (Shuffled-complex Differential Evolution) modelu BILAN. Dále jsou shrnuty metody vyhodnocení objektivními a statistickými funkcemi a poté posouzena výkonnost nově implementované optimalizační metody v porovnání s již stávajícími SCDE optimalizacemi modelu BILAN na sadě dat 50 povodí. V porovnání optimalizací byly použity 4 nastavení hodnot mutace, křížení a u optimalizace MDE_{pBX} 4 nastavení hodnot procentuální velikosti populace použité k vytvoření nového rodičovského vektoru. Vyhodnocení proběhlo též na případové studii profilu povodí 0310 - Častolovice. V závěru je probíráno, jak působí tato nastavení na výkonnost optimalizace při předpovědi odtoků z povodí.

3 Materiál a metody

3.1 Hydrologická bilance

Hydrologická bilance je založena na zákonu zachování hmoty - tj. jakákoliv změna obsahu vody v daném hydrologickém systému za určitou časovou periodu se rovná rozdílu mezi množstvím vody, které bylo přidáno do systému a množstvím vody, jenž bylo ze systému odňato. Hydrologická bilance tedy vyjadřuje všechny vodní vstupy a výstupy z povodí, přičemž rozdíl mezi velikostí vstupu a výstupu se rovná změně zásob (obr.3.1). Tento popis tak vyjadřuje základní bilanci hmoty (viz. rovnice (3.4.1)). Hlavní výhodou této metody ční v tom, že je založena na jasném koncepčním základě a používá dostupná a adekvátní srážko-odtoková data, která jsou spolu s informacemi o systému potřebné k výpočtu hydrologické bilance. Srážkový vstup je často nejdůležitějším prvkem v rovnici hydrologické bilance. Dalším prvkem je evapotranspirace, která v sobě zahrnuje výpar z půdy (evaporace) a z rostlin (transpirace). Posledním důležitým prvkem rovnice hydrologické bilance je odtok vody ze systému (Zhang et. al., 2002).

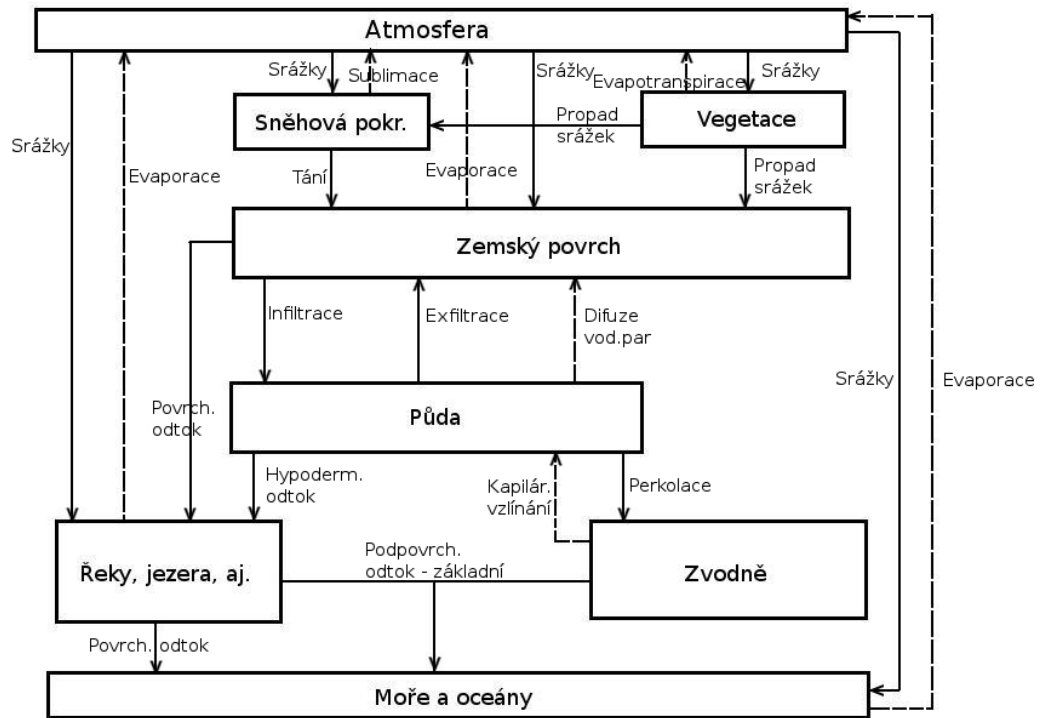


Obrázek 3.1: Hydrologický systém

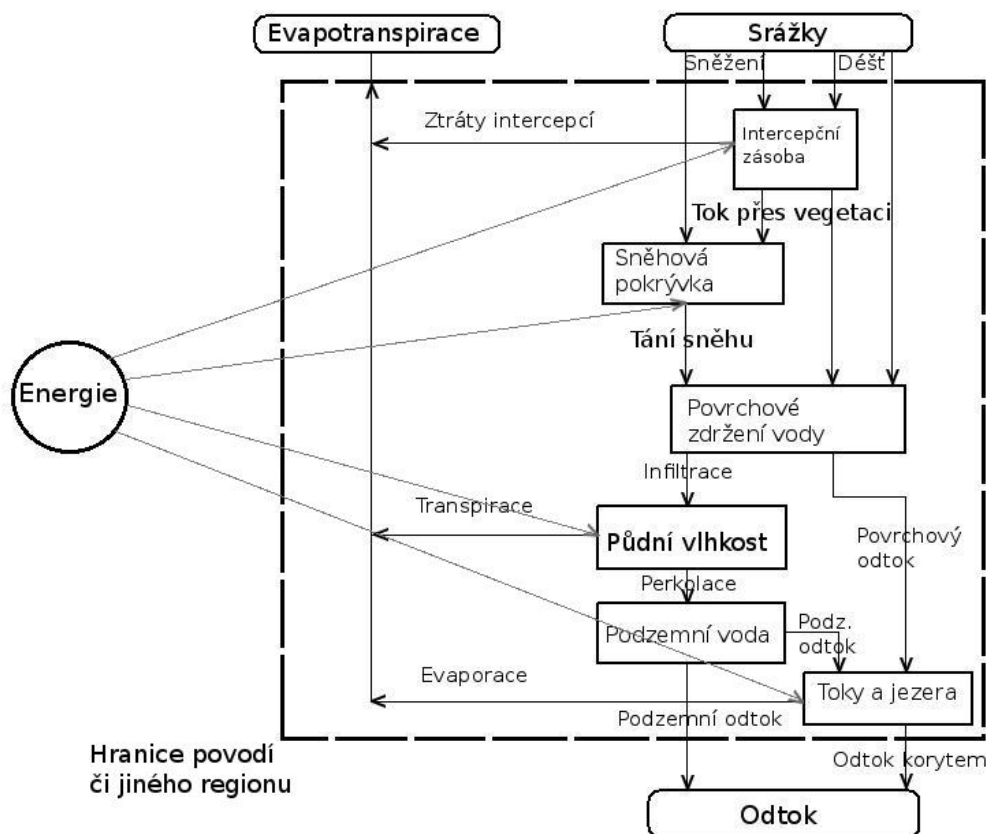
3.2 Hydrologický cyklus

Hydrologický cyklus je největší hybatelem masy na celém světě. Můžeme si ho představit jako navzájem propojené nádrže, které mezi sebou komunikují hydrologickými procesy. Má dopad na vše živé, je určujícím činitelem ve změnách klimatu a od pradávna měl vliv na evoluční vývoj. Výměny tepla a vlhkosti mezi atmosférou a zemským povrchem podstatně ovlivňují dynamiku a termodynamiku klimatického systému. Ve formě páry, mraků, kapaliny, sněhu, ledu a stejně tak při změnách skupenství hraje voda důležitou roli v ochlazení či oteplování podnebí. Hydrologický cyklus má několik hlavních prvků, které přímo souvisí s těmito formami a fyzikálními procesy. Mezi fyzikálními procesy patří evaporace, kondenzace, srážky, intercepce, infiltrace, perkolace,

transpirace, evapotranspirace, odtok a zásoba. Hydrologický cyklus můžeme rozdělit na globální a pevninský (či regionální nebo lokální) (Chahine, 1992; Dingman, 2002; NWRFC, 2014; Townsend et. al., 2010). Obr.3.2 znázorňuje globální koloběh vody dle Máca (2014) ex. Eagelson (2003) a obr. 3.3 znázorňuje pevninský hydrologický cyklus dle Dingman (2002).



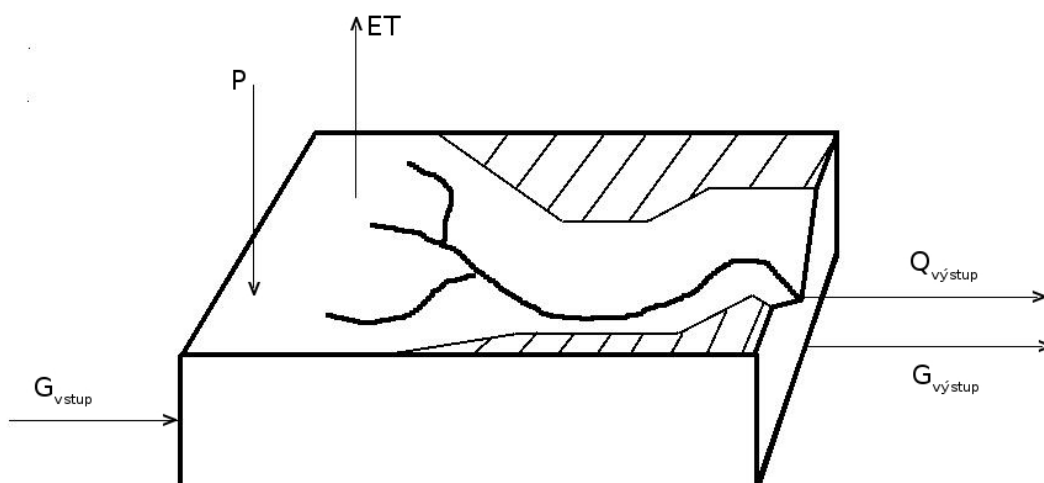
Obrázek 3.2: Globální hydrologický cyklus.



Obrázek 3.3: Pevnivnský hydrologický cyklus.

3.3 Povodí

Kemel (2000) popsal povodí jako území, jenž je omezeno rozvodnicí a je vztaženo k určitému profilu na toku. Rozvodnice je čára, která probíhá po nejvyšších místech, úbočích, hřebenech, vrcholech a sedlech obvodu území. Tato čára pomyslně odděluje sousedící povodí. Rozvodnice můžeme rozdělit na orografickou a hydrogeologickou. Orografická je určena z vrstevnicových map. Hydrogeologická naopak geologickým složením a průběhem nepropustných vrstev pod povrchem terénu. Tyto rozvodnice se nemusí shodovat a u velkých povodí můžeme rozdíly mezi oběmi rozvodnicemi zanedbat. U malých povodí však musíme hydrogeologickým průzkumem určit infiltrační oblast, jelikož by zde mohla být chyba z rozdílu rozvodnic výrazná. Plocha povodí je z definice plocha půdorysného průmětu povodí do vodorovné roviny. Většinou je udávána v km^2 . Jak lze vidět na obr.3.4 dle Dingman (2002), voda vstupuje do povodí prostřednictvím srážek P a podzemní vody G_{vstup} . Z povodí následně vystupuje jako evapotranspirace ET , odtokem podpovrchových $G_{\text{výstup}}$ a povrchových $Q_{\text{výstup}}$ vod.



Obrázek 3.4: Regionální (lokální) bilance na povodí

3.4 Základní bilanční rovnice

Rovnice základního popisu bilance hmoty nám udává změnu zásob v hydrologickém systému za jeden interval Δt .

$$\Delta S = I - O \quad (3.4.1)$$

Kde

- ΔS je změnou zásoby [m^3/t],
- I jsou všechny vstupy do hydrologického systému [m^3/t],
- O jsou výstupy z téhož systému [m^3/t].

Rovnici (3.4.1) lze dále rozvinout dle Dingman (2002) na

$$\Delta S = P + G_{\text{vstup}} - (ET + Q_{\text{vystup}} + G_{\text{vystup}}). \quad (3.4.2)$$

Proměnné zde taktéž reprezentují vstupní a výstupní hodnoty objemového toku v čase:

- P je srážkový úhrn na povodí [m^3/t],
- G_{vstup} je vstup podzemní vody do povodí [m^3/t],
- ET značí evapotranspiraci [m^3/t],
- Q_{vystup} je odtok povrchové vody z povodí [m^3/t],
- G_{vystup} je výstup podzemní vody z povodí [m^3/t].

Jestli bychom chtěli stanovit hodnoty parametrů pro toky podzemních vod, musíme vymezit hranice přísunu vody do povodí (vtok podzemních vod) a určit je tak, aby se shodovaly s hranicemi povodí. Toto může být nezřídka obtížné. Toky podzemních vod bývají často velmi malé a špatně se určují, proto jsou uvažovány jako zanedbatelné. Spolu s přítokem povrchových vod tedy bývají určovány jako nulové. Rovnice (3.4.2) bude tedy po zjednodušení vypadat takto:

$$Q_{\text{výstup}} = P - ET - \Delta S. \quad (3.4.3)$$

Pokud je tato rovnice řešena v časových krocích, je považována za hydrologický bilanční model (Dingman, 2002; Fish, 2011). První hydrologické bilanční modely byly vytvořeny pány Thornthwaite (1948) a Thornthwaite et. Mather (1955) a od té doby bylo vytvořeno mnoho dalších variant těchto modelů. Kdybychom tedy chtěli dále rozvinout základní bilanci hmoty (rovnice (3.4.1)), musíme dát do vztahu veličiny

$$I = P$$

a

$$O = ET + Q_{\text{výstup}}$$

z rovnice (3.4.3). Rovnice (3.4.1) se následně vydělí intervalem Δt , tudíž získáme

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{I}{\Delta t} - \frac{O}{\Delta t}. \quad (3.4.4)$$

Pro nekonečně malý přítok a odtok bude rovnice (3.4.4) vypadat následovně:

$$\frac{dS}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{I}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{O}{\Delta t}. \quad (3.4.5)$$

Rovnice (3.4.5) lze dále upravit na

$$\frac{dS}{dt} = i - o, \quad (3.4.6)$$

kde

$\frac{dS}{dt}$ je změna (derivace) zásob v čase t [m^3/t],
 o je odtok v čase t [m^3/t],
 i je přítok v čase t [m^3/t].

Pokud bychom brali odtok jako funkci zásoby

$$o = f(S),$$

vzájemný vztah mezi odtokem ze systému a zásobou vody v hydrologickém systému je možno vyjádřit konstitučním vztahem jako

$$o = k \cdot S = \frac{1}{T_{res}} \cdot S, \quad (3.4.7)$$

kde

T_{res} je doba zdržení [t].

Dobou zdržení je průměrný čas, po který voda zůstává v zásobníku (Dingman, 2002; Fish, 2011; Máca, 2010).

3.5 Rozdělení hydrologických modelů

Hydrologický model (matematický), jak jej popsali Daňhelka et al. (2003) je zjednodušeným představením hydrologického systému, který dává do vztahu jeho vstupní a výstupní veličiny. Jsou to fyzikální procesy, které působí na vstupní veličiny a ty se díky tomu následně mění na veličiny výstupní. Tento proces se v matematice nazývá algoritmus soustavy rovnic a popisuje chování a strukturu hydrologického systému. Singh et. Frevert (2006) dělí hydrologické modely na dvě hlavní skupiny - materiálové a symbolické modely.

3.5.1 Materiálové

Mezi materiálové patří:

- **analogové modely**, které jsou založeny na podobnosti fyz.veličin a zákonů, např. simulace toku kapaliny tokem tepla či elektrickým proudem.
- **laboratorní (fyzikální) modely**, které jsou zmenšenými kopiemi originálních předloh (např. právě povodí). Model musí mít stejné vlastnosti, jaké má modelovaný systém. Mezi tyto modely patří dešťové simulátory, modely povodí, lyzimetry, aj. (Dingman, 2002; Singh et. Frevert, 2002, 2006).

3.5.2 Symbolické

Symbolické modely se dle Singh et. Frevert (2006) dále dělí na:

- **nematematické modely**

- **matematické modely**, které se dále dělí na:

- empirické
- teoretické
- koncepční.

Empirické modely

Tzv. black-boxové modely, nejsou založeny na fyzikálním modelu, ale používají (hledají) pouze empirický vztah mezi veličinami vstupními a výstupními. Mezi tyto modely patří např. modely jednotkového hydrogramu, racionální metody nebo neuronové sítě. K uskutečnění výpočetního procesu nepotřebujeme znát mnoho věcí o povodí, postačují pouze kvalitní vstupní data. Empirické modely nejlépe fungují na menších povodí (Máca, 2010; Singh et. Frevert, 2002).

Teoretické modely

Jsou to white-boxové modely, které jsou založeny na numerickém vyjádření diferenciálních rovnic, které vyjadřují příslušný fyzikální zákon - např. zákon zachování hmoty, energie, hybnosti, aj. Tyto modely jsou poměrně náročné na vstupní data a bývají distribuovány v prostoru. Mezi tyto modely patří například Kineros, SHETRAN, SHE, aj. (Daňhelka et al., 2003; Kulhavý et. Kovář, 2002; Singh et. Frevert, 2002).

Koncepční modely

Nazývány grey-boxovými modely, koncepční modely se snaží popsat hydrologický systém z pohledu popisu toků a změny zásoby vody na povodí. Tyto modely potlačují fyzikální podstatu modelu a nejsou příliš detailní. Mezi tyto modely patří např. Nashův model, PDM model, Tank model, BILAN, aj. (Kulhavý et. Kovář, 2002; Singh et. Frevert, 2002, 2006).

3.6 Model BILAN

3.6.1 Popis

Model BILAN (Kašpárek et. Novický, 1997; Kašpárek, 1998) byl vyvinut k simulování prvků hydrologické bilance na povodí. Jedná se o celistvý koncepční hydrologický model, který simuluje složky hydrologické bilance na povodí, kde hranice časového úseku je 1 den, 10 dní či 1 měsíc. Model BILAN je založen na sadě vztahů, které popisují základní principy hydrologické bilance jak v nasycené, tak v nenasyčené zóně (Tallaksen et. Van Lanen, 2004). Model, který byl použit pro tuto práci byl napsán v jazyce C++ a byl spouštěn ve vývojovém prostředí přes příkazovou řádku

po vytvoření makefile. BILAN lze však spustit (a nastavit) také pomocí grafického uživatelského rozhraní (GUI) nebo např. přeložením v programu Code::BLOCKS¹.

Data, jež vstupují do modelu jsou denní/měsíční řady srážek, teploty vzduchu a relativní vlhkosti. Model následně simuluje denní/měsíční časové řady pro potenciální evapotranspiraci, aktuální evapotranspiraci, infiltraci do zóny aerace, perkolaci vody směrem ke zvodním, zásobu vody ve sněhové pokrývce, zásobu vody v půdě a ve zvodních. Dále pak celkový odtok, jež se skládá z přímého odtoku a možného a základního průtoku. Hodnoty teplot se používají k simulaci potenciální evapotranspirace a k rozlišení letního a zimního období. V případě, že byla naměřena sněhová pokrývka, spustí se algoritmy zásoby a tání sněhu. Tající sníh a srážky se vsakují do půdy. Voda, která je vsáknuta a po nějaký čas zdržena v půdě, může být extrahována vegetačním pokryvem. Za situací, při kterých je srážkový úhrn dlouhodobě větší, než potenciální evapotranspirace, jsou přebytky vláhy použity jako zásoba půdní vody. Pakliže dojde k nasycení půdy vlhkostí do takové míry, že již není schopna přijímat další, dojde k procesu perkolace. Perkolace pak může proběhnout dvěma způsoby - hypodermickým odtokem či zvodní. Proces optimalizace se v případě modelu BILAN snaží dosáhnout nejlepší možné korelace pozorovaných a simulovaných odtoků (Kašpárek et. Novický, 1997, 2004; Tallaksen et. Van Lanen, 2004).

V této práci byly využity k optimalizaci měsíční řady dat a tudíž byl použit měsíční model BILANu. Parametry měsíčního modelu viz. tabulka 2.

3.6.2 Data

Vstupní data do modelu jsou čtena z prostého .txt nebo .dat souboru v ASCII kódování. Jednotlivé řádky představují hodnoty v jednotlivém měsíci a jednotlivé sloupce pak hodnoty jednotlivých proměnných. Důležité je, aby byla data seřazena dle hydrologického roku (tj. prvním měsícem by měl být listopad). V tabulce 1 je zobrazen příklad řazení datového souboru dle řádků (Kašpárek et. Novický, 2004).

Jiné možnosti vstupních proměnných - časové řady potenciální evapotranspirace mohou být počítány za a) z hodnot teploty vzduchu nebo její vlhkosti; za b) hodnoty pot.evapotranspirace mohou být načteny přímo ze souboru (Kašpárek et. Novický, 2004).

Validace - po načtení všech vstupních dat modelem, jsou spočítány průměrné hodnoty

¹ke stažení zde: <http://www.codeblocks.org/>

časových řad a tyto jsou následně zobrazeny uživateli, aby mohla proběhnout kontrola správného načtení dat. Toto ale není možné provést ve vývojovém prostředí (Kašpárek et. Novický, 2004).

Transformace - pokud by chtěl uživatel transformovat vstupní data ještě před samotným výpočtem, může využít pomůcku zakomponovanou do BILANu, která provede lineární transformaci dat pomocí uživatelem nastavené konstanty (Kašpárek et. Novický, 2004).

Příklad	Popis
252	1.řádek - celkový počet měsíců vstupních dat
5	2.řádek - počet sloupců v souboru
1980	3.řádek - počáteční hydrologický rok, tj.1980, pokud simulace začíná 1.listopadu 1979
128.8 119.6 9.354 82.83 -1	4. a následující řádky obsahují měsíční data. sloupec 1 - srážky P [mm] sloupec 2 - odtok R [mm] sloupec 3 - teplota vzduchu T [°C] sloupec 4 - vlhkost vzduchu H [%] nebo potenciální evapotranspirace PE [mm] sloupec 5 - volitelná položka - tento sloupec může obsahovat kteroukoliv časovou řadu. Sloupec s touto časovou řadou není použit ve výpočtu a slouží pouze jako součást výstupu z modelu. Uživatel může například řadu základního odtoku B získanou měřením podzemních vod porovnat se základním odtokem vypočítaným modelem BILAN.

Tabulka 1: Popis vstupních dat do modelu BILAN dle Kašpárek et. Novický (2004)

3.6.3 Výpočet potenciální evapotranspirace

Potenciální evapotranspirace lze v modelu BILAN počítat dvěma způsoby:

1) Určením ze součinitele nasycení použitím funkcí, jenž byly odvozeny pro jednotlivé měsíce a pro různé bioklimatické zóny, které byly zpracovány ve formě empirických grafů v Gidrometeoizdat (1976). V modelu BILAN jsou však tyto zóny pouze pro severní polokouli, jelikož takto byly zpracovány ve výše uvedené publikaci. Součinitel nasycení je počítán z hodnot relativní vlhkosti a teploty vzduchu. Bioklimatické zóny použité v modelu BILAN se rozdělují na tundru, listnatý les, smíšený les, jehličnatý les a step. Každá z těchto zón je charakteristická svojí průměrnou teplotou vzduchu a průměrných ročních úhrnů srážek. Pro Českou republiku je rozdělení vegetačních zón určeno pouze teplotou. V původní verzi výpočtu této metody je nutné zadat bioklimatickou zónu zkoumaného povodí. Model v sobě obsahuje interpolační algoritmus, který k interpolaci mezi bioklimatickými zónami používá dlouhodobé průměrné teploty vzduchu měřených na povodí. Ve výstupu z modelu jsou následně zobrazeny informace o dvou bioklimatických zónách, které byly použity při výpočtu potenciální evapotranspirace v konkrétním povodí. Denní data jsou získána z měsíčních hodnot potenciální evapotranspirace vydělených hodnotou 30. Pokud je hodnota součinitele nasycení < 0 , proces se zastaví a je požadována oprava dat. V případě, že koeficient nasycení překročí limity výpočtu, nahradí se tento maximální možnou hodnotou nasycení (Beran et. al., 2011; Kašpárek et. Novický, 2004; VÚV TGM, 2014).

2) Metodou dle Oudina (Beran et. al., 2011), kde výpočet potenciální evapotranspirace je založen na změřené teplotě vzduchu. Rovnice pro výpočet je následující:

$$PET = \frac{0.408 \cdot R_e \cdot (t + 5)}{100}, \text{ pro } (t + 5) > 0, \quad (3.6.1)$$

Pokud bude $(t + 5) \leq 0$, tak $PET = 0$. Rovnice byla odvozena z experimentální studie výpočtu potenciální evapotranspirace, ve které byly porovnávány vzorce výpočtu PET na různých povodí (Beran et. al., 2011; Oudin et. al., 2010). R_e je množství dopadajícího slunečního záření na zemský povrch - to může být odvozeno pro určitou zeměpisnou šířku a délku a pro jakýkoliv den v roce ze sluneční konstanty, ročního období a sluneční deklinace (Allen et. al., 1998; Beran et. al., 2011).

V této práci byla použita 2) metoda, kterou v modelu BILAN prvně použili Beran et. al. (2011).

3.6.4 Určení počáteční zásoby podzemní vody

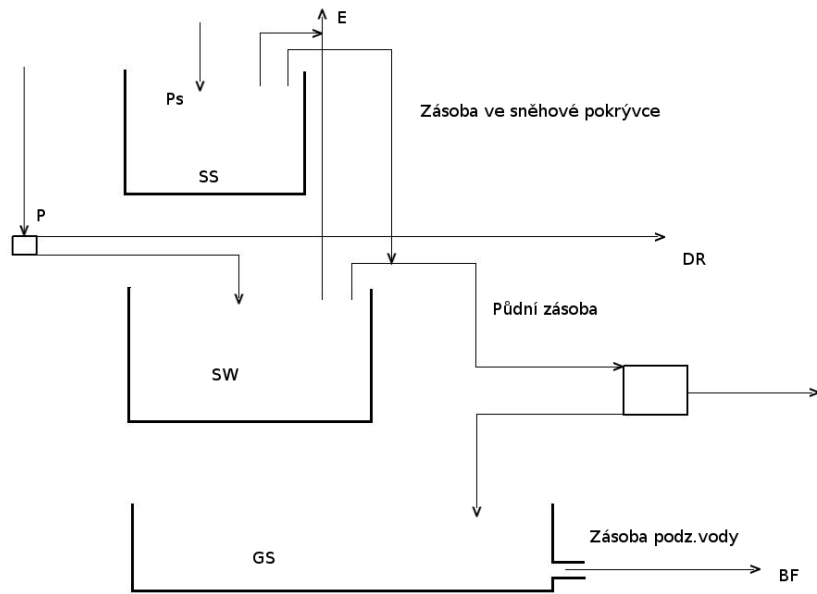
Nastavení počátečních podmínek na povodí může významně ovlivnit výsledky simulace hydrologické bilance. Toto se projeví především na počátku simulace. Počáteční hodnota zásoby podzemní vody je defaultně nastavená na 50mm. Hodnota může být změněna na základě znalosti aktuálních podmínek na povodí v prvním kroku simulace, nebo na znalostech vycházejících z předběžných simulací (Kašpárek et. Novický, 2004).

3.6.5 Parametry modelu BILAN

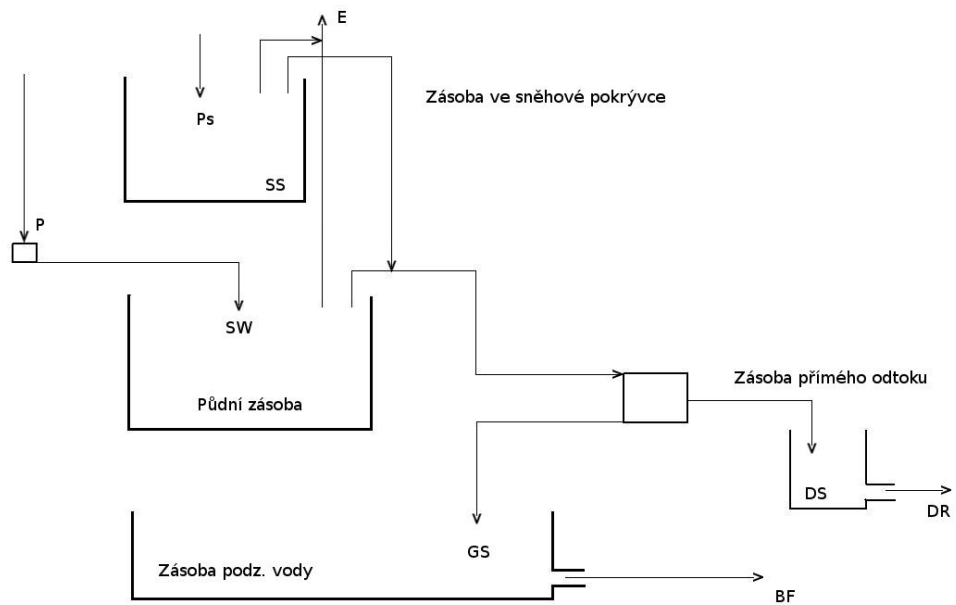
K simulaci generování odtoku je třeba určit volné parametry modelu, a to pro měsíční (obr.3.5) nebo denní (obr.3.6) model v závislosti na tom, která data chceme použít. Tato data jsou zobrazena v tabulce 2 jak pro denní, tak měsíční periodu. Proces optimalizace proběhne tehdy, byly-li nastaveny počáteční hodnoty parametrů a jejich horní a spodní okrajové podmínky. Nastavení těchto parametrů je požadováno po uživateli. Toto ale není případ optimalizace pomocí SCDE modelů, jelikož mohou být spouštěny i bez nastavení počátečních hodnot. Aby byl proces optimalizace úspěšně dokončen, nesmí být počáteční hodnoty parametrů nastaveny blízko hodnotám okrajových podmínek. Pokud by toto nastalo, je uživatel informován chybovým hlášením (error message). Pro proces optimalizace používá program přednastavené hodnoty, jenž nemusí být měněny, nicméně pokud je třeba dosáhnout různorodých výsledků, mohou být změněny parametry z tabulky 2 (Máca, 2015; VÚV TGM, 2014).

Název	Denní model	Měsíční model
Spa	kapacita zásoby půdní vlhkosti [mm]	
Dgm	faktor tání sněhové pokrývky	
Dgw	-	faktor pro výpočet objemu tekuté vody na zemském povrchu v zimním období
Alf	parametr kontrolující přímý odtok ze zásoby	parametr srážko-odtokové rovnice
Soc	parametr kontrolující rozložení perkolace v přímém odtoku a doplnění zásoby podz. vody v letním období	parametr kontrolující rozložení perkolace v hypodermickém odtoku a doplnění zásoby podz. vody v letním období
Mec	parametr kontrolující rozložení perkolace v přímém odtoku a doplnění zásoby podz. vody v případě tání sněhu	parametr kontrolující rozložení perkolace v hypodermickém odtoku a doplnění zásoby podz. vody v případě tání sněhu
Wic	-	parametr kontrolující rozložení perkolace v hypodermickém odtoku a doplnění zásoby vody v zimním období
Grd	parametr kontrolující odtok ze zásoby podzemích vod (základní odtok)	

Tabulka 2: Popis parametrů modelu BILAN dle VÚV TGM (2014)



Obrázek 3.5: Schéma měsíčního modelu BILAN dle Máca (2015)



Obrázek 3.6: Schéma denního modelu BILAN dle Máca (2015)

3.6.6 Optimalizace parametrů - popis SCDE

3.6.6.1 Optimalizace hydrologického modelu

Je snahou o co nejefektivnější využití vhodných systémových vlastností hydrologického modelu v kooperaci se zmenšováním nežádoucích charakteristik. Optimalizace se dělí na lokální a globální. Lokální optimalizace je řešení problému, který je lepší, než všechna ostatní okolní řešení, ale nepředčí globální optimum. Mezi lokální optimalizační algoritmy patří např. algoritmy náhodného prohledávání. Naopak globální optimalizace se snaží najít nejlepší řešení napříč celým problémem i v přítomnosti možných lokálních optim. Do globálních optimalizačních metod patří algoritmy SCDE (Daňhelka et al., 2003; Price et. Storn, 1997; Price et. al., 2005).

3.6.6.2 Klasické schéma SCDE

V této podkapitole budou rozebrány a popsány optimalizační metody, které byly vybrány k posouzení a vzájemnému porovnání. Všechny tyto metody vychází ze skupiny evolučních algoritmů, které napodobují chování evoluce druhů, jež popsal Darwin (1859). Tato práce se konkrétně zabývá metodou Diferenciální evoluce (Price et. Storn, 1997), ze které vychází všechny zde porovnávané optimalizační metody. Diferenciální evoluce je globální optimalizační metodou, ve které je účelem nalézt globálně nejlepší řešení a nezabřednout při tom v lokálním optimu. Diferenciální evoluce má prapůvod v metodě Genetického žhání, kterou objevil Price (1994). V následujících řádcích budou v krátkosti shrnuty komponenty Diferenciální evoluce a vysvětleno, jak Diferenciální evoluce pracuje:

Struktura populace - struktura populace u většiny typů Diferenciální evoluce vychází z vektorových populací, které se skládají z N_p D-dimenzionálních vektorů (N_p - velikost populace, D - dimenze), jenž mají parametry reálných čísel. Rovnice (3.6.2) zobrazuje aktuální populaci $P_{x,g}$, která v sobě obsahuje ty vektory $x_{i,g}$, jenž byly předtím vybrány za akceptovatelné jako výchozí vektory, či porovnáním s ostatními vektory. Veličina g indikuje generaci, ke které vektor náleží. Index populace je značen jako i , parametry vektoru pak indexem j (Price et. Storn, 1997; Price et. al., 2005). Všechny indexy nabývají hodnot, jenž lze vidět v rovnici (3.6.2)

$$P_{x,g} = (x_{i,g}), i = [1, N_p], g = [1, g_{\max}+1], \quad (3.6.2)$$
$$x_{i,g} = (x_{j,i,g}), j = [1, D].$$

Po inicializaci mutuje Diferenciální evoluce náhodně vybrané vektory za účelem vytvoření populace mutovaných vektorů $P_{v,g}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{v,g} &= (\mathbf{v}_{i,g}), i = [1, \mathbf{Np}], g = [1, g_{\max+1}], \\ \mathbf{v}_{i,g} &= (\mathbf{v}_{j,i,g}), j = [1, \mathbf{D}]. \end{aligned} \quad (3.6.3)$$

Každý vektor v aktuální populaci je poté zkřížen s vektorem mutantu, aby byla následně vytvořena zkušební populace vektorů. Během tohoto procesu přepíše zkušební vektory populaci mutovaných vektorů (Das et. Suganthan, 2011; Price et. Storn, 1997; Price et. al., 2005).

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{u,g} &= (\mathbf{u}_{i,g}), i = [1, \mathbf{Np}], g = [1, g_{\max+1}], \\ \mathbf{u}_{i,g} &= (\mathbf{u}_{j,i,g}), j = [1, \mathbf{D}]. \end{aligned} \quad (3.6.4)$$

Podrobnější informace o procesech v modelu Diferenciální evoluce lze nalézt v následujících řádcích.

Inicializace populace - než se vůbec začne populační struktura Diferenciální evoluce inicializovat, musí se nastavit horní a spodní okrajové podmínky. Tyto podmínky mohou být vyjádřeny dvěma D-dimenzionálními vektory b_L pro spodní hranici a b_U pro hranici horní. Jakmile jsou tyto podmínky nastaveny, generátor náhodných čísel přiřadí každému parametru v každém vektoru číslo z předem nastaveného rozmezí hodnot. Inicializační rovnice vektoru vypadá následovně:

$$\mathbf{x}_{j,i,g} = \text{rand}_j(0, 1) \cdot (\mathbf{b}_{j,U} - \mathbf{b}_{j,L}) + \mathbf{b}_{j,L} \quad (3.6.5)$$

kde

$\mathbf{b}_{j,U}$	horní hranice parametru j ,
$\mathbf{b}_{j,L}$	spodní hranice parametru j ,
$\mathbf{x}_{j,i,g}$	je inicializovaný vektor j -tého parametru, i -tého vektoru a g -té generace,
$\text{rand}_j(0, 1)$	je generátor náhodných čísel parametru, který vrací hodnoty z rozsahu $[0,1)$.

Model BILAN však inicializuje výchozí populaci modelů SCDE metodou latinských čtverců (Máca et. al., 2013; Price et. Storn, 1997; Price et. al., 2005).

Mutate - mutuje populaci \mathbf{Np} vybraných jedinců a vytváří populaci mutovaných vektorů $\mathbf{v}_{i,g}$. Rovnice (3.6.6) znázorňuje kombinaci tří různých a náhodně vybraných vek-

torů populace za účelem vytvoření mutovaného vektoru

$$v_{i,g} = x_{r_0,g} + F \cdot (x_{r_1,g} - x_{r_2,g}), \quad (3.6.6)$$

kde

$v_{i,g}$	je mutovaný vektor,
$x_{r_j,g}$	náhodně vybrané vektory z populace,
F	parametr mutace, obvykle nabývá hodnot $\in [0,2)$,
g	je aktuální generace,
r_j	náhodně vybraná, vzájemně se vylučující čísla z rozsahu $[1, N_p]$.

Parametr mutace F je konstantou, kterou si volí uživatel, $x_i = (x_1, \dots, x_D)$ je sada parametrů vektoru, kde $i = 1, \dots, N_p$. D je zde dimenze rodičovského (též cílového) vektoru a N_p velikost populace. V každé generaci g je mutovaný vektor $v_{i,g}$ generován z existujícího člena populace² $x_{r_j,g}$ aplikací mutační strategie. Toto schéma se nazývá DE/rand/1 - avšak model BILAN využívá jiné typy mutace, které jsou závislé na použitém typu Diferenciální evoluce - viz. podkap. 3.6.6.4, 3.6.6.5, 3.6.6.6 a 3.6.6.7 (Price et. Storn, 1997; Price et. al., 2005). Poté následuje proces křížení.

Křížení populace - se používá k doplnění mutace a zvýšení efektivity při nalézání nejlepších jedinců (vektorů). V základním typu Diferenciální evoluce se nejčastěji používají dva druhy křížení - binomické a exponenciální (v BILANu jsou použity modely, které využívají binomické křížení). Binomické křížení je znázorněno v rovnici (3.6.7), kde $\text{rand}_j[0, 1)$ je náhodně vybrané číslo z uvedeného rozsahu (resp. je to generátor náhodných čísel), j_{rand} je index rozhodovací proměnné, který je opět náhodně vybrán, ale z rozsahu $[1, D]$ a používá se k zajištění, že zkušební vektor nebude kopírovat vektor rodičovský. V neposlední řadě je tu křížící konstanta Cr , jež nabývá rozsahu $Cr \leq [0,1]$. Křížící konstanta Cr je uživatelem definovaná hodnota, která má však jistá úskalí - pokud je nastavena přímo na hodnotu 0, uživatel riskuje, že mutovaný vektor bude kopií vektoru rodičovského a tudíž by se postupně zastavil vývoj populace. Pakliže by Cr byla nastavena přímo na hodnotu 1, bude se algoritmus chovat jako náhodné prohledávání. Rovnice (3.6.7) nám říká, že zkušební vektor $u_{i,g}$ bude dědit parametry z mutovaného $v_{j,i,g}$ v tom případě, že náhodně vybrané číslo z generátoru $\text{rand}_j[0, 1)$ bude menší, či rovno hodnotě Cr . Jinak budou parametry zkušebního vektoru děděny z vektoru rodičovského $x_{j,i,g}$. Poté, co jsou vygenerovány

² $x_{r_j,g} = x_{i,g}$

všechny zkušební vektory $u_{i,g}$ z jedné generace o populaci N_p ($0 \leq i \leq N_p$), je každý rodičovský vektor $x_{i,g}$ porovnán s korespondujícím zkušebním vektorem $u_{i,g}$ a v následující generaci je tento vektor nahrazen či ponechán v populaci, jak je patrné z rovnice (3.6.8).

$$u_{i,g} = u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{if } (\text{rand}_j[0, 1] \leq \text{Cr or } j = j_{\text{rand}}) \\ x_{j,i,g} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.6.7)$$

Exponenciální křížení nejprve náhodně vybere celé číslo indexu j z rozsahu $[1, D]$, poté se zvolí celé číslo L z intervalu $[1, D]$, kde L je počet součástí rodiče a D značí dimenzi. Poté, co byly vybrány předchozí veličiny, je proces exponenciálního křížení dle algoritmu (1) následující: k veličinám j a L je v každém cyklu přičtena hodnota 1 (index j je ještě transformován modulo funkcí $j = (j + 1)_D$) a zkušební vektor $u_{j,i,g}$ je roven korespondujícímu mutovanému vektoru $v_{j,i,g}$. Cyklus se opakuje do té doby, dokud nedosáhne výstupní podmínky, kde platí, že dokud hodnota křížící konstanty nebude větší, než náhodná veličina z rozsahu $[0, 1)$ a zároveň hodnota počtu součástí rodiče L musí být menší, než dimenze D (Price et. Storn, 1997; Price et. al., 2005; Tanabe et. Fukunaga, 2014).

Algoritmus 1 Algoritmus exponenciálního křížení

- 1: $u_{i,g} = x_{i,g}, \quad j = \text{rand}[1, D], \quad L = \text{rand}[1, D];$
 - 2: **repeat**
 - 3: $u_{j,i,g} = v_{j,i,g}$
 - 4: $j = (j + 1)_D$
 - 5: $L = L + 1$
 - 6: **until** $(\text{rand}[0, 1) < \text{Cr} \ \& \ L < D)$
-

Selekce populace - díky čemuž je Diferenciální evoluce robustnější a přesnější model, než původní genetické žhání. Selekcce v tomto modelu funguje tak, že pokud je hodnota zkušebního vektoru $u_{i,g}$ rovna a nebo je nižší, než hodnota rodičovského vektoru $x_{i,g}$, bude tento vektor nahrazen v následující generaci, jak lze vidět v rovnici (3.6.8). Diferenciální evoluce porovnává každý vektor zkušební s vektorem rodičovským, ze kterého zkušební vektor dědí parametry.

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{if } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}), \\ x_{i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.6.8)$$

Po zavedení nové populace se proces mutace, křížení a selekce opakuje do té doby,

než je nalezeno optimum, nebo je splněna jedna z podmínek pro ukončení cyklu. K tomu může např. dojít, pokud je dosaženo maxima nastaveného počtu generací (Das et. Suganthan, 2011; Price et. Storn, 1997; Price et. al., 2005; Tanabe et. Fukunaga, 2014).

3.6.6.3 Značení použitých modelů SCDE

DE/best/1/bin	=	DEBOB	=	SCDE1
DE/current-to-best/1/bin	=	DECBB	=	SCDE2
DE/current-to-gr_best	=	DECGB	=	SCDE3
DE/rand/2/bin	=	DERTB	=	SCDE4

3.6.6.4 DE/current-to-gr_best

Úkolem Diplomové práce byla implementace této varianty Diferenciální evoluce do modelu BILAN, a proto je zde tento model popsán mnohem podrobněji, než ostatní použité optimalizační modely Diferenciální evoluce. Model byl realizován a vložen do modelu BILAN ve spolupráci s doc. Ing. Petrem Mácou, Ph.D. a byl též použit v Máca (2015). Tento typ SCDE je založen na schématu DE/current-to-best (Price, 1999), ale narozdíl od tohoto schématu má nový mutační operátor, který používá nejlepší jedince ze skupiny (jejíž velikost je $q\%$ velikosti populace N_p) náhodně vybraných vektorů z aktuální generace g k vytvoření nového rodičovského vektoru. DE/current-to-best naopak používá metodu výběru nejlepšího vektoru z celé populace k vytvoření nového rodičovského vektoru. Další věcí, kterou se schéma DE/current-to-gr_best liší od DE/current-to-best a dalších variant Diferenciální evoluce je proces křížení. Schéma výběru biasovaných rodičů je zde řešeno tak, že se nechá každý mutovaný vektor projít obvyklým procesem binomického křížení ale s jedním p -nejlepším jedincem z aktuální populace. Ostatní typy Diferenciální evoluce používají místo výběru p -nejlepšího jedince rodičovský vektor se stejným indexem (Islam et. al., 2012). Tyto nové způsoby mutace a křížení budou podrobněji vysvětleny v následujícím textu.

Islam et. al. (2012) tento nový typ autoadaptivní Diferenciální evoluce pojmenovali MDE- p BX (modified Differential evolution with p -best crossover). Islam et. al. (2012) navrhli tři algoritmické součásti, jenž mohou být implementovány do různých typů modelů Diferenciální evoluce. Tyto součásti pomáhají zlepšit výkonnost a funkčnost algoritmů Diferenciální evoluce na prostorově složitých fitness kritériích (benchmarks).

1) Islam et. al. (2012) navrhli méně greedy (chamtivou) a více explorativní verzi DE/current-to-best, kterou označili DE/current-to-gr_best, kde "gr" značí group (sku-

pinu). Jak již bylo napsáno v předchozím odstavci, DE/current-to-gr_best vytvoří skupinu, korespondující s každým rodičovským vektorem. Tato skupina je tvořena náhodně vybranými členy populace N_p . Velikost skupiny se odvíjí od nastavení její procentuální velikosti $q\%$ z rozsahu $[1, N_p]$. Nejlepší člen skupiny $q\%$ je poté použit k vytvoření nového rodičovského vektoru. Naproti tomu verze DE/current-to-best/1 vždy použije nejzdatnějšího jedince z celé aktuální populace N_p .

2) Další položkou, kterou Islam et. al. (2012) modifikovali, bylo klasické schéma binomického křížení používané v Diferenciální evoluci. Touto modifikací je v principu zavedení fitness-indukovaného biasu do selekce rodičů z aktuální generace. Toto nové exploitativní (vykořisťovatelské) schéma bylo nazváno p -best křížení. Základním principem p -best křížení je, že mutovaný vektor nemění své součásti s rodičovským vektorem stejného indexu, ale s náhodně vybraným členem z p nejlepších jedinců z aktuální generace pomocí binomického křížení. Za povšimnutí zde stojí, že toto není nový operátor křížení, ale obyčejné binomické křížení se strategií biasovaného výběru rodičovského vektoru.

3) Poslední součástí, jež navrhli Islam et. al. (2012) jsou jednoduchá schémata aktualizací hodnot parametru mutace F a křížící konstanty C_r v každé generaci. Aktualizace těchto parametrů se řídí na základě poznatků jejich úspěšných hodnot, které byly schopny generovat lepší potomky (zkušební vektory) v předchozí generaci.

Je třeba vzít na vědomí, že mutační strategie obsahující selekci na základě úspěšnosti má sklon ke zvyšování exploitace při vytváření fitness selekce. p -best křížení též zvyšuje exploitaci v rámci fitness selekce. Toto je praktická výhoda oproti klasickému schéma Diferenciální evoluce, jež nevybírá rodičovské vektory na základě fitness selekce a proto může dojít ke stagnaci vývoje populace. Na závěr, adaptační schéma pro parametry obsahuje určitý stupeň randomizace, která může podporovat řízené explorativní chování modelu. Je dobré zmínit, že rovnováha mezi exploitací a explorací je v Diferenciální evoluci získána pomocí separace subpopulací (Islam et. al., 2012; Weber et. al., 2009). V následujících částech bude algoritmus MDE- p BX rozebrán podrobněji.

Adaptace modelu

Jak již bylo zmíněno, model Diferenciální evoluce vytvořený Islam et. al. (2012) vychází ze schématu DE/current-to-best/1. Toto schéma bylo vybráno z toho důvodu, že v mnoha předešlých studiích bylo dosaženo lepších výsledků algoritmů, které těžily z procesu nalezení nejlepších hodnot (narozdíl např. od nalezení náhodných), do-

plněných o nejnižší hodnoty objektivní funkce pro minimalizační problémy. Ve srovnání s DE/rand/x, chamtivé (greedy) typy strategií (DE/current-to-best/x, DE/best/x) teží z rychlé konvergence. Chamtivé typy navádí evoluční prohledávání s nejlepším objeveným řešením a tím přispívají k rychlejší konvergenci. Nicméně díky této vykořisťovatelské tendenci může populace v mnoha případech ztratit svoji diverzitu a globální explorativní schopnosti za relativně malý počet generací. Následně je zachycena v lokálním optimu prohledávaného pole. Kromě toho, Diferenciální evoluce používá chamtivou strategii výběru (lepší z cílového nebo zkušebního vektoru je vybrán) a používá pevnou hodnotu mutačního faktoru F (běžně v rozmezí $[0.4-1]$). Tudíž, pokud je rozdílový vektor $x_{r1,g} - x_{r2,g}$ používaný k perturbaci malý (obvykle případ, kdy se k sobě vektory dostanou příliš blízko a populace zkonverguje do malé oblasti - domény), nebudou vektory schopny prozkoumat lepší oblast prohledávaného prostoru a díky tomu nalézt cestu z rozsáhlých plošin či suboptimálních vrcholů a údolí (Islam et. al., 2012).

Díky těmto poznatkům a také k předejití omezení daných rychlou, avšak méně spolehlivou konvergencí u DE/current-to-best/1, Islam et. al. (2012) navrhli méně chamtivou a více explorativní variaci mutační strategie DE/current-to-best/1 nazvanou DE/current-to-gr_best. Tato varianta využívá nejlepší vektor dynamické skupiny, jenž tvoří $q\%$ náhodně vybraných členů populace pro každý cílový vektor. Vyjádření je znázorněno v rovnici 3.6.9.

$$v_{i,g} = x_{i,g} + F_i(x_{gr_best,g} - x_{i,g} + x_{r1^i,g} + x_{r2^i,g}), \quad (3.6.9)$$

kde $x_{gr_best,g}$ je nejlepší z $q\%$ vektorů náhodně vybraných ze stávající populace, zatímco $x_{r1^i,g}$ a $x_{r2^i,g}$ jsou dva odlišné vektory náhodně vybrané ze stávající populace a žádný z nich není rovný $x_{gr_best,g}$ nebo cílovému vektoru. Toto je nutné, aby se zamezilo stejným hodnotám vektorů. Díky tomuto schématu nejsou cílová řešení tak náchylná k inklinaci do stejných nejlepších pozic nalezených v celkové populaci. Také to zabraňuje předčasné konvergenci v lokálním optimu. Bylo zjištěno, že velikost skupiny kolem 15-20% z celkové velikosti populace dává velmi dobré výsledky na většině testovaných problémech (benchmarks) (Islam et. al., 2012).

***p*-best crossover**

Křížení pomocí strategie *p*-best v sobě zahrnuje chamtivou strategii výběru rodičovských vektorů a klasické binomické křížení Diferenciální evoluce. Pro každý dárcovský vektor je náhodně vybrán vektor z p nejlepších vektorů (dle jejich hodnot objektivních funkcí) ve stávající populaci a poté je provedeno klasické binomické křížení (rovnice (3.6.7)) mezi dárcovským vektorem a náhodně vybraným *p*-best vektorem za účelem

vytvoření zkušebního vektoru stejného indexu. Parametr p je lineárně zmenšován s následujícími generacemi dle následujícího schématu:

$$p = \text{ceil} \left[\frac{Np}{2} \cdot \left(1 - \frac{g-1}{g_{\max}} \right) \right], \quad (3.6.10)$$

kde g je aktuální generace, g_{\max} je celkový počet generací a $\text{ceil}(y)$ je zaokrouhlovací funkce, která vrací celé číslo, jenž je větší, než jeho argument y . Tato redukční operace parametru p upřednostňuje exploraci na počátku prohledávání a exploitaci v pozdějších fázích pozvolným snižováním elitistických částí populace s náhodně vybraným členem z části kombinací komponentů dárcovského (Islam et. al., 2012).

Adaptační schéma parametrů v MDE- p BX

Adaptační schéma v MDE- p BX bylo inspirováno schématem metody JADE, kterou navrhli Zhang et. Sanderson (2009), ale také schémata původní Diferenciální evoluce byla zdrojem inspirace.

Adaptace faktoru mutace a měřítka

V každé generaci je faktor měřítka F_i nezávisle generován pro každý cílový vektor následovně:

$$F_i = \text{Cauchy}(F_m, 0.1), \quad (3.6.11)$$

kde $\text{Cauchy}(F_m, 0.1)$ je náhodné číslo vybrané z Cauchyho rozdělení s lokálním parametrem mutace F_m a měřítkem 0.1. Hodnota F_i je regenerována, pokud $F_i \leq 0$ nebo $F_i > 1$. Proměnná F_{success} značí sadu úspěšných faktorů měřítka aktuální generace. Mutační faktor F_m pro Cauchyho rozdělení je v počátku nastaven na hodnotu 0.5 (nastavení je zakomponováno do modelu, tudíž nastavení jakékoliv hodnoty tohoto parametru v nastavení parametrů v příloze A pro optimalizaci modelu BILAN, nemá vliv na výsledek optimalizace) a je poté aktualizován na konci každé generace dle následujícího vzorce:

$$F_m = w_F \cdot F_m + (1 - w_F) \cdot \text{mean}_{\text{Pow}}(F_{\text{success}}). \quad (3.6.12)$$

Faktor váhy w_F kolísá náhodně mezi hodnoty 0.8 - 1 následovně:

$$w_F = 0.8 + 0.2 \cdot \text{rand}(0, 1), \quad (3.6.13)$$

kde $\text{rand}(0, 1)$ značí náhodné číslo generované z normálního rozdělení v rozmezí 0 a 1. mean_{Pow} označuje mocniný průměr a je počítán dle vzorce:

$$\text{mean}_{\text{Pow}}(F_{\text{success}}) = \frac{\sum_{x \in F_{\text{success}}} x^n}{|F_{\text{success}}|}^{\frac{1}{n}}, \quad (3.6.14)$$

kde $|F_{success}|$ značí velikost sady $F_{success}$. Proměnná n je nastavena na hodnotu 1.5 díky předchozím zkušenostem a dobrými výsledky na rozmanitých testovaných problémech (Islam et. al., 2012; Zhang et. Sanderson, 2009).

Adaptace pravděpodobnosti křížení

V každé generaci je pravděpodobnost křížení Cr_i každého jednoho vektoru nezávisle vytvářena dle:

$$Cr_i = Gaussian(Cr_m, 0.1), \quad (3.6.15)$$

kde $Gaussian(Cr_m, 0.1)$ je náhodné číslo generované Gaussovo rozdělením s průměrem Cr_m a standardní odchylkou 0.1. Cr_i je obnovováno jakmile spadne mimo interval $[0,1]$. $Cr_{success}$ je poté sada všech úspěšných pravděpodobností křížení Cr_i v aktuální generaci. Průměr Cr_m je na počátku nastaven na hodnotu 0.6 (stejný případ jako u počáteční hodnoty F_m - nastavení je zakomponováno do modelu, tudíž nastavení křížení v nastavení modelů SCDE nemá vliv na výsledek optimalizace) a poté je aktualizována na konci každé generace dle:

$$Cr_m = w_{Cr} \cdot Cr_m + (1 - w_{Cr}) \cdot mean_{Pow}(Cr_{success}), \quad (3.6.16)$$

s váhou, která rovnoměrně náhodně kolísá mezi hodnotami 0.9 a 1, viz. následující rovnice.

$$w_{Cr} = 0.9 + 0.1 \cdot rand(0, 1) \quad (3.6.17)$$

Mocninný průměr je počítán jako

$$mean_{Pow}(Cr_{success}) = \frac{\sum_{x \in Cr_{success}} x^n}{|Cr_{success}|}^{\frac{1}{n}}, \quad (3.6.18)$$

kde $|Cr_{success}|$ značí velikost sady $Cr_{success}$. I zde bylo za konstantu n vybráno číslo 1.5 v závislosti na předchozích zkušenostech (Islam et. al., 2012).

Některé předchozí studie s Diferenciální evolucí ukázaly, že mutační faktor F je podstatný při kontrolování diverzity populace a má velký účinek na explorativní chování Diferenciální evoluce. Díky použití mocninného průměru v F_m bylo dosaženo vyšších hodnot F_m , což ve výsledku vedlo k větším odchylkám cílových vektorů a to zabraňovalo předčasné konvergenci v lokálním optimu. Podstatou $F_{success}$ je, že si zapamatuje úspěšné parametry faktoru měřítka v aktuální generaci, čímž zvyšuje šanci k vytvoření lepších dárcovských vektorů. F_m je používáno jako lokační parametr Cauchyho rozdělení, které diverzifikuje hodnoty F více, než ve srovnání s normálním rozdělením.

Výhodou je, že Cauchyho rozdělení má mnohem větší rozsah, než Gaussovo rozdělení a tudíž pokud je globální optimum daleko od aktuálně prohledávaného bodu, jsou brány i hodnoty F ze vzdálených částí prohledávané oblasti. Tyto hodnoty dávají ještě stále uspokojivou odchylku, a je tedy zabráněno předčasné konvergenci (Islam et. al., 2012).

Adaptace Cr_m je též založena na zaznamenání aktuálně úspěšných hodnot pravděpodobnosti křížení a tyto jsou použity k řízení generace nových Cr_i . $Cr_{success}$ zaznamenává úspěšné hodnoty Cr a generuje lepší potomstvo, jenž má větší šanci na přežití. V tomto případě je však ke generaci Cr hodnot použita klasická normální distribuce s průměrem Cr_m a odchylkou 0.1 a to z důvodu, že zde není nutný větší rozsah při adaptaci pravděpodobnosti křížení. Použitím mocinného průměru místo aritmetického v adaptaci Cr_m , vede k vyšším hodnotám Cr a k eliminaci systematické chyby při menších hodnotách Cr během sebe-adaptace (Islam et. al., 2012).

3.6.6.5 DE/best/1/bin

Tento model je vlastně původním typem Diferenciální evoluce popsané na začátku této kapitoly jen s tím rozdílem, že tato optimalizace používá jiný druh mutačního schéma a díky tomu se řadí mezi chamtivé typy Diferenciální evoluce. Model vždy vybere nejlepší ze všech vektorů jako základní (base) vektor, přidá jeden škálovaný vektorový rozdíl a následně vytvoří zkušební vektor pomocí binomického křížení výsledného mutačního vektoru s cílovým vektorem. Základní vektor algoritmu má vždy nejnižší hodnotu objektivní funkce v aktuální generaci (Price, 1999; Price et. al., 2005). Mutační schéma je následovné:

$$v_{i,g} = x_{best,g} + F \cdot (x_{r1^i,g} - x_{r2^i,g}), \quad (3.6.19)$$

kde je oproti klasickému schématu z rovnice (3.6.6) $r0 = best$ dle Price et. al. (2005) když:

$$r0 = best, \text{ if } \forall i \in (1, \dots, Np), f(x_{best,g}) \leq f(x_{i,g}). \quad (3.6.20)$$

3.6.6.6 DE/current-to-best/1/bin

Model je opět odnoží původního typu Diferenciální evoluce, oproti kterému se liší mutačním schématem. DE/current-to-best/1/bin vždy použije nejsilnějšího (a tudíž nejlepšího) jedince dle jeho fitness z celé aktuální populace k vytvoření cílového (rodičovského) vektoru. Tato varianta se řadí mezi chamtivé typy Diferenciální evoluce a její mutační schéma je následující:

$$v_{i,g} = x_{i,g} + F \cdot (x_{best,g} - x_{i,g}) + F \cdot (x_{r1^i,g} - x_{r2^i,g}). \quad (3.6.21)$$

I v tomto případě se používá binomické křížení k vytvoření zkušebního vektoru (Qin et. Suganthan, 2005; Zhang et. Sanderson, 2009).

3.6.6.7 DE/rand/2/bin

Tato optimalizace je stejná, jako schéma DE/rand/1, jenž bylo popsáno na začátku kapitoly 3.6.6. Rozdíl tkví v tom, že na mutační schéma používá navíc další diferenční vektory, což značí číslice 2 v názvu. Rovnice mutace bude vypadat takto:

$$v_{i,g} = x_{r1,g} + F \cdot (x_{r2,g} - x_{r3,g}) + F \cdot (x_{r4,g} - x_{r5,g}). \quad (3.6.22)$$

Jelikož se jedná o metodu, která má v názvu bin, je k vytvoření zkušebního vektoru používáno binomické křížení (Neri et. Tirronen, 2009; Price et. al., 2005).

3.6.7 Kalibrace parametrů

Ke kalibraci parametrů modelu je použit optimalizační algoritmus. Optimalizace se zde snaží o dosažení co možná největší podobnosti (fit) mezi pozorovanými a simulovanými hodnoty odtoku. V modelu BILAN jsou k dispozici dvě optimalizační metody - lokální (binární prohledávání) a globální (SCDE). Model BILAN použitý v této práci byl zkalibrován globální optimalizační metodou, pomocí měsíčních dat náhodně vybranou sadou 50 povodí z území ČR z let 1931-2007. Délka záznamu pozorování (celkový počet měsíců vstupních dat) se u jednotlivých povodí lišila.

Počet iterací

Hodnoty parametrů modelu vycházející z optimalizace mohou být ovlivněny počtem iteračních kroků. Hodnota počtu iterací je defaultně nastavena na 500. Tohoto čísla bylo dosaženo praktickými zkušenostmi s modelem a číslo nemusí být měněno. Program může být spuštěn taktéž bez nastavených počátečních hodnot (pro SCDE). Toho lze dosáhnout nastavením počtu iterací na číslo 0 (VÚV TGM, 2014).

Lokální algoritmus (binární prohledávání)

Kalibrace parametrů gradientní metodou se skládá z kroků, ve kterých mohou být optimalizační kritéria nastavena defaultně, či individuálně (a nezávisle) pro každý krok optimalizace. Kritéria používaná v modelu BILAN jsou popsána v podkapitole 4.1. V "klasické" verzi optimalizačního procesu by bylo použito kritérium MSE (Mean Square Error), jenže jeho nevýhodou je, že nedokáže zachytit přijatelnou podobnost hodnot měřených a simulovaných odtoků. Toto ale může být řešeno použitím metody sumy relativních odchylek, kterou v modelu reprezentuje kritérium MAPE (Mean Absolute Percentage Error). Nicméně toto kritérium často zhoršuje podobnost průměrných

hodnot odtoků a tudíž zde byl vyvinut proces, jež kombinuje kritéria MSE a MAPE (VÚV TGM, 2014).

SCDE

Tento model lze spustit ke kalibraci i bez zadaných počátečních hodnot (narozdíl od binárního prohledávání). Modelu BILAN používá k celkové evoluci globální algoritmus SCE-UA (Shuffled Complex Evolution - University of Arizona), který navrhli Duan et. al. (1993) nebo algoritmus Diferenciální evoluce (Price et. Storn, 1997). Informace se sdílí pomocí promíchávání (shufflování) k dosažení vyšší efektivity algoritmu. SCE-UA kombinuje simplexovou metodu s metodou komplexního promíchávání. Použité algoritmy Diferenciální evoluce, kterými byl optimalizován model BILAN v této práci, jsou popsány v kapitole 3.6.6. Jako optimalizační kritérium pro všechny modely SCDE bylo v této práci použito Nash-Sutcliffe.

Uživatel může definovat následující nastavení algoritmu dle VÚV TGM (2014), které bylo rozšířeno o nastavení pro DE/current-to-gr_best (Islam et. al., 2012):

typ optimalizačního kritéria (k výběru kritéria z kapitoly 4.1),

typ Diferenciální evoluce (k výběru jsou algoritmy z kapitoly 3.6.6),

počet komplexů (*number_of_Complexes*),

velikost populace v komplexu M (*population_in1complex*),

křížící konstantu Cr (*Crossoverr*),

parametr mutace F (*F_mutation*),

parametr mutace K (*K_mutation*),

počet shufflování (*Number_of_shuffles*),

počet generací (*N_generations_in_1Complex*),

počet opakování optimalizace (*help_ensemble_runs*),

q-% nejlepších jedinců k vytvoření rodičovského vektoru
(*best_pop_perc_CURTGRBEST*) - pouze pro DE/current-to-gr_best.

Nastavení modelů, použitých v této práci je v příloze A.

3.6.8 Výsledky

Po skončení optimalizace se výsledné hodnoty optimalizovaných parametrů a průměrných hodnot všech proměnných zobrazí v tabulce přehledu výsledků grafického rozhraní. Výstup z modelu může být uložen ve formě textového souboru nebo grafu z vybraných časových řad (pouze pro grafické uživatelské rozhraní). Pro výstup z modelu do souboru jsou k dispozici tři typy řad - denní řady (pouze pro denní typ), měsíční řady a měsíční charakteristiky. Denní či měsíční řady jsou časové řady vstupních a výstupních proměnných, které byly zpracovány modelem. Měsíční charakteristiky obsahují průměrné hodnoty, minima a maxima, jenž byly odvozeny z měsíčních časových řad pro každý měsíc v roce a každou proměnnou pro kompletní hydrologické roky. Pokud nejsou k dispozici žádná či relevantní data pro konkrétní proměnnou, vypíše se hodnota NA (Kašpárek et. Novický, 2004; VÚV TGM, 2014).

Součásti hydrologické bilance (P, R, RM, BF, B, I, DR, PET, ET, INF, PERC, RC, POD, POV, PVN, VYP) jsou vyjádřeny v [mm/den] nebo [mm/měsíc]. Komponenty zásoby vody (SW, SS, GS, DS, DEJV) jsou vyjádřeny jako sloupce vody v [mm]. Pokud je nastaveno "Volume" v předvolbě aplikace, budou součásti hydrologické bilance vyjádřeny v [m³/s] (VÚV TGM, 2014). Význam a popis proměnných je zobrazen v tab.3, 4, 5 a 6.

V případě této práce však byly vybrány pouze hodnoty simulovaných odtoků RM [m³/s], jenž byly vypsány do 50 .txt souborů, které představují 50 různých povodí a toto bylo provedeno pro každý ze čtyř použitých optimalizačních algoritmů Diferenciální evoluce. Výsledky byly následně porovnány se vstupními (měřenými) hodnotami. Fitness hodnoty optimalizačního kritéria Diferenciální evoluce, které bylo použito, se vypisovaly do zvláštního .txt souboru (není součástí přílohy).

Grafické vyjádření výsledků se zobrazuje v záložce "Plots", která je součástí grafického uživatelského rozhraní (GUI) po finálním výpočtu. Časové řady lze zobrazit jak denní, tak měsíční. K dispozici jsou čtyři typy výstupu měsíčních charakteristik - průměry, minima, maxima, boxploty (1. a 3.kvartil + průměru a rozsah od mi-

nima a maxima časové řady). Pokud je požadován specifitější rozbor výsledků, je možné využít grafy kvantilů - měrné křivky překročení, grafy Gumbelova rozdělení (pro extrémní hodnoty měsíčních řad), Q-Q grafy (rozptylový graf pozorovaných a simulovaných odtoků). Grafy mohou být ukládány ve formátu PNG či PDF (VÚV TGM, 2014). Grafické vyjádření výsledků není součástí vývojového prostředí, ve kterém byl model spouštěn.

Tudíž bylo grafické a statistické vyhodnocení výsledků této práce bylo provedeno v programu R, resp. v uživatelském rozhraní zvaném Rstudio a je shrnuto v kapitole 5 a přiloženo v přílohách B a C. Koeficienty využití k posouzení a vyhodnocení výsledků jsou popsány v podkapitole 4.1.

Symbol	Denní model	Měsíční model
Vstupní proměnné		
P	srážky na povodí	
T	teplota vzduch	
H	vlhkost vzduchu	
R	pozorovaný odtok	
B	odvozený zákl.odtok	
WEI	váhy pro kalibraci odtoku	
POD	vyjmutí podz.vod	
POV	vyjmutí zaznamenaných povrch.vod	
PVN	vyjmutí nezaznamenaných povrch.vod	
VYP	odběr vody	

Tabulka 3: Popis proměnných modelu dle VÚV TGM (2014)

Symbol	Denní model	Měsíční model
Součásti hydrologické bilance - denní nebo měsíční úhrny		
PET	potenciální evapotranspirace	
ET	evaporace na povodí	
INF	infiltrace do půdy	
PERC	perkolace skrz půdní vrstvy	
RC	plnění půdních zásobníků	
I	-	hypodermický odtok
DR	přímý odtok	
BF	simulovaný základní odtok	
RM	simulovaný celkový odtok	

Tabulka 4: Popis proměnných modelu dle VÚV TGM (2014)

Symbol	Denní model	Měsíční model
Součásti zásoby vody		
SS	zásoba sněhu	
SW	vlhkost půdy - zásoba vody v zóně aerace	
GS	zásoba podz.vody	
DS	zásoba přímého odtoku	-
DEFV	deficit objemů	

Tabulka 5: Popis proměnných modelu dle VÚV TGM (2014)

Symbol	Denní model	Měsíční model
Ostatní proměnné neuvedené ve výstupním souboru		
POT	-	srážková voda nebo tání sněhu (objem limitován teplotou vzduchu)
AKT	-	voda ve formě sněhu schopna tání a následné infiltrace
MELT	tání sněhu	-
RDS	přítok do zásoby přímého odtoku	-

Tabulka 6: Popis proměnných modelu dle VÚV TGM (2014)

4 Účelové funkce, hydrologická kritéria

Tato kapitola obsahuje shrnutí vyhodnocovacích metod, které byly použity v této Diplomové práci.

4.1 Použité objektivní funkce

K vyhodnocení výsledků optimalizace byla použita kritéria, která jsou implementována v modelu BILAN. K tomu, aby byl rozpoznán dobrý model, porovnávají se hodnoty měřené (v našem případě se jednalo o měsíční odtoky z povodí) se simulovanými (tj. residuum), které byly optimalizovány každou z použitých metod Diferenciální evoluce v modelu BILAN.

4.1.1 MAE

Střední absolutní chyba - jedná se o odhad střední hodnoty absolutních velikostí reziduí. Za dobrý model se považuje tehdy, pokud se hodnota blíží číslu 0. Nabývá pouze kladných hodnot a to v rozmezí $(0, \infty)$.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (|Q_{\text{obs}_i} - Q_{\text{sim}_i}|) \quad (4.1.1)$$

Q_{obs}	je měřený odtok v čase t [m^3/t],
Q_{sim}	je simulovaný odtok v čase t [m^3/t],
n	je n -hodnot vstupních dat (měřená i simulovaná data musí mít stejnou délku, tudíž stejné n),
i	aktuální hodnota z rozmezí $[1, \dots, n]$.

4.1.2 MSE

Střední kvadratická chyba - je to odhad rozptylu reziduí. MSE v sobě zahrnuje jak rozptyl odhadu, tak jeho systematickou chybu. Nevýhodou je, že velké hodnoty mají kvadratický vliv. Dobrý model se pozná podle toho, že se hodnoty MSE blíží 0 a to v rozmezí $(0, \infty)$.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}_i} - Q_{\text{sim}_i})^2 \quad (4.1.2)$$

4.1.3 MRE

Střední relativní chyba - je to odhad středních relativních reziduí. MRE zvýrazňuje rozdíl mezi malými a velkými hodnotami. Mezi jeho nevýhody patří nulování kladných chyb chybami zápornými - tzn. může dojít ke zkreslení výsledků. Dobrý model MRE je, pokud se hodnoty blíží 0 a to v rozmezí $(-\infty, \infty)$.

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{\text{obs}_i} - Q_{\text{sim}_i}}{Q_{\text{obs}_i}} \right) \quad (4.1.3)$$

4.1.4 MAPE

Střední absolutní procentuální chyba - nebo také střední absolutní procentuální odchylka. Je to nejpoužívanější metoda k měření předpovědní chyby. Pokud se někde v časové řadě Q_{obs} , jenž má být vyhodnocena, objeví číslo 0, bude výpočet chyby nemožný, jelikož by se jednalo o dělení nulou. MAPE nabývá rozmezí $(0, \infty)$ a model je dobrý, pokud jsou hodnoty MAPE blízko číslu 0.

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{\text{obs}_i} - Q_{\text{sim}_i}}{Q_{\text{obs}_i}} \right| \quad (4.1.4)$$

4.1.5 NS

Nash-Sutcliffe - aneb koeficient determinace. Porovnává rozptyl hodnot modelu, tj. variabilitu dat s variabilitou reziduí. NS lze pokládat za dobrý model, pokud jsou hodnoty blízko 1. Rozmezí NS je $(-\infty, 1)$, ale 0 je mezní hranicí k nezahození modelu.

$$\text{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}_i} - Q_{\text{sim}_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}_i} - \bar{Q})^2} \quad (4.1.5)$$

Kde \bar{Q} je aritmetický průměr:

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{\text{obs}_i}. \quad (4.1.6)$$

4.1.6 LNNS

Logaritmická verze NS. Jelikož NS není moc citlivý při vyhodnocování modelování nízkých hodnot odtoků, tak bývá k vykompenzování těchto omezení používán LNNS, který přiřazuje vyšší váhy nízkým hodnotám odtoků.

$$\text{LNNS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln Q_{\text{obs}_i} - \ln Q_{\text{sim}_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln Q_{\text{obs}_i} - \ln \bar{Q})^2} \quad (4.1.7)$$

Toto kritérium však nebylo použito pro vyhodnocování výsledků této práce.

5 Vyhodnocení

5.1 Metodika

Tato práce si vzala za úkol naprogramovat nový model Diferenciální evoluce, implementovat ho do modelu BILAN a porovnat jej s ostatními, již implementovanými optimalizačními algoritmy Diferenciální evoluce. Po naprogramování a výpočtech modelů se práce zaměřila na:

1.úkol: který byl zaměřen na porovnání optimalizačních algoritmů a jejich vyhodnocení pomocí objektivních funkcí a Wilcoxonova testu. Toto je vyhodnoceno v podkapitole 5.5

2.úkol: který se zabýval změnou odtoků na 1 vybraném povodí - tj. porovnáním měřených a simulovaných odtoků. Toto je popsáno v podkapitole 5.6.

5.2 Data

K optimalizaci parametrů modelu BILAN pomocí algoritmů Diferenciální evoluce byla použita data 50 povodí České republiky v měsíčním kroku bilance. Předpokládalo se, že povodí nebyla ovlivněna lidskou činností a data by tedy neměla být zkreslena např. odběrem vody pro průmyslové či jiné provozy. Data byla poskytnuta ČHMÚ a upravena dle metodiky VÚV TGM. Tento setup (rozšířený na 233 povodí) byl použit v publikacích Hanel et. al. (2012, 2013); Máca (2015).

5.3 Nastavení optimalizace pro výpočet

Pro výpočet optimalizačních algoritmů Diferenciální evoluce byla použita 4 různá nastavení pro každý typ Diferenciální evoluce. Tato nastavení jsou v syrové formě k nahlédnutí v příloze A. Vysvětlivky k nastavení:

OptCritType_DE - typ optimalizačního kritéria, číslo značí typ kritéria - 0=MSE, 1=MAE, 2=MAPE, 3=NS, 4=LNNS, 5=MRE

DETYPE - typ Dif.evolve, číslo značí typ Diferenciální evoluce - 0=DE/best/1/bin, 1=DE/current-to-best/1/bin, 2=DE/rand/2/bin, 3=DE/current-to-gr_best

number_of_Complexes - počet komplexů

population_in1complex - počet modelů v 1 komplexu

Crossover - index křížení Cr

F_mutation - mutační faktor F

K_mutation - mutační faktor K

Number_of_shuffles - počet promíchávání

N_generations_in_1Complex - počet generací v 1 komplexu

help_ensemble_runs - počet opakování výpočtu

best_pop_perc_CURTGRBEST - procentuální index velikosti skupiny q%
(pouze pro DE/current-to-gr_best)

V nastavení algoritmů Diferenciální evoluce se měnila pouze nastavení křížení Cr a mutačního faktoru F. Výjimkou byl typ SCDE3, který byl už v základu nastaven na Cr=0.6 a F=0.5 dle Islam et. al. (2012). Proto byly nastaveny 4 různé hodnoty procentuálního indexu velikosti skupiny q%. Optimalizační kritérium bylo pro všechny typy nastaveno Nash-Sutcliffe, počet komplexů = 4, počet modelů v 1 komplexu = 100, mutační faktor K = 0.85, počet promíchávání = 5, počet generací v 1 komplexu = 10 a počet opakování = 100.

5.4 Statistické metody vyhodnocení

5.4.1 Vyhodnocování testování hypotéz

Testování hypotéz je založeno na platnosti nulové nebo alternativní hypotézy. Pokud jsou splněny předpoklady pro použití testu a za platnosti nulové hypotézy, bude testovací kritérium (náhodná veličina) sledovat určité rozdělení. Protiklad nulové hypotézy je hypotéza alternativní. Alternativní hypotéza obvykle popírá hypotézu nulovou. Hodnoty testovacího kritéria, které nejsou za platnosti nulové hypotézy moc pravděpodobné, se odepíší a nulová hodnota se zamítne (i v případě, že by mohla platit). Pak lze tvrdit, že byla prokázána alternativní hypotéza. Odepsané hodnoty testovacího kritéria jsou chyby prvního řádu, kde by nulová hypotéza mohla platit, ale

je zamítnuta. Chyba prvního řádu je kvantifikována pomocí hladiny významnosti α , která se nejčastěji volí 0.1, 0.05, 0.01, 0.001. Odepsané hodnoty se vymezují v kritických oborech kritickými hodnoty. Kritické hodnoty jsou kvantily rozdělení, které odpovídají hladině významnosti a jsou sledovány testovacími kritérii. Konstrukce kritických oborů je nastavena tak, aby hodnoty v nich obsažené byly téměř nepravděpodobné pro nulovou hypotézu, ale pro alternativní hypotézu by měly být přijatelné. Tudíž, pokud spadne hodnota testovacího kritéria do kritického oboru, nulová hypotéza je zamítnuta na úkor alternativní, která leží na hladině významnosti α . S klesající hodnotou hladiny významnosti se zvyšuje obtížnost zamítnutí nulové hypotézy. Test pak ale ztrácí svoji sílu. Porovnání se proto uskutečňuje s hodnotami náhodných veličin a z hladin významnosti se k tomuto účelu stávají hodnoty kritické. Lze zvolit i alternativní cestu a to modifikací hodnoty testovacího kritéria, která se následně porovnává s hladinou významnosti. Toto porovnání probíhá na úrovni pravděpodobnosti. Modifikovaná hodnota testovacího kritéria se nazývá p-value a je nastíněna v kapitole 5.4.3 (Biskup, 2005).

5.4.2 Wilcoxonův test

Tato metoda se používá k vyhodnocení jednosložkových nebo párových pokusů, u kterých pozorovaná veličina nekoresponduje s Gaussovo rozdělením. V případě této práce byl k vyhodnocení objektivních funkcí použit párový test, který vyhodnocoval nejlepší hodnoty objektivních funkcí každé optimalizační procedury Diferenciální evoluce. Wilcoxonova metoda testuje domněnku ekvality distribučních funkcí na základě ověření symetrického rozložení pozorované náhodné veličiny. Wilcoxonův test obecně vychází z párových hodnot dvou měřených proměnných X a Y z výběrového souboru (měření před a po pokusném zásahu). Zprvce se zjišťují rozdíly mezi párovými hodnotami. Tento rozdíl je zde označen proměnnou Z . V některých případech bývají hodnoty Z záporné, jindy kladné a při shodě obou hodnot X, Y jsou rozdíly nulové, které se z následujícího výpočtu hodnocení vyřazují. Zadruhé se nenulové rozdíly uspořádají vzestupně a to bez ohledu na znaménko (např. $Z_4=|1.31|$, $Z_2=| - 2.48|$, $Z_9=| - 3.14|$, $Z_6=|3.15|$, ...). Zatřetí se každému rozdílu přiřadí pořadí (1., 2., 3., 4., ..., n), kde n je počet párů s nenulovým rozdílem. Součet kladných a záporných rozdílů by se neměl moc lišit, jelikož rozdíly by měly být symetricky rozloženy kolem 0, tj. součet záporných a kladných rozdílů by měl být 0. Začtvrté se určí proměnná, která bude odpovídat součtu pořadí kladných rozdílů (např. W_+) a proměnná, jenž bude odpovídat součtu pořadí záporných rozdílů (např. W_-). Poté platí vzorec:

$$W_- + W_+ = \frac{n \cdot (n + 1)}{2}, \quad (5.4.1)$$

jenž je možno použít k ulehčení výpočtu. Ta hodnota součtů W_- a W_+ , která bude menší, bude následně použita jako testovací kritérium, na jehož základě se rozhodne o platnosti nulové hypotézy:

$$W = \min(W_-, W_+). \quad (5.4.2)$$

Zapáté se porovná spočítané testovací kritérium W (hodnota vypočtená na základě náhodného výběru z dat, které jsou testovány) s kritickou hodnotou, jenž byla tabulována pro konkrétní n a zvolenou hladinu významnosti α (např. 0.05 pro 95% jistotu správnosti rozhodnutí). Pokud je

$$W < W_{(\alpha, n)}, \quad (5.4.3)$$

hypotéza o shodě rozdělení veličiny X a Y je zamítnuta. To znamená, že hodnoty před a po pokusném zásahu se ve svém rozlišení odlišují = pokusný zásah byl úspěšný. Pakliže

$$W > W_{(\alpha, n)}, \quad (5.4.4)$$

hypotéza o shodě rozdělení veličiny X a Y nemůže být zamítnuta. To znamená, že se hodnoty před a po pokusném zásahu nerozlišují ve svém rozdělení = pokusný zásah byl neúspěšný (Wilcoxon, 1945; Bedáňová, 2012).

Na 10.řádku pseudokódu 2 lze vidět, že první vstupní veličina je matice objektivní funkce všech typů Diferenciální evoluce s jejich nejlepšími hodnotami konkrétní objektivní funkce. Jedná se o nejlepší hodnoty NS všech použitých typů Diferenciální evoluce. Druhá vstupní veličina je totožná matice objektivní funkce. Pomocí "for" smyček se tyto matice porovnávají navzájem a následně se z Wilcoxonovy funkce extrahuje hodnota p-value pro každý typ Diferenciální evoluce. Funkce pro výpočet Wilcoxonova testu byla převzata ze základní statistické knihovny programu Rstudio.

Algoritmus 2 Pseudokód Wilcoxonova testu na příkladu NS

```
1: NSbox=data.frame(
2:   DEBOB=NSbestBOB,
3:   DECBB=NSbestCBB,
4:   DECGB=NSbestCGB,
5:   DERTB=NSbestRTB)
6:
7: NSpvall=matrix(nrow=4,ncol=4)
8:   for(i in 1:4){
9:     for(j in 1:4){
10:      NSwt=wilcox.test(as.matrix(NSbox)[i],as.matrix(NSbox)[j],
11:        alternative="less")
12:      NSpvall[i,j] = NSwt$p.value
13:    }
14:  }
15: xtable(NSpvall,digits=6)
```

5.4.3 Hladina významnosti

Aby byla hodnota p-value konkrétně definována, musí být po provedení testu známy hodnoty testovacího kritéria a alternativní hypotézy. p-value je vlastně nejnižší hladinou významnosti, která je uskutečnitelná. Určuje se na základě hodnoty testovacího kritéria, což je založeno na výsledku kvantifikace výběru. Při tomto lze ještě zamítnout nulovou hypotézu. p-value však podává o výsledku statistického testování více informací, než jen informace o zamítnutí či nezamítnutí nulové hypotézy. Lze předpokládat, že pokud bude výsledek p-value = 0.02, je možné zamítnout nulovou hypotézu na hladinách významnosti $a = 0.1$ a $a = 0.05$. Toto však není možné provést pro hladiny významnosti s hodnotami např. $a = 0.01$ nebo $a = 0.001$. Tedy nejnižší hladina významnosti, na které lze nulovou hypotézu zamítnout je $a = 0.02$. Platí jednoduché pravidlo, při kterém se rozhodne o výsledku testu a zamítnutí či nezamítnutí nulové hypotézu. Spočívá v porovnání p-value a hladiny významnosti a :

- 1) zamítnutí nulové hypotézy, pokud p-value $\leq a$,
- 2) nezamítnutí nulové hypotézy, pokud p-value $> a$.

Počítačové statistické programy však kalkulují hodnotu p-value pro oboustrannou hypotézu i v případě jednostranné varianty. To je zvláště případ tzv. t-testů. Program vynásobí absolutní hodnotu z hodnoty testovacího kritéria číslem 2. To nastane poté,

kdy spočítá pravděpodobnost, s jakou náhodná veličina, jenž sleduje teoretické rozdělení, nabyde větší hodnotu, než je absolutní hodnota z hodnoty kritéria. Tato vynásobená hodnota je poté prezentována jako p-value. Tudíž je tento způsob interpretace p-value vhodný pouze pro oboustranné hypotézy, ne však pro jednostranné. Jednostranná varianta poté podléhá modifikaci (Biskup, 2005).

Touto modifikací se rozumí získání jednostranného p-value lze odvodit spočítáním oboustranné varianty pomocí programu a následném přepočítání "manuálně" za pomoci dalšího vhodného software. Nebo na základě výpočtu testovacího kritéria a předpisu pro kritický obor odvodit přepočet z oboustranné na jednostrannou variantu. V následujícím příkladě si označme alternativní hypotézy $\alpha_1 > \alpha_2$ jako pravostrannou a $\alpha_1 < \alpha_2$ jako levostrannou. Veličiny α_1 a α_2 značí parametry, které byly testovány (stř.hodnoty t-testů). Bohužel, modifikace p-value, která je vypočtena programem pro oboustrannou alternativní hypotézu záleží nejen na právě počítané alternativní hypotéze, ale také na použitých datech, což jsou hodnoty testovacího kritéria. Při levostranné variantě alternativní hypotézy tedy bude při *záporné* hodnotě testovacího kritéria:

$$\frac{\text{p-value}}{2}, \quad (5.4.5)$$

a při *kladné* hodnotě testovacího kritéria bude:

$$1 - \frac{\text{p-value}}{2}. \quad (5.4.6)$$

Pravostranná alternativní hypotéza pro *zápornou* hodnotu je naopak:

$$1 - \frac{\text{p-value}}{2}, \quad (5.4.7)$$

a pro *kladnou* hodnotu testovacího kritéria je:

$$\frac{\text{p-value}}{2}. \quad (5.4.8)$$

V případě oboustranné alternativní hypotézy se hodnota p-value nemodifikuje (Biskup, 2005). Extrahování p-value z Wilcoxonovy metody bylo provedeno v programu Rstudio tak, jak je to zobrazeno na řádce 12 v pseudokódu algoritmu 2.

5.5 Výsledky - 50 povodí

Optimalizace parametrů v modelu BILAN proběhla pomocí kritérií popsaných v podkapitole 4.1. Vyhodnocení optimalizačních algoritmů Diferenciální evoluce s nově implementovanou metodou SCDE3 bylo testováno na již zmíněných 50 povodí. Tyto optimalizační algoritmy byly následně porovnány mezi sebou za použití objektivních funkcí a p-value extrahované z Wilcoxonova testu. Každý výpočet každého typu Diferenciální evoluce se 100x opakoval pro každé povodí zvlášť.

5.5.1 Porovnání algoritmů Diferenciální evoluce

Jak již bylo zmíněno, pro optimalizaci pomocí algoritmů Diferenciální evoluce bylo využito 4 typů nastavení, které jsou k nahlédnutí v příloze A. Hodnoty nastavení optimalizačních algoritmů byly vybrány na základě předešlých zkušeností s kalibrací modelu a dle Kašpárek (1998); Kašpárek et. Novický (1997). Tabulky 7, 8, 9 a 10 obsahují nejlepší hodnoty objektivních funkcí z 50x100 kalibrací každého modelu. Výsledné hodnoty nejlepších NS, MAE, MSE a MAPE pro všechna nastavení jsou shrnuty v krabicových grafech v příloze B, konkrétněji v podkapitole B.1.

Porovnání nejlepších hodnot objektivních funkcí

Pokud se zaměříme na 1set (tabulka 7), můžeme dojít k závěru, že v tomto nastavení si s optimalizací nejlépe poradily modely DEBOB, DEBOB a DECB, které dosáhly téměř stejných hodnot kritérií. Model DERTB podal o něco horší výsledky.

	DEBOB	DECB	DECG	DERTB
MRE	-0.000005	-0.000019	0.000068	-0.000052
MAPE	0.283685	0.282968	0.289489	0.258149
NS	0.797106	0.796763	0.798099	0.785803
MAE	2.871561	2.865647	2.882156	2.905329
MSE	15.460460	15.479288	15.400242	16.423550

Tabulka 7: Hodnoty nejlepších hodnot obj. funkcí testovaných optimalizací Diferenciální evoluce pro 1set.

Ve 2setu (tabulka 8) byla nastavena nižší hodnota mutačního faktoru F oproti 1setu. U modelů DECB, DECB a DECG nebyly pozorovány výraznější statistické odchylky a tak jako v 1setu dosáhly téměř stejných hodnot kritérií a taktéž dosáhly lepších hodnot, než DERTB. Nastavení 2setu nepřineslo významnější odchylky objektivních funkcí od nastavení 1setu.

	DEBOB	DECB	DECG	DERTB
MRE	0.000001	-0.000005	-0.000032	0.000021
MAPE	0.289034	0.288523	0.281950	0.248989
NS	0.798093	0.798080	0.798100	0.786571
MAE	2.877728	2.881901	2.884224	2.858104
MSE	15.401998	15.401814	15.400207	16.230714

Tabulka 8: Hodnoty nejlepších hodnot obj. funkcí testovaných optimalizací Diferenciální evoluce pro 2set.

V nastavení 3setu, jehož výsledky jsou v tabulce 9, byla použita nižší hodnota křížicí konstanty C_r a koeficient mutace F byl zvětšen na původní hodnotu v 1setu. V tomto nastavení opět nedošlo k výraznější statistické odchylce objektivních funkcí, než v předchozích nastaveních. Mezi modely DECGB, DECBB a DEBOB opět nebyly pozorovány výraznější rozdíly. Model DERTB byl opět poražen ostatními modely.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
MRE	0.000007	0.000008	-0.000118	0.000016
MAPE	0.282707	0.282951	0.289489	0.262955
NS	0.797132	0.797349	0.798100	0.786650
MAE	2.868844	2.867859	2.887128	2.874887
MSE	15.448586	15.499340	15.400179	16.993715

Tabulka 9: Hodnoty nejlepších hodnot obj. funkcí testovaných optimalizací Diferenciální evoluce pro 3set.

Nastavení 4setu (tabulka 10) se lišilo od předchozích tím, že hodnoty C_r a F byly shodně sníženy na 0.80, čímž se zmenšily tendence k náhodnému prohledávání. Hodnoty objektivních funkcí pak dosahovaly přibližně stejných výsledků, jako v předchozích setech. Nastavením vyšší hodnoty $q\%$ optimalizace DECGB nebylo dosaženo téměř žádného markantního zlepšení oproti 3setu, ale v porovnání se všemi předešlými nastaveními DECGB, dosáhla optimalizace nastavená dle 4setu druhého nejlepšího výsledku hned po 2setu, pokud se ovšem zaměříme na veličiny od 4.místa dále za desetinnou čárkou. Celkově lze říci, že nebyly pozorovány markantnější rozdíly mezi nastavením modelů, ale pokud bychom se chtěli podrobněji zaměřit na porovnání, tak 2set by byl vyhodnocen jako nejúspěšnější. Dále pak mezi modely DECGB, DECBB a DEBOB nebyly pozorovány významnější statistické odlišnosti, o trochu lepší výsledky než modely DECBB a DEBOB podával model DECGB. Model DERTB nebyl shledán jako úspěšný model v těchto nastaveních, ale v jiných by mohl podávat lepší výkony.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
MRE	0.000020	-0.000037	-0.000156	0.000213
MAPE	0.288216	0.288187	0.289447	0.253479
NS	0.798042	0.798050	0.798100	0.791400
MAE	2.877135	2.880732	2.885699	2.857557
MSE	15.404740	15.411382	15.400128	16.501012

Tabulka 10: Hodnoty nejlepších hodnot obj. funkcí testovaných optimalizací Diferenciální evoluce pro 4set.

Posouzení střední výkonnosti optimalizací

Posouzení střední výkonnosti optimalizací Diferenciální evoluce pomocí mediánů byl taktéž provedeno pro všechna 4 nastavení. Pro 1set v tabulce 11 lze vyvodit, že nejlépe si vedla optimalizace DECGB, následovaná DEBOB. Tyto rozdíly už byly o něco více statisticky významnější, než při vyhodnocování nejlepších optimalizací. Nejhůře si opět vedl typ DERTB. Toto bylo pozorováno i pro zbylá nastavení v tabulkách 12, 13 a 14. U optimalizace DECGB nemělo zvyšování hodnoty $q\%$ statisticky významnější vliv na výkonnost optimalizace. Změny v nastavení F a Cr a jejich dopad na výsledek optimalizace byly popsány v předchozím textu. V případě střední výkonnosti optimalizací můžeme vidět, že kritérium MSE nebylo vhodně zvoleno pro porovnání optimalizací, jelikož je zde patrná jeho nevýhoda, a to kvadratický vliv, který zapříčinil zveličení výsledných hodnot kritéria.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
MRE	-0.167257	-0.166828	-0.168225	-0.129805
MAPE	0.445428	0.445742	0.444260	0.462023
NS	0.618627	0.618130	0.620239	0.585029
MAE	9.414357	9.458572	9.469219	10.465233
MSE	178.167592	178.335106	177.067020	207.416294

Tabulka 11: Hodnoty medianu objektivních funkcí testovaných optimalizací Diferenciální evoluce pro 1set.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
MRE	-0.169933	-0.168892	-0.168460	-0.136443
MAPE	0.444271	0.444369	0.444258	0.459965
NS	0.620170	0.620123	0.620240	0.588024
MAE	9.469158	9.469737	9.469214	10.366650
MSE	177.112238	177.138154	177.067008	202.569929

Tabulka 12: Hodnoty medianu objektivních funkcí testovaných optimalizací Diferenciální evoluce pro 2set.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
MRE	-0.163529	-0.167113	-0.168443	-0.142450
MAPE	0.445420	0.445721	0.444256	0.459724
NS	0.618147	0.617639	0.620240	0.583305
MAE	9.473095	9.465108	9.469213	10.467137
MSE	178.373283	178.516061	177.066986	209.461826

Tabulka 13: Hodnoty medianu objektivních funkcí testovaných optimalizací Diferenciální evoluce pro 3set.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
MRE	-0.169799	-0.167898	-0.168624	-0.136981
MAPE	0.444499	0.444540	0.444258	0.461161
NS	0.620044	0.619974	0.620240	0.588443
MAE	9.468802	9.469612	9.469216	10.476399
MSE	177.191245	177.221709	177.066987	206.096070

Tabulka 14: Hodnoty medianu objektivních funkcí testovaných optimalizací Diferenciální evoluce pro 4set.

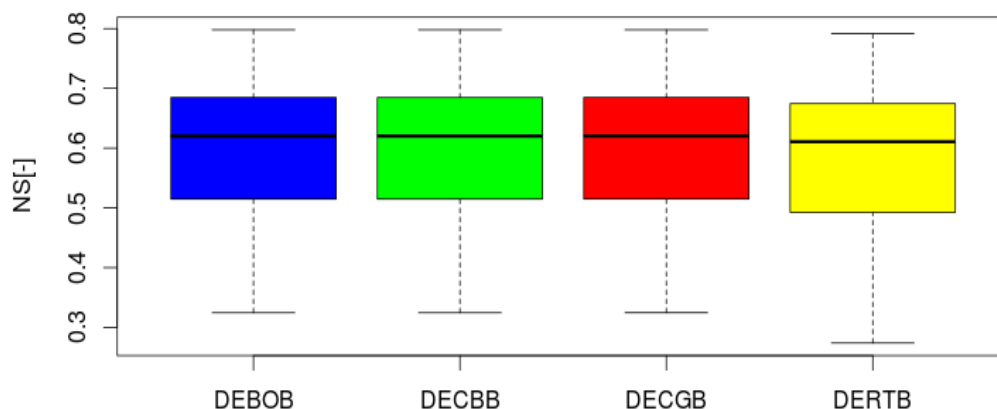
Vyhodnocení Wilcoxonova testu pomocí p-value

Hladina významnosti α byla určena hodnotou 0.05, což značí 95% jistotu správnosti rozhodnutí. Všechny hodnoty p-value, které jsou menší, než α zamítají nulovou hypotézu, a tudíž se jedná o úspěšné kritérium a rozdíl mezi optimalizacemi je tudíž markantní. V opačném případě není nulová hypotéza zamítnuta a kritérium je neúspěšné - rozdíly mezi optimalizacemi nejsou statisticky významné. Vyhodnocení je provedeno na 4setu nejlepších modelů, ale výsledky zbylých nastavení (i s nastavením 4set) jsou obsaženy v příloze C. Tento test nám ukázal to, co je patrné z krabicových grafů 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5. A to, že vyhodnocení nejlepších modelů SCDE neprokázalo statisticky významné odchylky. Jak lze vidět z hodnot p-value v tabulkách 15, 16, 17, 18 a , 19, všechny optimalizace vykázaly chybu 1.řádu. Pouze hodnoty DERTB v tabulce 19 by zamítly nulovou hypotézu. Je to však dáno faktem, že MRE, jak již bylo zmíněno, nuluje kladné chyby zápornýma a tudíž u této nejméně úspěšné optimalizace Diferenciální evoluce tohoto vyhodnocení dochází ke zkreslení výsledků. Stejně výsledky lze prokázat i pomocí krabicových grafů 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 a 5.5 (pro všechna nastavení v příloze B.1).

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.537075	0.438367	0.710536
DECBB	0.465665	0.501375	0.438367	0.708174
DECGB	0.564349	0.564349	0.501375	0.710536
DERTB	0.291826	0.294197	0.291826	0.501375

Tabulka 15: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší NS pro 4set všech 50 povodí.

Krabicový graf nejlepších NS hodnot pro všechny DE 4set

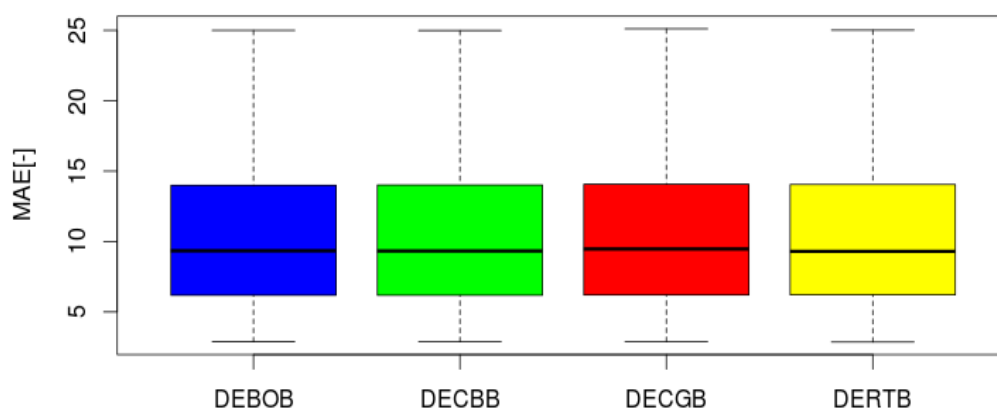


Obrázek 5.1: Krabicový graf pro NS 4set

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.528852	0.432938	0.484877
DECBB	0.473891	0.501375	0.422120	0.490375
DECGB	0.569771	0.580576	0.501375	0.520618
DERTB	0.517871	0.512374	0.482129	0.501375

Tabulka 16: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAE pro 4set všech 50 povodí.

Krabicový graf nejlepších MAE hodnot pro všechny DE 4set

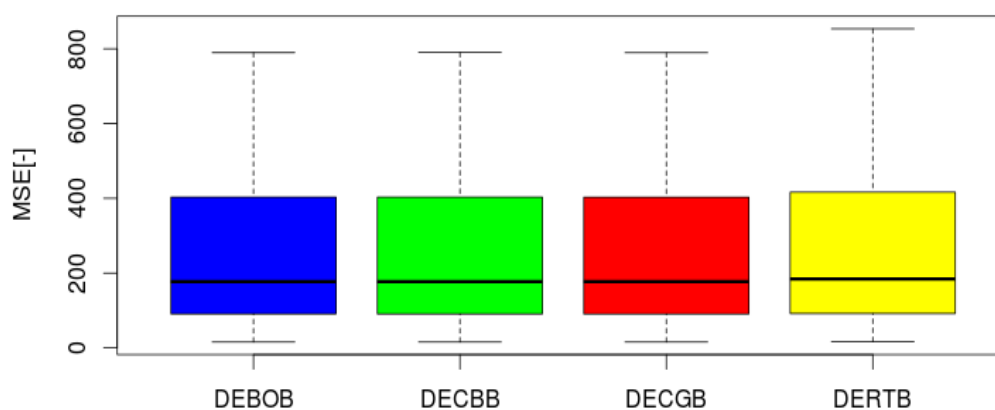


Obrázek 5.2: Krabicový graf pro MAE 4set

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.465665	0.564349	0.379507
DECBB	0.537075	0.501375	0.564349	0.382134
DECGB	0.438367	0.438367	0.501375	0.379507
DERTB	0.623114	0.620493	0.623114	0.501375

Tabulka 17: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MSE pro 4set všech 50 povodí.

Krabicový graf nejlepších MSE hodnot pro všechny DE 4set

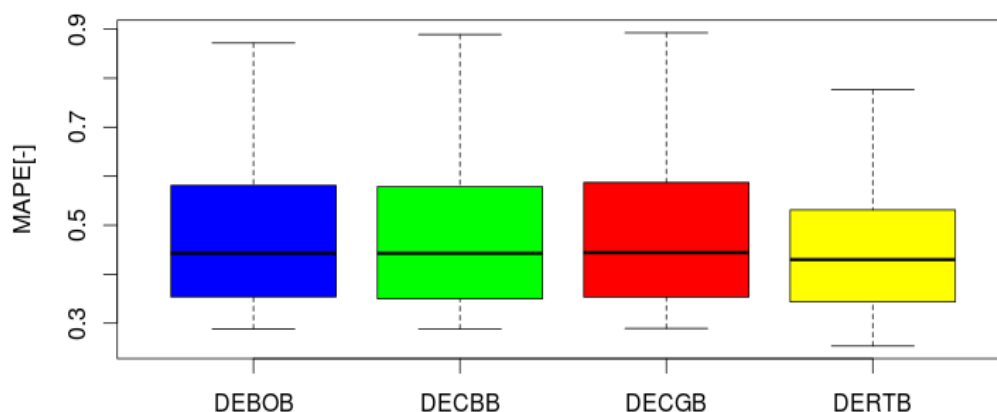


Obrázek 5.3: Krabicový graf pro MSE 4set

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.556193	0.406004	0.871610
DECBB	0.446531	0.501375	0.374271	0.856584
DECGB	0.596667	0.628339	0.501375	0.898297
DERTB	0.129842	0.144982	0.102933	0.501375

Tabulka 18: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAPE pro 4set všech 50 povodí.

Krabicový graf nejlepších MAPE hodnot pro všechny DE 4set

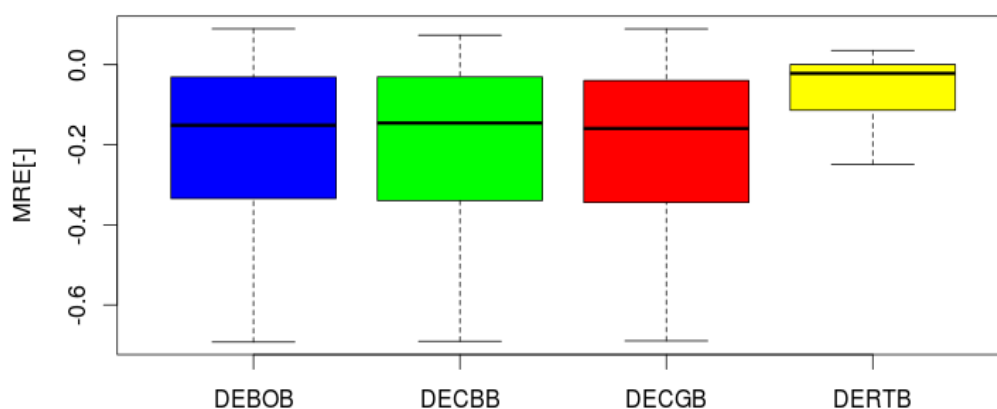


Obrázek 5.4: Krabicový graf pro MAPE 4set

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.460188	0.646435	0.000158
DECBB	0.542548	0.501375	0.659164	0.000138
DECGB	0.356131	0.343368	0.501375	0.000090
DERTB	0.999846	0.999865	0.999913	0.501375

Tabulka 19: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MRE pro 4set všech 50 povodí.

Krabicový graf nejlepších MRE hodnot pro všechny DE 4set



Obrázek 5.5: Krabicový graf pro MRE 4set

5.6 Výsledky - případová studie 0310 Častolovice

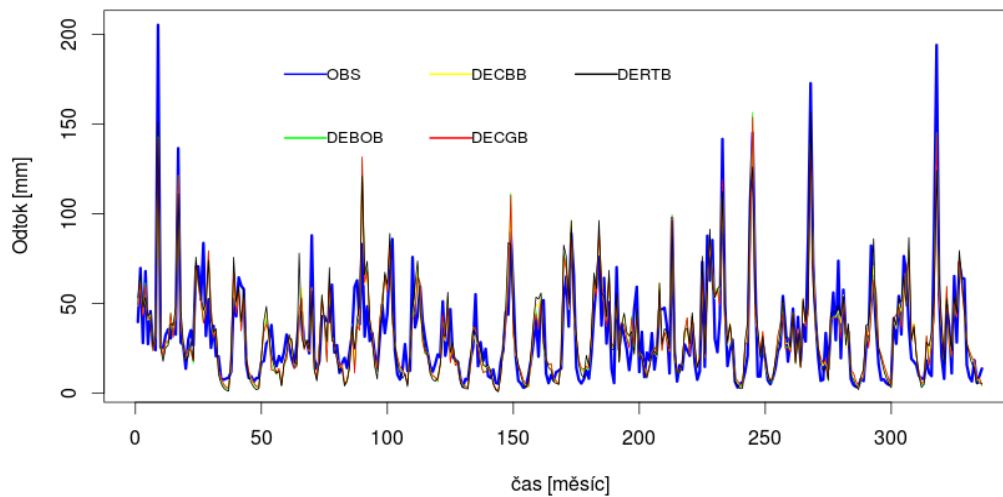
Z 50 náhodně vybraných povodí, které byly zahrnuty do optimalizace, byl pro případovou studii zvolen profil č.20 - 0310 Častolovice, kterým protéká tok Bělá. Povodí má velikost 213.3 km² a dlouhodobý průměrný odtok Q_a zde činil 2.62 m³/s.

K vyhodnocení kvantilů metod SCDE byl opět jako příklad uveden 4set s tím, že ve zbylých třech nastaveních (grafy kvantilů jsou hromadně zobrazeny v příloze B.2) nejsou patrné výraznější odchylky od grafů zobrazených v 4setu. Povodí bylo též vyhodnoceno pomocí NS, kde byly použity nejlepší hodnoty povodí dosažených pro tuto objektivní funkci. Toto bylo učiněno pro všechna 4 nastavení.

Z grafů 5.6, 5.7, 5.8 a 5.9 je patrné, že všechna nastavení ve většině případů podhodnocují extrémní hodnoty měřených dat. Všechny optimalizace poměrně solidně zachytily průběh křivky za středních a nižších odtoků. Relativní chyba průměrných hodnot za zkoumané období na profilu 0310 Častolovice optimalizacemi DEBOB, DECBB a DECGB pro NS byla 26%, u DERTB to bylo 29% pro 1set. Pro 2set to bylo také 26% pro DEBOB, DECBB a DECGB. DERTB dosáhl menšího zlepšení a relativní chyba byla 28%. 3set měl stejnou relativní chybu, jako 1set a 4set dosáhl přibližně (na setiny) stejné chyby, jako 2set. Lze říci, že odchylky od měřených dat nebyly pro všechna nastavení a optimalizace příliš vysoké. U některých peaků však došlo k nadhodnocení měřených dat. To může být dáno také velikostí (řadí se spíše mezi menší) a "předvídatelností" povodí.

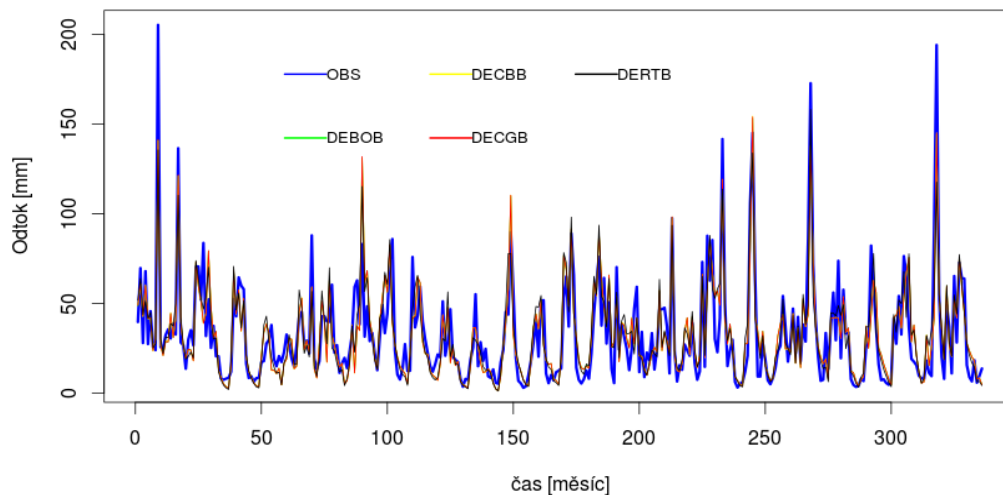
Pokud se zaměříme na míru polohy rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, tak kvantily DEBOB a DECBB nevykazují téměř žádný rozdíl v mediánu a minimálně se liší v 5% kvantilu, ale vzhledem k tomu, že jde o velmi malý počet hodnot, nelze tomu přiřkládat velkou váhu. U DECGB jsou rozdíly mezi kvantily při nižších odtocích téměř nulové. DERTB dosáhl největší variace mezi kvantily ze všech optimalizací, což poukazuje na to, že tato optimalizace nebyla tak přesná, jako optimalizace pomocí DEBOB, DECBB a DECGB. Výsledné porovnání optimalizací SCDE ukazuje, že použité modely z větší části zachycují sezónní proměnlivost v pozorovaných odtocích na případové studii 0310 Častolovice, avšak jak lze vidět v hodnotách z tabulek v příloze C, není to pravidlem. Záleží na nastavení modelu a velikosti a hydrologických podmínkách v daném povodí.

Nejlepší hodnoty NS pro 1set - povodí č. 20



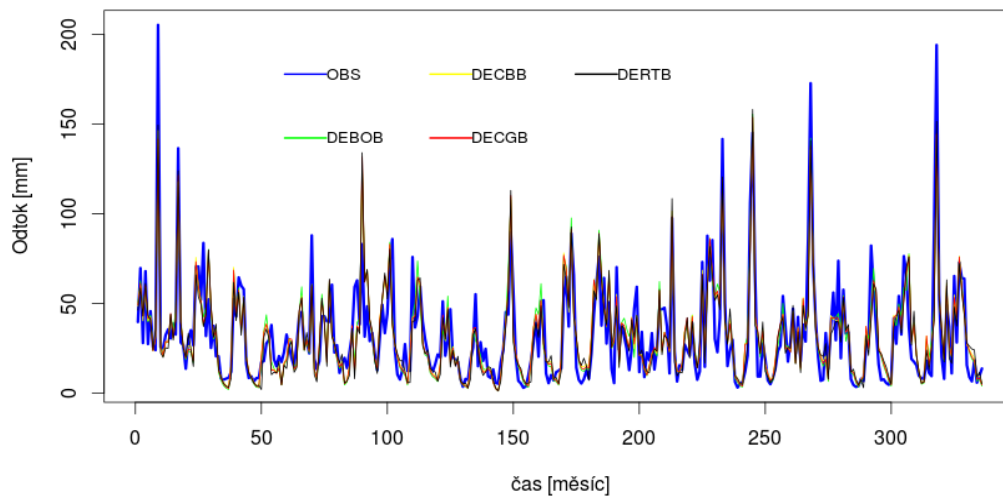
Obrázek 5.6: Nejlepší hodnoty pro NS 1set povodí 0310 Častolovice

Nejlepší hodnoty NS pro 2set - povodí č. 20



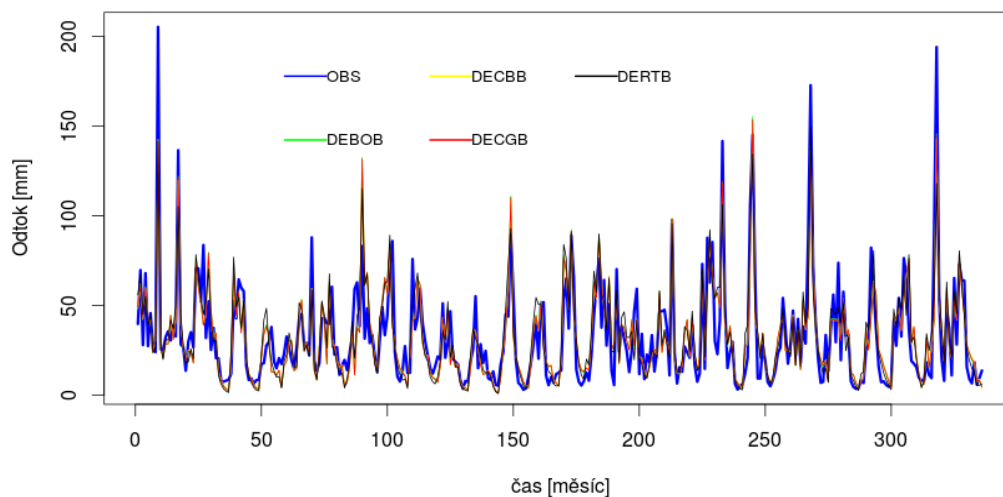
Obrázek 5.7: Nejlepší hodnoty pro NS 2set povodí 0310 Častolovice

Nejlepší hodnoty NS pro 3set - povodí č. 20



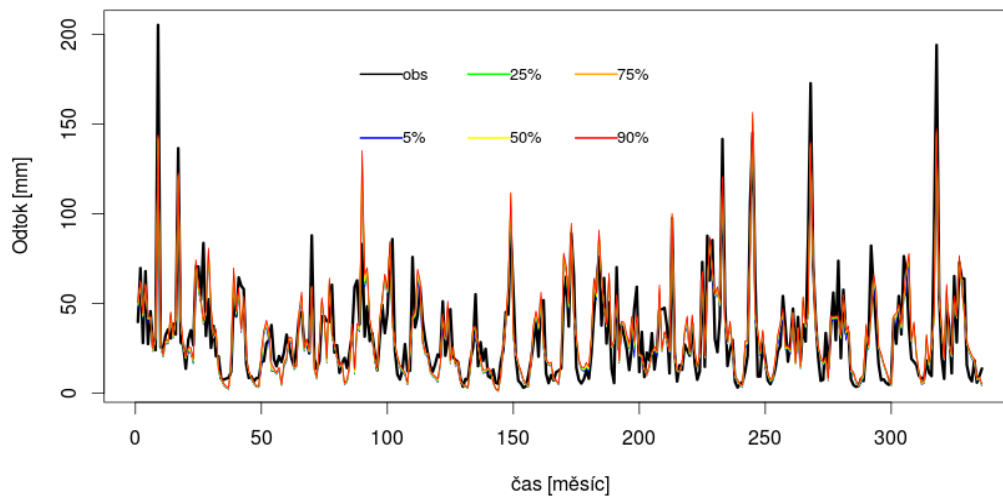
Obrázek 5.8: Nejlepší hodnoty pro NS 3set povodí 0310 Častolovice

Nejlepší hodnoty NS pro 4set - povodí č. 20



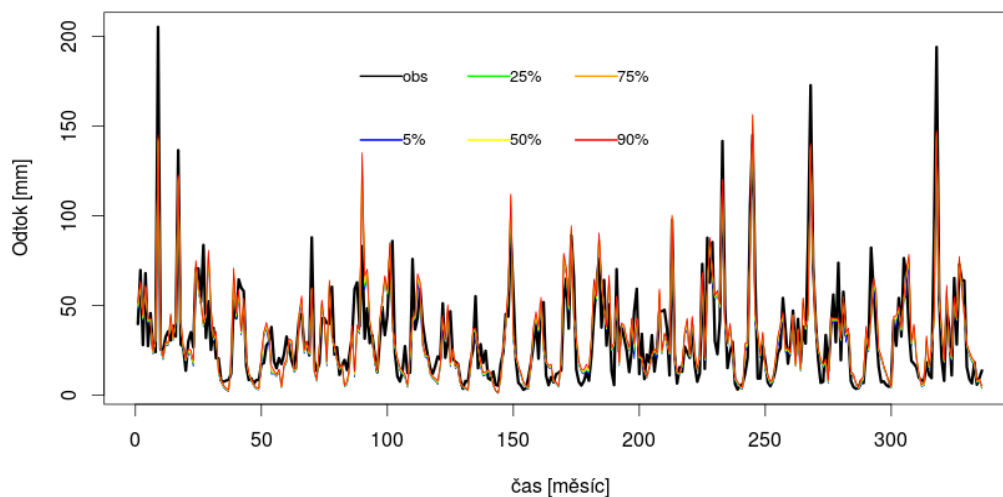
Obrázek 5.9: Nejlepší hodnoty pro NS 4set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DEBOB pro 4set - povodí č. 20



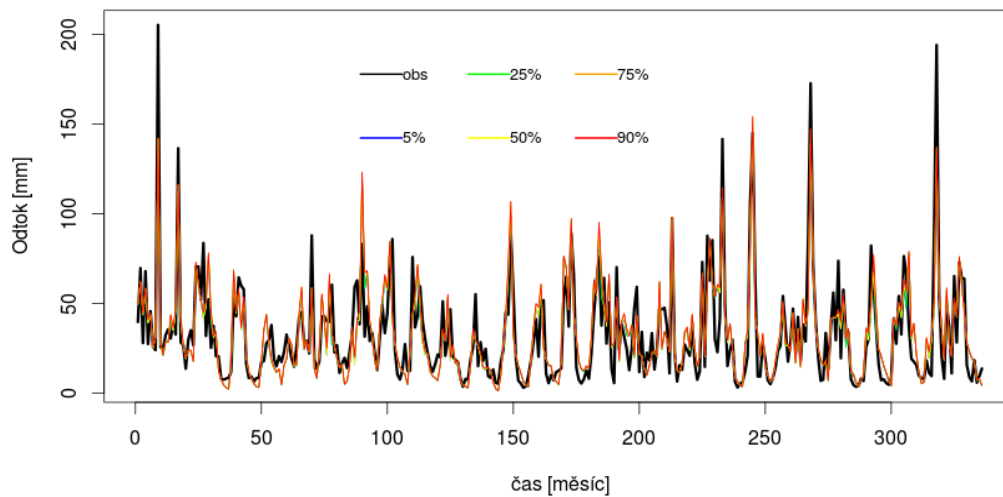
Obrázek 5.10: Rozdělení kvantilů DEBOB pro 4set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECBB pro 4set - povodí č. 20



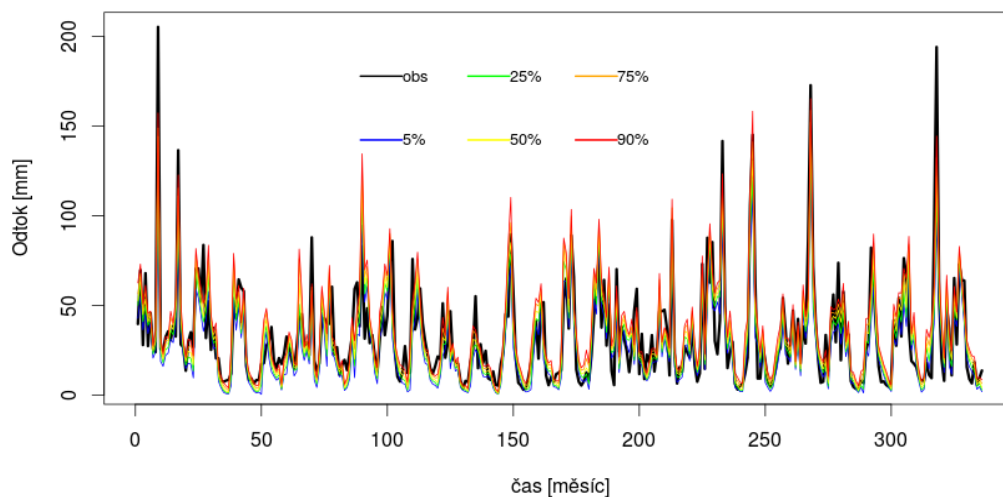
Obrázek 5.11: Rozdělení kvantilů DECBB pro 4set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECGB pro 4set - povodí č. 20



Obrázek 5.12: Rozdělení kvantilů DECGB pro 4set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DERTB pro 4set - povodí č. 20



Obrázek 5.13: Rozdělení kvantilů DERTB pro 4set povodí 0310 Častolovice

6 Závěr

V této práci byly porovnány 4 optimalizační metody SCDE modelu BILAN v různých nastaveních na 50 vybraných povodí České republiky. Jedna z těchto SCDE metod byla nově implementovaná. Jednalo se o algoritmus MDE_pBX navržený Islam et. al. (2012). Odhady parametrů byly testovány na měsíčním kroku bilance.

Výsledky v kapitole 5 ukázaly, že rozdíly mezi optimalizacemi SCDE modelu BILAN napříč všemi nastaveními nebyly významné. Jediným faktorem, který měl větší význam, byl typ chování optimalizace - explorativní či exploitativní. Exploitativní algoritmy DEBOB a DECBB podaly vesměs stejné výkony. Explorativní algoritmus DERTB za těmito SCDE modely zaostával, viz. výsledky v kapitole 5 a přílohách B a C. Algoritmus DECGB používá ty nejlepší vlastnosti z obou fází. Proto dosáhl o trochu lepších výsledků oproti zbytku optimalizačních metod, ikdyž rozdíly ve výsledcích nebyly od DEBOB a DECBB příliš významné.

Dále pak bylo zjištěno, že různé hodnoty koeficientů mutace a křížení nemají při stejné velké populaci, počtu komplexů, shufflování a generací významnější statistické odchylky. Taktéž různá nastavení $q\%$ populace optimalizace DECGB měla malý vliv na hodnoty objektivních funkcí. Zvyšující se číslo $q\%$ populace (tj. procentuální velikosti populace použité k vytvoření nového rodičovského vektoru) nevedlo k očekávanému rapidnímu zlepšení výsledků optimalizace. Důvodem mohlo být nastavení velikosti populace. I tak ale byla metoda DECGB vyhodnocena jako nejúspěšnější optimalizace (ale i nadále srovnatelná s DEBOB a DECBB) mezi 4 porovnávanými metody SCDE.

Variabilita mezi vyhodnocovanými povodími byla poměrně vysoká, což lze vidět na příkladu povodí č.9 (nejméně úspěšná optimalizace) a č.31 (nejúspěšnější optimalizace), kde rozdíl ve správnosti předpovědí mezi těmito povodími pomocí optimalizační SCDE byl 76% - u povodí č.31 byla relativní chyba simulovaných odtoků oproti měřeným 22% u DEBOB, DECBB a DECGB, u DERTB to bylo o 24%. Pro povodí č.9 to však již bylo o 98% u DEBOB, DECBB a DECGB - to už je velmi výrazná chyba simulovaných odtoků. Optimalizace pomocí DERTB by byla pro povodí č.9 posouzena jako nevhodná a model by byl zahozen. Z toho lze vyvodit, že při bilanční předpovědi závisí na nastavení modelu a optimalizace; a velikosti a předvídatelnosti (chování) každého jednotlivého povodí zvlášť. Protože ikdyž je předpověď na jednom povodí úspěšná, na dalším už nastavení modelu nebude fungovat optimálně a model nepodá uspokojivé výsledky. Je tedy třeba posuzovat jednotlivá povodí zvlášť a dle

toho zohlednit nastavení modelu. Na závěr lze konstatovat, že optimalizace BILANu modely SCDE jsou při určování bilance odtoku výkonnostně srovnatelné a statistické rozdíly výstupu z modelu nejsou významné.

Literatura

Literatura

Allen R.G., Pereira L.S., Reas D., Smith M., 1998: Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace – Guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO of the UN, Rome*.

Bedáňová I., 2012: Statistika a výpočetní technika, *Multimediální výukový text pro studenty VFU Brno*,

online: <http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/prednasky.htm>,
cit.26.02.2015.

Beran A., Horáček S., Hanel M., 2011: Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu BILAN, *VTEI 53(3), příloha VH 11/2011*, 17-20.

Biskup R., 2005: Hodnota p-value, *Katedra aplikované matematiky a informatiky, Zemědělská fakulta JČU v Českých Budějovicích*,

online: http://home.ef.jcu.cz/birom/stat/cviceni/09/p_value.pdf,
cit.01.03.2015.

Daňhelka J., Krejčí J., Šálek M., Šercl P., Zezulák J., 2003: Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území České republiky, *ČZU Praha, 2003*, 214 stran.

Darwin C., 1859: The Origin Of Species, 6th edition, *John Murray, 1859*,

online: <http://www.gutenberg.org/files/1228/1228-h/1228-h.htm>,
cit.26.10.2014.

Das S., Suganthan P.N., 2011: Differential Evolution: A Survey of The State-of-The-Art, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation 15(1)*, 2011, 4-34.

Dingman S.L., 2002: Physical hydrology, 2nd edition, *Prentice Hall, 2002*, 646 stran.

Duan Q., Gupta V.K., Sorooshian S., 1993: A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global optimization, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1993, 501-521.

Fish R.E., 2011: Using water balance models to approximate the effects of climate change on spring catchment discharge: Mt.Hanang,

Tanzania, *A Thesis, Michigan Technological University, 2011, online: <http://www.mtu.edu/peacecorps/programs/geo-mitigation/pdfs/randall-fish-thesis-final.pdf>*, cit.31.8.2014.

Gidrometeoizdat, 1976: Guidelines for calculation of evaporation from land surface (Rekomendatsii po roschotu ispareniiia s poverhnosti suchi), *Gidrometeoizdat, St. Peterburg, Russia, 1976*.

Gupta H.V., Sorooshian S., Yapo P.O., 1998: Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information, *Water Resources Research* 34(4), 1998, online: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/97WR03495/pdf>, 751-763, cit.15.4.2015.

Hanel M., Máca P., Pavlásek J., Vizina A., 2012: A Multi-Model Assessment of Climate Change Impact on Hydrological regime in the Czech republic, *Journal of Hydrology And Hydromechanics* 60 (3), 2012, 152-161.

Hanel M., Máca P., Mrkvičková M., Pech P., Vizina A., 2013: Evaluation of Simple Statistical Downscaling Methods for Monthly Regional Climate Model Simulations with Respect to the Estimated Changes in Runoff in the Czech republic, *Water Resources Management* 27 (15), 2013, 5261-5279.

Chahine M.T., 1992: The hydrological cycle and its influence on climate, *Nature* vol.359, October 1992, online: http://davidmlawrence.com/Woods_Hole/References/Chahine_1992_HydrologicalCycle_Climate.pdf, 373-380, cit.1.9.2014.

Islam S.M., Das S., Ghosh S., Roy S., Suganthan P.N., 2012: An Adaptive Differential Evolution Algorithm With Novel Mutation and Crossover Strategies for Global Numerical Optimization, *IEEE Transactions on System, man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics* 42(2), 2012, online: <http://znjs.jpkc.cc/uploads/znjs/file/An%20Adaptive%20Differential%20Evolution%20Algorithm%20With%20Novel%20Mutation%20and%20Crossover%20Strategies%20for%20Global%20Numerical%20Optimization.pdf>, 482-500, cit.9.11.2014.

Kašpárek L., 1998: Regional study of impacts of climate change on hydrological conditions in the Czech republic, *VÚV TGM Praha, edice Práce a studie, sešit 193*, 70 stran.

- Kašpárek L., Novický O.**, 1997: Application of a physically-based model to identify factors causing hydrological droughts in western and central European basins, *FRIEND'97 – Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management*, IAHS Publ. no. 246, 197–204.
- Kašpárek L., Novický O.**, 2004: User's guide BILAN, *online*: http://www.geo.uio.no/edc/software/BILAN/User_guide_BILAN.pdf, 12 stran.
- Kemel M.**, 2000: Klimatologie, meteorologie a hydrologie, *ČVUT Praha, 2000*, 289 stran.
- Kulhavý Z., Kovář P.**, 2002: Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí, *VÚMOP Praha, 2002*, 123 stran.
- Máca P.**, 2010: Jednotkový hydrogram, *ČZU Praha, VÚV TGM Praha, edice Práce a studie, sešit 202*, 103 stran.
- Máca P.**, 2012: Globální optimalizace hydrologického modelu BILAN, , 40 stran.
- Máca P., Horáček S., Vizina A.**, 2013: Optimalizace parametrů modelu BILAN metodou SCDE, *VTEI 55, 4/2013*, 1-4.
- Máca P.**, 2014: Hydrologie pro bakaláře, *ČZU Praha, 2014*, 126 stran.
- Máca P.**, 2015: Hydrologické modely a automatická optimalizace parametrů, *Habilitační práce, ČZU Praha, 2015*, 210 stran.
- Neri F., Tirronen V.**, 2009: Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis, *Artificial Intelligence Review 33, Springer, online*: http://www.researchgate.net/profile/FerranteNeri/publication/220637872_Recent_advances_in_differential_evolution_a_survey_and_experimental_analysis/links/0f317530f2faef17b3000000.pdf, 61-106, cit.18.2.2015.
- NWRFC**, 2014: Northwest River Forecast Center, *National Oceanic and Atmospheric Administration, online*: http://www.nwrfc.noaa.gov/info/water_cycle/hydrology.cgi, cit.8.9.2014.
- Oudin L., Moulin L., Bendjoudi H., Ribstein P.**, 2010: Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulation, *Hydrological Sciences Journal 55(2), 2010*, 209-222.

- Pešek F.**, 2012: Vybrané optimalizační algoritmy hydrologických modelů, *Bakalářská práce, FŽP ČZU Praha, nepublikováno.*
- Price K.V.**, 1994: Genetic Annealing, *Dr. Dobbs Journal* 19(11), 1994, 127 stran.
- Price K.V., Storn R.M.**, 1997: Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization, Kluwer Academic Publishers* 1997, 341-359.
- Price K.V.**, 1999: An introduction to Differential evolution, *New ideas in optimization, McGraw-Hill Ltd., UK Maidenhead, England, 1999*, 79-108.
- Price K.V., Storn R.M., Lampinen J.A.**, 2005: Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization, *Springer, Verlag Berlin Heidelberg*, 535 stran + CD.
- Qin A.K., Suganthan P.N.**, 2005: Self-adaptive Differential Evolution Algorithm for Numerical Optimization, *The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2*, online: <http://150.214.190.154/EAMHCO/pdfs/contributionsCEC05/quin05sad.pdf>, 1785-1791, cit.16.2.2015.
- Singh V.P., Frevert D.K.**, 2002: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology, *Water Resources Publications*, 2002.
- Singh V.P., Frevert D.K.**, 2006: Watershed Models, 1st edition, *Taylor and Francis*, 2006.
- Tallaksen L.M., Van Lanen H.A.J.**, 2004: Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater, *Vol. 48. Elsevier*, 2004.
- Tanabe R., Fukunaga A.**, 2014: Reevaluating Exponential Crossover in Differential Evolution, *Parallel Problem Solving from Nature, 2014*, online: <http://metahack.org/PPSN2014-Tanabe-Fukunaga.pdf>, cit.29.10.2014.
- Thornthwaite C.W.**, 1948: An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review* 38(1), 55-94.
- Thornthwaite C.W., Mather J.R.**, 1955: The Water Balance, *Climatology* 8, 1-104.
- Townsend C.R., Begon M., Harper J.L.**, 2010: Základy ekologie, *Univerzita Palackého v Olomouci*, 2010, 505 stran.
- VÚV TGM Praha**, 2014: BILAN Water Balance Model - Manual, *T. G. Masaryk Water Research Institute in Prague (VÚV TGM Praha), version 2014-09-25, 2014.*

- Weber M., Neri F., Tirronen V.**, 2009: Distributed differential evolution with explorative–exploitative population families, *Genetic Programm. Evol. Mach.* 10(4), 2009, 343–371.
- Wilcoxon F.**, 1945: Individual Comparisons by Ranking Methods, *Biometrics Bulletin* 1(6), 1945, *online: <http://sci2s.ugr.es/keel/pdf/algorithm/articulo/wilcoxon1945.pdf>*, 80–83, cit.26.2.2015.
- Zhang L., Walker G.R., Dawes W.R.**, 2002: Water Balance Modelling: Concepts and Applications, *Regional Water and Soil Assessment for Managing Sustainable Agriculture in China and Australia*, *ACIAR Monograph No. 84*, *online: http://www.researchgate.net/publication/228947764_Water_balance_modelling_concepts_and_applications*, 31–47, cit.31.8.2014.
- Zhang J., Sanderson A.C.**, 2009: JADE: Adaptive Differential evolution with optional external archive, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 13(5), 2009, 945–958.

A Příloha Nastavení modelů SCDE

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
OptCritType_DE_0-MSE_1-MAE_2-MAPE_3-NS_4-LNNS_5-MRE:	3	3	3	3
DETYPE_0-BESTONEBIN_1-CURBESTTBIN_2-RANDTWOBIN_3-CURTGRBEST:	3	3	3	3
number_of_Complexes:	4	4	4	4
population_in1complex:	100	100	100	100
Crossover:	0.60	0.60	0.60	0.60
F_mutation:	0.50	0.50	0.50	0.50
K_mutation:	0.85	0.85	0.85	0.85
Number_of_shuffles:	5	5	5	5
N_generations_in_1Complex:	10	10	10	10
help_ensemble_runs:	100	100	100	100
best_pop_perc_CURTGRBEST:	0.20	0.30	0.40	0.50

Tabulka 21: Nastavení DECGB

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
OptCritType_DE_0-MSE_1-MAE_2-MAPE_3-NS_4-LNNS_5-MRE:	3	3	3	3
DETYPE_0-BESTONEBIN_1-CURBESTTBIN_2-RANDTWOBIN_3-CURTGRBEST:	0	0	0	0
number_of_Complexes:	4	4	4	4
population_in1complex:	100	100	100	100
Crossover:	0.95	0.95	0.80	0.80
F_mutation:	0.95	0.80	0.95	0.80
K_mutation:	0.85	0.85	0.85	0.85
Number_of_shuffles:	5	5	5	5
N_generations_in_1Complex:	10	10	10	10
help_ensemble_runs:	100	100	100	100
best_pop_perc_CURTGRBEST:	0.10	0.10	0.10	0.10

Tabulka 23: Nastavení DEBOB

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
OptCritType_DE_0-MSE_1-MAE_2-MAPE_3-NS_4-LNNS_5-MRE:	3	3	3	3
DETYPE_0-BESTONEBIN_1-CURBESTTBIN_2-RANDTWOBIN_3-CURTGRBEST:	1	1	1	1
number_of_Complexes:	4	4	4	4
population_in1complex:	100	100	100	100
Crossover:	0.95	0.95	0.80	0.80
F_mutation:	0.95	0.80	0.95	0.80
K_mutation:	0.85	0.85	0.85	0.85
Number_of_shuffles:	5	5	5	5
N_generations_in_1Complex:	10	10	10	10
help_ensemble_runs:	100	100	100	100
best_pop_perc_CURTGRBEST:	0.10	0.10	0.10	0.10

Tabulka 25: Nastavení DECBB

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
OptCritType_DE_0-MSE_1-MAE_2-MAPE_3-NS_4-LNNS_5-MRE:	3	3	3	3
DETYPE_0-BESTONEBIN_1-CURBESTTBIN_2-RANDTWOBIN_3-CURTGRBEST:	2	2	2	2
number_of_Complexes:	4	4	4	4
population_in1complex:	100	100	100	100
Crossover:	0.95	0.95	0.80	0.80
F_mutation:	0.95	0.80	0.95	0.80
K_mutation:	0.85	0.85	0.85	0.85
Number_of_shuffles:	5	5	5	5
N_generations_in_1Complex:	10	10	10	10
help_ensemble_runs:	100	100	100	100
best_pop_perc_CURTGRBEST:	0.10	0.10	0.10	0.10

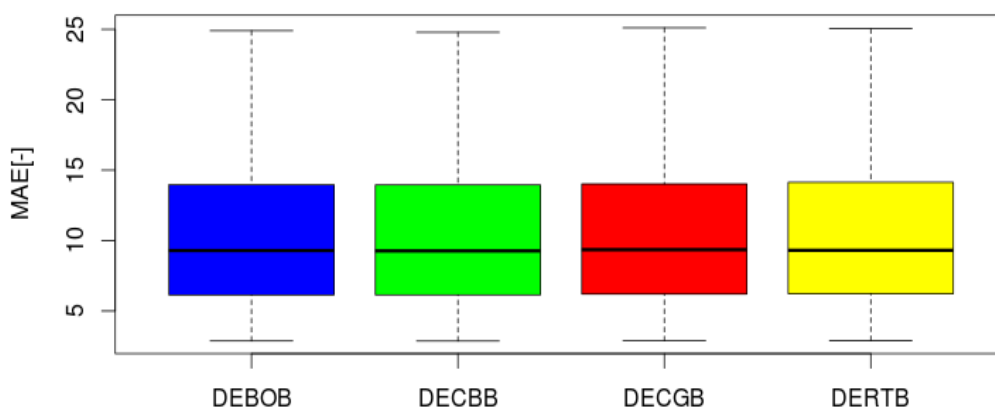
Tabulka 27: Nastavení DERTB

B Příloha Grafy výsledků

B.1 Porovnání optimalizačních algoritmů - krabicové grafy

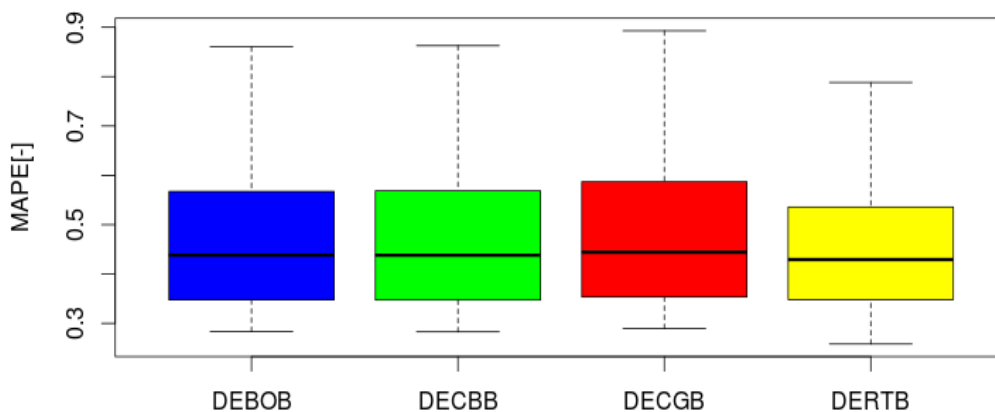
B.1.1 1set

Krabicový graf nejlepších MAE hodnot pro všechny DE 1set



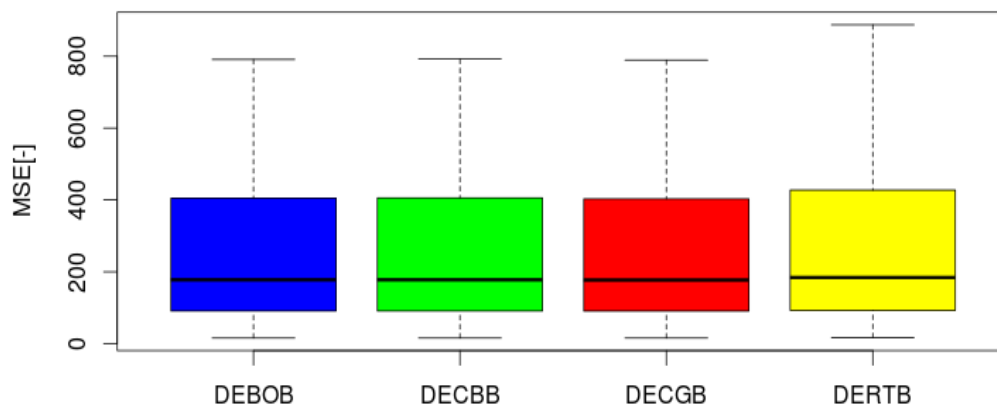
Obrázek B.1: Krabicový graf pro MAE 1set

Krabicový graf nejlepších MAPE hodnot pro všechny DE 1set



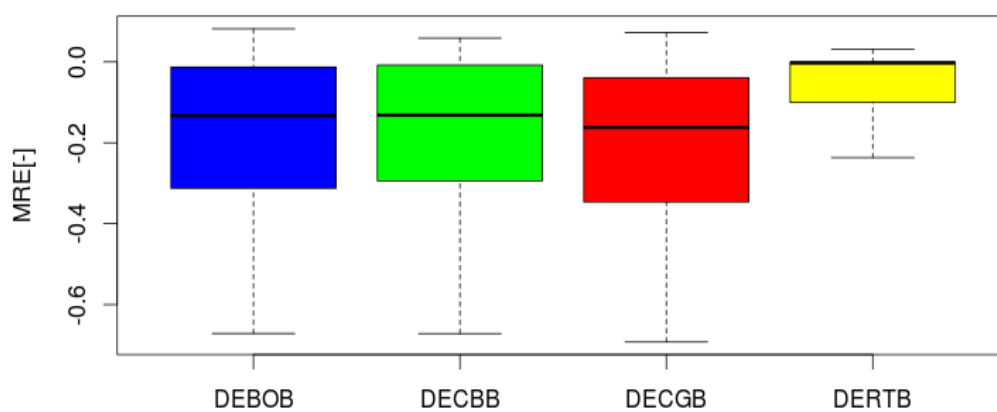
Obrázek B.2: Krabicový graf pro MAPE 1set

Krabicový graf nejlepších MSE hodnot pro všechny DE 1set



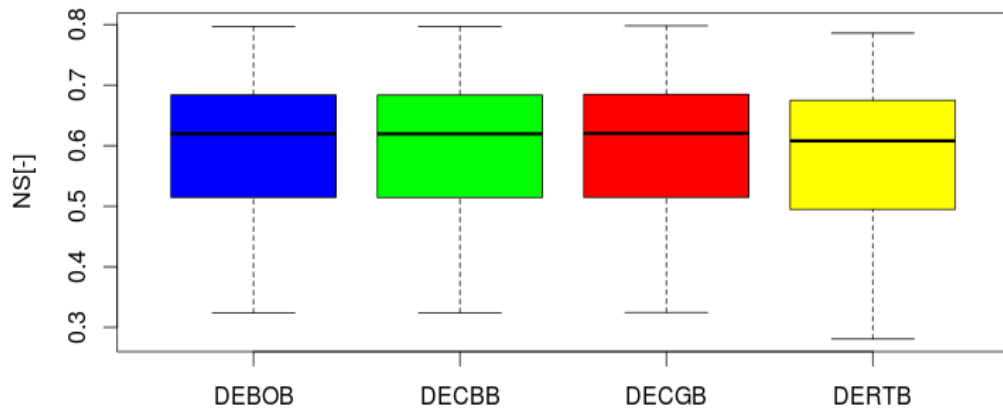
Obrázek B.3: Krabicový graf pro MSE 1set

Krabicový graf nejlepších MRE hodnot pro všechny DE 4set



Obrázek B.4: Krabicový graf pro MRE 1set

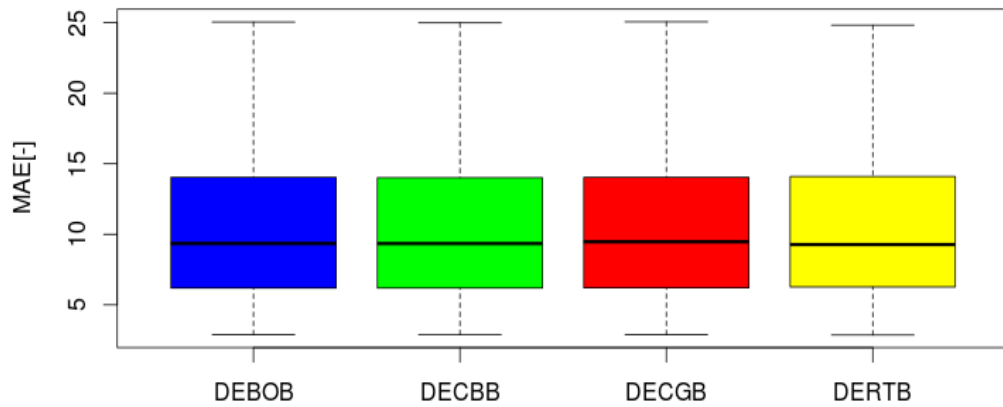
Krabicový graf nejlepších NS hodnot pro všechny DE 1set



Obrázek B.5: Krabicový graf pro NS 1set

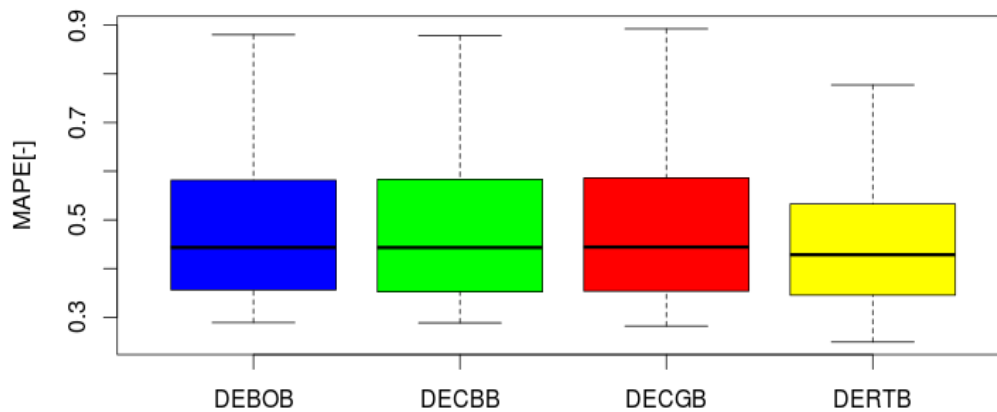
B.1.2 2set

Krabicový graf nejlepších MAE hodnot pro všechny DE 2set



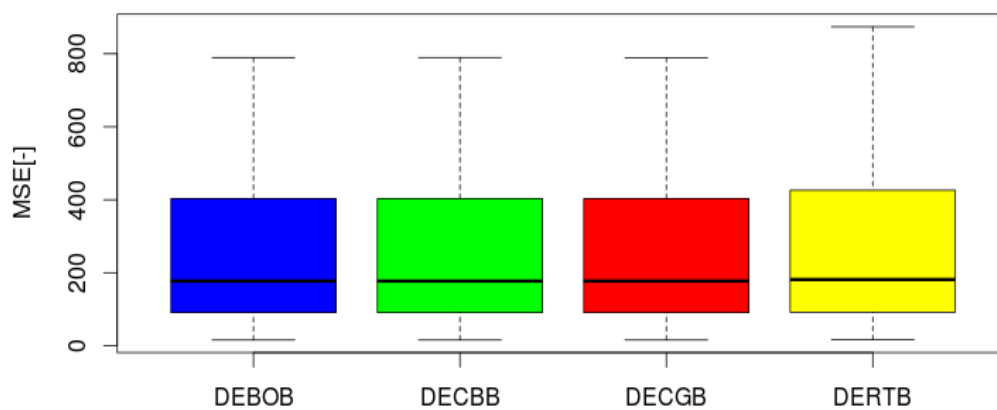
Obrázek B.6: Krabicový graf pro MAE 2set

Krabicový graf nejlepších MAPE hodnot pro všechny DE 2set



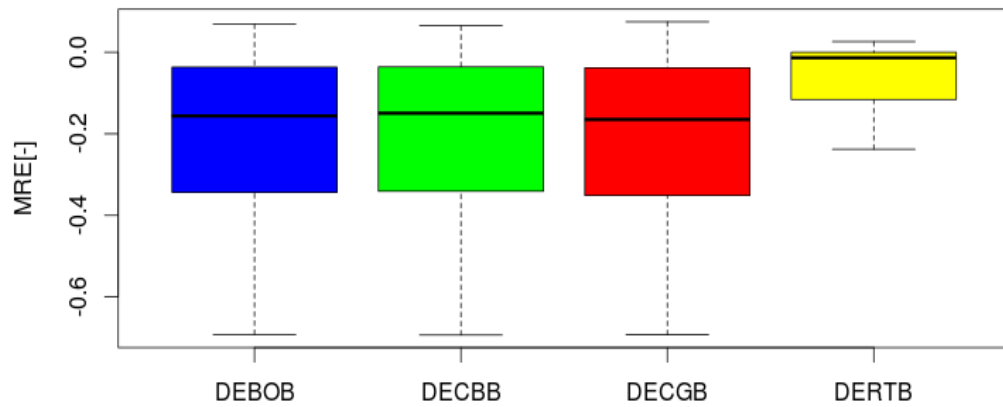
Obrázek B.7: Krabicový graf pro MAPE 2set

Krabicový graf nejlepších MSE hodnot pro všechny DE 2set



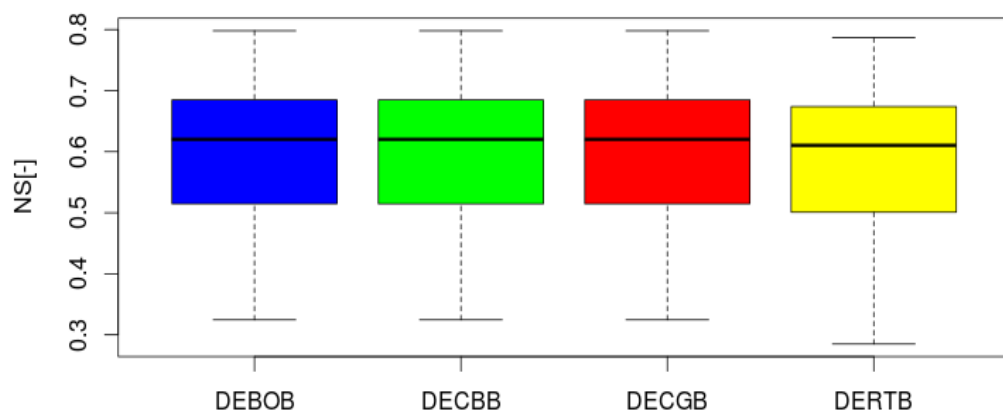
Obrázek B.8: Krabicový graf pro MSE 2set

Krabicový graf nejlepších MRE hodnot pro všechny DE 4set



Obrázek B.9: Krabicový graf pro MRE 2set

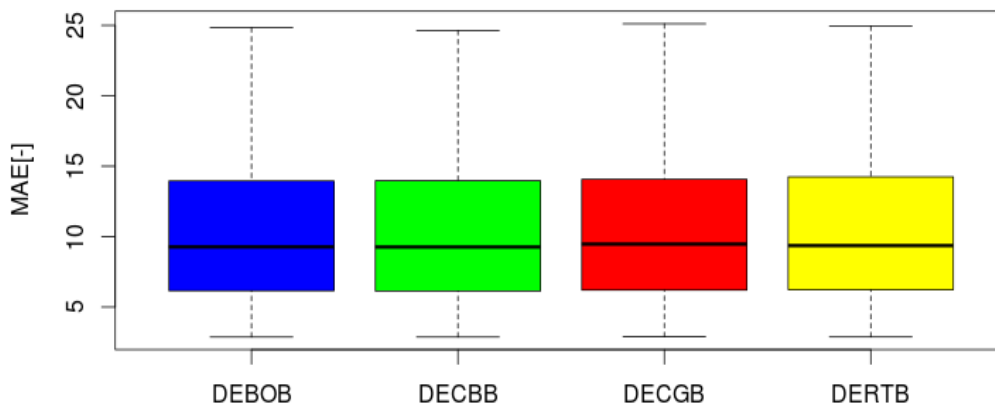
Krabicový graf nejlepších NS hodnot pro všechny DE 2set



Obrázek B.10: Krabicový graf pro NS 2set

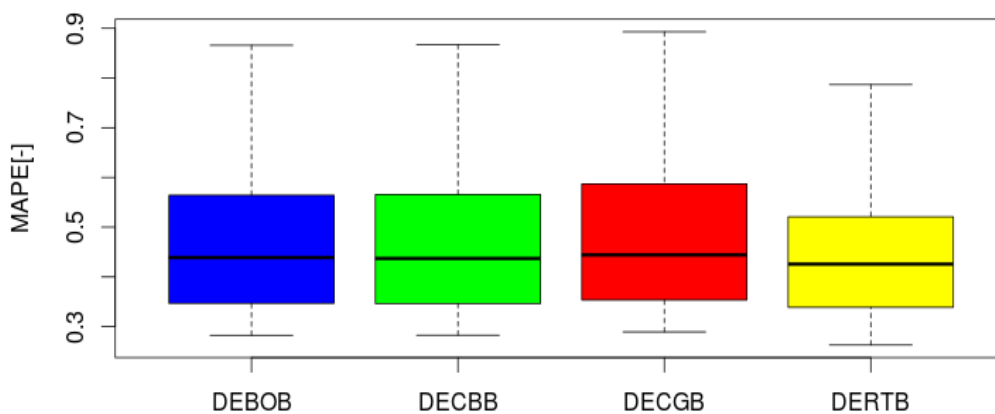
B.1.3 3set

Krabicový graf nejlepších MAE hodnot pro všechny DE 3set



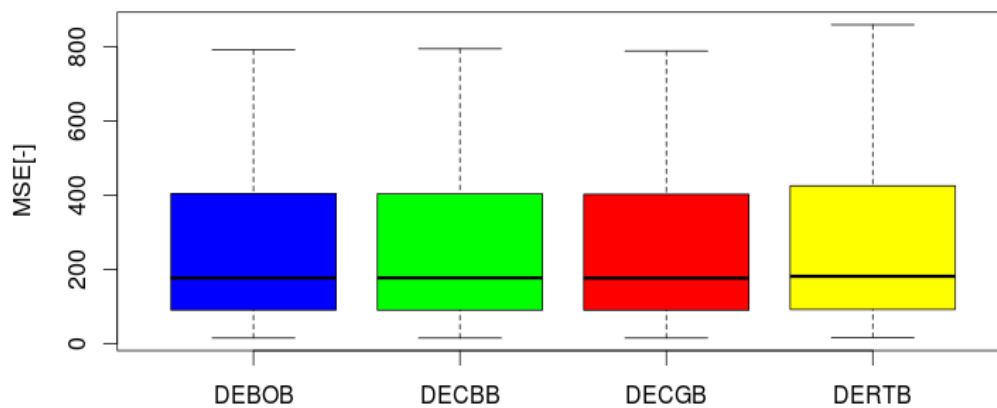
Obrázek B.11: Krabicový graf pro MAE 3set

Krabicový graf nejlepších MAPE hodnot pro všechny DE 3set



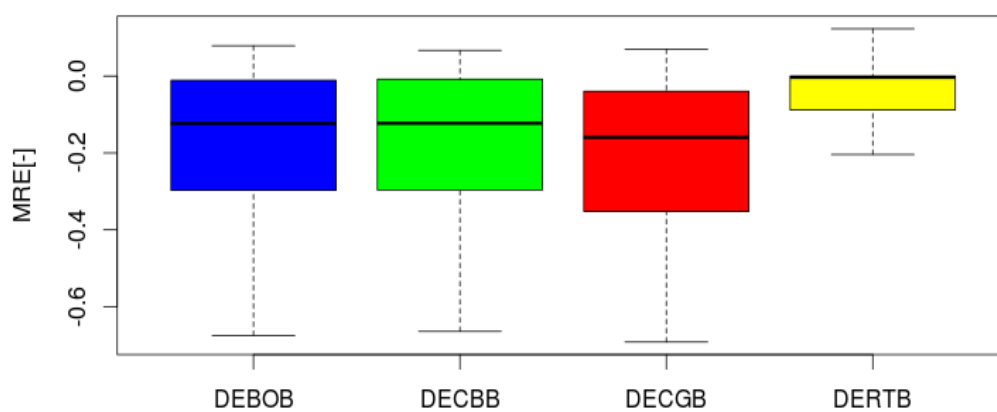
Obrázek B.12: Krabicový graf pro MAPE 3set

Krabicový graf nejlepších MSE hodnot pro všechny DE 3set



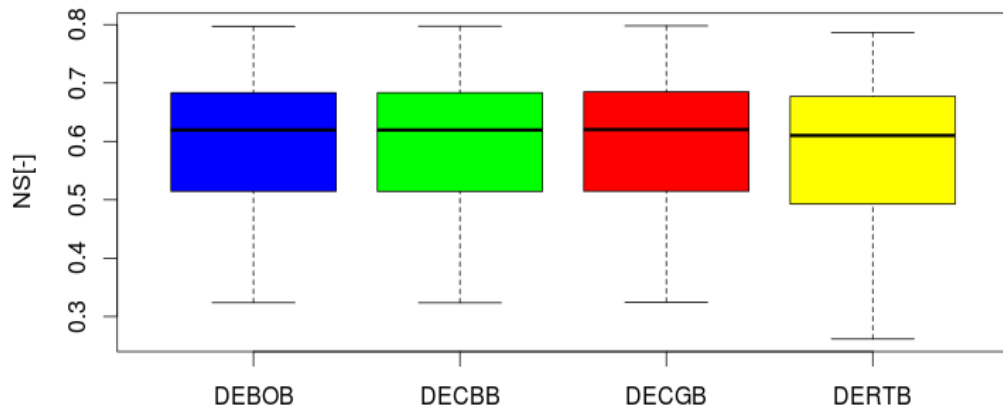
Obrázek B.13: Krabicový graf pro MSE 3set

Krabicový graf nejlepších MRE hodnot pro všechny DE 4set



Obrázek B.14: Krabicový graf pro MRE 3set

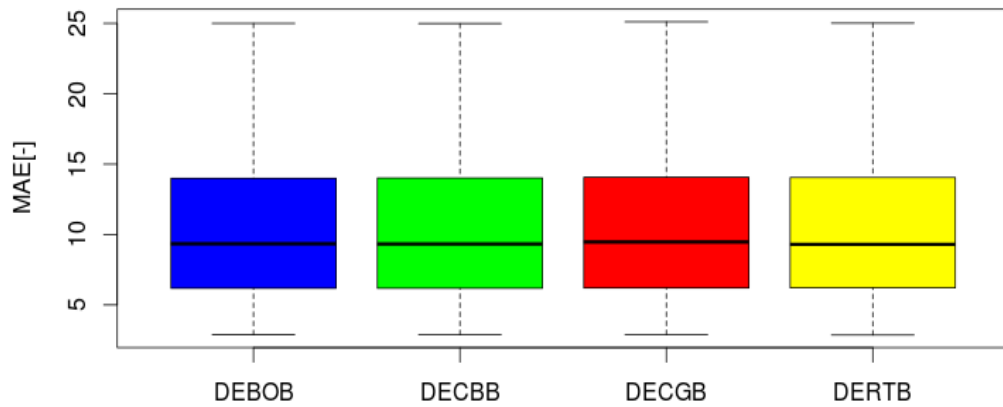
Krabicový graf nejlepších NS hodnot pro všechny DE 3set



Obrázek B.15: Krabicový graf pro NS 3set

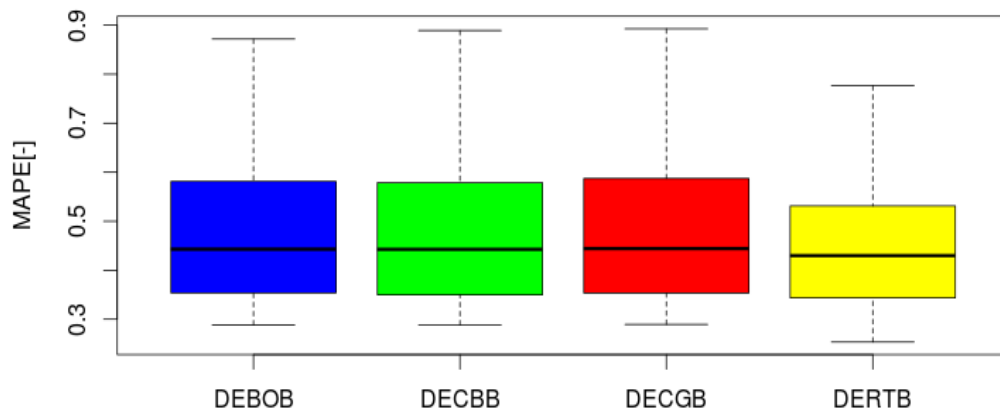
B.1.4 4set

Krabicový graf nejlepších MAE hodnot pro všechny DE 4set



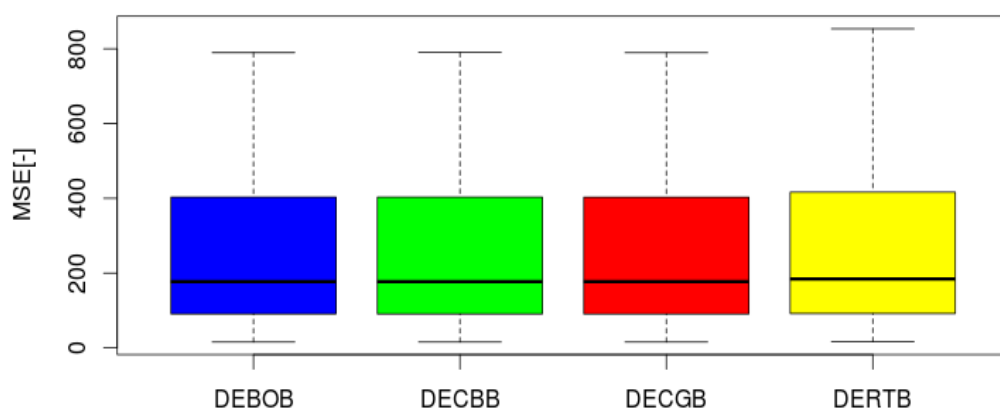
Obrázek B.16: Krabicový graf pro MAE 4set

Krabicový graf nejlepších MAPE hodnot pro všechny DE 4set



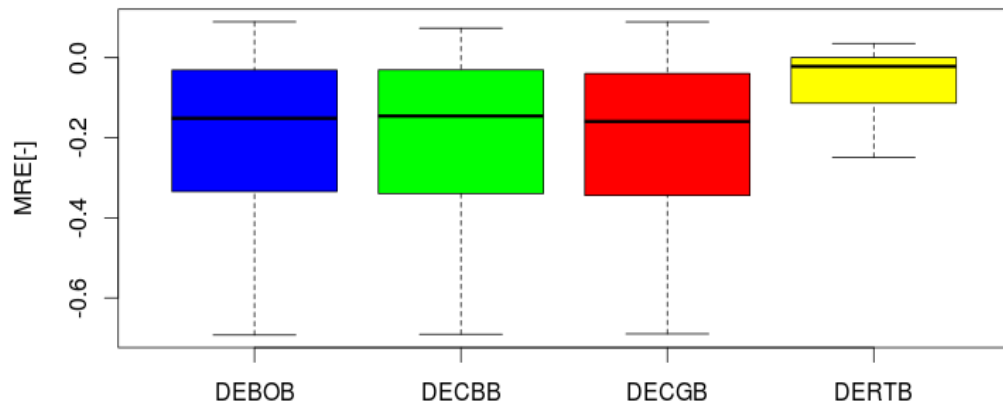
Obrázek B.17: Krabicový graf pro MAPE 4set

Krabicový graf nejlepších MSE hodnot pro všechny DE 4set



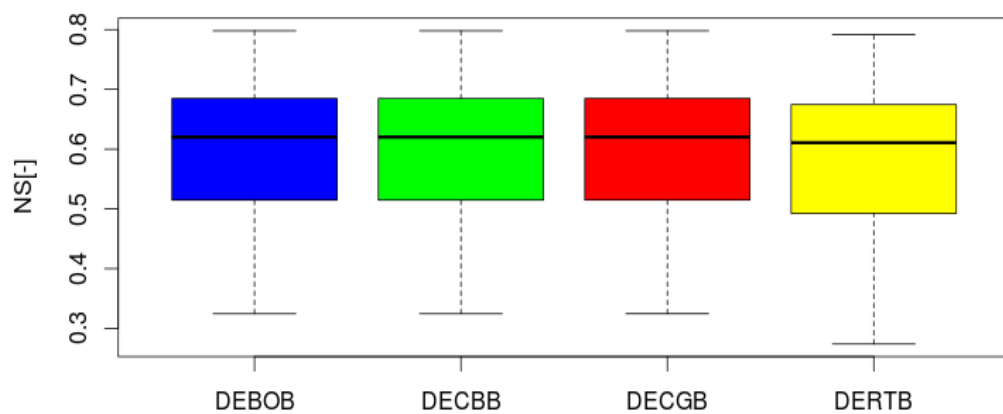
Obrázek B.18: Krabicový graf pro MSE 4set

Krabicový graf nejlepších MRE hodnot pro všechny DE 4set



Obrázek B.19: Krabicový graf pro MRE 4set

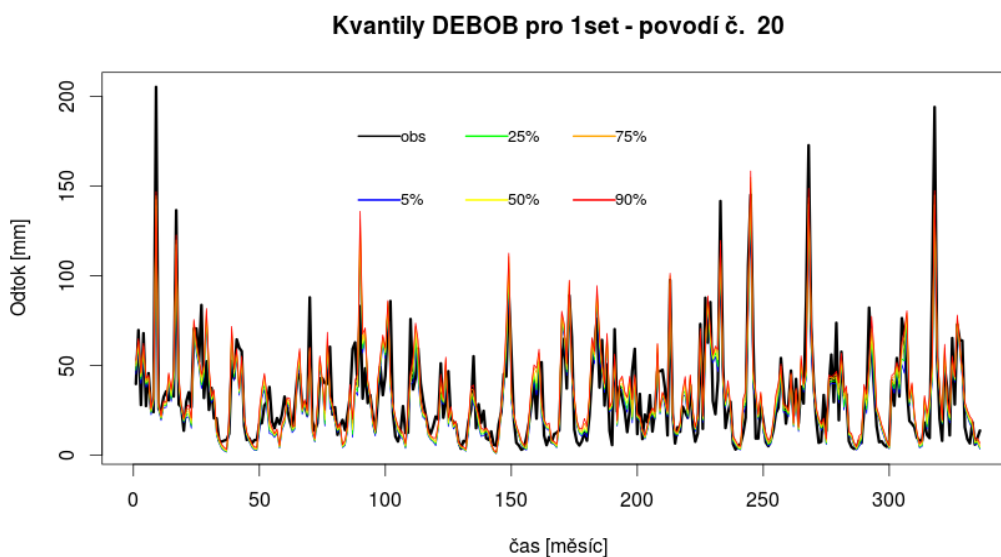
Krabicový graf nejlepších NS hodnot pro všechny DE 4set



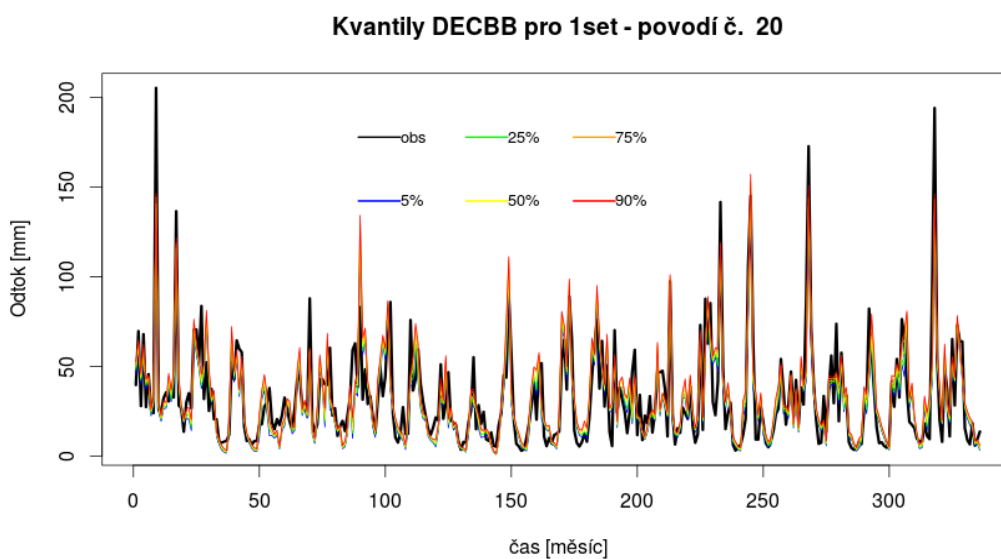
Obrázek B.20: Krabicový graf pro NS 4set

B.2 Porovnání optimalizačních algoritmů - grafy kvantilů

B.2.1 1set

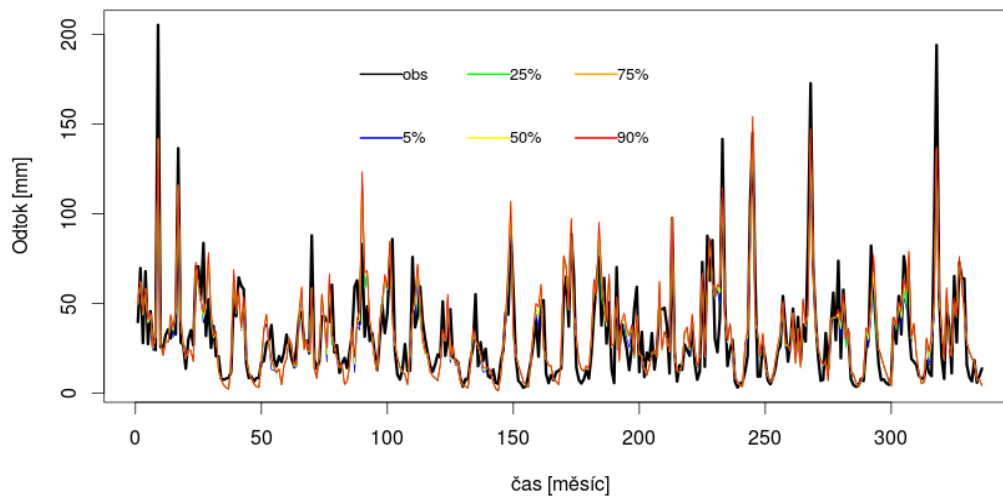


Obrázek B.21: Rozdělení kvantilů DEBOB pro 1set povodí 0310 Častolovice



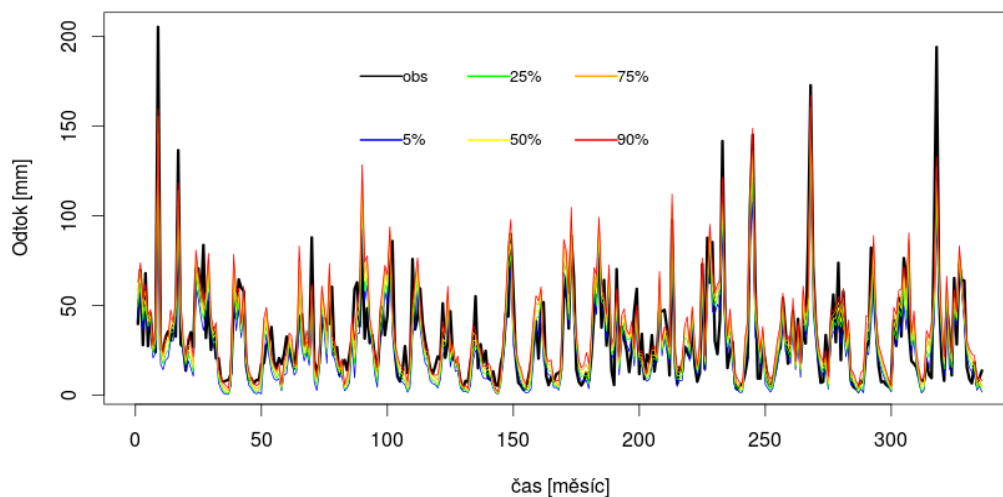
Obrázek B.22: Rozdělení kvantilů DECBB pro 1set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECGB pro 1set - povodí č. 20



Obrázek B.23: Rozdělení kvantilů DECGB pro 1set povodí 0310 Častolovice

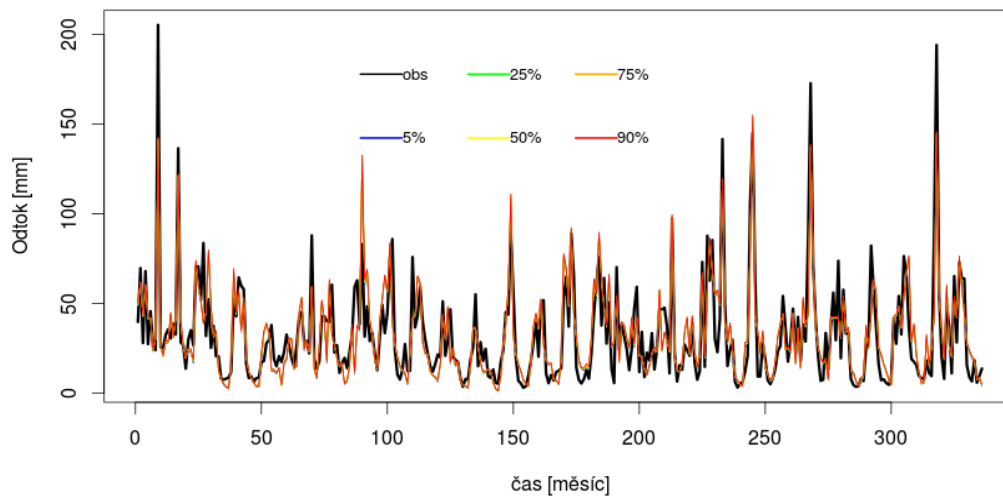
Kvantily DERTB pro 1set - povodí č. 20



Obrázek B.24: Rozdělení kvantilů DERTB pro 1set povodí 0310 Častolovice

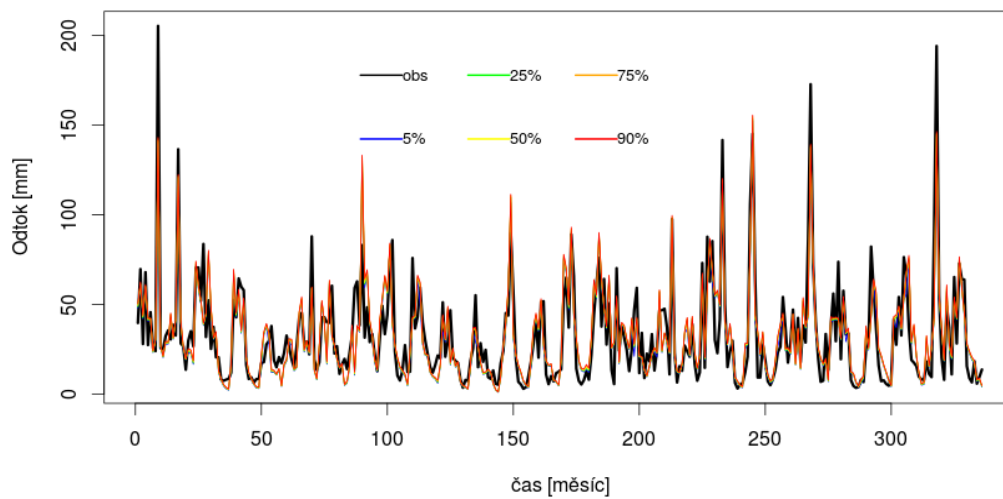
B.2.2 2set

Kvantily DEBOB pro 2set - povodí č. 20



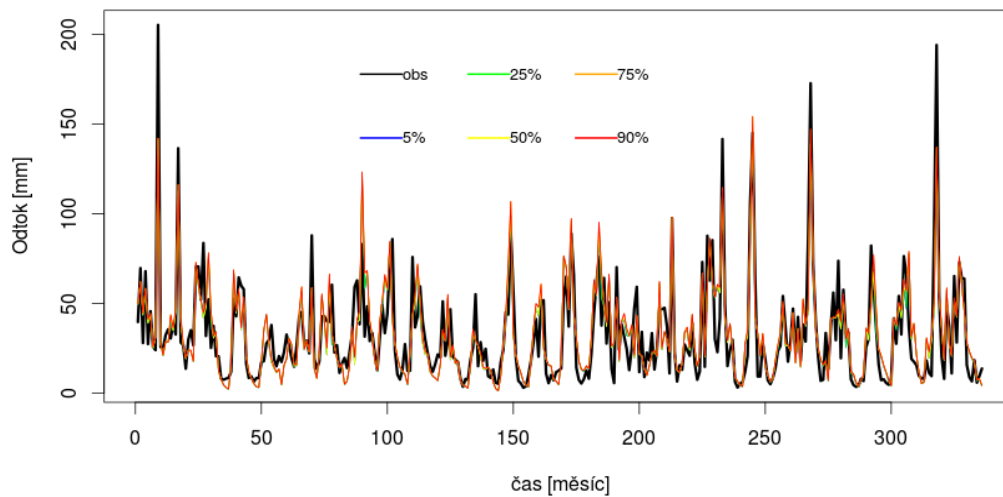
Obrázek B.25: Rozdělení kvantilů DEBOB pro 2set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECBB pro 2set - povodí č. 20



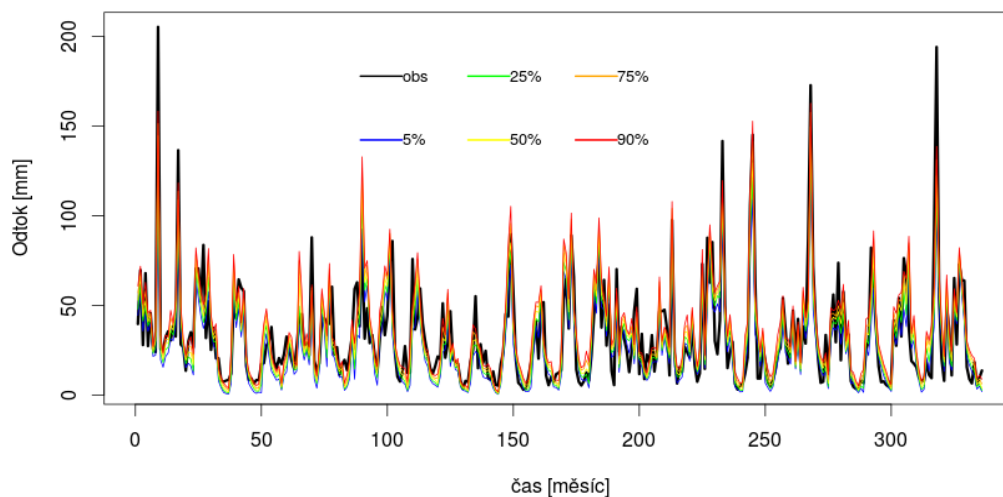
Obrázek B.26: Rozdělení kvantilů DECBB pro 2set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECGB pro 2set - povodí č. 20



Obrázek B.27: Rozdělení kvantilů DECGB pro 2set povodí 0310 Častolovice

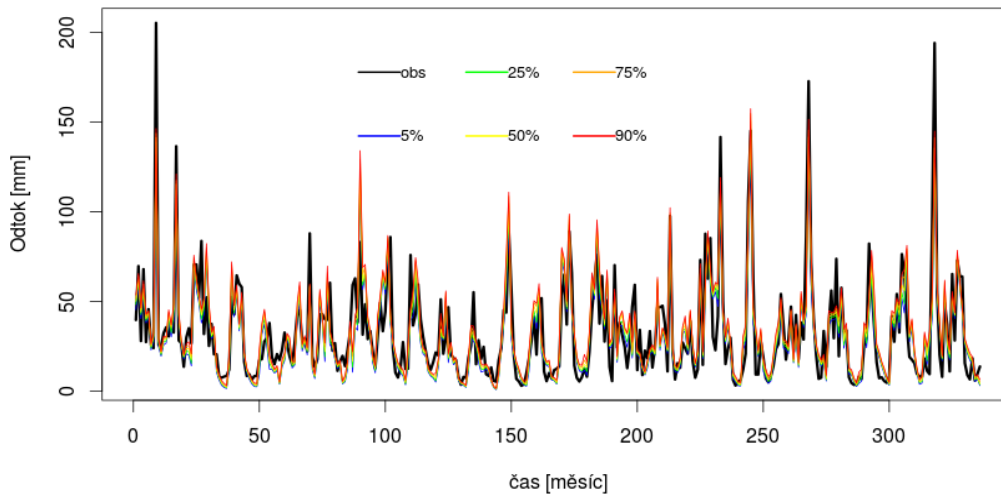
Kvantily DERTB pro 2set - povodí č. 20



Obrázek B.28: Rozdělení kvantilů DERTB pro 2set povodí 0310 Častolovice

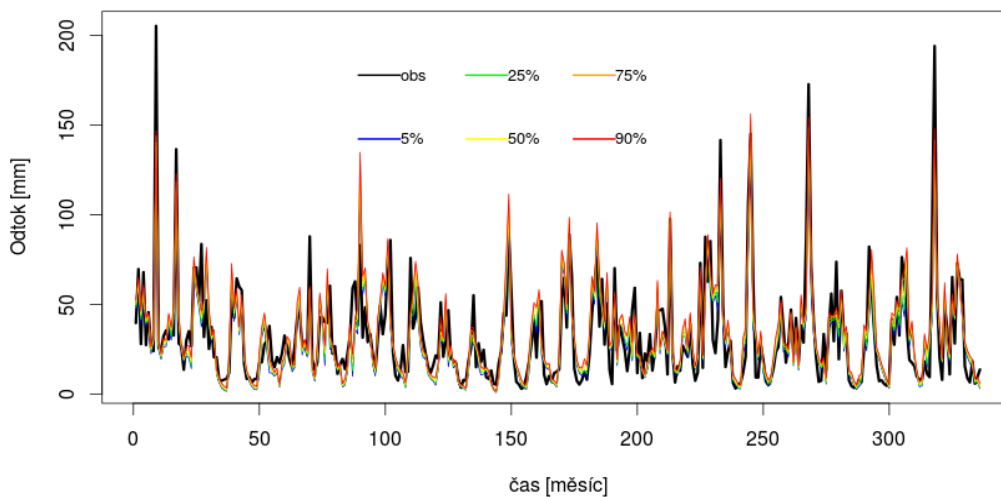
B.2.3 3set

Kvantily DEBOB pro 3set - povodí č. 20



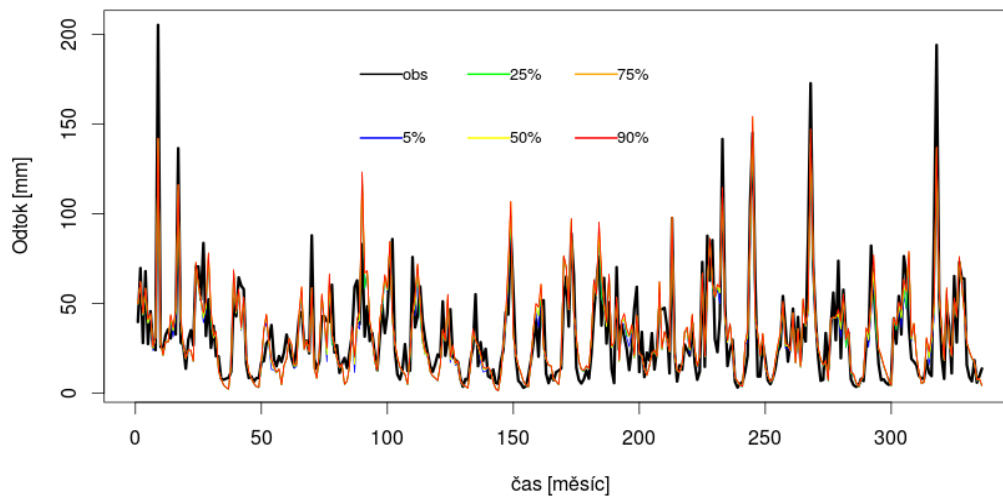
Obrázek B.29: Rozdělení kvantilů DEBOB pro 3set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECBB pro 3set - povodí č. 20



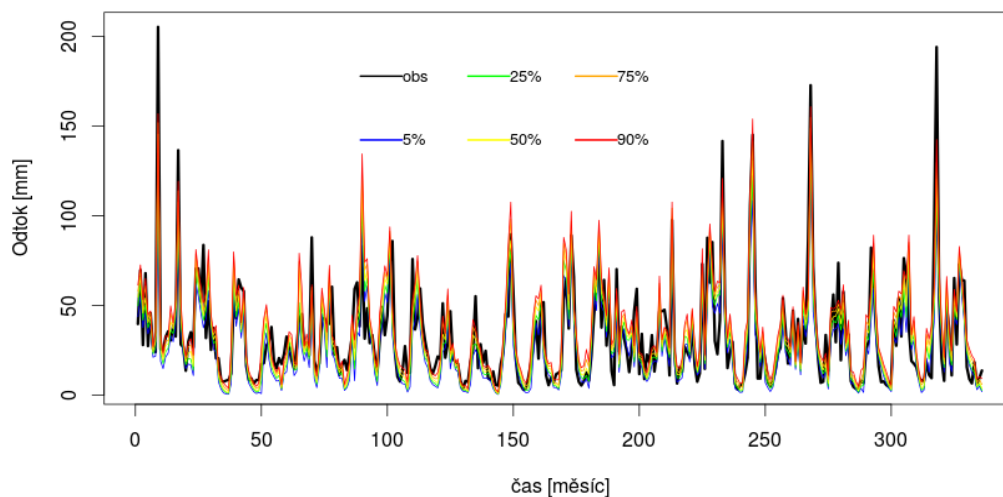
Obrázek B.30: Rozdělení kvantilů DECBB pro 3set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECGB pro 3set - povodí č. 20



Obrázek B.31: Rozdělení kvantilů DECGB pro 3set povodí 0310 Častolovice

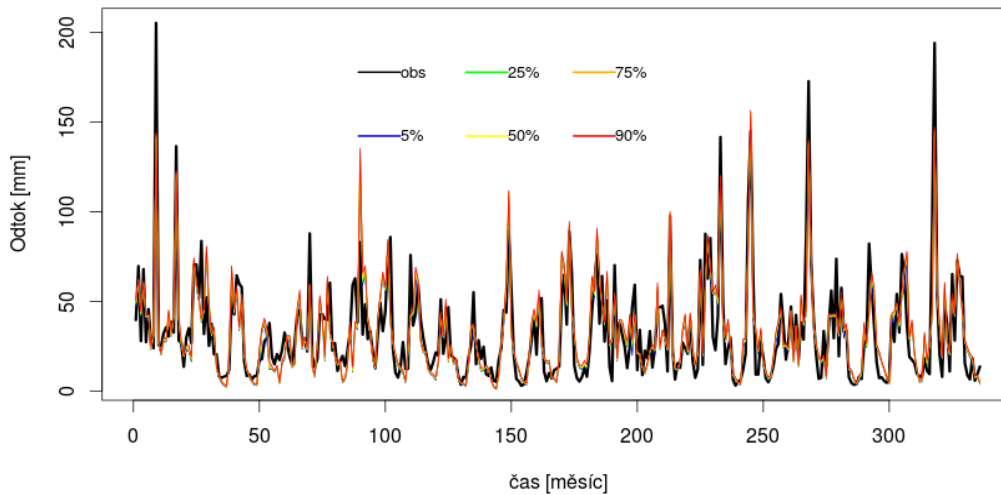
Kvantily DERTB pro 3set - povodí č. 20



Obrázek B.32: Rozdělení kvantilů DERTB pro 3set povodí 0310 Častolovice

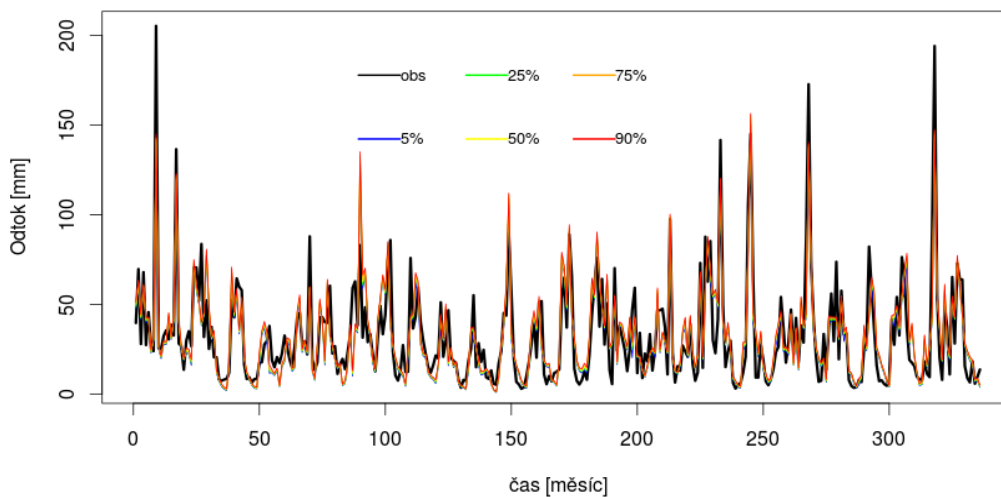
B.2.4 4set

Kvantily DEBOB pro 4set - povodí č. 20



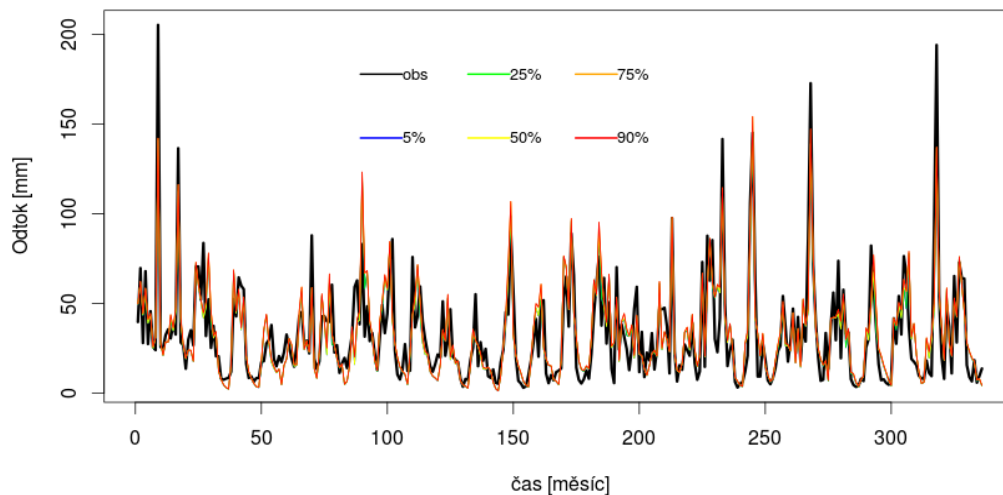
Obrázek B.33: Rozdělení kvantilů DEBOB pro 4set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECBB pro 4set - povodí č. 20



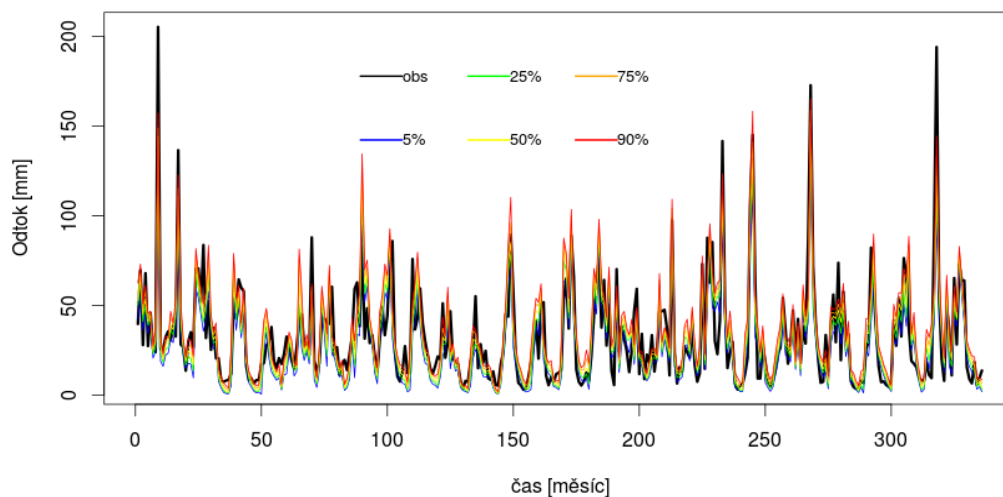
Obrázek B.34: Rozdělení kvantilů DECBB pro 4set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DECGB pro 4set - povodí č. 20



Obrázek B.35: Rozdělení kvantilů DECGB pro 4set povodí 0310 Častolovice

Kvantily DERTB pro 4set - povodí č. 20



Obrázek B.36: Rozdělení kvantilů DERTB pro 4set povodí 0310 Častolovice

C Příloha Výsledky residuí (koeficientů) a statistiky

C.1 NS

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.7052	0.7039	0.7054	0.6979
2	0.5387	0.5380	0.5396	0.5238
3	0.6693	0.6689	0.6705	0.6588
4	0.6348	0.6343	0.6347	0.6204
5	0.4881	0.4881	0.4883	0.4694
6	0.5963	0.5932	0.5971	0.5653
7	0.6503	0.6498	0.6510	0.6076
8	0.4034	0.4032	0.4037	0.3807
9	0.0206	0.0206	0.0217	-0.0606
10	0.5073	0.5074	0.5090	0.4863
11	0.3950	0.3955	0.3959	0.3802
12	0.4424	0.4423	0.4391	0.4080
13	0.5491	0.5492	0.5499	0.5345
14	0.6453	0.6453	0.6461	0.6334
15	0.7026	0.7025	0.7028	0.6953
16	0.7971	0.7968	0.7981	0.7858
17	0.6133	0.6131	0.6142	0.6084
18	0.4938	0.4937	0.4942	0.4827
19	0.5594	0.5583	0.5614	0.5349
20	0.7455	0.7446	0.7468	0.7301
21	0.4763	0.4764	0.4779	0.4580
22	0.5405	0.5402	0.5406	0.5327
23	0.4037	0.4033	0.4060	0.3539
24	0.7395	0.7392	0.7405	0.7306
25	0.5683	0.5683	0.5692	0.5596
26	0.7221	0.7219	0.7224	0.7167
27	0.3509	0.3510	0.3528	0.3247
28	0.5745	0.5745	0.5750	0.5649
29	0.6492	0.6488	0.6496	0.6393
30	0.7635	0.7635	0.7641	0.7569
31	0.7819	0.7817	0.7823	0.7745
32	0.4740	0.4740	0.4742	0.4689
33	0.6755	0.6758	0.6759	0.6673
34	0.7161	0.7154	0.7170	0.7066
35	0.5145	0.5145	0.5147	0.5072
36	0.6057	0.6056	0.6058	0.6006
37	0.7104	0.7102	0.7116	0.7001
38	0.6551	0.6550	0.6556	0.6486
39	0.6010	0.6010	0.6011	0.5872

40	0.7197	0.7197	0.7198	0.7168
41	0.6466	0.6465	0.6467	0.6381
42	0.6839	0.6836	0.6849	0.6750
43	0.3235	0.3239	0.3245	0.2806
44	0.5244	0.5239	0.5263	0.4948
45	0.6940	0.6926	0.6945	0.6879
46	0.6260	0.6258	0.6263	0.6158
47	0.6345	0.6342	0.6347	0.6298
48	0.6521	0.6518	0.6527	0.6435
49	0.6283	0.6279	0.6289	0.6158
50	0.5578	0.5575	0.5579	0.5496

Tabulka 28: Nejlepší hodnoty NS pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.7054	0.7053	0.7054	0.6972
2	0.5396	0.5395	0.5396	0.5317
3	0.6705	0.6704	0.6705	0.6569
4	0.6360	0.6357	0.6350	0.6270
5	0.4883	0.4883	0.4883	0.4759
6	0.5971	0.5969	0.5971	0.5737
7	0.6510	0.6509	0.6510	0.6136
8	0.4037	0.4037	0.4037	0.3892
9	0.0216	0.0216	0.0217	-0.0223
10	0.5089	0.5090	0.5090	0.4938
11	0.3959	0.3959	0.3959	0.3801
12	0.4426	0.4426	0.4360	0.3997
13	0.5499	0.5499	0.5499	0.5423
14	0.6461	0.6461	0.6461	0.6355
15	0.7028	0.7028	0.7028	0.6891
16	0.7981	0.7981	0.7981	0.7866
17	0.6141	0.6141	0.6142	0.6072
18	0.4942	0.4942	0.4942	0.4868
19	0.5612	0.5611	0.5614	0.5359
20	0.7467	0.7467	0.7468	0.7400
21	0.4778	0.4778	0.4779	0.4684
22	0.5406	0.5406	0.5406	0.5315
23	0.4058	0.4057	0.4060	0.3653
24	0.7405	0.7405	0.7405	0.7336
25	0.5690	0.5691	0.5692	0.5594
26	0.7224	0.7224	0.7224	0.7171
27	0.3527	0.3526	0.3527	0.3278
28	0.5750	0.5750	0.5750	0.5680
29	0.6496	0.6496	0.6496	0.6415
30	0.7640	0.7640	0.7641	0.7597

31	0.7823	0.7822	0.7823	0.7762
32	0.4742	0.4742	0.4742	0.4698
33	0.6759	0.6759	0.6759	0.6692
34	0.7170	0.7169	0.7170	0.7063
35	0.5147	0.5147	0.5147	0.5063
36	0.6058	0.6058	0.6058	0.5980
37	0.7115	0.7115	0.7116	0.6996
38	0.6556	0.6556	0.6556	0.6511
39	0.6011	0.6011	0.6011	0.5844
40	0.7198	0.7198	0.7198	0.7153
41	0.6467	0.6467	0.6467	0.6424
42	0.6848	0.6848	0.6849	0.6738
43	0.3245	0.3245	0.3245	0.2848
44	0.5262	0.5262	0.5263	0.5007
45	0.6945	0.6944	0.6945	0.6880
46	0.6263	0.6263	0.6263	0.6158
47	0.6347	0.6347	0.6347	0.6315
48	0.6527	0.6527	0.6527	0.6481
49	0.6289	0.6288	0.6289	0.6190
50	0.5579	0.5579	0.5579	0.5540

Tabulka 29: Nejlepší hodnoty NS pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.7048	0.7041	0.7054	0.6975
2	0.5383	0.5388	0.5396	0.5254
3	0.6702	0.6689	0.6705	0.6575
4	0.6343	0.6343	0.6353	0.6244
5	0.4880	0.4880	0.4883	0.4683
6	0.5953	0.5927	0.5971	0.5694
7	0.6499	0.6485	0.6510	0.6199
8	0.4024	0.4024	0.4037	0.3791
9	0.0202	0.0201	0.0217	-0.0269
10	0.5079	0.5066	0.5090	0.4927
11	0.3947	0.3953	0.3959	0.3810
12	0.4417	0.4417	0.4360	0.4117
13	0.5491	0.5490	0.5499	0.5407
14	0.6454	0.6453	0.6461	0.6256
15	0.7026	0.7026	0.7028	0.6931
16	0.7971	0.7973	0.7981	0.7866
17	0.6133	0.6130	0.6142	0.6066
18	0.4938	0.4936	0.4942	0.4822
19	0.5580	0.5570	0.5614	0.5343
20	0.7453	0.7446	0.7468	0.7352
21	0.4769	0.4765	0.4779	0.4662

22	0.5403	0.5400	0.5406	0.5346
23	0.4028	0.4033	0.4060	0.3538
24	0.7390	0.7391	0.7405	0.7284
25	0.5682	0.5682	0.5692	0.5620
26	0.7221	0.7219	0.7224	0.7143
27	0.3507	0.3514	0.3528	0.3217
28	0.5748	0.5746	0.5750	0.5650
29	0.6490	0.6489	0.6496	0.6360
30	0.7637	0.7636	0.7641	0.7574
31	0.7818	0.7820	0.7823	0.7721
32	0.4740	0.4739	0.4742	0.4676
33	0.6750	0.6752	0.6759	0.6684
34	0.7151	0.7154	0.7170	0.7086
35	0.5145	0.5144	0.5147	0.5058
36	0.6057	0.6056	0.6058	0.5998
37	0.7105	0.7099	0.7116	0.6985
38	0.6548	0.6551	0.6556	0.6490
39	0.6010	0.6010	0.6011	0.5877
40	0.7197	0.7197	0.7198	0.7150
41	0.6466	0.6465	0.6467	0.6404
42	0.6833	0.6834	0.6849	0.6772
43	0.3237	0.3236	0.3245	0.2615
44	0.5248	0.5232	0.5263	0.4773
45	0.6937	0.6930	0.6945	0.6845
46	0.6256	0.6259	0.6263	0.6138
47	0.6343	0.6339	0.6347	0.6297
48	0.6520	0.6511	0.6527	0.6459
49	0.6285	0.6281	0.6289	0.6144
50	0.5574	0.5574	0.5579	0.5441

Tabulka 30: Nejlepší hodnoty NS pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.7053	0.7052	0.7054	0.7021
2	0.5394	0.5393	0.5396	0.5237
3	0.6703	0.6702	0.6705	0.6628
4	0.6355	0.6357	0.6347	0.6165
5	0.4883	0.4883	0.4883	0.4716
6	0.5971	0.5966	0.5971	0.5674
7	0.6509	0.6507	0.6510	0.6227
8	0.4034	0.4035	0.4037	0.3833
9	0.0213	0.0215	0.0217	-0.0203
10	0.5089	0.5087	0.5090	0.4923
11	0.3959	0.3958	0.3959	0.3824
12	0.4425	0.4425	0.4360	0.4136

13	0.5499	0.5498	0.5499	0.5408
14	0.6461	0.6460	0.6461	0.6315
15	0.7028	0.7028	0.7028	0.6848
16	0.7980	0.7981	0.7981	0.7914
17	0.6141	0.6141	0.6142	0.6051
18	0.4941	0.4941	0.4942	0.4836
19	0.5610	0.5608	0.5614	0.5303
20	0.7465	0.7465	0.7468	0.7352
21	0.4776	0.4775	0.4779	0.4692
22	0.5406	0.5406	0.5406	0.5320
23	0.4054	0.4054	0.4060	0.3317
24	0.7404	0.7404	0.7405	0.7329
25	0.5691	0.5689	0.5692	0.5631
26	0.7223	0.7223	0.7224	0.7167
27	0.3525	0.3525	0.3528	0.3326
28	0.5750	0.5750	0.5750	0.5673
29	0.6496	0.6495	0.6496	0.6413
30	0.7640	0.7640	0.7641	0.7599
31	0.7822	0.7822	0.7823	0.7748
32	0.4742	0.4742	0.4742	0.4728
33	0.6758	0.6758	0.6759	0.6717
34	0.7169	0.7169	0.7170	0.7082
35	0.5147	0.5147	0.5147	0.5078
36	0.6058	0.6058	0.6058	0.5998
37	0.7115	0.7115	0.7116	0.7032
38	0.6555	0.6555	0.6556	0.6513
39	0.6011	0.6011	0.6011	0.5936
40	0.7198	0.7198	0.7198	0.7151
41	0.6467	0.6467	0.6467	0.6407
42	0.6848	0.6847	0.6849	0.6745
43	0.3245	0.3245	0.3245	0.2737
44	0.5261	0.5259	0.5263	0.4924
45	0.6944	0.6940	0.6945	0.6814
46	0.6263	0.6263	0.6263	0.6205
47	0.6347	0.6346	0.6347	0.6297
48	0.6527	0.6526	0.6527	0.6480
49	0.6288	0.6288	0.6289	0.6222
50	0.5579	0.5579	0.5579	0.5517

Tabulka 31: Nejlepší hodnoty NS pro 4set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.537075	0.438367	0.715234
DECBB	0.465665	0.501375	0.430229	0.715234
DECGB	0.564349	0.572478	0.501375	0.724518

DERTB	0.287110	0.287110	0.277789	0.501375
-------	----------	----------	----------	----------

Tabulka 32: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší NS pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.539812	0.438367	0.698637
DECBB	0.462925	0.501375	0.438367	0.698637
DECGB	0.564349	0.564349	0.501375	0.696231
DERTB	0.303769	0.303769	0.306184	0.501375

Tabulka 33: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší NS pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.528852	0.430229	0.712890
DECBB	0.473891	0.501375	0.424819	0.710536
DECGB	0.572478	0.577880	0.501375	0.729103
DERTB	0.289464	0.291826	0.273185	0.501375

Tabulka 34: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší NS pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.537075	0.438367	0.710536
DECBB	0.465665	0.501375	0.438367	0.708174
DECGB	0.564349	0.564349	0.501375	0.710536
DERTB	0.291826	0.294197	0.291826	0.501375

Tabulka 35: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší NS pro 4set všech 50 povodí.

C.2 MAE

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	35.5481	35.5085	35.8314	35.4072
2	20.5525	20.5128	20.8193	20.8497
3	13.3123	13.3149	13.3596	13.5583
4	8.5587	8.5300	8.6253	8.6897
5	14.0666	14.0376	14.1380	14.1402
6	27.1745	27.2572	27.1993	28.2321
7	20.0810	20.0925	20.0938	20.5986
8	13.9759	13.9567	14.0237	14.3359
9	8.1951	8.1674	8.2565	8.5113
10	8.7234	8.7935	8.8499	8.7932
11	10.0693	10.0796	10.1511	10.0852
12	9.3236	9.3354	9.3863	9.3750
13	9.1419	9.1406	9.2465	9.1410
14	8.6848	8.6786	8.7149	8.8221
15	4.8005	4.8041	4.8742	4.7081
16	13.9035	13.8412	14.0189	14.1262
17	20.4986	20.4761	20.6388	20.5825
18	21.6307	21.6524	21.6987	21.6991
19	13.3973	13.4069	13.4994	13.2273
20	10.2763	10.2427	10.3109	10.4769
21	15.0610	15.0867	15.1867	15.2898
22	12.6688	12.6662	12.7193	12.7378
23	8.4277	8.4208	8.4885	8.8949
24	9.0214	9.0871	9.1817	9.1777
25	13.6169	13.5771	13.7442	13.6990
26	7.1040	7.0900	7.1570	7.1232
27	6.7532	6.7586	6.7772	6.7931
28	5.6602	5.6650	5.7214	5.6955
29	3.8088	3.8095	3.8512	3.7462
30	9.2633	9.2038	9.3195	9.2505
31	8.3216	8.3186	8.3739	8.2705
32	11.5344	11.5186	11.5877	11.5083
33	5.6783	5.6673	5.7068	5.6325
34	6.1026	6.1465	6.1908	6.2010
35	11.6705	11.6575	11.7248	11.4662
36	7.6396	7.6348	7.6587	7.6402
37	6.1367	6.1277	6.2040	6.2312
38	5.9923	5.9729	6.0362	5.9819
39	5.4760	5.4677	5.4979	5.3412
40	4.9295	4.9233	4.9530	4.8689
41	4.0304	4.0366	4.0520	3.9774

42	5.5203	5.5315	5.5772	5.5579
43	5.9314	5.9185	6.0151	5.9772
44	2.8716	2.8656	2.8822	2.9053
45	32.3981	32.2844	32.4393	32.3399
46	10.7158	10.7053	10.7730	10.7470
47	24.9061	24.7909	25.1163	25.0450
48	19.2972	19.2875	19.3580	19.4170
49	16.8450	16.8570	16.9543	17.0817
50	9.9601	9.9477	10.0384	9.9195

Tabulka 36: Nejlepší hodnoty MAE pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	35.9876	35.8879	35.9091	35.5009
2	20.7613	20.6574	20.8280	20.8036
3	13.3493	13.3383	13.3665	13.5133
4	8.6218	8.6091	8.6357	8.6372
5	14.1128	14.1122	14.1372	13.9403
6	27.1703	27.1653	27.1925	28.0216
7	20.1102	20.0930	20.0941	20.8304
8	14.0492	14.0118	14.0366	14.3578
9	8.2156	8.2624	8.2289	7.9158
10	8.8204	8.8033	8.8496	8.8930
11	10.1271	10.1299	10.1521	10.0294
12	9.3874	9.3879	9.6184	9.2344
13	9.2292	9.2315	9.2468	9.0811
14	8.6913	8.6938	8.7096	8.7459
15	4.8679	4.8637	4.8750	4.6902
16	13.9802	13.9696	14.0191	14.0953
17	20.5965	20.5903	20.6394	20.7348
18	21.6794	21.6749	21.6990	21.6294
19	13.4712	13.3366	13.4969	13.3393
20	10.2680	10.2618	10.3119	10.4692
21	15.1359	15.1577	15.1889	15.1977
22	12.7031	12.7090	12.7201	12.6208
23	8.5133	8.4919	8.5180	8.8186
24	9.1043	9.1431	9.1820	9.2111
25	13.7113	13.7080	13.7368	13.7138
26	7.1542	7.1493	7.1671	7.0902
27	6.7784	6.7986	6.7793	6.8061
28	5.7093	5.7071	5.7216	5.6517
29	3.8493	3.8463	3.8004	3.7661
30	9.3110	9.3024	9.3195	9.3133
31	8.3653	8.3593	8.3739	8.4220
32	11.5856	11.5830	11.5878	11.5586

33	5.7021	5.6995	5.7066	5.7023
34	6.1783	6.1848	6.1938	6.2695
35	11.7160	11.7139	11.7250	11.5472
36	7.6544	7.6551	7.6574	7.6597
37	6.1859	6.1826	6.2041	6.1930
38	6.0168	6.0021	6.0357	5.9432
39	5.4945	5.4920	5.4984	5.3205
40	4.9491	4.9466	4.9539	4.8559
41	3.9405	3.9847	4.0519	3.9566
42	5.5648	5.5602	5.5781	5.5555
43	5.9956	5.9841	6.0167	5.9061
44	2.8777	2.8819	2.8842	2.8581
45	32.4669	32.3150	32.4815	32.3453
46	10.7639	10.7536	10.7751	10.7447
47	25.0486	24.9860	25.0654	24.8277
48	19.3375	19.3376	19.3578	19.4496
49	16.9260	16.9160	16.9543	17.1035
50	10.0278	10.0266	10.0435	9.8271

Tabulka 37: Nejlepší hodnoty MAE pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	35.4536	35.4248	35.9112	35.9323
2	20.5418	20.3971	20.8437	20.6802
3	13.3248	13.3075	13.3668	13.5720
4	8.6224	8.5977	8.5959	8.5097
5	14.0251	14.0520	14.1377	13.9149
6	27.1690	27.2680	27.1844	28.0980
7	20.0963	20.0668	20.0809	20.7077
8	13.9564	13.9744	14.0685	14.3498
9	8.1457	8.1452	8.2358	8.2984
10	8.6897	8.6849	8.8514	8.8115
11	10.0559	10.0543	10.1519	9.9637
12	9.3001	9.2977	9.6185	9.4588
13	9.1342	9.1077	9.2468	9.0723
14	8.6596	8.6610	8.7146	8.8090
15	4.8146	4.8149	4.8749	4.8114
16	13.8406	13.8521	14.0190	14.2446
17	20.4997	20.4666	20.6421	20.8331
18	21.6279	21.6350	21.6991	21.6550
19	13.4085	13.3869	13.5005	13.5089
20	10.2123	10.2628	10.3118	10.5881
21	15.0029	15.0282	15.1972	15.1582
22	12.6576	12.6476	12.7201	12.6813
23	8.4035	8.4304	8.5141	8.8534

24	9.0586	9.1016	9.1807	9.2613
25	13.5977	13.6066	13.7429	13.7402
26	7.0998	7.1052	7.1581	7.0988
27	6.7683	6.7734	6.7787	6.8579
28	5.6749	5.6385	5.7218	5.6877
29	3.8118	3.8241	3.8510	3.7985
30	9.2333	9.2215	9.3195	9.2401
31	8.3087	8.3133	8.3740	8.4224
32	11.5324	11.5349	11.5874	11.5669
33	5.6623	5.6825	5.7068	5.7186
34	6.1541	6.1181	6.1852	6.2346
35	11.6702	11.6524	11.7263	11.4845
36	7.6289	7.6316	7.6567	7.6624
37	6.1270	6.1318	6.2036	6.1758
38	5.9446	5.9726	6.0345	5.9552
39	5.4624	5.4628	5.4984	5.3243
40	4.9187	4.9270	4.9539	4.8501
41	4.0345	4.0427	4.0522	3.8886
42	5.5349	5.5180	5.5787	5.5490
43	5.9268	5.9099	6.0170	5.9219
44	2.8688	2.8679	2.8871	2.8749
45	32.2855	32.3448	32.4673	32.1083
46	10.7152	10.7178	10.7700	10.8164
47	24.8403	24.6439	25.1154	24.9616
48	19.2745	19.3267	19.3586	19.4139
49	16.8628	16.8695	16.9547	17.1527
50	9.9529	9.9351	10.0448	9.8136

Tabulka 38: Nejlepší hodnoty MAE pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	35.8628	35.4058	35.9096	35.8784
2	20.6418	20.5898	20.8332	20.8138
3	13.3341	13.3244	13.3677	13.4847
4	8.5758	8.5991	8.5530	8.5088
5	14.0963	14.0996	14.1399	14.0403
6	27.1712	27.1630	27.1923	28.1906
7	20.0985	20.0868	20.0978	20.3600
8	13.9932	14.0165	14.0692	14.1993
9	8.2378	8.2057	8.2362	8.1773
10	8.7802	8.7705	8.8511	8.7895
11	10.0988	10.1083	10.1500	10.1083
12	9.3825	9.3614	9.6185	9.3470
13	9.2272	9.2158	9.2461	9.0612
14	8.6772	8.6811	8.7158	8.7593

15	4.8586	4.8567	4.8750	4.6978
16	13.9556	13.9460	14.0192	14.0528
17	20.5894	20.5666	20.6402	20.7266
18	21.6685	21.6613	21.6993	21.7132
19	13.4065	13.3519	13.4984	13.4455
20	10.2263	10.2506	10.3081	10.4080
21	15.1056	15.1287	15.1945	15.3060
22	12.7031	12.7017	12.7202	12.7843
23	8.4842	8.4559	8.5172	8.8303
24	9.1408	9.0944	9.1866	9.2544
25	13.6948	13.6762	13.7367	13.8100
26	7.1525	7.1455	7.1589	7.0981
27	6.7762	6.7956	6.7781	6.8544
28	5.7087	5.7029	5.7210	5.6772
29	3.8427	3.8419	3.8510	3.7325
30	9.2973	9.2946	9.3195	9.2520
31	8.3564	8.3432	8.3740	8.3365
32	11.5823	11.5791	11.5916	11.5601
33	5.7009	5.6970	5.7066	5.6935
34	6.1619	6.1568	6.1928	6.2112
35	11.7058	11.7111	11.7261	11.5297
36	7.6521	7.6520	7.6590	7.6409
37	6.1796	6.1779	6.2041	6.2093
38	6.0112	6.0081	6.0365	5.9070
39	5.4915	5.4903	5.4985	5.3571
40	4.9477	4.9457	4.9537	4.8534
41	3.9473	4.0490	4.0520	3.9123
42	5.5596	5.5408	5.5796	5.5221
43	5.9812	5.9855	6.0169	5.9837
44	2.8771	2.8807	2.8857	2.8576
45	32.4133	32.4301	32.4604	32.3242
46	10.7511	10.7453	10.7752	10.8418
47	25.0016	24.9900	25.1166	25.0181
48	19.3269	19.3289	19.3583	19.5196
49	16.8900	16.8793	16.9537	17.1289
50	10.0055	10.0203	10.0447	9.8927

Tabulka 39: Nejlepší hodnoty MAE pro 4set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.517871	0.416732	0.438367
DECBB	0.484877	0.501375	0.416732	0.427522
DECGB	0.585956	0.585956	0.501375	0.506875
DERTB	0.564349	0.575181	0.495875	0.501375

Tabulka 40: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAE pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.534335	0.441086	0.504125
DECBB	0.468405	0.501375	0.430229	0.493125
DECGB	0.561633	0.572478	0.501375	0.528852
DERTB	0.498625	0.509625	0.473891	0.501375

Tabulka 41: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAE pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.498625	0.411360	0.432938
DECBB	0.504125	0.501375	0.411360	0.438367
DECGB	0.591320	0.591320	0.501375	0.515123
DERTB	0.569771	0.564349	0.487626	0.501375

Tabulka 42: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAE pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.528852	0.432938	0.484877
DECBB	0.473891	0.501375	0.422120	0.490375
DECGB	0.569771	0.580576	0.501375	0.520618
DERTB	0.517871	0.512374	0.482129	0.501375

Tabulka 43: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAE pro 4set všech 50 povodí.

C.3 MSE

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	2653.6928	2665.5411	2651.8383	2719.6144
2	732.3459	733.5995	730.9399	756.0973
3	348.8509	349.2541	347.5373	359.9442
4	144.7105	144.8966	144.7632	150.3995
5	418.7150	418.7131	418.5391	434.0011
6	1598.9944	1611.0548	1595.8697	1721.6406
7	791.0966	792.1709	789.4556	887.7137
8	362.2427	362.3415	362.0504	375.9882
9	133.3587	133.3559	133.2171	144.4216
10	174.0885	174.0355	173.4801	181.5205
11	256.1336	255.9348	255.7292	262.3742
12	142.6059	142.6346	143.4498	151.3907
13	180.9827	180.9414	180.6537	186.8392
14	157.8558	157.8620	157.5051	163.1598
15	59.5086	59.5259	59.4599	60.9700
16	404.9534	405.6385	402.9710	427.5129
17	947.1582	947.8002	945.0938	959.1587
18	962.3614	962.4335	961.5454	983.3764
19	385.5509	386.4730	383.7539	406.9907
20	204.2435	204.9895	203.1782	216.6178
21	517.4826	517.3673	515.9327	535.5990
22	342.8314	343.0686	342.7601	348.6423
23	164.2074	164.3170	163.5816	177.9396
24	162.4585	162.6331	161.8254	167.9806
25	398.5906	398.5278	397.7831	406.6236
26	107.4607	107.5079	107.3369	109.5138
27	81.3962	81.3804	81.1580	84.6807
28	74.2674	74.2755	74.1773	75.9566
29	29.8106	29.8479	29.7793	30.6522
30	173.8731	173.8570	173.4603	178.7350
31	134.8955	135.0306	134.6883	139.4791
32	317.7673	317.7997	317.6664	320.8585
33	62.8102	62.7605	62.7345	64.3938
34	78.7110	78.8905	78.4584	81.3441
35	341.5407	341.4975	341.3638	346.6371
36	120.7386	120.7464	120.6929	122.2900
37	77.1016	77.1404	76.7836	79.8217
38	90.7816	90.8079	90.6483	92.4847
39	68.1221	68.1192	68.0995	70.4821
40	50.2649	50.2646	50.2400	50.7918
41	31.9454	31.9507	31.9325	32.7137

42	63.2318	63.2992	63.0384	65.0159
43	109.8180	109.7594	109.6511	116.7820
44	15.4605	15.4793	15.4002	16.4235
45	1845.9673	1854.3555	1842.7902	1882.8669
46	264.8602	264.9989	264.6371	272.0597
47	1792.6538	1794.3718	1791.8253	1815.8493
48	768.1288	768.7009	766.7007	787.1766
49	619.3970	620.1540	618.5078	640.3278
50	261.8088	261.9489	261.7167	266.6259

Tabulka 44: Nejlepší hodnoty MSE pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	2651.8932	2652.4424	2651.8340	2725.1387
2	731.0520	731.1450	730.9402	743.4468
3	347.5836	347.6178	347.5370	361.8605
4	144.2255	144.3516	144.6200	147.7874
5	418.5528	418.5523	418.5390	428.6964
6	1595.8258	1596.6551	1595.7536	1688.1628
7	789.4816	789.6590	789.4492	874.0800
8	362.0753	362.0792	362.0473	370.8671
9	133.2286	133.2262	133.2156	139.2003
10	173.5062	173.4929	173.4802	178.8576
11	255.7546	255.7512	255.7291	262.4376
12	142.5575	142.5578	144.2321	153.5219
13	180.6580	180.6604	180.6537	183.6986
14	157.5130	157.5184	157.5052	162.2180
15	59.4607	59.4603	59.4599	62.1974
16	402.9836	403.0104	402.9710	425.9799
17	945.1865	945.2203	945.0940	962.1332
18	961.5747	961.5862	961.5456	975.6671
19	383.9420	384.0708	383.7531	406.0735
20	203.2529	203.3095	203.1749	208.6617
21	515.9875	516.0218	515.9322	525.3044
22	342.7656	342.7648	342.7601	349.5584
23	163.6243	163.6560	163.5759	174.7984
24	161.8429	161.8474	161.8253	166.1574
25	397.8810	397.8705	397.7835	406.8310
26	107.3423	107.3416	107.3369	109.3952
27	81.1672	81.1804	81.1586	84.2918
28	74.1812	74.1822	74.1773	75.4088
29	29.7801	29.7802	29.7793	30.4666
30	173.4645	173.4672	173.4602	176.6954
31	134.6914	134.6957	134.6883	138.4378
32	317.6682	317.6695	317.6664	320.3071

33	62.7373	62.7392	62.7345	64.0349
34	78.4616	78.4721	78.4583	81.4083
35	341.3659	341.3688	341.3638	347.3033
36	120.6935	120.6938	120.6930	123.0960
37	76.7895	76.7914	76.7836	79.9609
38	90.6613	90.6547	90.6483	91.8505
39	68.1001	68.1005	68.0995	70.9460
40	50.2404	50.2406	50.2400	51.0542
41	31.9328	31.9328	31.9325	32.3254
42	63.0485	63.0524	63.0384	65.2539
43	109.6578	109.6548	109.6511	116.0975
44	15.4020	15.4018	15.4002	16.2307
45	1842.8158	1843.1880	1842.7861	1881.7183
46	264.6452	264.6484	264.6370	272.0813
47	1791.8510	1791.8715	1791.8258	1807.3816
48	766.7192	766.7983	766.7007	776.9249
49	618.5320	618.5540	618.5077	634.8683
50	261.7217	261.7227	261.7166	264.0542

Tabulka 45: Nejlepší hodnoty MSE pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	2656.7864	2663.0928	2651.8012	2722.9362
2	733.1043	732.2858	730.9394	753.5065
3	347.9063	349.2440	347.5363	361.3046
4	144.9233	144.8946	144.5102	148.8299
5	418.7986	418.7587	418.5390	434.9425
6	1602.8728	1613.2312	1595.7546	1705.5664
7	792.0894	795.1518	789.4505	859.9008
8	362.8488	362.8275	362.0472	376.9993
9	133.4132	133.4315	133.2153	139.8294
10	173.8733	174.3329	173.4801	179.2483
11	256.2685	256.0044	255.7291	262.0339
12	142.7678	142.7829	144.2322	150.4610
13	180.9790	181.0176	180.6536	184.3473
14	157.8163	157.8916	157.5051	166.6507
15	59.5065	59.5104	59.4599	61.3963
16	404.9015	404.4682	402.9706	425.8236
17	947.1852	948.0773	945.0940	963.7729
18	962.3417	962.6068	961.5454	984.3853
19	386.7319	387.6482	383.7553	407.5309
20	204.4450	204.9522	203.1756	212.4986
21	516.9199	517.2921	515.9319	527.4590
22	342.9797	343.2217	342.7601	347.2108
23	164.4591	164.3279	163.5743	177.9619

24	162.7327	162.6921	161.8254	169.3936
25	398.6811	398.6368	397.7831	404.3880
26	107.4277	107.5288	107.3369	110.4732
27	81.4097	81.3329	81.1580	85.0457
28	74.2134	74.2597	74.1773	75.9271
29	29.8319	29.8357	29.7793	30.9303
30	173.7119	173.7566	173.4603	178.3681
31	134.9454	134.8595	134.6883	140.9717
32	317.7469	317.8562	317.6663	321.6595
33	62.9044	62.8765	62.7345	64.1838
34	78.9675	78.8957	78.4583	80.7945
35	341.5156	341.5586	341.3637	347.6477
36	120.7349	120.7513	120.6929	122.5426
37	77.0654	77.2313	76.7836	80.2571
38	90.8742	90.7898	90.6483	92.3889
39	68.1158	68.1135	68.0995	70.3879
40	50.2621	50.2705	50.2400	51.1138
41	31.9437	31.9493	31.9325	32.4985
42	63.3471	63.3263	63.0384	64.5690
43	109.7817	109.8058	109.6511	119.8902
44	15.4486	15.4993	15.4002	16.9937
45	1847.4496	1851.7224	1842.7827	1903.3007
46	265.1461	264.8995	264.6370	273.5107
47	1793.7367	1795.7968	1791.8253	1816.1207
48	768.4264	770.3463	766.7004	781.8650
49	619.1710	619.7213	618.5075	642.6633
50	261.9961	262.0023	261.7166	269.8922

Tabulka 46: Nejlepší hodnoty MSE pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	2652.1696	2653.7704	2651.8081	2681.5267
2	731.2368	731.4007	730.9386	756.2512
3	347.7470	347.8627	347.5362	355.7032
4	144.4517	144.3485	144.7585	151.9445
5	418.5570	418.5594	418.5390	432.2068
6	1595.8259	1597.8023	1595.7511	1713.4472
7	789.6876	790.1552	789.4496	853.5947
8	362.2033	362.1670	362.0469	374.4453
9	133.2623	133.2387	133.2136	138.9275
10	173.5287	173.5780	173.4801	179.4027
11	255.7642	255.7725	255.7291	261.4813
12	142.5623	142.5661	144.2322	149.9606
13	180.6627	180.6717	180.6536	184.3127
14	157.5311	157.5519	157.5051	163.9967

15	59.4617	59.4621	59.4598	63.0698
16	403.0860	403.0697	402.9709	416.3419
17	945.2927	945.3687	945.0940	967.4064
18	961.6320	961.6233	961.5449	981.5920
19	384.1716	384.3500	383.7448	411.0331
20	203.4740	203.4300	203.1743	212.5136
21	516.2306	516.2541	515.9317	524.5008
22	342.7736	342.7733	342.7602	349.1741
23	163.7530	163.7479	163.5716	184.0399
24	161.8801	161.9042	161.8253	166.5836
25	397.8492	397.9781	397.7828	403.3465
26	107.3477	107.3536	107.3369	109.5209
27	81.1938	81.1871	81.1572	83.6860
28	74.1875	74.1872	74.1773	75.5242
29	29.7813	29.7828	29.7793	30.4811
30	173.4750	173.4740	173.4603	176.5356
31	134.7065	134.7090	134.6883	139.2863
32	317.6739	317.6784	317.6664	318.5128
33	62.7472	62.7475	62.7345	63.5412
34	78.4847	78.4935	78.4583	80.9033
35	341.3770	341.3747	341.3638	346.2634
36	120.6948	120.6959	120.6928	122.5242
37	76.7992	76.8081	76.7836	79.0140
38	90.6751	90.6864	90.6483	91.7769
39	68.1004	68.1005	68.0995	69.3779
40	50.2412	50.2420	50.2400	51.0861
41	31.9329	31.9334	31.9325	32.4760
42	63.0530	63.0718	63.0384	65.1135
43	109.6614	109.6652	109.6511	117.9013
44	15.4047	15.4114	15.4001	16.5010
45	1843.3459	1845.5480	1842.7807	1921.7521
46	264.6640	264.6682	264.6371	268.7406
47	1791.9396	1792.1617	1791.8253	1816.3024
48	766.8909	767.0261	766.7003	777.1498
49	618.5478	618.6990	618.5077	629.6023
50	261.7277	261.7279	261.7166	265.4060

Tabulka 47: Nejlepší hodnoty MSE pro 4set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.471148	0.567062	0.384766
DECBB	0.531595	0.501375	0.569771	0.384766
DECGB	0.435651	0.432938	0.501375	0.379507
DERTB	0.617866	0.617866	0.623114	0.501375

Tabulka 48: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MSE pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.462925	0.561633	0.384766
DECBB	0.539812	0.501375	0.564349	0.384766
DECGB	0.441086	0.438367	0.501375	0.384766
DERTB	0.617866	0.617866	0.617866	0.501375

Tabulka 49: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MSE pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.479382	0.569771	0.384766
DECBB	0.523364	0.501375	0.569771	0.384766
DECGB	0.432938	0.432938	0.501375	0.379507
DERTB	0.617866	0.617866	0.623114	0.501375

Tabulka 50: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MSE pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.465665	0.564349	0.379507
DECBB	0.537075	0.501375	0.564349	0.382134
DECGB	0.438367	0.438367	0.501375	0.379507
DERTB	0.623114	0.620493	0.623114	0.501375

Tabulka 51: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MSE pro 4set všech 50 povodí.

C.4 MAPE

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.3474	0.3385	0.3536	0.3378
2	0.4984	0.4968	0.5165	0.4837
3	0.3888	0.3859	0.3953	0.3954
4	0.4023	0.3993	0.4072	0.3973
5	0.3476	0.3474	0.3521	0.3335
6	0.3466	0.3450	0.3474	0.3483
7	0.3436	0.3433	0.3457	0.3299
8	0.4208	0.4202	0.4246	0.4292
9	0.6776	0.6720	0.7033	0.4555
10	0.2888	0.2941	0.3002	0.2810
11	0.3305	0.3308	0.3387	0.3115
12	0.2861	0.2855	0.2902	0.2581
13	0.3412	0.3421	0.3504	0.3330
14	0.5674	0.5688	0.5872	0.5466
15	0.2945	0.2944	0.3006	0.2832
16	0.3118	0.3082	0.3210	0.3090
17	0.4065	0.4078	0.4175	0.4034
18	0.5141	0.5146	0.5209	0.4982
19	0.6000	0.5890	0.6395	0.5568
20	0.4224	0.4193	0.4332	0.4125
21	0.3669	0.3655	0.3770	0.3659
22	0.4367	0.4360	0.4414	0.4258
23	0.6078	0.6083	0.6485	0.5358
24	0.3261	0.3307	0.3397	0.3288
25	0.5811	0.5810	0.5969	0.5853
26	0.4086	0.4058	0.4159	0.3942
27	0.8065	0.8060	0.8199	0.7883
28	0.3827	0.3848	0.3931	0.3721
29	0.2837	0.2830	0.2895	0.2661
30	0.4401	0.4404	0.4470	0.4295
31	0.4123	0.4112	0.4243	0.4004
32	0.5636	0.5606	0.5724	0.5431
33	0.5872	0.5831	0.6026	0.5537
34	0.5314	0.5306	0.5425	0.5071
35	0.5046	0.5018	0.5086	0.4424
36	0.5091	0.5105	0.5178	0.4671
37	0.4624	0.4633	0.4807	0.4401
38	0.6854	0.6816	0.7083	0.6173
39	0.8243	0.8245	0.8364	0.6892
40	0.8133	0.8142	0.8541	0.6148
41	0.8604	0.8628	0.8930	0.7434

42	0.3199	0.3213	0.3282	0.3182
43	0.8456	0.8356	0.8902	0.6018
44	0.5668	0.5640	0.5820	0.4713
45	0.5474	0.5333	0.5517	0.4817
46	0.5321	0.5319	0.5407	0.5231
47	0.4507	0.4433	0.4589	0.4444
48	0.3929	0.3924	0.4016	0.3890
49	0.3532	0.3533	0.3624	0.3487
50	0.7066	0.6989	0.7316	0.6451

Tabulka 52: Nejlepší hodnoty MAPE pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.3560	0.3522	0.3537	0.3363
2	0.5138	0.5055	0.5170	0.4887
3	0.3946	0.3926	0.3956	0.3820
4	0.4039	0.4021	0.4053	0.3969
5	0.3509	0.3506	0.3520	0.3302
6	0.3481	0.3459	0.3483	0.3498
7	0.3523	0.3487	0.3378	0.3275
8	0.4275	0.4255	0.4255	0.4289
9	0.6896	0.7053	0.6930	0.4399
10	0.2985	0.2971	0.3002	0.2887
11	0.3369	0.3371	0.3388	0.3071
12	0.2898	0.2896	0.2902	0.2490
13	0.3491	0.3490	0.3505	0.3250
14	0.5817	0.5834	0.5861	0.5329
15	0.3002	0.2998	0.3007	0.2762
16	0.3190	0.3188	0.3210	0.3046
17	0.4151	0.4132	0.4175	0.4072
18	0.5200	0.5192	0.5209	0.5072
19	0.6310	0.6081	0.6379	0.5652
20	0.4303	0.4285	0.4331	0.4147
21	0.3738	0.3744	0.3772	0.3642
22	0.4402	0.4404	0.4415	0.4240
23	0.6440	0.6349	0.6527	0.5565
24	0.3330	0.3359	0.3397	0.3256
25	0.5927	0.5887	0.5970	0.5868
26	0.4146	0.4141	0.4159	0.3989
27	0.8178	0.8188	0.8198	0.7774
28	0.3912	0.3908	0.3932	0.3703
29	0.2890	0.2885	0.2819	0.2680
30	0.4464	0.4460	0.4470	0.4279
31	0.4231	0.4220	0.4243	0.3944
32	0.5718	0.5716	0.5725	0.5366

33	0.6010	0.6001	0.6034	0.5604
34	0.5463	0.5434	0.5497	0.5040
35	0.5092	0.5094	0.5086	0.4427
36	0.5167	0.5167	0.5174	0.4666
37	0.4760	0.4760	0.4808	0.4361
38	0.7037	0.7043	0.7180	0.6268
39	0.8352	0.8344	0.8365	0.6945
40	0.8486	0.8484	0.8542	0.6540
41	0.8410	0.8434	0.8927	0.7646
42	0.3270	0.3264	0.3283	0.3166
43	0.8806	0.8788	0.8913	0.5866
44	0.5811	0.5797	0.5833	0.4765
45	0.5555	0.5372	0.5554	0.4898
46	0.5402	0.5388	0.5417	0.5312
47	0.4577	0.4556	0.4575	0.4387
48	0.4001	0.3978	0.4016	0.3922
49	0.3605	0.3602	0.3624	0.3453
50	0.7286	0.7297	0.7336	0.6277

Tabulka 53: Nejlepší hodnoty MAPE pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.3449	0.3373	0.3537	0.3388
2	0.4981	0.4889	0.5179	0.4799
3	0.3864	0.3873	0.3960	0.3904
4	0.4027	0.4035	0.4041	0.4015
5	0.3468	0.3465	0.3520	0.3287
6	0.3461	0.3444	0.3485	0.3494
7	0.3399	0.3363	0.3471	0.3338
8	0.4173	0.4171	0.4303	0.4247
9	0.6624	0.6565	0.6964	0.4488
10	0.2886	0.2906	0.3002	0.2853
11	0.3308	0.3254	0.3388	0.3070
12	0.2827	0.2830	0.2902	0.2630
13	0.3385	0.3395	0.3505	0.3190
14	0.5643	0.5658	0.5872	0.5340
15	0.2951	0.2945	0.3007	0.2818
16	0.3107	0.3093	0.3210	0.3077
17	0.4086	0.4057	0.4176	0.4105
18	0.5149	0.5137	0.5209	0.5029
19	0.5828	0.5741	0.6305	0.5299
20	0.4200	0.4240	0.4334	0.4163
21	0.3644	0.3671	0.3773	0.3531
22	0.4358	0.4346	0.4415	0.4228
23	0.6128	0.6104	0.6475	0.4950

24	0.3291	0.3293	0.3396	0.3267
25	0.5726	0.5733	0.5969	0.5736
26	0.4067	0.4074	0.4159	0.3981
27	0.8089	0.8028	0.8194	0.7869
28	0.3851	0.3836	0.3932	0.3698
29	0.2833	0.2851	0.2895	0.2670
30	0.4421	0.4397	0.4470	0.4270
31	0.4090	0.4145	0.4243	0.4031
32	0.5616	0.5626	0.5724	0.5263
33	0.5830	0.5861	0.6033	0.5595
34	0.5262	0.5292	0.5452	0.5027
35	0.5002	0.4998	0.5087	0.4379
36	0.5055	0.5078	0.5172	0.4647
37	0.4604	0.4602	0.4807	0.4377
38	0.6850	0.6826	0.7167	0.6270
39	0.8204	0.8191	0.8366	0.6695
40	0.8101	0.8210	0.8540	0.6612
41	0.8658	0.8675	0.8931	0.7196
42	0.3210	0.3189	0.3287	0.3162
43	0.8287	0.8319	0.8913	0.6149
44	0.5559	0.5638	0.5853	0.4838
45	0.5426	0.5161	0.5553	0.4299
46	0.5334	0.5340	0.5403	0.5209
47	0.4481	0.4413	0.4589	0.4437
48	0.3940	0.3918	0.4017	0.3886
49	0.3546	0.3519	0.3625	0.3363
50	0.7092	0.7086	0.7337	0.6347

Tabulka 54: Nejlepší hodnoty MAPE pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.3537	0.3435	0.3535	0.3436
2	0.5050	0.5025	0.5172	0.4980
3	0.3928	0.3920	0.3959	0.3916
4	0.4014	0.4027	0.4072	0.3979
5	0.3494	0.3500	0.3521	0.3325
6	0.3475	0.3456	0.3488	0.3505
7	0.3507	0.3470	0.3488	0.3267
8	0.4220	0.4231	0.4299	0.4294
9	0.6970	0.6898	0.6957	0.4570
10	0.2957	0.2952	0.3003	0.2822
11	0.3337	0.3347	0.3386	0.3095
12	0.2896	0.2890	0.2902	0.2535
13	0.3483	0.3473	0.3504	0.3192
14	0.5813	0.5789	0.5872	0.5411

15	0.2995	0.2993	0.3007	0.2715
16	0.3172	0.3175	0.3210	0.3094
17	0.4133	0.4129	0.4175	0.4112
18	0.5193	0.5184	0.5209	0.5035
19	0.6253	0.6094	0.6381	0.5483
20	0.4288	0.4253	0.4332	0.4160
21	0.3717	0.3726	0.3769	0.3599
22	0.4400	0.4400	0.4415	0.4212
23	0.6403	0.6331	0.6528	0.5509
24	0.3355	0.3293	0.3400	0.3317
25	0.5915	0.5913	0.5970	0.5859
26	0.4145	0.4131	0.4159	0.3994
27	0.8180	0.8176	0.8178	0.7767
28	0.3917	0.3907	0.3932	0.3705
29	0.2882	0.2882	0.2894	0.2581
30	0.4458	0.4454	0.4470	0.4304
31	0.4219	0.4213	0.4243	0.3952
32	0.5711	0.5714	0.5734	0.5276
33	0.5983	0.5974	0.6033	0.5570
34	0.5435	0.5411	0.5502	0.4979
35	0.5085	0.5083	0.5087	0.4480
36	0.5150	0.5157	0.5178	0.4609
37	0.4733	0.4712	0.4808	0.4395
38	0.7012	0.6977	0.7191	0.6309
39	0.8335	0.8334	0.8366	0.6483
40	0.8463	0.8448	0.8538	0.6589
41	0.8432	0.8891	0.8927	0.7596
42	0.3260	0.3239	0.3287	0.3229
43	0.8716	0.8735	0.8914	0.5955
44	0.5769	0.5778	0.5809	0.5065
45	0.5490	0.5443	0.5559	0.4779
46	0.5384	0.5384	0.5417	0.5313
47	0.4546	0.4547	0.4589	0.4421
48	0.3991	0.3982	0.4017	0.3867
49	0.3595	0.3571	0.3625	0.3430
50	0.7228	0.7254	0.7338	0.6363

Tabulka 55: Nejlepší hodnoty MAPE pro 4set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.537075	0.318383	0.804631
DECBB	0.465665	0.501375	0.296577	0.787053
DECGB	0.684074	0.705803	0.501375	0.886835
DERTB	0.197277	0.214956	0.114494	0.501375

Tabulka 56: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAPE pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.553469	0.441086	0.892038
DECBB	0.449258	0.501375	0.416732	0.881455
DECGB	0.561633	0.585956	0.501375	0.897067
DERTB	0.109246	0.119918	0.104174	0.501375

Tabulka 57: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAPE pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.528852	0.294197	0.833623
DECBB	0.473891	0.501375	0.268618	0.821299
DECGB	0.708174	0.733650	0.501375	0.920699
DERTB	0.168103	0.180508	0.080324	0.501375

Tabulka 58: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAPE pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.556193	0.406004	0.871610
DECBB	0.446531	0.501375	0.374271	0.856584
DECGB	0.596667	0.628339	0.501375	0.898297
DERTB	0.129842	0.144982	0.102933	0.501375

Tabulka 59: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MAPE pro 4set všech 50 povodí.

C.5 MRE

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.0820	0.0591	0.0729	0.0210
2	-0.3435	-0.3380	-0.3767	-0.2759
3	-0.0694	-0.0628	-0.1113	0.0050
4	-0.1652	-0.1664	-0.1881	-0.1165
5	0.0232	0.0273	0.0420	0.0015
6	-0.0004	-0.0002	0.0001	-0.0004
7	-0.1313	-0.1268	-0.1003	-0.0586
8	-0.1752	-0.1674	-0.1808	-0.1636
9	-0.4580	-0.4487	-0.4860	-0.0081
10	-0.0093	-0.0129	-0.0515	0.0007
11	-0.0529	-0.0345	-0.0805	0.0013
12	0.0207	0.0187	0.0249	-0.0002
13	-0.0020	0.0032	-0.0249	-0.0002
14	-0.2352	-0.2447	-0.3073	-0.0550
15	-0.0133	-0.0101	-0.0382	-0.0025
16	-0.0412	-0.0447	-0.0786	0.0056
17	-0.0857	-0.0856	-0.1051	-0.0459
18	-0.2748	-0.2705	-0.2951	-0.2095
19	-0.3434	-0.2940	-0.4114	-0.1785
20	-0.1104	-0.1029	-0.1540	-0.0004
21	0.0004	0.0001	0.0059	-0.0028
22	-0.0461	-0.0408	-0.0721	-0.0012
23	-0.3197	-0.3153	-0.3965	-0.0407
24	-0.0000	0.0004	-0.0056	-0.0016
25	-0.2052	-0.2053	-0.2521	-0.1205
26	0.0000	0.0005	0.0001	-0.0001
27	-0.6715	-0.6717	-0.6926	-0.6221
28	-0.0263	-0.0234	-0.0528	-0.0022
29	-0.0127	-0.0026	-0.0300	0.0019
30	0.0001	-0.0000	-0.0095	-0.0010
31	0.0001	-0.0000	-0.0114	-0.0004
32	-0.0344	-0.0251	-0.0508	0.0016
33	-0.1856	-0.1845	-0.2485	-0.0490
34	-0.1578	-0.1605	-0.1959	-0.0319
35	-0.1602	-0.1573	-0.1704	0.0006
36	-0.2523	-0.2516	-0.2721	-0.0454
37	-0.1340	-0.1413	-0.1922	0.0087
38	-0.3370	-0.3266	-0.3824	-0.1003
39	-0.5699	-0.5666	-0.5884	-0.2965
40	-0.3918	-0.3932	-0.4581	0.0319
41	-0.4643	-0.4614	-0.5187	-0.2021

42	-0.0104	-0.0025	-0.0475	-0.0007
43	-0.5800	-0.5661	-0.6388	0.0003
44	-0.3126	-0.3115	-0.3462	-0.0706
45	-0.4045	-0.3882	-0.4120	-0.2019
46	-0.3031	-0.2933	-0.3255	-0.2366
47	-0.0851	-0.0738	-0.1044	-0.0281
48	-0.1378	-0.1364	-0.1710	-0.0947
49	-0.0135	-0.0078	-0.0390	-0.0012
50	-0.4382	-0.4246	-0.4922	-0.2309

Tabulka 60: Nejlepší hodnoty MRE pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.0692	0.0648	0.0748	0.0262
2	-0.3717	-0.3575	-0.3775	-0.3169
3	-0.1103	-0.1059	-0.1102	-0.0021
4	-0.1755	-0.1724	-0.1788	-0.1115
5	0.0372	0.0379	0.0423	-0.0004
6	0.0041	-0.0000	0.0020	0.0018
7	-0.1414	-0.1368	-0.1004	-0.0629
8	-0.1901	-0.1855	-0.1850	-0.1578
9	-0.4739	-0.4852	-0.4767	0.0223
10	-0.0411	-0.0386	-0.0518	0.0000
11	-0.0786	-0.0780	-0.0778	-0.0018
12	0.0243	0.0243	0.0249	0.0009
13	-0.0220	-0.0193	-0.0250	0.0003
14	-0.2920	-0.2879	-0.2939	-0.0964
15	-0.0365	-0.0360	-0.0382	0.0019
16	-0.0723	-0.0713	-0.0787	-0.0004
17	-0.1006	-0.0981	-0.1051	-0.0600
18	-0.2911	-0.2889	-0.2949	-0.1944
19	-0.3980	-0.3701	-0.4103	-0.1468
20	-0.1462	-0.1444	-0.1592	-0.0294
21	0.0006	0.0021	0.0060	-0.0008
22	-0.0669	-0.0669	-0.0705	0.0001
23	-0.3861	-0.3712	-0.4034	0.0176
24	0.0000	0.0002	-0.0055	-0.0033
25	-0.2401	-0.2316	-0.2521	-0.1329
26	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0001
27	-0.6919	-0.6935	-0.6927	-0.6073
28	-0.0473	-0.0460	-0.0532	0.0016
29	-0.0280	-0.0262	-0.0303	-0.0005
30	-0.0057	-0.0044	-0.0096	-0.0008
31	-0.0080	-0.0044	-0.0114	-0.0001
32	-0.0547	-0.0521	-0.0511	-0.0007

33	-0.2406	-0.2340	-0.2491	-0.0415
34	-0.1941	-0.1929	-0.1995	-0.0237
35	-0.1706	-0.1712	-0.1706	0.0004
36	-0.2699	-0.2695	-0.2712	-0.0577
37	-0.1814	-0.1793	-0.1922	-0.0487
38	-0.3818	-0.3844	-0.4113	-0.1242
39	-0.5860	-0.5851	-0.5886	-0.3428
40	-0.4495	-0.4497	-0.4582	-0.0879
41	-0.4511	-0.4415	-0.5182	-0.2378
42	-0.0395	-0.0384	-0.0319	-0.0006
43	-0.6252	-0.6241	-0.6402	-0.0035
44	-0.3434	-0.3408	-0.3512	-0.1160
45	-0.4143	-0.3933	-0.4156	-0.3097
46	-0.3218	-0.3198	-0.3262	-0.2271
47	-0.1033	-0.1000	-0.1019	-0.0493
48	-0.1661	-0.1546	-0.1711	-0.1003
49	-0.0357	-0.0328	-0.0395	-0.0007
50	-0.4866	-0.4879	-0.4959	-0.2310

Tabulka 61: Nejlepší hodnoty MRE pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.0789	0.0669	0.0702	0.0339
2	-0.3430	-0.3228	-0.3789	-0.2598
3	-0.0649	-0.0655	-0.1115	-0.0156
4	-0.1662	-0.1738	-0.1828	-0.1270
5	0.0279	0.0282	0.0423	-0.0016
6	-0.0001	0.0001	0.0034	0.0010
7	-0.1223	-0.1153	-0.1002	-0.0536
8	-0.1646	-0.1681	-0.1951	-0.1506
9	-0.4366	-0.4334	-0.4808	-0.0051
10	-0.0121	-0.0063	-0.0518	-0.0004
11	-0.0361	-0.0230	-0.0763	0.0016
12	0.0210	0.0179	0.0249	-0.0001
13	-0.0009	-0.0002	-0.0250	0.0008
14	-0.2334	-0.2252	-0.2969	-0.0728
15	-0.0155	-0.0145	-0.0383	0.0003
16	-0.0513	-0.0238	-0.0787	-0.0006
17	-0.0873	-0.0811	-0.1050	-0.0498
18	-0.2754	-0.2702	-0.2952	-0.2032
19	-0.2766	-0.2591	-0.3950	-0.1430
20	-0.0861	-0.1015	-0.1481	0.0012
21	-0.0003	-0.0003	0.0086	0.0008
22	-0.0403	-0.0398	-0.0726	-0.0004
23	-0.3240	-0.3206	-0.3942	0.1231

24	0.0001	0.0007	-0.0058	-0.0002
25	-0.1801	-0.1780	-0.2523	-0.1582
26	0.0000	0.0000	-0.0001	0.0007
27	-0.6747	-0.6641	-0.6918	-0.5819
28	-0.0179	-0.0229	-0.0536	-0.0003
29	-0.0104	-0.0080	-0.0293	-0.0007
30	0.0002	-0.0001	-0.0096	-0.0002
31	0.0001	0.0001	-0.0114	0.0007
32	-0.0256	-0.0276	-0.0510	-0.0003
33	-0.1747	-0.1832	-0.2493	-0.0548
34	-0.1494	-0.1556	-0.1995	0.0273
35	-0.1574	-0.1543	-0.1706	-0.0001
36	-0.2433	-0.2488	-0.2707	-0.0567
37	-0.1237	-0.1300	-0.1922	-0.0200
38	-0.3278	-0.3320	-0.4085	-0.1120
39	-0.5655	-0.5609	-0.5886	-0.3007
40	-0.3870	-0.3991	-0.4580	-0.0770
41	-0.4634	-0.4666	-0.5188	-0.2040
42	-0.0110	-0.0142	-0.0402	-0.0013
43	-0.5388	-0.5524	-0.6402	0.0431
44	-0.2971	-0.3098	-0.3520	-0.0580
45	-0.3985	-0.3626	-0.4149	-0.0861
46	-0.2976	-0.2965	-0.3247	-0.2277
47	-0.0855	-0.0813	-0.1053	-0.0509
48	-0.1456	-0.1311	-0.1712	-0.0883
49	-0.0071	-0.0019	-0.0396	0.0000
50	-0.4406	-0.4479	-0.4961	-0.1819

Tabulka 62: Nejlepší hodnoty MRE pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
1	0.0897	0.0737	0.0894	0.0354
2	-0.3543	-0.3517	-0.3778	-0.2909
3	-0.0981	-0.0916	-0.1127	-0.0240
4	-0.1678	-0.1708	-0.1886	-0.1139
5	0.0362	0.0365	0.0425	0.0002
6	0.0014	-0.0000	0.0052	-0.0014
7	-0.1397	-0.1330	-0.1002	-0.0375
8	-0.1755	-0.1784	-0.1939	-0.1624
9	-0.4826	-0.4564	-0.4783	0.0020
10	-0.0280	-0.0324	-0.0519	-0.0011
11	-0.0753	-0.0735	-0.0794	0.0020
12	0.0238	0.0240	0.0249	0.0004
13	-0.0201	-0.0153	-0.0250	0.0011
14	-0.2944	-0.2875	-0.3076	-0.0617

15	-0.0344	-0.0338	-0.0383	0.0005
16	-0.0689	-0.0624	-0.0787	-0.0003
17	-0.0972	-0.0974	-0.1052	-0.0472
18	-0.2887	-0.2863	-0.2952	-0.2024
19	-0.3895	-0.3600	-0.4109	-0.2049
20	-0.1418	-0.1296	-0.1481	0.0017
21	0.0002	-0.0000	0.0061	0.0022
22	-0.0649	-0.0641	-0.0726	0.0002
23	-0.3812	-0.3684	-0.4032	-0.0661
24	0.0007	-0.0003	-0.0053	0.0004
25	-0.2325	-0.2328	-0.2522	-0.1473
26	0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0007
27	-0.6929	-0.6910	-0.6898	-0.5597
28	-0.0441	-0.0324	-0.0535	0.0018
29	-0.0257	-0.0241	-0.0303	-0.0015
30	-0.0034	-0.0031	-0.0096	0.0027
31	-0.0037	-0.0024	-0.0114	0.0007
32	-0.0523	-0.0521	-0.0576	-0.0005
33	-0.2344	-0.2301	-0.2488	-0.0637
34	-0.1903	-0.1909	-0.1996	-0.0196
35	-0.1709	-0.1705	-0.1706	0.0036
36	-0.2661	-0.2683	-0.2722	-0.0450
37	-0.1747	-0.1697	-0.1923	-0.0037
38	-0.3714	-0.3659	-0.4126	-0.1329
39	-0.5836	-0.5836	-0.5886	-0.2867
40	-0.4459	-0.4441	-0.4576	-0.0774
41	-0.4537	-0.5125	-0.5181	-0.1761
42	-0.0389	-0.0289	-0.0478	0.0032
43	-0.6139	-0.6167	-0.6403	-0.0416
44	-0.3343	-0.3394	-0.3442	-0.1048
45	-0.4059	-0.4023	-0.4157	-0.2428
46	-0.3169	-0.3182	-0.3262	-0.2492
47	-0.0994	-0.0885	-0.1059	-0.0453
48	-0.1611	-0.1587	-0.1712	-0.0654
49	-0.0308	-0.0307	-0.0396	0.0059
50	-0.4758	-0.4802	-0.4963	-0.2451

Tabulka 63: Nejlepší hodnoty MRE pro 4set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.411360	0.791037	0.000510
DECBB	0.591320	0.501375	0.843739	0.001223
DECGB	0.210950	0.157918	0.501375	0.000034
DERTB	0.999502	0.998804	0.999967	0.501375

Tabulka 64: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MRE pro 1set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.432938	0.564349	0.000234
DECBB	0.569771	0.501375	0.596667	0.000259
DECGB	0.438367	0.406004	0.501375	0.000158
DERTB	0.999772	0.999747	0.999846	0.501375

Tabulka 65: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MRE pro 2set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.462925	0.833623	0.000523
DECBB	0.539812	0.501375	0.853441	0.000650
DECGB	0.168103	0.148147	0.501375	0.000037
DERTB	0.999490	0.999365	0.999964	0.501375

Tabulka 66: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MRE pro 3set všech 50 povodí.

	DEBOB	DECBB	DECGB	DERTB
DEBOB	0.501375	0.460188	0.646435	0.000158
DECBB	0.542548	0.501375	0.659164	0.000138
DECGB	0.356131	0.343368	0.501375	0.000090
DERTB	0.999846	0.999865	0.999913	0.501375

Tabulka 67: Hodnoty p-value z Wilcoxonova testu pro nejlepší MRE pro 4set všech 50 povodí.