

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav vodního hospodářství krajiny

Ing. Daniel Marton, Ph.D.

**NEJISTOTY ZATĚŽUJÍCÍ
VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ
ZÁSOBNÍHO OBJEMU ÚDOLNÍ NÁDRŽE**

UNCERTAINTY IMPACT ON WATER MANAGEMENT ANALYSIS
OF OPEN WATER RESERVOIR STORAGE CAPACITY

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

Nejistoty měření, změna klimatu, hluboké nejistoty, zásobní objem nádrže, zabezpečení, bilanční model, simulační model

KEYWORDS

Uncertainty of measurement, Climate change, Deep uncertainty, Reservoir storage capacity, Reliability, Balance model, Simulation model

MÍSTO ULOŽENÍ HABILITAČNÍ PRÁCE:

Originál práce uložen v archivu PVO FAST VUT v Brně.

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	5
2 CÍLE PRÁCE	6
3 METODY.....	7
3.1 Nejistoty měření.....	7
3.1.1 Zjednodušující předpoklady.....	7
3.1.2 Obecná metoda Monte Carlo	7
3.2 Nejistoty změny klimatického systému	8
3.2.1 Zjednodušující předpoklady.....	8
3.2.2 Statistický downscaling.....	9
3.2.3 Lumped bilanční model	9
3.3 Simulační model chování nádrže	9
3.3.1 Výpočet zásobního objemu se 100% zabezpečeností odtoku z nádrže.....	9
3.3.2 Výpočet zásobního objemu při zabezpečenosti odtoku z nádrže menší než 100 %	10
3.3.3 Výpočet zabezpečenosti podle trvání.....	10
3.4 Metody vyhodnocení.....	10
3.4.1 Výpočet statistických charakteristik	10
3.4.2 Robustnost.....	10
4 PRAKTICKÁ APLIKACE	11
4.1 Nejistoty měření a jejich vliv na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže	11
4.1.1 Stávající nádrž – Vír I.....	11
4.1.2 Návrh nové nádrže – Hanušovice	13
4.2 Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistot změn klimatu	14
4.2.1 Hydrologická, klimatologická data povodí a technické informace o nádrži Vír I.	14
4.2.2 Statistický downscaling klimatologických dat.....	15
4.2.3 Kalibrace a validace hydrologického modelu	16
4.2.3 Hydrologická analýza povodí s uvažováním klimatické změny.....	17
4.2.5 Analýza vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže Vír I s uvažováním nejistoty klimatické změny	19
5 SHRNUÍ VÝSLEDKŮ	20
5.1 Nádrž Vír I – nejistoty měření	20
5.2 Nádrž Hanušovice – nejistoty měření	21
5.3 Vliv nejistot budoucího vývoje klimatu na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže - Nádrž Vír I.....	22
5.3.1 Hydrologická analýza povodí řeky Svratky nad nádrží	22
5.3.2 Vodohospodářské řešení nádrže Vír I v podmínkách nejistoty změn klimatu	25
6 DISKUZE.....	28
6.1 Nejistoty měření a jejich vliv na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže	28
6.2 Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistoty změny klimatu	29
7 ZÁVĚR.....	31
8 POUŽITÁ LITERATURA.....	32

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: Ing. Daniel Marton, Ph.D.
Datum narození: 21. 11. 1980
Adresa: Nováčkova 66, Brno, 614 00
Státní příslušnost: CZE
E-mail: marton.d@fce.vutbr.cz
Web: <http://www.vutbr.cz/en/people/daniel-marton-14614>



Vzdělání

- 2007 – 2012 Doktorské studium, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Obor: Vodní hospodářství a vodní stavby. Zakončení: Obhajoba disertační práce, titul Ph.D.
- 2002 – 2007 Magisterské studium, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Obor: Vodní hospodářství a vodní stavby. Zakončení: Státní závěrečná zkouška, titul Ing.
- 1995 – 2000 Střední škola průmyslová a umělecká Hodonín, Česká republika. Zaměření: Stavební inženýrství a ekonomie. Zakončení: maturitní zkouška.

Pracovní zkušenosti

- 2015 – 2018 Odborný asistent, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny.
- 2014 – 2014 Hostující vědecký pracovník, University of Exeter, College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, Centre for Water System, United Kingdom (1 měsíc).
- 2013 – 2013 Hostující vědecký pracovník, University of Exeter, College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, Centre for Water System, United Kingdom (6 měsíců).
- 2012 – 2015 Vědecký pracovník – Postdoc, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny.
- 2011 – 2012 Asistent, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny.
- 2009 – 2011 Technický a výzkumný pracovník, Brno Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny.

Současná pedagogická činnost

- BS002 – Hydrologie (cvičení)
- BS051 – Klimatologie (přednášky a cvičení)
- BS003 – Nádrže a soustavy (cvičení)
- CS004 – Vodohospodářská legislativa (přednášky a cvičení)
- MZ002 – Právo v městském inženýrství (přednášky a cvičení)
- DS74 – Meteorologie a klimatologie (přednášky)
- Vedoucí bakalářských, diplomových a disertačních prací.

Činnost pro ústav a fakultu

- 2012 – 2018 pedagogický tajemník Ústavu vodního hospodářství krajiny.
- Od 2012 člen Rady studijního programu, obor Vodní hospodářství a vodní stavby.
- Od 2015 vedoucí meteorologické stanice VUT FAST v Brně.
- Od 2018 zástupce vedoucího Ústavu vodního hospodářství krajiny.

1 ÚVOD

Současné poznatky z oblasti klimatologie ukazují na postupnou změnu hydroklimatických podmínek po celém světě. Změny klimatu se promítají do změn hydrologického cyklu. Postupné přerозdělení srážkových úhrnů v průběhu roku přispívá k častějším výskytům hydrologických extrémů v podobě povodní a období sucha. Příčinu lze pak pozorovat v podobě zhoršených odtokových poměrů v povodí, které společně se špatnou retenční schopností krajiny, vyvolává pokles dlouhodobých průměrných průtoků v říční síti a dlouhodobý pokles vydatnosti zdrojů podzemních vod. Vše dohromady pak pozvolně mění hydrologický režim v povodích. Je možno očekávat, že popsání změny budou mít velký vliv na budoucí hospodaření s vodními zdroji.

Zřetelné projevy klimatických změn se vyskytují v posledních dekádách i v České republice. Povodňové události z přelomu 21. století jsou stále v paměti lidí i vodohospodářů. Naopak roky 2011, 2012 byly z hydrologického hlediska hodnoceny jako extrémně suché (Zahradníček a kol., 2014). Zima roku 2014 byla teplotně nadprůměrná. Zásoba vody ve sněhové pokrývce v tomto období byla nejnižší za posledních dvacet let. Léto 2015 pak bylo jedním z nejsušších za poslední desetiletí a rok 2016 byl z pohledu sucha také významný. V těchto letech se naplno projevíly důsledky dlouhodobě nízkých srážkových deficitů. Byly pozorovány nízké stavy podzemních a povrchových vod, které se promítly do výrazných škod v zemědělství. Vlivem zhoršených hydrologických podmínek bylo přikročeno i k mimořádným manipulacím na některých vodních nádržích. Výše uvedené důsledky lze pozorovat do dnešních dnů. Hladiny podzemních vod jsou stále pod dlouhodobým normálem. V dílčích povodích jsou nadále pozorovány historické minimální průtoky.

Celosvětově pak roky 2015 a 2016 co do měření teploty vzduchu byly vyhlášeny jako nejteplejší za celou historii měření. Rok 2017 byl vyhlášen třetím nejteplejším. V evropském měřítku pak zima na přelomu let 2016/2017 přinesla velké problémy do horských oblastí na pomezí švýcarsko-italsko-francouzských hranic. V uvedené oblasti byla vyhlášena významná omezení v hospodaření s vodou. Nedostatek sněhu a sucho přiměly vysokohorská lyžařská střediska k omezení umělého zasněžování.

Výše je uveden jen malý výčet dopadů, které "suché" roky vyvolaly. Na nepříznivou situaci reagovala vláda ČR schválením Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách České republiky (MŽP, 2015). V uvedeném dokumentu je počítáno se souborem adaptačních opatření, které mají mírnit dopady klimatické změny. Mezi technická adaptační opatření patří výstavba vodních nádrží ve vybraných kritických lokalitách ČR, ale také opatření ve formě optimalizace stávajících objemů nádrží, převody vody a přepočty objemů vody v profilech chráněných pro akumulaci povrchových vod. Na danou situaci reagovaly také státní podniky povodí, které zadaly ke zpracování Technicko-ekonomické studie nádrží ve vybraných profilech toků na celém území ČR. V současnosti jsou tak na pěti hájených profilech prováděny přípravné projektové činnosti vedoucí k budoucí realizaci vodních děl.

Je zřejmé, že téma pokročilého managementu a řízení povrchových vodních zdrojů začíná být čím dál více žádanější. Manipulační řady velkých vodních děl byly schvalovány v době výstavby vodních děl a následně revidovány na aktuální hydrologické podmínky. V budoucnu bude nutná z pohledu adaptivity na probíhající vývoj klimatického systému a hydrologického cyklu jejich důkladná revize. Stejně jako bude nutná i revize souvisejících norem a předpisů, ze kterých manipulační řady a úlohy vodohospodářského řešení nádrží čerpají. Proto výzkum v dané oblasti bude stále potřebný a důležitý. Jedná se především o aplikace nových definic spolehlivosti nádrže, nových metod odvození hydrologických vstupů do řešení, nových způsobů optimalizačních úloh zavedených do řešení a v neposlední řadě i zavedení analýz nejistot. Současné metody výpočtu zásobního objemu nádrže vycházejí převážně z deterministického řešení a analýzu nejistot nezohledňují. Přitom nerespektování nejistot mohou výsledky výpočtů výrazně ovlivnit. Zde se

otevřít prostor pro uplatnění modernizovaných metod výpočtů vodohospodářského řešení nádrží a to především z pohledu nejistot vstupujících do řešení.

Nejprve je však důležité pojem nejistota důkladně vysvětlit a vyjasnit její základní terminologii. V současné době je možné v české literatuře narazit na dva základní přístupy v pojetí slova nejistota a tím je nejistota a neurčitost, jako například v (Dudek, 1999). V zahraniční literatuře jako například (Paté-Cornell, 1996) se často můžeme setkat s pojmy aleatory, stochastic nebo statistical uncertainty, kterým odpovídá český ekvivalent nejistota a epistemic nebo také knowledge-based uncertainty, kterému odpovídá pojem neurčitost (Dlabka a Baudišová, 2012). Nejistoty jsou pak vázány k určitému rozdělení pravděpodobnosti a nejistota popisuje variabilitu spojenou se systémem nebo prostředím a je možno ji popsat pomocí stochastických simulací např. metodou Monte Carlo (Dantan a kol., 2013). Neurčitost pak lze chápat jako nedostatek znalostí, resp. vágní, nepřesnou informaci o systému (Hester, 2012) a lze ji postihnout například pomocí teorie fuzzy množin (Zadech, 1965) a (Zadech, 1978), teorie možností (Dubois a Prade, 1988), (Klir, 2005) a dalších.

Podle (Tannert a kol., 2007) již Kant (1783) upozornil na první úvahy o nejistotě, které vedli Sokrates a Platón. Ti pochybovali o tom, zda vědecké poznatky, bez ohledu na to, jak komplikované jsou, dostatečně odrážejí realitu. V moderní historii pak byly nejistoty poprvé popsány v práci (Knight, 1921). Práce položila základ pro použití pojmu tzv. Knightiho nejistoty.

Avšak koncept nejistoty je v současné době vnímán z více hledisek a uplatnění nejistot je celá řada. Podle (Kiureghian a Ditlevsen, 2009) je pohled na typologii nejistoty a neurčitosti v technických úlohách složitý a může ji určit sám autor při tvorbě modelu na základě mnoha faktorů, znalostí, procesu rozhodování a dalších.

Nejistota v představené práci je chápána jednak jako nejistota měření vznikající z chyb opakovaných měření vstupních parametrů vodohospodářského řešení zásobního objemu. Dále pak jako nejistota vycházející z omezené schopnosti předpovědi vývoje klimatického systému, resp. širokého spektra možností budoucího klimatického vývoje, které je těžko hodnotitelné. Tato nejistota je známá pod pojmem hluboká nejistota z anglického deep uncertainty.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je představit možnosti sestavení a zavedení různých typů nejistot do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže. Jejich analýza a vhodné vyhodnocení. V práci jsou nejistoty chápány a popsány dvěma obecnými přístupy, které se shodují také s cílem práce.

V prvním přístupu je nejistota chápána jako nejistota vznikající v průběhu měření hydrologických, morfologických a technických parametrů nádrže vstupujících do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže. Cílem práce je tedy pomocí metody Monte Carlo generovat náhodné průběhy batygrafických křivek, ztrát vody z nádrže (výpar, průsak tělesem hráze) a přítoku vody do nádrže. Náhodné průběhy vstupních parametrů vyhodnotit simulačním modelem chování nádrže a jeho výsledky následně zpracovat a vyhodnotit pomocí odpovídajících statistických metod.

Druhým přístupem je analýza vlivu nejistot vývoje klimatického systému na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže. Nejistoty jsou v tomto pojetí chápány jako hluboké nejistoty popisující budoucí variabilitu vývoje klimatu. Klimatická změna je popsána pomocí ensemblu emisních scénářů reprezentujících budoucí globální socioekonomický vývoj populace a klimatických modelů generujících klimatická data. Hydrologický bilanční model, upravená klimatická data reprezentující klimatickou změnu a simulační model nádrže tvoří základ pro sestavení hydrologické analýzy dlouhodobých průměrných průtoků v povodí a posouzení výsledného návrhu zásobního objemu pomocí analýzy robustnosti řešení.

3 METODY

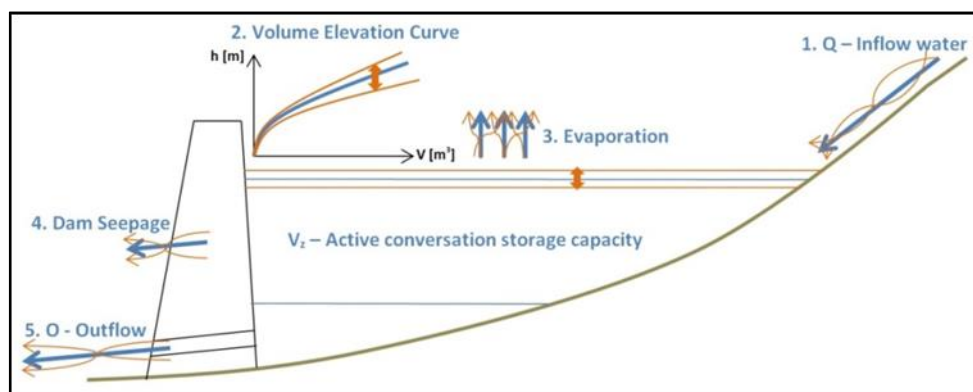
3.1 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Postup zavedení a vyhodnocení nejistot vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže je složen z více kroků, které mají jasnou posloupnost.

Nejprve je nutné generovat náhodná vstupní data zatížení nejistotou měření. Generování náhodných vstupních dat do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže vychází z metody Monte Carlo, pomocí které jsou vytvářeny náhodné průběhy batygrafických křivek, výparu, průsaku tělesem hráze a přítoku vody do nádrže.

Následně každá jedna sestava náhodných vstupních dat je vyhodnocena pomocí simulačního modelu nádrže. Zjednodušeně řečeno, každému náhodnému vstupu odpovídá jeden výstup simulačního modelu v podobě náhodného zásobního objemu nebo náhodné zabezpečení odtoku vody z nádrže podle trvání. Výsledkem opakovaného výpočtu je soubor náhodných výstupů simulačního modelu nádrže zatížených nejistotou měření.

V dalším kroku je provedeno statistické vyhodnocení souboru výstupních dat, kdy interpretace výsledků je provedena pomocí vyhodnocení statistických charakteristik a odpovídajících vztahových křivek. Obrázek 1 znázorňuje symbolické zavedení nejistot do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže.



Obr. 1. Symbolické zavedení nejistot do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže.

3.1.1 Zjednodušující předpoklady

Obecná vstupní hodnota X vzešlá z měření je považována za náhodnou (stochastickou) veličinu, což umožní generovat nové realizace hodnoty kolem vstupní měřené hodnoty X jako zcela náhodné a na sobě nezávislé. Náhodné veličiny jsou tedy výslednicí většího počtu vzájemně nezávislých náhodných jevů. Tento předpoklad umožní popsat vstupní hodnotu pomocí odpovídajícího normálního rozdělení pravděpodobnosti $N(\mu(X), \sigma(X))$. Předpoklad zavedené funkce normálního rozdělení pravděpodobnosti umožňuje zadávat v okolí výsledné hodnoty náhodné veličiny pomocí střední hodnoty $\mu(X) = \text{naměřená hodnota } X$ a směrodatné odchylky $\sigma(X) = \text{standardní nejistota } u_{B,X}$. Maximální hranici výskytu náhodně generovaných hodnot X definuje hodnota rozšířené nejistoty měření $U_{a,X}$. Při výpočtu je uvažováno pouze se standardní nejistotou měření typu B $u_{B,X}$. Pro jednoduchost je standardní nejistota $u_{B,X}$ zavedena pomocí relativní hodnoty koeficientu variace $C_v(X)$. Výsledná směrodatná odchylka $\sigma(X)$ je následně dopočítána pomocí odpovídajících matematických vztahů.

3.1.2 Obecná metoda Monte Carlo

Základem řešení generátoru náhodných řad je opakované použití metody Monte Carlo. Pomocí generátoru náhodných čísel a příslušných distribučních křivek jsou opakovaně generovány náhodné průběhy řady prvků X . Každému prvku X_j odpovídá distribuční křivka, která je určena

normálním rozdělením $N(\mu(X), \sigma(X))$, pro $j = 1, 2, \dots, n$, kde n je počet prvků v řadě. Opakovaně náhodně generované průběhy řady prvků X jsou označeny jako NX_j , pro $j = 1, 2, \dots, PO$, kde PO je počet opakování. Základní princip použití zmíněné metody Monte Carlo vychází z (Starý, 1984).

3.2 NEJISTOTY ZMĚNY KLIMATICKÉHO SYSTÉMU

Pro výpočty zahrnující analýzu nejistot změny klimatu je nutné mít k dispozici tzv. ensemble klimatických dat, ve kterých je klimatická změna zohledněna. Jak je uvedeno výše, nejistotu budoucího vývoje klimatu je nutno chápat jako kombinaci nejistot a neurčitostí vznikající vlivem více faktorů. Hluboká nejistota je pak popsána spektrem možností vývoje klimatu. Zdrojem nejistoty jsou emisní scénáře, globální a regionální klimatické modely a nejistoty spojené se statistickým downscalingem. K popisu tohoto typu nejistoty a sestrojení potřebných ensemble klimatických a následně hydrologických dat bylo nutné učinit následující kroky.

Pomocí nástrojů statistického downscalingu, resp. generátoru počasí LARS WG a ENSEMBLES downscaling portálu sestrojil ensemble klimatických dat. V dalším kroku je nutné provést hydrologickou transformaci klimatických dat na hydrologická data. Uvedená transformace je provedena pomocí kalibrovaného a validovaného lumped bilančního modelu. Výsledkem transformace jsou ensemble hydrologických dat, které jsou následně vloženy do simulačního modelu nádrže, který pro volené období stanoví hydrologickou spolehlivost zásobního objemu nádrže. Výsledkem je pak množina hodnot hydrologických spolehlivostí, které jsou statisticky vyhodnoceny a podrobeny analýze robustnosti.

3.2.1 Zjednodušující předpoklady

V práci není uvažováno s dlouhodobým přirozeným vývojem klimatického systému. Klimatická změna v tomto smyslu je chápána jako změna klimatu vyvolaná antropogenní činností.

Zjednodušující předpoklady zavedené v bilančním modelu jsou následující. Bilanční model používá oproti doporučením v publikaci (Wang a kol. 2013) odlišný způsob výpočtu výparu. Pro řídicí rovnice převzatého bilančního modelu je doporučeno používat pro výpočet hodnoty výparu získané buď měřením pomocí výparoměrů typu PAN, nebo výpočtem rovnic Penman-Monteith. Z důvodů velkého množství vstupních parametrů do rovnice Penman-Monteith byla pro potřeby této práce zvolena a testována odlišná varianta stanovení evapotranspirace. Konkrétně byla použita metoda Thornthwaite. Bilanční model dále také nezohledňuje budoucí změny vývoje hydrologického procesu v povodí způsobené změnami vegetačního pokryvu, plochy zástavby v povodí a dalšími změnami ve využití plochy povodí.

Dalším zjednodušujícím předpokladem je zjednodušené zavedení BIAS korekce. V práci není uvažována žádná pokročilá statistická korekce BIAS roviny a scénářových dat. Zjednodušený postup BIAS korekce je vztažen k poměru mezi dlouhodobými průměry historických dat a BIAS dat. BIAS data a následně scénářová data jsou tímto poměrem upravena tak, aby bylo možné porovnání ensembleových dat s reálnými historickými daty.

Zjednodušující předpoklady použité v simulačním modelu chování zásobního objemu nádrže v podmínkách změny klimatu jsou následující. Simulační model zanedbává změnu evapotranspirace v závislosti na vývoji klimatu. Hodnota budoucí evapotranspirace je zadána jen jako procentuální nárůst současné hodnoty. Tato hodnota je odvozená v závislosti na navýšení roční evapotranspirace vycházející z výparů z povodí dle Thornthwaite metody pro budoucí období.

Při vyhodnocení všech posuzovaných veličin byl zaveden předpoklad, že ensemble scénářových dat vychází z normálního rozdělení. Výsledky jsou pak prezentovány ve formě střední hodnoty $\mu(X)$, standardní nejistota $\sigma(X)$ je popisována velikostí směrodatné odchylky $\sigma(X)$ a rozšířená nejistota U je dána minimální $\min(X)$ a maximální $\max(X)$ dosazenou hodnotou.

3.2.2 Statistický downscaling

Statistický downscaling klimatických modelů a klimatologických dat byl proveden pomocí dvou downscalingových nástrojů.

Prvním byl software LARS WG verze 3.0, který vychází z typu series weather generator posaný (Racsko a kol., 1991), samotný algoritmus a práci se softwarem popsali (Semenov a Barrow, 2002). Emisní scénáře integrované do softwaru jsou z rodiny scénářů SRES A1 (A1B), A2, B1 (IPCC, 2007).

Druhým použitým nástrojem byl ENSEMBLE Downscaling portál (Gutiérrez a kol., 2012). Cílem portálu je poskytnout výsledky modelování klimatických dat pomocí multi-model climate change global simulations. Portál umožňuje kalibrovat a downscalovat výstupy v zájmových regionech na základě historických měření a přívětivou práci s různými metodami statistického downscalingu. Pracuje transparentně s historickým měřením, reanalýzou a globálními klimatickými simulacemi. Portál pracuje se sérií emisních scénářů RCPs - Representative Concentration Pathways (IPCC, 2013).

3.2.3 Lumped bilanční model

Základem bilančního modelu jsou upravené řídicí rovnice použité v bilančním modelu dle (Wang a kol., 2013). Soustava řídicích rovnic modelu je následující. Nejprve jsou použity řídicí rovnice plošného povrchového odtoku, podzemního odtoku a řídicí rovnice celkového výparu z povodí. Z výsledků plošného povrchového odtoku a podzemního odtoku je složena rovnice celkového odtoku z povodí a stanovena hodnota půdní vlhkosti. Pro výpočet potenciálního výparu vody z povodí je použita metoda výpočtu dle Thornthwaite. Optimální kalibrační koeficienty vstupující do řídicích rovnic jsou nalezeny pomocí Gradientní optimalizační metody a metody Evolučních algoritmů. Kritériem optimalizace je maximalizace hodnoty Nash–Sutcliffova koeficientu. Rovnice byly upraveny za výše definovaných zjednodušujících předpokladů a následně byly aplikovány na středně velké povodí v České republice. Testování a sestavení modelu bylo předmětem diplomové práce (Knoppová, 2018).

3.3 SIMULAČNÍ MODEL CHOVÁNÍ NÁDRŽE

3.3.1 Výpočet zásobního objemu se 100% zabezpečeností odtoku z nádrže

Simulační model chování nádrže popsal (Starý, 2006) a vychází ze základní rovnice nádrže v součtovém tvaru (1).

$$V_n = V_0 + \sum_{i=1}^n (O_i(V_i) - Q_i) \Delta t \quad (1)$$

V ní značí V_n objem vody v nádrži na konci n -tého kroku řešení, V_0 je počáteční objem vody v nádrži, Q_i je průměrný měsíční přítok vody do nádrže a $O_i(V_i)$ je průměrný měsíční řízený odtok vody z nádrže, který se mění v závislosti na plnění nádrže, Δt je délka časového kroku. Index i značí pořadí řešeného měsíce $i = 1, 2, \dots, n$, kde n je počet všech řešených měsíců a je dán počtem členů řady průměrných měsíčních přítoků vody do nádrže. Protože odtok je v sumě předřazen přítoku, rovnice simuluje prázdnění nádrže. Počáteční podmínkou řešení je plný zásobní objem o známé velikosti V_z , prázdnění zásobního objemu je tedy nulové. Okrajovou podmínkou řešení je zadaný přítok vody do nádrže – řada průměrných měsíčních přítoků. Řešení je provedeno na plánovaný nalepšený odtok vody z nádrže O_p .

3.3.2 Výpočet zásobního objemu při zabezpečení odtoku z nádrže menší než 100 %

Ve vztahu (2), který je omezující podmínkou typu nerovnosti, představuje výraz mezi znaménky nerovnosti hodnotu prázdnění nádrže na konci k-tého kroku. Uvedené prázdnění nemůže být menší než nula (zásobní objem je plný a voda odtéká přes přeliv) a nemůže být větší než velikost zásobního objemu nádrže (zásobní objem je prázdný a vodu není kam shromažďovat). Suma až do k-1 kroku je vyčíslena z předchozích kroků řešení. Zbývá tedy v každém kroku rozhodnout, zda je možno řízený odtok O_K nahradit hodnotou O_P . Pokud při dosazení O_P za O_K zůstane výraz v daných mezích, není třeba reagovat a výpočet se rekurentně přesune do dalšího kroku řešení. Pokud však budou meze překročeny, položí se výraz roven překročené mezi a vypočte se korigovaná hodnota O_K . V daném kroku je pak hodnota příslušné meze prázdněním nádrže právě dosažena. Pokud je O_K menší než O_P , vzniká v daném měsíci porucha, měsíc je poruchový. Vniklé poruchy za celé řešené období jsou pak uvažovány při výpočtu zabezpečení. Popsaným postupem založeným na principu predikce-korekce je vyčíslen průběh skutečného odtoku vody z nádrže a je daný řadou vyčíslených řízených odtoků vody z nádrže.

$$0 \leq \sum_{i=0}^{k-1} (O_i - Q_i)\Delta t + (O_k - Q_k)\Delta t \leq V_z, \quad (2)$$

3.3.3 Výpočet zabezpečení podle trvání

Obecnou definici zabezpečení vodohospodářských systémů postupně popsali (Kritskiy, Menkel 1952), (Klemeš, 1967). Výpočet zabezpečení podle trvání je odvozen dle Čegodajeva (ČSN 75 2405) a je dán rovnicí (3).

$$P_T = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100 \quad (3)$$

Kde m je počet bezporuchových měsíců v řadě a n je celkový počet měsíců v řadě.

3.4 METODY VYHODNOCENÍ

3.4.1 Výpočet statistických charakteristik

Statistické posouzení výsledků bylo provedeno pomocí statistických charakteristik počítaných Momentovou metodou. Z výsledných souborů dat byly stanoveny střední hodnoty, disperse, směrodatné odchylky, koeficienty variace a asymetrie a odvozeny minimální a maximální hodnoty.

3.4.2 Robustnost

Jednou z možností jak ohodnotit navrhované řešení v podmínkách hlubokých nejistot změn klimatu je provedení analýzy robustnosti, resp. ohodnocení robustnosti navrhovaného řešení.

Definice robustnosti popisuje vlastnost, jakým způsobem je jedinec, řešení, systém silný a zdravý. Pokud převedeme definici na jakýkoliv systém, je Robustnost definována jako určitá schopnost systému tolerovat poruchy, které by mohly ovlivnit jeho funkční podstatu. Stejně pak může být Robustnost definována jako "schopnost systému odolat změnám bez přizpůsobení jeho počátečnímu nastavení, resp. konfigurace" (Wieland a Wallenburg, 2012). Robustnost v tomto případě je definována dle prací Paton a kol. (2014), Roach a kol. (2016). Robustnost může nabývat intervalu od $R \in (0,1)$. Navrhované řešení je robustnější čím více se blíží k 1.

4 PRAKTICKÁ APLIKACE

Praktická aplikace výše popsaných metod byla provedena na dvou případových studiích. První testovanou nádrží byla reálně provozovaná nádrž Vír I. Posouzení zásobního objemu bylo provedeno v souladu s manipulačním řádem k vodnímu dílu. Druhým testovaným případem byl návrh budoucí nádrže v hájeném profilu Hanušovice. Návrh nádrže byl proveden v souladu s Technicko–ekonomickou studií k vodnímu dílu Hanušovice na řece Moravě zadanou podnikem Povodí Moravy s.p.

Díličí výsledky praktické aplikace popsané dále v práci byly následující. Analýza vlivu nejistot měření na zásobní objem nádrže byla provedena na nádrži Vír I a na výhledovém profilu nádrže Hanušovice. Analýza nejistot dopadů změn klimatu na zásobní objem nádrže byla aplikována pouze na nádrž Vír I.

4.1 NEJISTOTY MĚŘENÍ A JEJICH VLIV NA VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍ FUNKCE NÁDRŽE

4.1.1 Stávající nádrž – Vír I

Nádrž Vír I se nachází v České republice v kraji Vysočina a slouží převážně k protipovodňové ochraně, k akumulaci povrchové vody k vodárenským a hydroenergetickým účelům. Nádrž je vybudována v povodí řeky Svratky a v provozu je od roku 1957. Řeka Svratka je také hlavním přítokem vody do nádrže. Vstupní hodnoty pro výpočet tvoří časová řada průměrných měsíčních průtoků v délce 60 let za období měření 1950 až 2016. Průměrný dlouhodobý přítok vody do nádrže stanovený z této průtokové řady je $Q_a = 3,28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Roční průměrná hodnota výparu z vodní hladiny je $E_A = 613 \text{ mm}$. Hodnoty měsíčního množství výparu z vodní hladiny jsou odvozeny zjednodušeně podle procentuálního rozložení hodnot výparu dle ČSN 75 2405 a z hodnoty E_A pro nádrž Vír I.

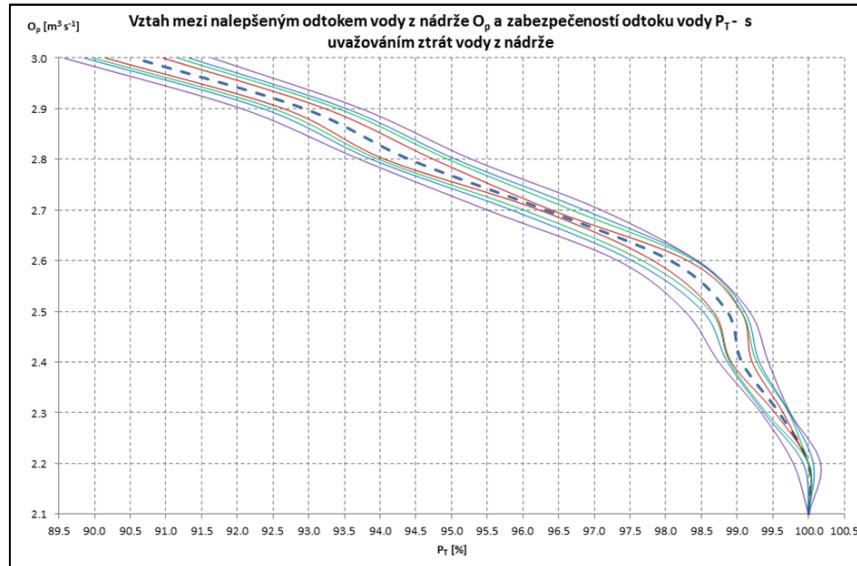
Celkový objem nádrže $V_{\text{CELKOVÝ}}$ je 56,193 mil. m^3 , objem zásobní $V_{Z,\text{max}}$ činí 44,056 mil. m^3 a ochranný objem nádrže V_R je 8,337 mil. m^3 . Celková výška hráze je 67,3 m. Nádrž Vír I je zařazena do třídy významnosti A ($P_T \geq 99,5 \%$). Nalepšený odtok vody z nádrže je $O_p = 2,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pro uvažovanou zabezpečení podle trvání $P_T = 99,5 \%$. Nalepšený odtok je dle manipulačního řádu rozdělen na minimální zůstatkový odtok MZ odpovídající hodnotě $0,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a na odběry vody $O = 2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Kdy odběry vody jsou rozděleny dále na díličí odběry pro oblast Žďár nad Sázavou a odběry do Vířského oblastního vodovodu. Hodnota průsaku tělesem hráze je odvozena z empirického pozorování a pro gravitační betonové těleso hráze činní $0,15 \text{ l s}^{-1}$ na 1000 m^2 .

Praktická aplikace pro reálně provozovanou nádrž Vír I je rozdělena do dvou částí. Nejprve je stanoven zásobní objem nádrže v podmínkách nejistot pro 100% zabezpečení odtoku vody z nádrže. První část praktické aplikace slouží k počátečnímu nastavení výpočtů druhé části. V druhé části je provedena analýza zabezpečení odtoku vody z nádrže v podmínkách nejistot.

4.1.1.1 Stanovení zásobního objemu při zabezpečení odtoku z nádrže menší než 100 % v podmínkách hydrologických a provozních nejistot

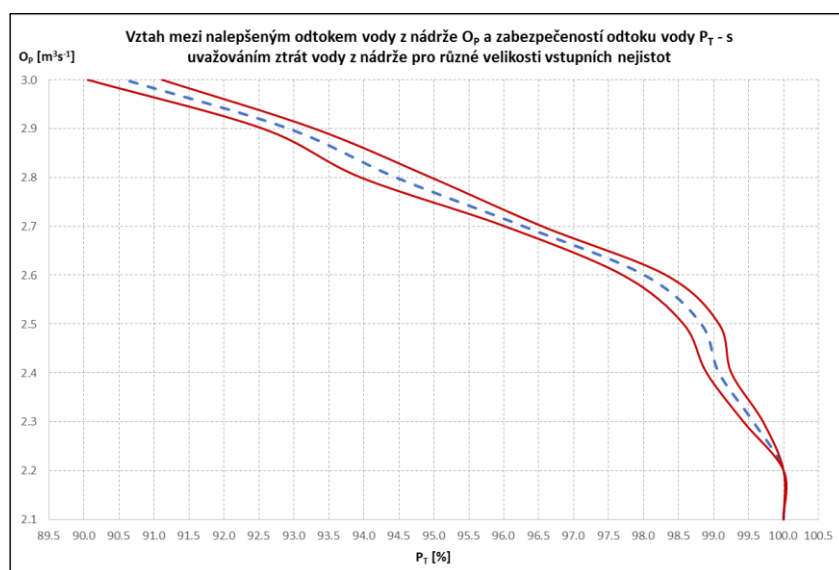
Prezentované výsledky byly převzaty z publikace (Marton a kol., 2015). Citlivostní analýza zabezpečení nalepšeného odtoku vody z nádrže byla provedena bez a s uvažováním ztrát vody z nádrže. Při uvažování ztrát vody ve výpočtech zabezpečení byly uplatněny popsané postupy pro generování nejistotou zatížených hydrologických, morfologických a provozních vstupů. Analýza byla provedena pro hodnoty nalepšeného odtoku O_p ležícího v intervalu $O_p \in (2,2; 3,0) \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Počet opakování metodou Monte Carlo byl zvolen 300. Velikosti vstupních nejistot byly pro všechny vstupní data konstantní a pohybovaly se v intervalu ± 3 , ± 6 , ± 9 a $\pm 15 \%$. Algoritmus simulující chování nádrže následně vypočítal náhodné odtoky NO_i vody z nádrže a zabezpečení podle trvání $NP_{T,i}$. Pro lepší prezentaci výsledků byly opět tyto hodnoty

statisticky vyhodnoceny. Byla stanovena střední hodnota $\mu(X)$ každého náhodného souboru, která je považována za výslednou hodnotu. Dále byla stanovena směrodatná odchylka $\sigma(X)$, která je považována za standardní nejistotu vztaženou k danému výsledku $\mu(X)$. Celková, rozšířená nejistota typu „ U_a “ pokrývající téměř 100 %, resp. 99,97 % výskytu sledované veličiny odpovídala hodnotě $\mu(X) \pm 3\sigma$. Na obrázku 1 jsou zobrazeny výsledky analýzy ve formě vztahové křivky závislosti O_p na P_T .



Obr. 1. Vztah mezi nalepšeným odtokem vody z nádrže a zabezpečeností odtoku vody z nádrže s uvažováním ztrát vody z nádrže pro vstupní nejistotu ± 3 , ± 6 , ± 9 a ± 15 %.

Dodatečně byl také proveden výpočet, kdy v jednom řešení byly nastaveny různé velikosti vstupní nejistoty. Oproti výsledkům citlivostní analýzy, kde vstupní nejistoty byly zadávány konstantně pro všechny vstupní parametry, byl proveden výpočet s různým nastavením nejistoty na vstupních parametrech. Vstupní nejistoty pro uvedený příklad byly nastaveny následovně ± 5 % nejistota na přítoku vody do nádrže, ± 15 % nejistota batygrafických křivek, ± 3 % výparu z vodní hladiny a ± 10 % nejistota průsaku tělesem hráze. Hodnoty nalepšeného odtoku O_p byly počítány pro interval $O_p \in (2,1; 3,0)$ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ a počet opakování metodou Monte Carlo byl zvolen 300. Na obrázku 2 je zobrazen výsledek výpočtu ve formě vztahové křivky závislosti O_p na P_T .



Obr. 2. Vztah mezi nalepšeným odtokem vody z nádrže a zabezpečeností odtoku vody z nádrže, s uvažováním ztrát vody z nádrže.

4.1.2 Návrh nové nádrže – Hanušovice

Praktická aplikace vychází z podkladů Technicko-ekonomické studie variant vodního díla Hanušovice. Podnikem Povodí Moravy s.p. byl zadán požadavek na vypracování vodohospodářského řešení nádrže Hanušovice pro posílení vodárenských účelů regionů v severovýchodní části České republiky. Tudíž základní podklady, hydrologická data a batygrafické křivky uvedené v této části práce byly získány v rámci znaleckého posudku k nádrži Hanušovice (Marton, 2016). V rámci výzkumné činnosti pak byl návrh rozšířen o analýzu nejistot nádrže, která byla prezentována v této části praktické aplikace a byla publikována v člancích (Marton, Starý, Paseka, Menšík, 2016 a), (Marton, Paseka, Knoppová, 2016 b) a (Marton a Paseka 2017). Nádrž Hanušovice byla řešena ve variantním řešení pro tři volené profily umístění hráze. Jedná se o variantu A – velká nádrž pod soutokem řek Moravy a Krupé. Dále variantu B – menší nádrž na řece Krupé a varianta C – malá nádrž na řece Morava před soutokem s Krupou. Pro další výpočty byla použita pouze varianta umístění nádrže v profilu A.

Základní hydrologické údaje o povodí varianty A byly následující. Pro výpočet byla použita vstupní hydrologická řada průměrných měsíčních průtoků jako součet z profilů Vlaské a Habartice za období 1949 – 2014. Data byla získána od ČHMÚ pobočka Ostrava. Vliv mezipovodí, které leží mezi profily je zanedbán. Dlouhodobý průměrný průtok je stanoven na $Q_a = 4.09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ekologický průtok tvořící hranici sucha je dán hodnotou Q_{355} odpovídající průtoku $1,04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Hodnota průměrného měsíčního výparu je odvozena pro střední plnění nádrže a odpovídá hodnotě $E_A = 700 \text{ mm}$ z odhadované nadmořské výšky vodní hladiny přibližně 460 m n. m.

4.1.2.1 Stanovení zásobního objemu při zabezpečení odtoku z nádrže menší než 100% v podmínkách hydrologických a provozních nejistot

Výsledky byly publikovány v (Marton a Paseka, 2017). Nejprve byl proveden návrh nádrže s ohledem na výpočet zásobního objemu V_z pro 100 % zabezpečení, aby byl odhadnut počáteční zásobní objem v nádrži. Dále byla provedena i analýza zabezpečení zásobního objemu nádrže. Nalepšený odtok vody z nádrže O_P se pohyboval v rozpětí 0,6 až 0,8 koeficientu nalepšení. Vstupní hodnota rozšířené nejistoty pro výpočet nejistoty zásobního objemu byla zadávána konstantně pro všechny parametry v rozmezí $\pm 6 \%$ a $\pm 9 \%$. Počet opakování generace náhodných vstupních parametrů metodou Monte Carlo byl roven 300.

Tabulka 1 ukazuje výsledky výpočtu zásobního objemu nádrže pro koeficient nalepšení 0,6 až 0,8 a 100 % zabezpečení zásobního objemu nádrže. Hodnota $\mu(V_z)$ je považována za výsledek výpočtu po statistickém vyhodnocení. Hodnota $3\sigma(V_z)$ následně ukazuje hodnotu maximální nejistoty zásobního objemu nádrže pokrývající 99,97 % pravděpodobnosti výskytu objemu ve sledované množině realizací.

Tab. 1. Zásobní objem nádrže s uvažováním nejistot pro 100 % zabezpečení nádrže.

Počáteční nejistota		$\pm 6 \%$			$\pm 9 \%$		
α	$O_P [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$	$\mu(V_z) [\text{m}^3]$	$3\sigma(V_z) [\text{m}^3]$		$\mu(V_z) [\text{m}^3]$	$3\sigma(V_z) [\text{m}^3]$	
0.6	2,453	27 764 638	$\pm 638 831$	$\pm 2,30 \%$	27 823 438	$\pm 903 776$	$\pm 3,25 \%$
0.7	2,861	44 111 900	$\pm 1 830 159$	$\pm 4,15 \%$	44 105 676	$\pm 2 742 899$	$\pm 6,22 \%$
0.8	3,270	68 148 752	$\pm 1 831 426$	$\pm 2,69 \%$	68 148 040	$\pm 2 756 372$	$\pm 4,05 \%$

Pro výpočet zabezpečení podle trvání objemu nádrže byl zásobní objem nádrže zadán z výpočtu deterministického řešení a odpovídal hodnotě $44 127 380 \text{ m}^3$ pro koeficient nalepšení $\alpha = 0,7$. Mrtvý prostor byl uvažován jako 10 % zásobního prostoru. Hodnota rozšířené nejistoty byla zadávána konstantně pro všechny vstupní parametry na hodnotě $\pm 6 \%$ a $\pm 9 \%$. Počet opakování náhodných vstupních parametrů generovaných metodou Monte Carlo byl roven 300.

Tabulka 2 prezentuje výsledky analýzy výpočtů zabezpečení odtoku vody z nádrže. Hodnota $\mu(P_T)$ je považována za výsledek výpočtu a hodnoty $2\sigma(P_T)$ a $3\sigma(P_T)$ pak popisují velikost nejistoty vyskytující se kolem výsledku výpočtu. Analýza byla provedena pro hodnoty nalepšeného odtoku 0,69 až 0,78.

Tab. 2. Výpočet zabezpečení odtoku vody z nádrže podle trvání s uvažováním vstupních nejistot.

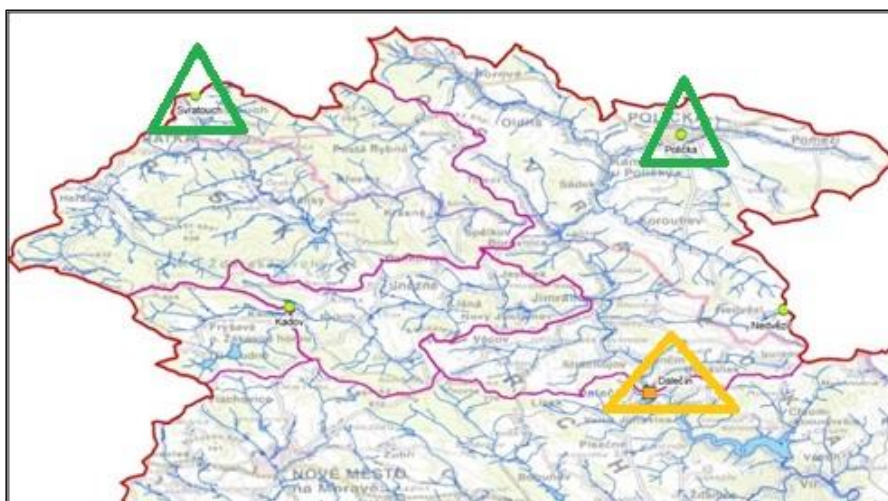
Počáteční nejistota		±6 %			±9 %		
α	$O_P [m^3 s^{-1}]$	$\mu(R_T) [\%]$	$2\sigma(R_T) [\%]$	$3\sigma(R_T) [\%]$	$\mu(R_T) [\%]$	$2\sigma(R_T) [\%]$	$3\sigma(R_T) [\%]$
0.690	2.819	100.00	±0.00	±0.00	100.00	±0.00	±0.00
0.693	2.833	100.00	±0.00	±0.00	99.99	±0.05	±0.07
0.70	2.861	99.90	±0.21	±0.32	99.90	±0.23	±0.34
0.72	2.943	99.62	±0.03	±0.04	99.63	±0.07	±0.11
0.73	2.984	99.53	±0.12	±0.18	99.54	±0.13	±0.20
0.74	3.025	99.30	±0.18	±0.26	99.29	±0.24	±0.36
0.76	3.107	98.49	±0.14	±0.22	98.52	±0.21	±0.31
0.78	3.188	98.06	±0.22	±0.33	98.02	±0.25	±0.38

4.2 VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍ FUNKCE NÁDRŽE V PODMÍNKÁCH NEJISTOT ZMĚN KLIMATU

Průběh sestavení praktické aplikace je následující. Nejprve byla vygenerována klimatická data v programu LARS WG a ENSEMBLE Downscaling portálu. Dále byla provedena kalibrace a validace bilančního srážkoodtokového modelu za použití odpovídající řady průměrných měsíčních teplot, měsíčních úhrnů srážek a průměrných měsíčních průtoků měřených v daném závěrovém profilu povodí. Do kalibrovaného modelu byla následně vkládána downscalovaná klimatická data. Bilanční model provedl výpočet hydrologické transformace. Výsledkem výpočtu byly řady průměrných měsíčních hodnot povrchového, podzemního a celkového odtoku vody v povodí. Opakovaným vkládáním klimatických dat pro různé klimatické modely a emisní scénáře byly sestaveny ensembly hydrologických dat zatížené nejistotou klimatických modelů a emisních scénářů. Výsledné ensembly byly použity pro posouzení zásobního objemu a hydrologických spolehlivostí nádrže Vír I v podmínkách nejistoty klimatické změny.

4.2.1 Hydrologická, klimatologická data povodí a technické informace o nádrži Vír I

Plocha povodí Svatky nad nádrží je 366,94 km². V povodí se nacházejí celkem čtyři meteorologické stanice. Jsou jimi stanice Kadov, Nedvězí, Polička a Svatouch. Z toho stanice Svatouch je plně profesionální stanice s pravidelnou obsluhou. Ostatní tři stanice jsou jen vedlejší. V práci se pro další výpočty uvažuje s daty z meteorologických stanic Polička a Svatouch. Důvodem je, že klimatologická data z obou stanic byla k dispozici s nejdelším kontinuálním záznamem měření, resp. bez žádného výpadku v měření. Data obsahovala řadu průměrných denních teplot vzduchu, řadu minimálních a maximálních denních teplot vzduchu a denní úhrny srážek za období 1964-2016. Hydrologická data byla použita v podobě řady hodnot průměrných měsíčních průtoků v hydrometrickém profilu Dalečín (přítok do nádrže) za období 1950 – 2016. Pro kalibraci modelu byla použita sjednocená data za období 1964 - 2016. Klimatická a hydrologická data poskytl Český hydrometeorologický ústav pobočka Brno. Zelené body ukazují rozmístění klimatologických stanic a žlutý bod popisuje vodoměrnou stanici v povodí, viz obrázek 3.



Obr. 3. Rozmístění klimatologických stanic a vodoměrné stanice v povodí řeky Svatky.

Hodnota výparu byla do výpočtů nastavena na hodnotu $E_A = 700$ mm. Roční průměrná hodnota výparu z vodní hladiny koresponduje s procentuálním zvýšením evapotranspirace z povodí stanovené bilančním modelem. Pro účely výpočtu byla odhadnuta hodnota navýšení výparu 10 %.

4.2.2 Statistický downscaling klimatologických dat

4.2.2.1 LARS WG

Programem LARS WG byla generována klimatologická data a to především hodnoty průměrných denních teplot a denních srážkových úhrnů nad povodím. Vstupem do programu byla data minimální a maximální denní teploty a řada denních úhrnů srážek ze stanic Svatouch a Polička za období 1964 až 2016. Jak již bylo zmíněno, program LARS WG nabízí možnosti downscalingu klimatologických dat na základě série okrajových podmínek z globálních klimatických modelů GCM a regionálních klimatických modelů RCM a emisních scénářů SRES. Standardně jsou v programu obsaženy okrajové podmínky a statistické charakteristiky upravující výsledná downscalová data pro 15 GCM a RCM modelům a tři SRES emisní scénáře A1B, B1 a A2.

Pro další prezentaci budou výsledky prezentovány následovně: i) Scénář A1B bude dále chápán jako scénář vyrovnaný s pohledu koncentrací CO_2 v atmosféře, ii) scénář B1 bude považován za optimistický z pohledu snižování koncentrací CO_2 v atmosféře, iii) scénář A2 bude dále brán jako pesimistický scénář s pokračujícím navyšováním koncentrace CO_2 v atmosféře.

Program vždy umožnil generovat klimatologická data pro tři časové úseky nazvané a dále používané jako: i) Období I tzv. blízká budoucnost, které popisuje období let 2011 až 2030. ii) Období II tzv. středně vzdálená budoucnost charakteristická pro roky 2046 až 2065. iii) Období III je popisováno jako období vzdálené budoucnosti charakteristické pro roky 2080 až 2099. Celkem bylo možno sestavit ensemble s 29 kombinací klimatických modelů pro tři časová období I, II a III.

4.2.2.2 ENSEMBLES Downcaling Portal

Pro sestavení downscaling modelu je nutné provést tři základní kroky:

1.) Nejprve je nutné vytvořit Prediktor. To znamená soubor informací o daném území, velikosti gridu, časových a prostorových informacích klimatologických veličin a informací o kompatibilních typech GCM modelů. Velikost výběru odpovídá také maximálnímu možnému výběru dostupných klimatologických stanic. Pro vytvoření prediktoru bylo zvoleno následující nastavení: i) byl vybrán datový soubor s globálními daty ERA-INT_DM. Datový soubor obsahuje historické záznamy max. a min. teplot, teploty 2 m nad povrchem a úhrny srážek za období 1979

až 2011, ii) proměnné max. a min. teploty, teploty 2 m nad povrchem a úhrny srážek byly zvoleny pro prostorové a časové rozlišení 2D/12, iii) GCM model, který byl pro dané požadavky k dispozici z možných 8 GCM modelů, byl norský The Norwegian Earth System Model - CMIP5-NORESM1-M. Model je schopen pro dané území provést simulace na základě historických dat za období 1941-2001 pro sestavení BIAS souboru. Dále je schopen simulací pomocí emisních scénářů RCPs 4,5 a 8,5. Všechny simulace je schopen provést v maximálním časovém kroku 24 hodin.

2.) Po nastavení Prediktoru byl následně vytvořen Prediktant. Ve vybrané oblasti se nachází pět stanic. Jsou to stanice Vídeň, Görlitz, Fichtelberd, Milešovka a Oravská Lesná. K samotnému vytvoření Prediktantu byly vybrány tři stanice v trojúhelníku Milešovka, Vídeň a Oravská Lesná a byl vybrán klimatický dataset ECA_EUROPE s proměnnými srážkami resp. se srážkovými úhrny a průměrnými teplotami vzduchu 2 m nad povrchem.

3.) Dalším krokem práce s portálem byl výběr downscaling metody. Aby byla postihnuta míra nejistoty generování resp. downscalingu byly testovány všechny dostupné metody, které portál nabízel pro nastavení Prediktantu a Prediktoru. Testováno bylo pět metod: i) Non-Generative (algorithmic), typ Analogová metoda. Počet analogů nastaven na 1 a metoda analogu průměr. ii) Generative (model-based), typ Lineární regrese. iii) Generative (model-based), typ Generalizovaná lineární metoda. iv) Generative (model-based), typ Kvantitativní regrese. v) Generative (model-based), typ Neuronové sítě (ELM), počet skrytých neuronů v neuronové síti byl nastaven na 100.

Pro jednotlivé downscaling metody byly dále v práci použity zkratky: i) LR - Lineární regrese, ii) AN – Analogová metoda, iii) EML – metoda neuronových sítí a iv) KOMBI – kombinace (Generalizovaná lineární metoda) pro řady srážkových úhrnů a Kvantitativní regrese – řadu teploty vzduchu.

Pro každou volenou metodu byla provedena validace downscaling metody a následně vytvořena sada klimatologických dat v podobě řady denních srážkových úhrnů a denních průměrných teplot vzduchu 2 m nad povrchem. Tato data byla vytvořena pro srovnávací řadu resp. BIAS rovinu a dále pro emisní scénáře RCP 4,5 a 8,5. Výsledkem byla jedna BIAS řada dat denních hodnot srážek a teplot a dále pak osm souborů klimatických dat pro čtyři výše jmenované downscaling metody a dva emisní scénáře RCP 4,5 a 8,5. Délka downscalových řad je 89 let za období 2010 - 2099.

Klimatická data byla na závěr upravena tak, aby jejich hodnoty byly použitelné pro povodí řeky Svratky a odpovídaly podobným klimatologickým parametrům ze stanic Svratouch a Polička. Za tímto účelem je provedena analogová BIAS korekce klimatologických dat podle dlouhodobých průměrných hodnot srážkových úhrnů a dlouhodobých průměrných teplot vzduchu ve zmíněných stanicích. Zpracování podkladů a dat bylo předmětem diplomové práce (Hudec, 2018).

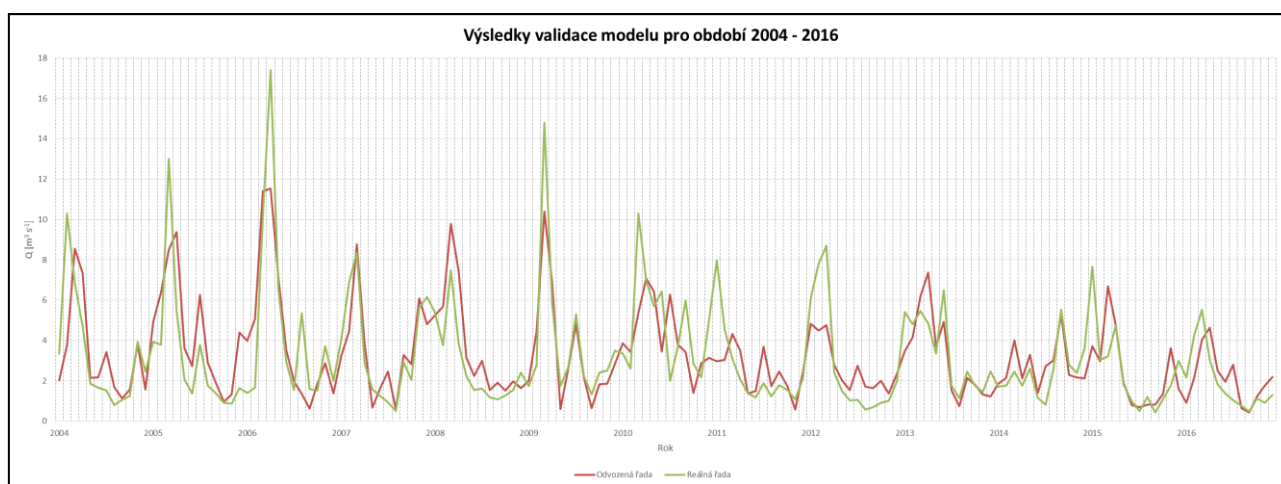
4.2.3 Kalibrace a validace hydrologického modelu

V (Knoppová, 2018) bylo provedeno detailní testování možností kalibrace a validace hydrologického modelu na povodí řeky Svratky. Vstupem do kalibrací byla vždy data průměrných měsíčních teplot, srážek a průtoků. Z práce vyplynuly základní parametry nastavení bilančního modelu. Nejlepších výsledků dosahoval bilanční model pro rozložení poměru kalibrace a validace 70 %/30 % a počtu kalibračních koeficientů 12, resp. každý kalendářní měsíc měl svůj vlastní kalibrační koeficient. Kalibrace modelu byla provedena na datech o délce 40ti let za období let 1964-2003. Validace modelu byla provedena na období zbývajících 13ti let 2004-2016. V práci byly také použity dvě optimalizační metody pro nalezení optimálních hodnot 37 kalibračních koeficientů povrchového odtoku k_s , podzemního odtoku k_g , koeficientů evapotranspirace k_e a parametru počáteční půdní vlhkosti S_{i-1} . První metoda gradientní a druhá metoda evolučních algoritmů. Pro sestavení ensamble dat jejichž základem je generátor počasí LASR WG (emisní

scénáře SRES) byl bilanční model optimalizován a kalibrován podle gradientní metody. Ensemble dat jejichž základem byla klimatologická data použitá z ENSEMBLE downscalig portálu (emisní scénáře RCPs) byl vytvořen pomocí optimalizace bilančního modelu využitím evolučních algoritmů.

Výsledky kalibrace bilančního modelu pomocí gradientní optimalizační metody byly následující. Hodnota Nash Sutcliffova kritéria po optimalizaci kalibračního souboru odpovídala hodnotě $NSE = 0.699$. Validační soubor pak dosáhl Nash Sutcliff kritéria $NSE = 0.6$. Obrázek 4 znázorňuje výsledek validace modelu. Zelená křivka odpovídá hodnotám reálného průtoku v profilu Dalečín a červená křivka prezentuje odvozená data z bilančního hydrologického modelu.

Kalibrace pomocí evolučních algoritmů byla následující. Výsledná hodnota Nash Sutcliffova kritéria a po optimalizaci kalibračních koeficientů byla u kalibrace $NSE = 0.6905013$. Validační soubor dosáhl Nash Sutcliff kritéria $NSE = 0,6904778$.



Obr. 4. Výsledky validace hydrologického modelu pro období 2004 – 2016.

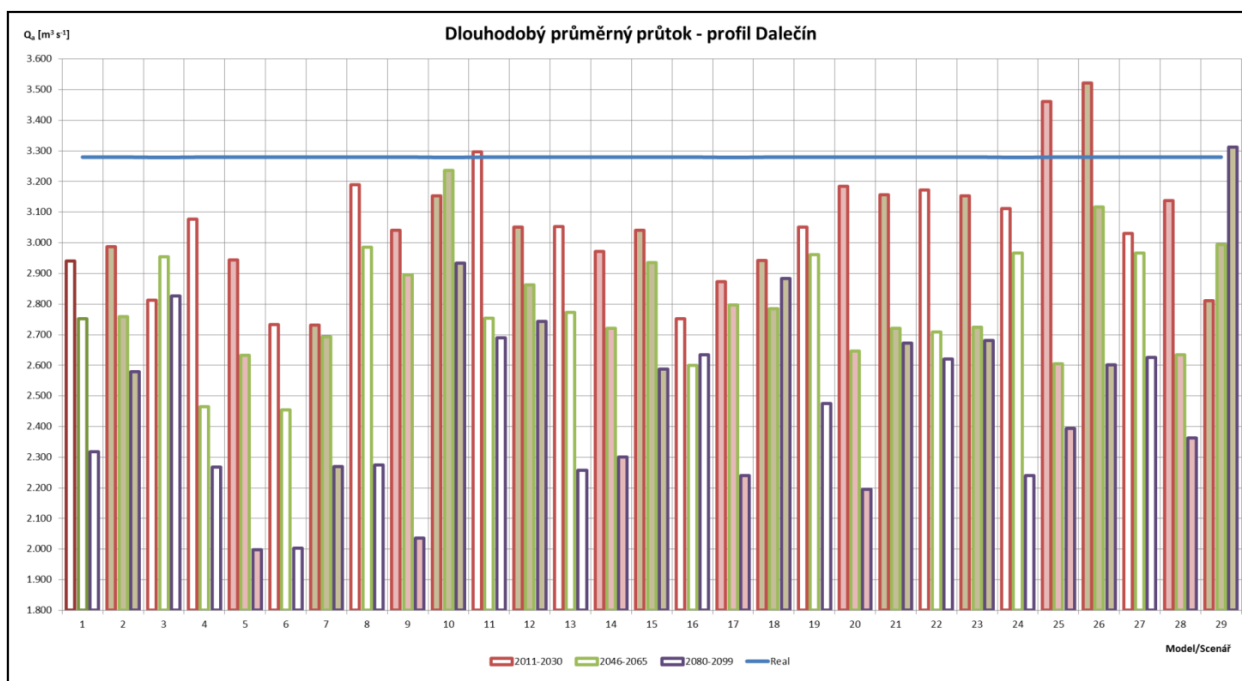
4.2.3 Hydrologická analýza povodí s uvažováním klimatické změny

Součástí výpočtů bylo i provedení detailní hydrologické analýzy povodí nad nádrží. Hydrologická analýza stejně jako následná analýza vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže byla provedena pro dva druhy klimatických dat zatížených změnou klimatu. Dále bude dělení pojmenováno následovně. Pro klimatologická data generovaná z programu LARS WG bude zavedeno pojmenování klimatických dat a výsledků dle emisních scénářů SRES. Pro data vytvořená na základě ENSEMBLE downscalig portálu budou výsledky pojmenovány dle emisních scénářů Representative Concentration Pathways RCPs.

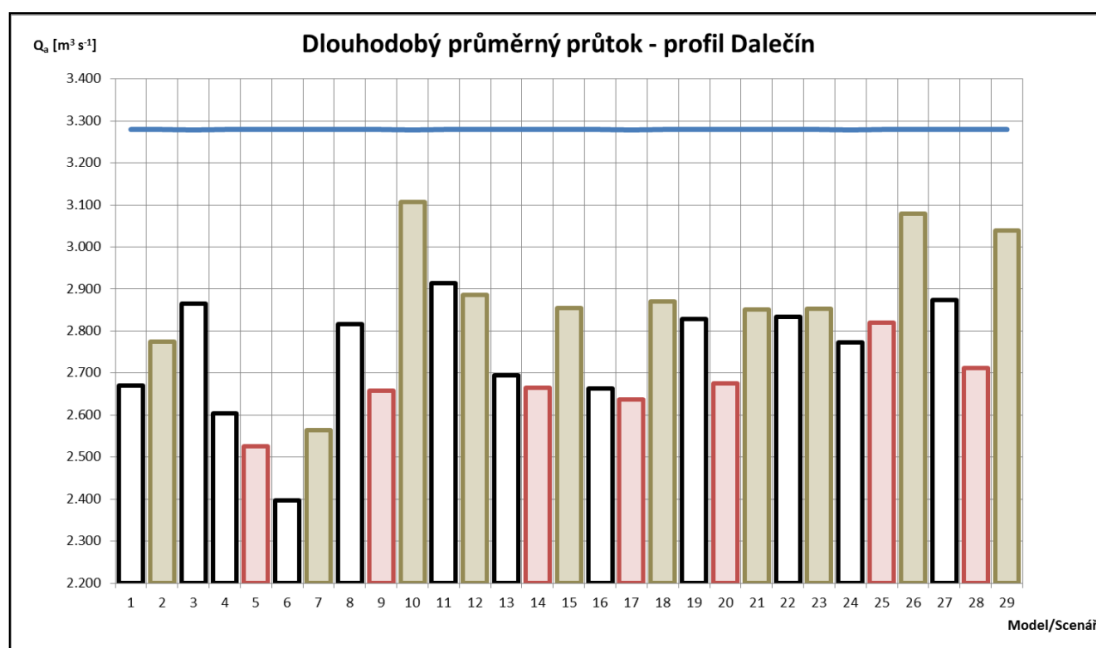
4.2.3.1 Emisní scénáře SRES

Obrázek 5 ukazuje srovnání dlouhodobých průměrných průtoků Q_a odvozených pro klimatické modely a emisní scénáře SRES s dlouhodobým průměrným průtokem z reálné průtokové řady za období 1950 až 2016. Obrázek ukazuje srovnání vždy mezi Q_a reálné řady a Q_a zpracovanými pro tři budoucí časová období I, II, III. Hodnota Q_a vypočtená z reálné průtokové řady je $Q_a = 3,28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Obrázek 6 ukazuje obdobné srovnání dlouhodobých průměrných průtoků Q_a . Jde o srovnání Q_a reálné řady a Q_a zpracované za celé generované období 2011-2099. V obou grafech na obrázcích 5. a 6. vždy výplň sloupců odpovídá použitému emisnímu scénáři. Bílé sloupce odpovídají scénáři A1B, světle hnědé sloupce odpovídají scénáři B1 a světle červené sloupce scénáři A2.



Obr. 5. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III.



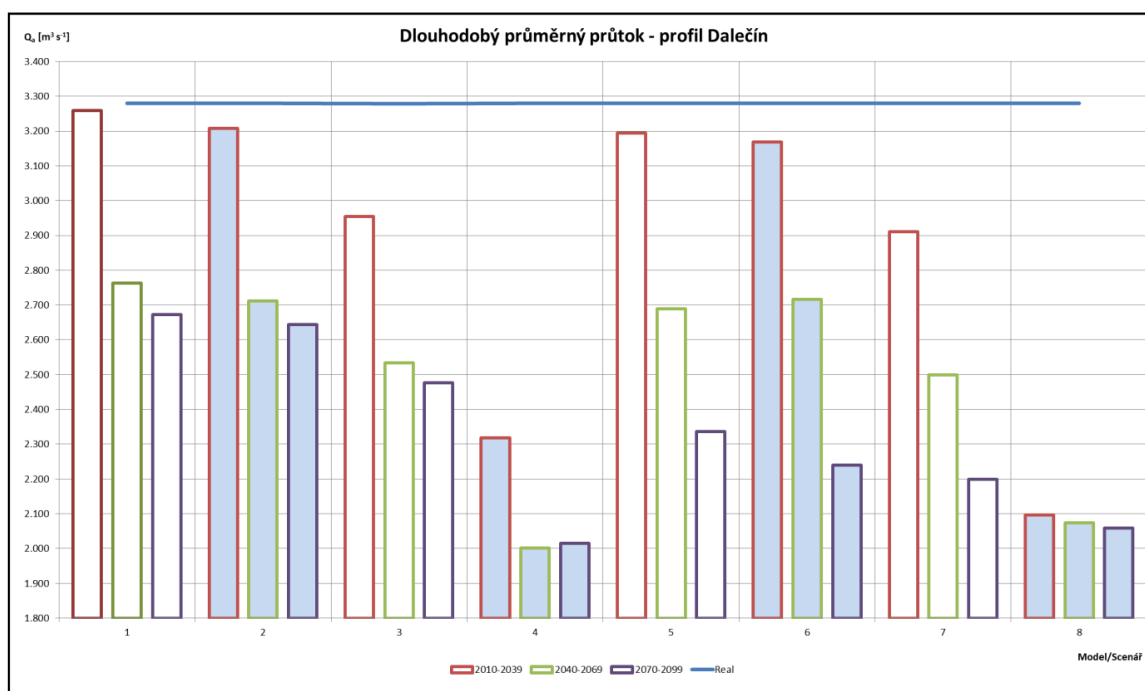
Obr. 6. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé generované období 2011-2099.

4.2.3.2 Representative Concentration Pathways RCPs

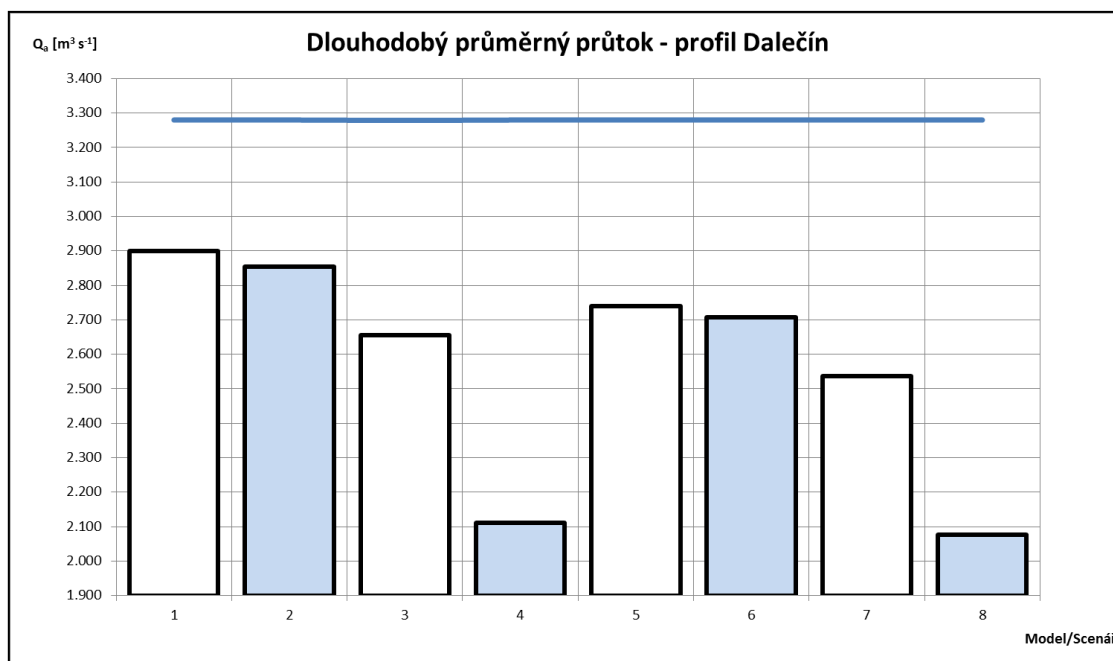
Obrázek 7 ukazuje srovnání dlouhodobých průměrných průtoků Q_a odvozených pro klimatické modely a emisní scénáře RCP s dlouhodobým průměrným průtokem z reálné průtokové řady za období 1950 až 2016. Obrázek ukazuje srovnání vždy mezi Q_a reálné řady a Q_a zpracovanými pro tři budoucí časová období I, II, III. Hodnota Q_a vypočtená z reálné průtokové řady je opět $Q_a = 3,28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Obrázek 8 ukazuje obdobné srovnání dlouhodobých průměrných průtoků Q_a . Jde o srovnání Q_a reálné řady a Q_a zpracované za celé generované období 2010-2099. V obou grafech na obrázcích

7. a 8. vždy výplň sloupů odpovídá použitému emisnímu scénáři. Bílé sloupce odpovídají scénáři RCP 4,5 a světle modré sloupce odpovídají scénáři RCP 8,5.



Obr. 7. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a vypočteného z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III.



Obr. 8. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé období 2010-2099.

4.2.5 Analýza vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže Vír I s uvažováním nejistoty klimatické změny

Pomocí simulačního modelu byla provedena analýza zásobního objemu a robustnosti řešení na požadovanou zabezpečení odtoku vody podle trvání $P_T = 99,5 \%$. Vypočet byl proveden dvěma

způsoby. V prvním případě byl nalepšený odtok vody z nádrže odvozen na základě koeficientu nalepšení α . Kdy nalepšený odtok O_P byl vypočítán jednotlivě pro každou průtokovou řadu z ensamble hydrologických dat dle vzorce $O_{P,i} = \alpha \cdot Q_{a,i}$, pro $i = 1, \dots, n$ řad v ensamble. Rozsah koeficientu nalepšení α odpovídal intervalu $\alpha \in \langle 0,7; 1 \rangle$. V druhém případě byla analýza zabezpečení zásobního objemu a robustnosti řešení provedena pro jednotný nalepšený odtok vody z O_P . Rozsah nalepšeného odtoku O_P se pohyboval v intervalu $O_P \in \langle 1,8; 2,7 \rangle$.

Analýza byla provedena pro ensemble hydrologických dat zatížených nejistotou modelů a emisních scénářů SRES a ensemble dat zatížených nejistotou modelů a emisních scénářů RCPs. Ensemble z emisních scénářů SRES obsahoval celkově 29 hydrologických řad. Ensemble byl pak jednotlivě rozdělen na dílčí ensamble o dvanácti řadách scénáře A1B, deseti řadách scénáře B1 a sedmi řadách pro A2. Časová období byla opět rozdělena na I (2011-2030), II (2046-6065), III (2080-2099) a jejich kombinace I+II a I+II+III.

Ensemble z emisních scénářů RCPs obsahoval celkem 8 řad. Dílčí dva ensamble pak obsahovaly 4 řady pro scénář RCP 4,5 a 4 řady pro scénář RCP 8,5. Časová období byla použita obdobně jako v předešlém případě období I (2010-2039), II (2040-6069), III (2070-2099) a jejich kombinace období I+II a I+II+III. Vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže bylo počítáno včetně uvažování ztrát vody výparem z vodní hladiny.

Jak bylo uvedeno výše, nejistota byla v tomto případě chápána jako hluboká nejistota vycházející ze socio-ekonomického vývoje populace popsaného emisními scénáři, metod downscalingu a klimatologických modelů. Nejistota tedy postihuje širokou variabilitu možností vývoje, která působí i na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže. Výsledkem simulací zásobního objemu nádrže bylo spektrum možností vývoje nalepšeného odtoku vody z nádrže pro danou zabezpečení $P_T \geq 99,5 \%$ a daný zásobní objem nádrže $V_Z = 44\,056\,000 \text{ m}^3$. To znamená, že nejistoty do výsledků byly popsány a vyhodnoceny pomocí střední hodnoty $\mu(P_T)$, $\min(P_T)$ a $\max(P_T)$ hodnoty a Robustnosti řešení. Analýza zásobního objemu byla provedena v definovaných intervalech hodnot α a O_P . Aby bylo možno provést odpovídající porovnání se současným stavem O_P , bylo za vyhovující výsledek považováno splnění následujícího kritéria $\min \{ \mu(P_T) - (P_T = 99,5 \%) \}$.

5 SHRNUÍ VÝSLEDKŮ

5.1 NÁDRŽ VÍR I – NEJISTOTY MĚŘENÍ

Shrnutí výsledků z pohledu analýzy zabezpečení odtoku vody z nádrže je možné popsat následovně. Srovnání je provedeno pro vybrané nalepšené odtoky vody z nádrže $O_P = 2,5$ a $O_P = 3,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, kde je vliv zřetelně odstupňovaný. Ve variantě $O_P = 2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s uplatněním všech kombinací, tudíž s uvažováním nejistot přítoku i ztrát vody z nádrže se interval zabezpečení pohyboval v $P_T \in \langle 98,663 \%; 99,055 \% \rangle$ $P_T = 98,859 \% \pm 0,196 \%$ pro vstupní konstantní nejistotu $\pm 3 \%$ a pro nejistotu $\pm 15 \%$ pak v intervalu $P_T \in \langle 98,27 \%; 99,172 \% \rangle$ $P_T = 98,721 \% \pm 0,451 \%$. Pro $O_P = 3,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pak interval zabezpečení podle trvání nabýval hodnot $P_T \in \langle 90,154 \%; 90,958 \% \rangle$ $P_T = 90,556 \% \pm 0,402 \%$ pro 3% vstupní nejistotu a $P_T \in \langle 89,57 \%; 91,646 \% \rangle$ $P_T = 90,608 \% \pm 1,038 \%$ pro vstupní nejistotu 15% . Z výše prezentovaných výsledků plyne logický závěr, že se zvětšující se nejistotou vstupních dat se i nejistota zabezpečení zvětšuje. Převáděno na počet poruchových měsíců, pro nalepšený odtok $O_P = 2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ v řešení bez uvažování nejistot a s uvažováním ztrát vody z nádrže odpovídá 8 poruchovým měsícům a pro $O_P = 3,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pak 70 měsícům. Při uvažování vstupních nejistot $\pm 3 \%$ je počet poruchových měsíců v rozmezí 8 až 9 měsíců pro $O_P = 2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a 66 až 72 měsíců pro $O_P = 3,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Pro nejistotu vstupních dat $\pm 15 \%$ je počet možných poruchových měsíců 8 až 12 pro $O_P = 2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a 60 až 76 měsíců pro $O_P = 3,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Při pohledu na vyhodnocení výsledků, kdy nejistoty byly do řešení zadávány pro každý vstupní parametr odlišně, jsou výsledky následující. Ve variantě $O_P = 2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s uplatněním všech

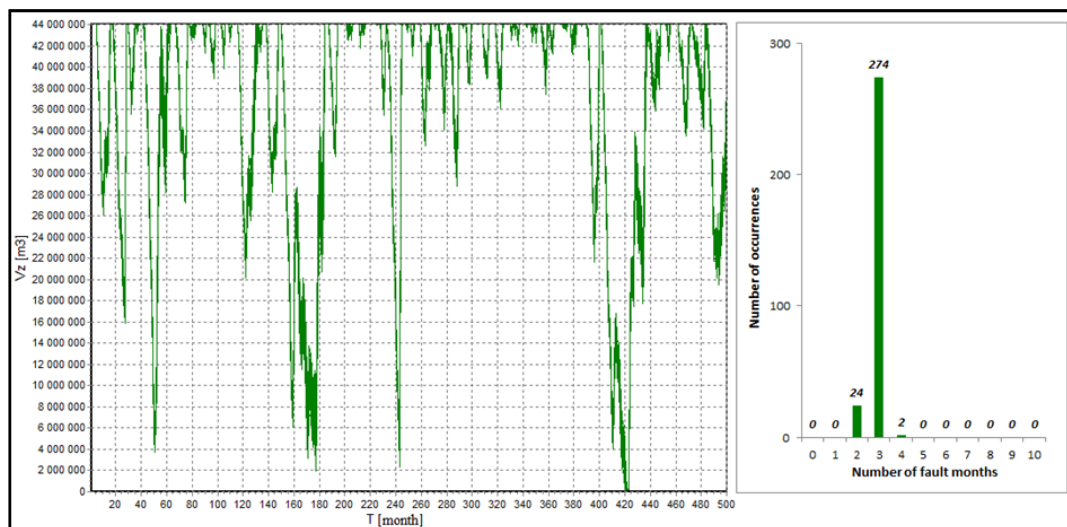
kombinací, tudíž s uvažováním nejistot přítoku $\pm 5\%$, $\pm 15\%$ na batygrafických křivkách, $\pm 3\%$ na výparu a $\pm 10\%$ na průsaku tělesem hráze, resp. s uvažováním ztrát vody z nádrže se interval zabezpečení pohyboval v $P_T \in \langle 98,568\%; 99,076\% \rangle$ $P_T = 98,822\% \pm 0,254\%$. Pro $O_P = 3,0\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ pak interval zabezpečení podle trvání nabýval hodnot $P_T \in \langle 90,05\%; 91,11\% \rangle$ $P_T = 90,58\% \pm 0,53\%$.

Z prezentovaných výsledků je vidět jak mohou nejistoty ovlivnit nárůst počtu poruchových měsíců a jakých intervalů může následně zabezpečení nabývat.

5.2 NÁDRŽ HANUŠOVICE – NEJISTOTY MĚŘENÍ

Výpočty provedené pro profil umístění hráze A pak byly následující. Nejprve byly v prvním kole výpočtů stanoveny zásobní objemy nádrže pro velikosti nalepšeného odtoku odpovídající koeficientu nalepšení 0,6 a 0,8. Zabezpečení odtoku vody z nádrže byla počítána dle trvání. Objem, který definoval hranici maximálního zásobního objemu určujícího stav poruchy nádrže, resp. vyprázdnění nádrže, odpovídal objemu pro koeficient nalepšení 0,7. V navrhovaném profilu A nejlépe odpovídal daným požadavkům nalepšený odtok $O_P = 2,861\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ a $\mu(V_Z) = 44\,111\,900\text{ m}^3$ pro koeficient nalepšení $\alpha = 0,7$. Při kontrole správnosti výpočtů byl vypočten zásobní objem i pro deterministické řešení. Jeho hodnota je téměř totožná s výpočtem ve stochastickém řešení. V deterministickém řešení vyšel zásobní objem $V_Z = 44\,127\,380\text{ m}^3$. Pokud budeme k výsledkům uvažovat i nejistoty vstupující do řešení, výsledky se začnou výrazně zkruslovat. Zásobní objem s uvažováním vstupních nejistot odpovídající hodnotě rozšířené nejistoty $U \pm 3\sigma \cdot \mu(V_Z)$, lze prezentovat takto. Pro hodnotu vstupní nejistoty $\pm 6\%$ leží zásobní objem v intervalu $V_Z \in \langle 42\,281\,741\text{ m}^3; 45\,942\,059\text{ m}^3 \rangle$ a nejistota objemu je $\pm 4,15\%$. Pro $\pm 9\%$ vstupní nejistoty přesahuje rozmezí objemů $\pm 6\%$ intervalu nejistoty. Zásobní objem se pohybuje v rozmezí $V_Z \in \langle 41\,362\,777\text{ m}^3; 46\,848\,575\text{ m}^3 \rangle$.

Na obrázku 8 je zobrazen průběh prázdnění nádrže za celé řešené období a histogram rozdělení počtu poruchových měsíců v nádrži pro vstupní nejistotu $\pm 9\%$ a koeficient nalepšení $\alpha = 0,72$.



Obr. 8. Průběhy plnění nádrže pro $\alpha = 0,72$ a histogram poruchových měsíců.

Podle zpracovaných výsledků prezentující průběhy plnění a prázdnění nádrže s histogramy poruchových měsíců můžeme zabezpečení podle trvání prezentovat také právě podle četnosti výskytů poruchových měsíců. Z histogramu na obr. 8, tedy můžeme říci, že zabezpečení $P_T = 99,74\%$ odpovídající pro náhodné řešení se 2 poruchovými měsíci se vyskytne s pravděpodobností 8,00 %, resp. 24 průběhů náhodných řad z 300. Zabezpečení $P_T = 99,62\%$ odpovídající výskytu 3 poruchových měsíců v náhodném řešení bude odpovídat pravděpodobností výskytu 91,33 %. To odpovídá 274 náhodných řešením z 300. Pro 4 poruchové měsíce je

zabezpečení $P_T = 99,48 \%$ a odpovídá výskytu $0,67 \%$, to připadá pouze na 2 náhodné řešení z 300. Obecně lze prohlásit, že zabezpečení podle trvání vyhovující nejvyšší kategorii bezpečnosti provozu nádrží podle České legislativy kategorií A, která je definována zabezpečeností $P_T \geq 99,5 \%$, bude dosažena nebo překročena s pravděpodobností výskytu $99,33 \%$ respektive 298 náhodných řešení z 300 tomuto požadavku vyhoví. Naopak nevyhovující řešení kategorii A, ale ještě vyhovující kategorii B (kde platí $P_T \geq 98,5 \%$), se vyskytne s pravděpodobností $0,67 \%$. To znamená pouze ve dvou případech z 300. Interpretaci výsledků podle tabulky 2 lze také popsat následovně. Zabezpečení podle trvání s předpokladem 3σ ($99,97 \%$ pravděpodobnosti výskytu) pro stejný případ, tedy nejistotu $\pm 9 \%$ a $O_p = 2,943 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ byla $P_T = 99,63 \% \pm 0,11 \%$ neboli $P_T \in (99,52 \%; 99,74 \%)$. Tento interval vyhoví v celém rozsahu kategorií bezpečnosti vodních děl A.

5.3 VLIV NEJISTOT BUDOUCÍHO VÝVOJE KLIMATU NA VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍ FUNKCE NÁDRŽE - NÁDRŽ VÍR I

5.3.1 Hydrologická analýza povodí řeky Svratky nad nádrží

5.3.1.1 Emisní scénáře SRES

K pochopení vlivu změn klimatu na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže bylo nutné nejprve provést detailní hydrologickou analýzu vývoje dlouhodobých průměrných průtoků v povodí řeky Svratky. Hydrologická analýza byla vztažena k průměrnému dlouhodobému průtoku Q_a stanoveného z reálné průtokové řady průměrných měsíčních průtoků ve vodoměrném profilu Dalečín. Tabulka 3 ukazuje shrnutí výsledků analýzy vztažené k jednotlivým obdobím I, II a III a skupině emisních scénářů A1B, B1 a A2.

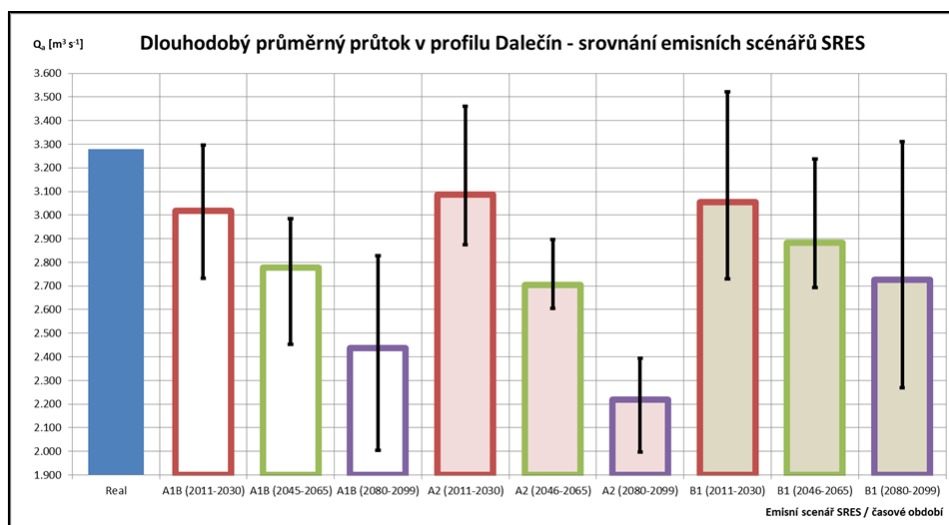
Tab. 3. Výsledky hydrologické analýzy v povodí Svratky vodoměrný profil Dalečín nad nádrží Vír I.

Scénář (období)	$\mu(Q_a) [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$	$\min(Q_a) [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$	$\max(Q_a) [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$	$\Delta Q_a [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$	$\Delta Q_a [\%]$
Real Q_a (1950-2016)	3.280	-	-	-	-
A1B - I (2011-2030)	3.018	2.732	3.297	-0.261	-7.970
A1B - II (2045-2065)	2.779	2.454	2.985	-0.501	-15.279
A1B - III (2080-2099)	2.436	2.003	2.828	-0.844	-25.722
A2 - I (2011-2030)	3.087	2.875	3.460	-0.192	-5.865
A2 - II (2046-2065)	2.705	2.605	2.896	-0.575	-17.524
A2 - III (2080-2099)	2.218	1.998	2.393	-1.062	-32.369
B1 - I (2011-2030)	3.055	2.731	3.522	-0.225	-6.859
B1 - II (2046-2065)	2.883	2.693	3.237	-0.397	-12.104
B1 - III (2080-2099)	2.727	2.269	3.312	-0.553	-16.868

V tabulce jsou uvedeny hodnoty Q_a , kdy hodnota dlouhodobého průtoku pro emisní scénáře je brána jako střední hodnota $\mu(Q_a)$. Tabulka dále ukazuje minima a maxima, které nastaly v daném ensemblu a procentuální pokles $\mu(Q_a)$ oproti reálné hodnotě Q_a . Z výsledků je zřetelný pokles dlouhodobých průtoků, který se pohybuje pro ensemble dat z emisního scénáře A1B (vyrovnaný scénář) od -8% pro období I, v období II pokles -15% , až po -26% v období III. Pro emisní scénář A2 (pesimistický scénář) je pokles průtoků výraznější oproti scénáři A1B. Pohybuje se od -6% v období I po -32% v období III. Scénář B1 (optimistický) ukazuje nejmírnější poklesy průtoků od -7% v období I po -16% v období III.

Obrázek 9 ukazuje grafické srovnání dlouhodobých průměrných průtoků. Porovnání je provedeno pro hodnotu Q_a z reálné řady a střední hodnotu dlouhodobých průtoků $\mu(Q_a)$ stanovených z ensemblu jednotlivých SRES scénářů a různá období. V grafu jsou znázorněny i chybové úsečky popisující $\max(Q_a)$ a $\min(Q_a)$ tvořící meze dlouhodobých průtoků v ensemblu. Barevné dělení sloupců je opět zachováno dle emisních scénářů. Bílá barva pro scénář A1B, světle

červená pro B1 a světle hnědá pro A2. Výsledky pro všechny scénáře zaznamenávají pokles $\mu(Q_a)$ oproti Q_a stanovených z reálných průtokových řad. V období I jsou výsledky $\mu(Q_a)$ pro všechny SRES scénáře podobné. V období II a III však pesimistický A2 scénář dosahuje nejvýraznějšího poklesu $\mu(Q_a)$ jak proti současnému Q_a tak proti $\mu(Q_a)$ ze scénářů A1B a B1.



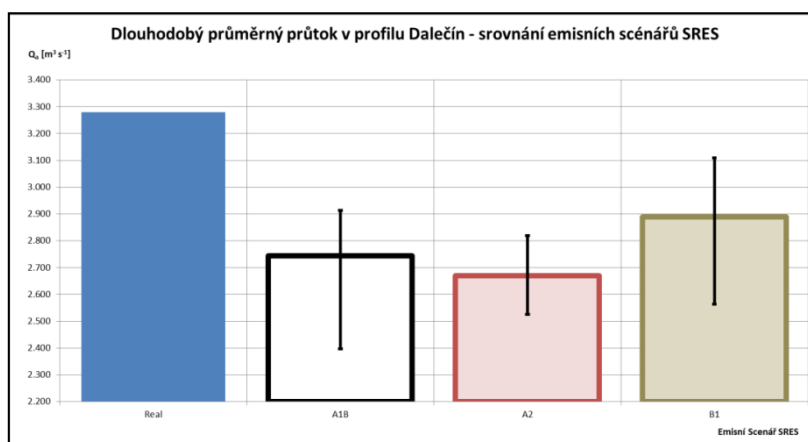
Obr. 9. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III.

Tabulka 4 ukazuje shrnutí výsledků hydrologické analýzy vztahen k celému, resp. sloučenému období (2011 - 2099) a skupině emisních scénářů A1B, B1 a A2.

Tab. 4. Výsledky hydrologické analýzy v povodí Svratky vodoměrný profil Dalečín nad nádrží.

Scénář	$\mu(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]
Real Q_a	3.280	-	-	-	-
A1B	2.744	2.397	2.914	-0.589	-16.32
A2	2.670	2.525	2.819	-0.670	-18.59
B1	2.888	2.564	3.109	-0.431	-11.94

Opět je zde zjevný pokles $\mu(Q_a)$ jak oproti realitě, tak mezi jednotlivými $\mu(Q_a)$ SRES A1B, B1 a A2 scénáři. Obrázek 10 ukazuje grafické srovnání dlouhodobých průtoků Q_a . Opět na grafu je zřejmý pokles, ale také rozdíl mezi jednotlivými skupinami scénářů. Kdy $\mu(Q_a)$ z pesimistického scénáře A2 je nejnižší.



Obr. 10. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé generované období 2011-2099.

5.3.1.2 Representative Concentration Pathways RCPs

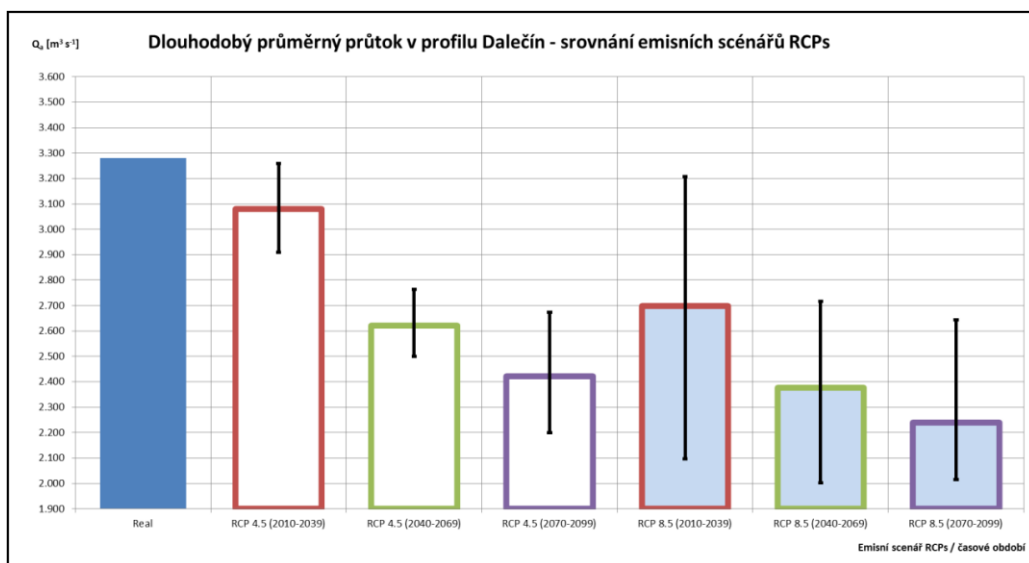
Obdobná hydrologická analýza byla i pro rodinu emisních scénářů RCPs. Tabulka 5 ukazuje shrnutí výsledků analýzy vztahené k jednotlivým obdobím I (2010-2039), II (2040-2069) a III (2070 - 2099) a skupině emisních scénářů RCP 4,5 a 8,5.

Tab. 5. Výsledky hydrologické analýzy v povodí Svratky vodoměrný profil Dalečín nad nádrží Vír I.

Scénář (období)	$\mu(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]
Real (1950-2015)	3.280	-	-	-	-
RCP 4.5 - I (2010-2039)	3.079	2.910	3.259	-0.200	-6.109
RCP 4.5 - II (2040-2069)	2.621	2.499	2.763	-0.659	-20.080
RCP 4.5 - III (2070-2099)	2.421	2.199	2.673	-0.859	-26.182
RCP 8.5 - I (2010-2039)	2.698	2.096	3.207	-0.582	-17.750
RCP 8.5 - II (2040-2069)	2.376	2.001	2.715	-0.904	-27.563
RCP 8.5 - III (2070-2099)	2.239	2.014	2.643	-1.041	-31.736

Z výsledků je zřetelný pokles dlouhodobých průtoků, který se pohybuje pro ensemble dat z emisního scénáře RCP 4,5 (vyrovnaný scénář) od -6 % pro období I, -20 % v období II až -26 % v období III. Pro emisní scénář RCP 8,5 (pesimistický scénář) je pokles průtoků výraznější oproti scénáři RCP 4,5. Pohybuje se od -17 % v období I po -32 % v období III.

Obrázek 11 pak ukazuje grafické srovnání dlouhodobých průměrných průtoků. Porovnání je provedeno pro hodnotu Q_a z reálné řady a střední hodnotou dlouhodobých průtoků $\mu(Q_a)$ stanovených z ensamble jednotlivých RCPs scénářů a různá období. Sloupce bílé odpovídají scénáři RCP4,5 a světle modré scénáři RCP 8,5. V grafu jsou znázorněny i chybové úsečky popisující $\max(Q_a)$ a $\min(Q_a)$ meze dlouhodobého průtoku $\mu(Q_a)$. Z grafu je opět zřejmý dlouhodobý pokles Q_a .



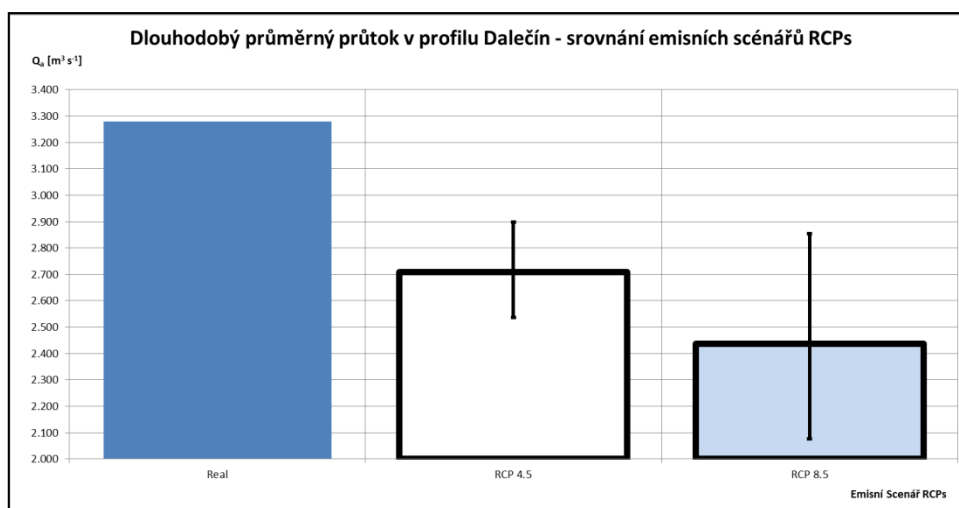
Obr. 11. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III.

Tabulka 6 ukazuje shrnutí výsledků hydrologické analýzy vztahené k celému, resp. sloučenému období (2010 - 2099) a skupině emisních scénářů RCP 4,5 a 8,5.

Tab. 6. Výsledky hydrologické analýzy v povodí Svratky vodoměrný profil Dalečín nad nádrží Víř I.

Scénář	$\mu(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(Q_a)$ [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]
Real	3.280	-	-	-	-
RCP 4.5	2.707	2.536	2.899	-0.573	-17.457
RCP 8.5	2.437	2.076	2.854	-0.842	-25.683

Opět je zde zjevný pokles dlouhodobých průtoků Q_a jak proti realitě, tak vzájemně mezi jednotlivými $\mu(Q_a)$ z RCPs scénářů. Pokles je -17,5 % pro RCP 4,5 a -25,6 % u scénáře RCP 8,5. Obrázek 12 ukazuje grafické srovnání dlouhodobých průtoků Q_a . Na grafu je zřejmý pokles, ale také rozdíl mezi jednotlivými skupinami RCPs scénářů.



Obr. 12. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoků Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé období 2010-2099.

5.3.2 Vodohospodářské řešení nádrže Víř I v podmínkách nejistoty změn klimatu

5.3.2.1 Emisní scénáře SRES

Tabulka 7 ukazuje shrnutí výsledků vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pro různé možnosti emisních scénářů a délky období. Zásobní objem nádrže byl počítán pomocí koeficientu nalepšení. V tabulce je uvedena střední hodnota nalepšeného odtoku $\mu(O_p)$. Dále jsou v tabulce uvedeny statistické charakteristiky výsledné hodnoty zabezpečení P_T . Výsledky výpočtů jsou prezentovány pro dosažení $\mu(P_T)$ podle kritéria $\min \{ \mu(P_T) - (P_T = 99,5 \%) \}$. $P_T = 99,5 \%$ je požadovaná zabezpečení zásobního objemu vodního díla Víř I dle manipulačního řádu a řazení díla do třídy významnosti. Posledním výsledkem v tabulce je výpočet robustnosti daného řešení.

Tab. 7. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p , odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – kombinace všech scénářů.

	α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	0.8296	2.528	99.524	98.360	99.940	0.552
II období	0.847	2.369	99.509	98.080	99.940	0.621
III období	0.860	2.136	99.504	97.990	99.940	0.690
I+II období	0.818	2.390	99.510	97.750	99.970	0.655
I+II+III období	0.771	2.140	99.507	96.520	99.980	0.724

Pokud bude nalepšený odtok stanoven z koeficientu nalepšení α pro všech 29 možností ensemblu vstupních dat emisních scénářů SRES, viz tabulka 7, pak lze výsledky prezentovat takto.

V období I je výsledný nalepšený odtok z nádrže $2,528 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s Robustností $R = 0,522$. Oproti současné platné hodnotě $O_P = 2,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ je pokles minimální a činní $-0,079 \%$. Na první pohled se zdá, že odtok vody z nádrže se v tomto případě nezměnil oproti současné hodnotě. Avšak Robustnost řešení je poměrně nízká, z celkových 29 realizací časových řad v ensambleu jich 15 nevyhoví požadovaným podmínkám pro zachování zabezpečení a zásobního objemu. Pro posílení Robustnosti řešení a tím pádem i jeho odolnosti je nutné hodnotu O_P snížit a zvýšit zabezpečení P_T . Nalepšený odtok klesne na hodnotu $O_P = 2,438 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pro $P_T = 99,791 \%$ a Robustnost $0,862$. To znamená, že 25 z 29 scénářů vyhoví změněným podmínkám, ale za cenu snížení odtoku o $-3,63 \%$. V období II je $O_P = 2,369 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a výsledku odpovídá Robustnost $0,621$, to znamená, že 18 z 29 scénářů vyhoví nastaveným podmínkám. V období III O_P opět klesl a odpovídá hodnotě $O_P = 2,140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ při Robustnosti $0,690$, 20 z 29 scénářů vyhovělo daným podmínkám. Pro obě období platí stejné doporučení. Snížit hodnotu O_P , a zvýšit P_T , aby došlo k posílení Robustnosti. U kombinace období I+II je výsledný $O_P = 2,390 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s Robustností $0,655$. Oproti současné hodnotě nalepšeného odtoku $2,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ je pokles o $-5,5 \%$. Pro kombinaci období I+II+III je výsledný nalepšený odtok z nádrže $2,140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s Robustností $0,724$. Oproti současné hodnotě O_P je pokles $-15,4 \%$. Robustnost řešení je v tomto případě silnější, 21 řad z celkových 29 je vyhovujících požadovaným podmínkám. U kombinací období jsou výsledky obdobné, je pozorována slabá Robustnost, proto je výhledově nutné přehodnotit hodnoty V_Z , O_P a P_T .

Tabulka 8 ukazuje shrnutí výsledků vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pro různé možnosti emisních scénářů a délky období. Zásobní objem nádrže byl počítán pomocí pevně daného nalepšeného odtoku vody z nádrže O_P . V tabulce je vždy uvedena jedna vstupní hodnota nalepšeného odtoku O_P , která je fixní pro celé řešení. Dále jsou v tabulce uvedeny statistické charakteristiky výsledné hodnoty zabezpečení P_T . Výsledky výpočtů jsou opět prezentovány pro dosažení $\mu(P_T)$ podle kritéria $\min \{ \mu(P_T) - (P_T = 99,5 \%) \}$. Posledním výsledkem v tabulkách je výpočet Robustnosti daného řešení.

Tab. 8. *Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_P – kombinace všech scénářů.*

	O_P [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	2.491	99.509	97.620	99.940	0.690
II období	2.282	99.504	95.400	99.940	0.793
III období	1.923	99.505	94.100	99.940	0.897
I+II období	2.362	99.502	96.130	99.970	0.759
I+II+III období	2.035	99.503	95.410	99.980	0.862

Pokud bude O_P brána jako fixní hodnota pro všechny řady v ensambleu vstupních dat pak výsledky budou vypadat takto, viz tabulka 8. Výsledný nalepšený odtok z nádrže pro období I je $O_P = 2,491 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s Robustností $0,690$. Oproti současné platné hodnotě $O_P = 2,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ je zaznamenán pokles $-1,5 \%$. Robustnost řešení je poměrně vysoká, 20 vstupujících hydrologických řad z celkových 29 vyhoví požadovaným podmínkám. V období II a III jsou hodnoty $O_P = 2,282$, resp. $1,923 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s Robustností $0,793$, resp. $0,897$. Opět je zde patrný pokles hodnot odtoku vody z nádrže, ale výsledné řešení jsou poměrně silná vůči nejistotám změny klimatu. U kombinace období I+II je výsledný $O_P = 2,362 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s Robustností $0,759$. V porovnání s platnou hodnotou O_P pokles odpovídá $-6,6 \%$. Robustnost řešení se zvýšila, když 22 vstupujících hydrologických řad z celkových 29 vyhoví požadovaným podmínkám. Pro kombinaci období I+II+III je výsledný $O_P = 2,035 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s Robustností $0,862$. Oproti současné platné hodnotě O_P je to o pokles $-19,6 \%$. Robustnost řešení v tomto případě je velmi silná, 25 vstupujících hydrologických řad z celkových 29 vyhoví požadovanému kritériu.

5.3.2.2 Representative Concentration Pathways RCPs

Tabulka 9 ukazuje shrnutí výsledků vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pro různé možnosti emisních scénářů RCPs a volené délky období. Zásobní objem nádrže byl počítán pomocí koeficientu nalepšení α . Výsledky výpočtů jsou prezentovány pro dosažení $\mu(P_T)$ podle kritéria $\min \{\mu(P_T) - (P_T = 99,5 \%) \}$ odpovídající požadované zabezpečení zásobního objemu vodního díla Vír I. Tab. 9 ukazuje řešení s uvažováním všech emisních scénářů RCPs a všech možností downscalingu.

Tab. 9. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – kombinace všech RCPs scénářů.

	α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost
I období	0.7646	2.209	99.531	98.140	99.810	0.750
II období	0.90	2.249	99.531	98.700	99.810	0.625
III období	0.92	2.144	99.531	98.420	99.810	0.750
I+II období	0.8339	2.246	99.503	98.380	99.900	0.625
I+II+III období	0.825	2.122	99.523	97.160	99.940	0.750

Z pohledu RCPs emisních scénářů lze výsledky prezentovat takto. Vstupní ensemble dat je 8. Pro období I je výsledný $\mu(O_p) = 2,209 m^3 s^{-1}$ s Robustností 0,750. Oproti současné platné hodnotě $O_p = 2,53 m^3 s^{-1}$ pokles činní -12,7 %, avšak Robustnost řešení je poměrně vysoká. Šest z osmi vstupujících hydrologických řad vyhoví požadovanému kritériu. U období II a III jsou výsledky obdobné. Nastává snížení O_p , avšak Robustnost řešení je poměrně silná. Pro kombinaci období I+II je výsledný nalepšený odtok z nádrže $2,246 m^3 s^{-1}$ a Robustnost 0,625. V konfrontaci se současnou platnou hodnotou O_p je pokles -11,2 %. Pět z osmi vstupujících hydrologických řad vyhoví danému kritériu. Pro kombinaci období I+II+III je výsledné $\mu(O_p) = 2,122 m^3 s^{-1}$ s Robustností 0,75. Oproti současné hodnotě O_p je pokles -16,1 %. Robustnost řešení je v tomto případě poměrně silná. Šest z osmi vstupujících hydrologických řad vyhoví.

Tabulka 10 ukazuje shrnutí výsledků vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pro jednotlivé možnosti emisních scénářů RCPs a délky období. Zásobní objem nádrže byl počítán pomocí pevně daného nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p pro celý vstupní ensemble. Výsledky výpočtů jsou prezentovány pro dosažení $\mu(P_T)$ podle kritéria $\min \{\mu(P_T) - (P_T = 99,5 \%) \}$.

Tab. 10. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – kombinace všech RCPs scénářů.

	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost
I období	1.953	99.533	97.590	99.810	0.875
II období	1.8972	99.531	98.420	99.810	0.750
III období	1.885	99.533	97.590	99.810	0.875
I+II období	1.895	99.503	96.990	99.900	0.875
I+II+III období	1.902	99.511	97.810	99.940	0.750

Z pohledu RCPs emisních scénářů, lze výsledky prezentovat obdobně jako výše. Pro období I je výsledný nalepšený odtok z nádrže $O_p = 1,953 m^3 s^{-1}$ s Robustností 0,875. Oproti současné platné hodnotě O_p je pokles výrazný a v procentuálním vyjádření je -22,8 %. Avšak Robustnost řešení je poměrně vysoká. Sedm z osmi vstupujících hydrologických řad vyhoví danému kritériu. Obdobné výsledky platí i pro období II a III. U kombinaci období I+II je výsledný nalepšený odtok z nádrže $1,895 m^3 s^{-1}$ s Robustností 0,875. Oproti platné hodnotě O_p je pokles -25 %. Robustnost řešení je stejná, kdy 7 z 8 hydrologických řad je vyhovujících. Pro kombinaci období I+II+III je výsledný $O_p = 1,902 m^3 s^{-1}$ s Robustností 0,75. Oproti současné hodnotě O_p je pokles -24,8 %. Šest z osmi vstupujících hydrologických řad vyhoví požadovaným podmínkám.

6 DISKUZE

6.1 NEJISTOTY MĚŘENÍ A JEJICH VLIV NA VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍ FUNKCE NÁDRŽE

V manipulačním řádu k nádrži Víř I se uvádí zabezpečení podle trvání díla pro hydrologické období 1931 až 1991 $P_T = 99.5 \%$ pro nalepšený odtok nádrže $O_p = 2.53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Z prezentovaných výsledků jsou zřejmé dva závěry.

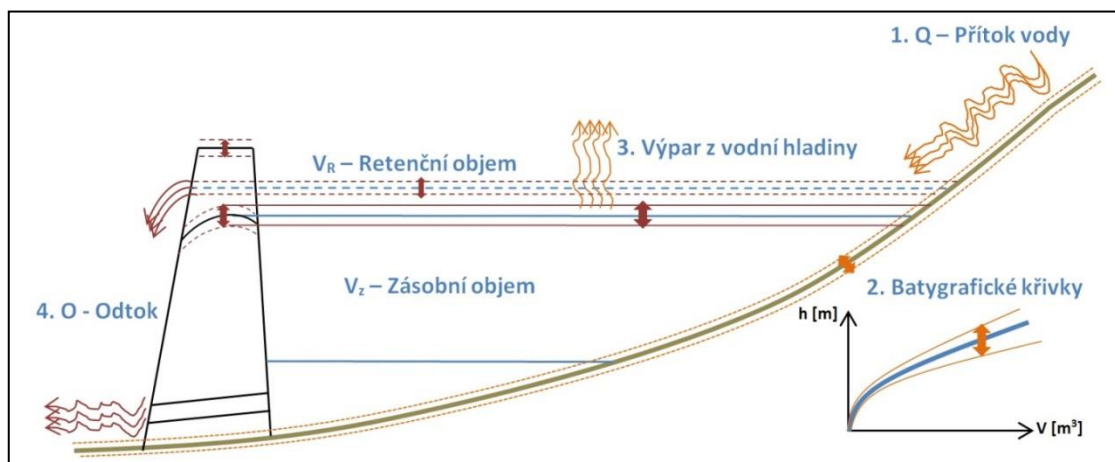
Prvním výrazným závěrem je, že současné vodohospodářské řešení nádrže je podhodnocené z pohledu zabezpečení P_T přibližně o 1 % oproti výpočtům, které byly pro danou nádrž provedeny. Podhodnocení je možné vysvětlit délkou vstupní průtokové řady zavedenou do výpočtů, která nebyla aktualizována o data do roku 2016. Přitom v první polovině 90-tých let se vyskytlo pár málovodých let a roky 2015 a 2016 byly z hydrologického pohledu také velmi suché.

V prezentované analýze je nejbližší požadované zabezpečení nádrže $P_T \geq 99.5 \%$ střední hodnota zabezpečení $\mu(P_T) = 99,6 \%$ pro hodnotu nalepšeného odtoku z nádrže $O_p = 2.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A zde se otevírá prostor pro popis druhého závěru. Pokud je přihlédnuto k řešení s uvažováním nejistot vstupních dat, pak je efekt možného podhodnocení hydrologické zabezpečení ještě závažnější. Nejenže nádrž Víř I je z hlediska odběru vody z nádrže ohrožena, protože hodnota nalepšeného odtoku klesla o $0,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Hrozí také nevhodné zařazení vodního díla do třídy významnosti podle normy ČSN 75 2405. Například pro vstupní nejistotu $\pm 6 \%$, byla střední hodnota zabezpečení vypočtena jako $\mu(P_T) = 99.566 \%$, což odpovídá významnosti nádrže $A \geq 99.5 \%$. Pokud však bude uvažováno s nejistotou vstupních parametrů, pak dolní interval zabezpečení odpovídá hodnotě $P_T = 99.411 \%$. Tím pádem z hlediska hydrologické zabezpečení spadne významnost nádrže do nižší třídy významnosti odpovídající třídě $B \geq 98.5 \%$. Tedy nejenže je nádrž z aktuálního pohledu odběru vody podhodnocena, ale hrozí také špatné zařazení vodního díla do třídy významnosti. U vodárenské nádrže se strategickým významem v dodávkách vody pro Žďársko a Brněnsko je nutné dbát co nejpřesnějších výsledků, aby se předešlo možným provozním výpadkům. Práce prokázala, že respektování vlivu nejistot jednoznačně napomůže výsledné přesnosti výsledků.

Pokud se na výsledky podíváme z pohledu posouzení nové nádrže v hájeném profilu Hanušovice, jsou závěry totožné. Podle dosažených výsledků mohou být návrhové parametry nádrže bez uvažování nejistot vstupních dat výrazně podhodnoceny. Za určitých podmínek může dojít i k chybnému zařazení nádrže do třídy významnosti vodních děl pro účely zásobování vodou dle ČSN 75 2405, a tím může být ohrožena jejich budoucí provozní schopnost v málo vodných a suchých obdobích. Důsledek může být patrný v podobě provozního výpadku zásobního objemu. Jak je vidět v tabulce 2 na straně 14, tak pro případ nejistoty $\pm 6 \%$ a $\pm 9 \%$, $\alpha = 0,73$ jsou střední hodnoty zabezpečení $\mu(P_T)$ rovny $99,53 \%$ ($\pm 0,18 \%$) a $99,54 \%$ ($\pm 0,20 \%$), ale interval výskytu jednoznačně spadá pod tíženou hranici $99,5 \%$.

Dalším možným problémem jsou výpočty a návrhy retenčního prostoru nádrže, umístění výšky koruny hráze a s ním spojené budoucí náklady na stavbu nádrže, s odkazem na posudek Technicko-ekonomické studie vodního díla Hanušovice (Marton, 2016). Byl proveden návrh bezpečnostního přelivu a určena velikost objemu retenčního prostoru nádrže. Pro dané parametry byl předběžně navrhnut objem retenčního prostoru $5,5 \text{ mil m}^3$. Pokud budeme uvažovat výsledný zásobní objem zatížený nejistotou vstupních parametrů odpovídající hodnotě $44,1 \text{ mil m}^3$ a nejistotě $\pm 2,7 \text{ mil m}^3$, pak retenční objem nádrže může být z více než poloviny ovlivněn nejistotou návrhu zásobního objemu. S tím je spojen i návrh výšky koruny hráze, která se může pohybovat v rozmezí $\pm 1,2 \text{ m}$ celkové výšky hráze. Obrázek 13 ukazuje vazbu nejistot zásobního objemu nádrže na všechny návrhové a provozní parametry nádrže. Pokud chceme, aby řešení bylo na straně bezpečné, je nutné k objemu přičíst velikost výsledné nejistoty zásobního objemu nádrže. To však ve svém důsledku klade nároky na velikost tělesa hráze a celkové náklady na možnou výstavbu. Je také nutné dodat, že do řešení retenčního objemu nádrže nebyly uvažovány nejistoty

vstupních parametrů. Byly zanedbány například nejistoty odvození povodňových průtoků, které mohou dosahovat hodnot 10 až 20 %.



Obr. 13. Vazba nejistot na komplexní návrh nádrže.

Z tohoto pohledu se otevírá prostor pro budoucí revize manipulačních řádů nádrží a možnou novelizaci normy ČSN 75 2405, ve které by mělo být s nejistotami vstupních dat uvažováno. V daném případě bude nutností brát hodnotu zásobního objemu V_Z jako horní hranici intervalu a hodnotu zabezpečení P_T jako dolní hranici výsledného intervalu a tím se při řešení přiklonit více na stranu bezpečnou.

Citlivostní analýza také ukázala, jak velký vliv mají nejistoty měření na jednotlivé parametry a výsledné řešení zásobního objemu nádrže. Za těchto podmínek se ukázalo, že přítok vody je nejvýznamnějším zdrojem nejistot ovlivňující výsledný objem. Další vstupující nejistoty měření mají na výsledek také vliv, se kterým je nutno počítat. V současné době však není známo, jakých hodnot nejistot mohou nabývat například průběhy batygrafických křivek, kdy jejich udávaný aktuální průběh je ovlivněn zanášením nádrže a jinými vlivy. Zde je možné předpokládat, že vyšší nejistoty průběhu batygrafické křivky mohou výsledky ještě více ovlivnit.

Dodatečně byl proveden výpočet s různým nastavením nejistoty na vstupních parametrech a výsledky porovnány s výsledky citlivostní analýzy. Vstupní nejistoty byly nastaveny na ± 5 % nejistota na přítoku vody do nádrže, ± 15 % nejistota batygrafických křivek, ± 3 % výparu z vodní hladiny a ± 10 % nejistota průsaku tělesem hráze. Výsledky výpočtů jsou ukázány na obrázku 2 na straně 12. Porovnání ukazuje, že dané výsledky z rozdílného nastavení vstupních nejistot odpovídají výsledkům při nastavení konstantních vstupních nejistot v rozmezí ± 6 % až ± 9 %.

6.2 VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍ FUNKCE NÁDRŽE V PODMÍNKÁCH NEJISTOTY ZMĚNY KLIMATU

Nejprve je nutné říci, že pro sestavení celé analýzy bylo potřeba kombinovat znalosti více oborů. V práci byly použity jednak poznatky z oboru aplikované klimatologie a hydrologie, ale také znalosti z oblasti návrhu a řízení nádrží.

V oblasti klimatologie šlo především o vhodnou aplikaci metod statistického downscalingu a nejistot vycházejících z modelování budoucích změn klimatického systému. Každá z použitých metod má svá úskalí. Použití generátoru počasí LARS WG má nespornou výhodu v tom, že je možné analýzu zacílit na zájmové povodí. Program také nabízí široké rozpětí klimatických modelů a emisních scénářů k popisu hluboké nejistoty budoucího chování klimatického systému. Hlavní nevýhoda generátoru LARS WG je především v tom, že hlediska emisních scénářů a modelování klimatu nejsou data aktuální. Nicméně z pohledu hydrologického a vodohospodářského jsou data vyhovující. Hlavně z pohledu ověření správnosti navrhovaných postupů hydrologického modelování a simulačního modelu zásobní funkce nádrže.

Nespornou výhodou dat získaných z ENSEMBLE downscaling portálu je jejich aktuálnost. Data z programu ENSEMBLES vychází z posledních klimatologických poznatků uveřejněných v hodnotící zprávě AR5. Nevýhodou je velký prostorový grid downscalingu a omezený počet klimatologických stanic v ČR a okolí. Dalším omezením je postihnutí nejistoty GCM modelů tvořící okrajovou podmínku downscaling metodám. Pro území ČR je možné použít pouze jeden GCM model a dvě varianty RCPs scénářů. Pro účely nastavení a ověření možností daných modelů jsou data vyhovující, avšak pro detailní analýzu hlubokých nejistot změny klimatu na zásobní objem nádrže by bylo žádoucí mít k dispozici data z většího počtu GCM modelů a emisních scénářů.

Bilanční model je v současné době rozpracován do poměrně detailní fáze a také poskytuje velký prostor pro další uplatnění. V první řadě je však nutné zdůraznit, že použitá metoda, aplikace a výsledky bilančního modelu v podobě, jak byly v práci prezentovány, nebyly dosud nikde uveřejněny. Bilanční model byl upraven na hydrologické podmínky středně velkého povodí v ČR. Původní řídicí rovnice prezentované v (Wang a kol., 2013) jsou aplikovány na velké aridní povodí v Číně. Místní hydroklimatické podmínky autorům zaručily jistou míru pravidelného opakování hydrologického cyklu a řídicí rovnice bylo možno přesněji kalibrovat. Důkladná testování řídicích rovnic provedená jak v předložené práci, ale také v pracích (Knoppová, 2018), (Hudec, 2018) a (Smolík, 2018) ukázala dobrý aplikační potenciál na hydrologické podmínky v ČR. Z prezentovaných výsledků plyne, že Nash-Sutcliffe koeficient NSE pro kalibraci a validaci modelu se blíží hodnotě 0,7, což se dá považovat za velmi dobrou shodu.

Nedílnou součástí analýzy zásobního objemu nádrže Vír I byla i analýza hydrologického potenciálu povodí prezentována detailním porovnáním reálných a výhledových dlouhodobých průměrných průtoků povodí nad nádrží Vír I. Z prezentovaných výsledků je zřetelné, že z dlouhodobého hlediska se potvrdil trend, který popisoval již Kašpárek (2005). V práci je uveden předpoklad budoucích snížení odtokových poměrů z povodí v ČR až o 40 % oproti současným hodnotám. Při pohledu na srovnání dlouhodobých průměrných hodnot průtoků lze pro povodí řeky Svratky nad nádrží konstatovat pokles hodnot Q_a ve všech modelovaných situacích. Při uvažování emisních scénářů SRES byly výsledky pro dané povodí včetně uvažování nejistoty klimatických modelů následující. Pokles za celkové budoucí období tedy do roku 2099 bude pro emisní scénář A1B (střední scénář) přibližně 16 %, pro scénář A2 (pesimistický) 18,5 % a scénář B1 (optimistický) 11,9 % oproti současným hodnotám. Pro jednotlivé období se výsledky pohybují v rozmezí u scénáře A1B je to od 8 % v období I až po 25,7 % v posledním období III. U scénáře A2 je pokles od 6 % v prvním období po 32,4 % v posledním období. Scénář B1 pak vykazuje pokles od 7 % v období I do 17 % v období III. Z pohledu emisních scénářů RCPs jsou výsledky následující. Z dlouhodobého hlediska je pokles průtoků do roku 2099 u scénáře RCP 4,5 17,5 % a u scénáře 8,5 je pokles 31,7 %. Pro jednotlivá období se pokles pohybuje od 6 % v období I, v období III až po 26 % u scénáře RCP 4,5. V období I 17,7 % až po 31,7 % v období III u scénáře RCP 8,5. U všech výsledků je respektována hluboká nejistota klimatických modelů a emisních scénářů a zjednodušené výsledky jsou vztaženy ke střední hodnotě Q_a .

Z pohledu analýzy zásobního objemu nádrže Vír I je nejprve nutné zmínit, že pro výpočet byl sestaven simulační model zásobního objemu nádrže, který umožnil vyhodnocení zásobního objemu a zabezpečení odtoku vody z nádrže v podmínkách nejistot klimatického systému. Řečeno zjednodušeně, algoritmus vyhodnotí ensamble vstupních hydrologických dat a provede statistické vyhodnocení dosažených výsledků. V praktické aplikaci je také přistoupeno k vyhodnocení výsledků zatížených hlubokou nejistotou pomocí tzv. principu Robustnosti. Zjednodušeně Robustnost popisuje sílu výsledného řešení k nejistým vstupům. Analýza byla provedena z pohledu změny nalepšených odtoků vody z nádrže při zachování současných hodnot zásobního objemu a zabezpečení odtoku vody z nádrže 99,5 %. Robustnost pak byla zastoupena poměrem vyhovujících scénářů pro dané řešení k celkovému počtu scénářů vstupujících do řešení. Opět je zde nutné zdůraznit, že u všech výsledků je respektována nejistota klimatických modelů

a emisních scénářů a pro zjednodušení jsou výsledky vztaženy ke střední hodnotě a variační rozpětí dosažených výsledků je uváděno pomocí maximálních a minimálních dosažených hodnot.

Při celkovém pohledu lze konstatovat, že data získaná z pomocí RCPs scénářů jsou výrazně pesimističtější, než pro emisní scénáře SRES. A pokles odtoků vody z nádrže se pohybuje v rozmezí 10 % až 26 % pro emisní scénáře RCP. Pokles je výrazný hned od prvního časového období. V emisních scénářích SRES se pokles odtoků vody z nádrže projevuje postupně s narůstajícím časovým obdobím. Kdy od poměrně vyrovnaného stavu v prvním období může být pokles -27 % ve třetím období u pesimistického scénáře A2. Nabízí se i porovnání dosažených výsledků analýzy zásobního objemu na klimatické změny s výsledky publikovanými v (Marton a Starý, 2018). Předmětem článku bylo posouzení funkčních objemů vodního díla Vír I na aktuální hydrologické podmínky. Výsledky článku vycházely z odborného posudku pro podnik Povodí Moravy s.p., kdy předmětem posudku byl přepočítání zásobního objemu nádrže Vír I se započítáním suchých období 2014, 2015 a 2016. Výsledky studie ukázaly na podhodnocení nalepšeného odtoku vody z nádrže o -8,3 % na hodnoty $O_P = 2,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ oproti odtoku $O_P = 2,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ uváděnému v manipulačním řádu k vodnímu dílu. Takže data získaná z reálných záznamů jen potvrzují klesající trend, který je zde prezentován. Z pohledů emisních scénářů SRES se v podstatě pokles odráží v podobnosti s poklesem pro období II (2045 - 2065). Z pohledů emisních scénářů RCPs se v podstatě pokles odráží v podobnosti s poklesem hned v období I (2010 - 2039).

7 ZÁVĚR

Pokud se na výsledky podíváme z pohledu celkového zhodnocení, tak práce dává ucelený pohled na možnosti uplatnění nejistot do výpočtu zásobního objemu nádrže. Otevírá prostor pro další uplatnění a to od možnosti spolupráce při aktualizacích zastaralých manipulačních řádů vodních děl až po práce na aktualizaci norem a předpisů souvisejících s vodohospodářským řešením vodních nádrží. Otevírají se možnosti uplatnění popsaných postupů u vodohospodářských analýz s vazbou na změny klimatického systému.

Výsledky práce týkající se nejistot měření v současné době, nelze úplně zobecnit. Za dobu řešení však vznikl software s přehledným uživatelským prostředím, který je napsán obecně a lze jej použít pro jiné nádrže. Software je možno použít jak pro výpočty deterministického řešení, pouze s uvažováním historických měření, tak ke statistickému řešení popsanému v této práci. Celá práce je stále otevřená a to zejména z pohledu aplikace nejistot do celkového vodohospodářského řešení nádrže. Jedná se hlavně o řešení nejistotou zatíženého retenčního objemu nádrže a jeho vazby na zásobní objem.

Stejně závěry lze konstatovat i u práce týkající se vlivu změny klimatu na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže. Výsledkem popsaného výzkumu jsou dva software produkty, které je možno propojit a použít ke klimatickým analýzám cíleným na stávající i navrhované vodní nádrže. Práce je otevřená také z pohledu uplatnění nestacionárních jevů při modelování změny klimatu. Zde se nabízí otázka postupné časové redistribuce jednotlivých klimatických a hydrologických dat vstupujících do bilančního modelu a její propagace v budoucích časových řadách.

Celkově je nutno nejistoty vstupující do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže začít brát více a více v potaz. Teorii je nutno zdokonalovat a více propojovat s praktickými výstupy. Pro použití v praxi je pak nutné jejich co největší zjednodušení tak, aby je odborná veřejnost začala více vnímat a respektovat.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN 75 2405. *Vodohospodářské řešení vodních nádrží*. Praha: Český normalizační úřad, 2004. ICS 93.160; 13.060.10
- [2] DANTAN J.Y., GAYTON N., QUERESHI A.J., LEMAIRE M., ETIENNE A. *Tolerance Analysis Approach based on the Classification of Uncertainty (Aleatory/Epistemic)*. Volume 10, Pages 287-293. Elsevier: Procedia CIRP, 2013. ISSN 2212-8271.
- [3] DLABKA, J., BAUDIŠOVÁ, B. *Nejistoty a neurčitosti při aplikaci probitových funkcí v oblasti prevence závažných havárií: Část I* [online]. Roč. 5, č. 3-4. Praha: Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti, 2012. ISSN 1803-3687. Dostupný z: <http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-03-04-2012/aplikace-probit-funkci-havarie.html>.
- [4] DUBOIS D., PRADE H. *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York, NY, USA: Plenum Press, 1988. ISBN 978-1-4684-5287-7.
- [5] DUDEK, I. *Poznání a neurčitost základní racionální přístupy a praktické metody* [online]. Praha: Electronic journal for philosophy. 1999. ISSN 1211-0442. Dostupné z: <https://nb.vse.cz/kfil/elogos/science/dudek.htm>.
- [6] GUTIÉRREZ, J.M., SAN-MARTÍN, D., COFINO, A.S., HERRERA, S., MANZANAS, R., and FRÍAS, M.D. *User Guide of the ENSEMBLES Downscaling Portal. Version 3*. Pages 16. Santander Meteorology Group: Technical Note 2/2012, 2012.
- [7] HESTER, P. *Epistemic Uncertainty Analysis: An Approach Using Expert Judgment and Evidential Credibility*. Vol. 2012, Pages 8. Hindawi, London: International Journal of Quality, Statistics, and Reliability, 2012. ISSN 2314-8047.
- [8] HUDEC, M. *Klimatická změna a její vliv na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže* [online]. 72 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2018. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [9] IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [10] IPCC, 2013, *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- [11] KANT I, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können*. Riga, Lithuania: Friedrich Hartknoch, 1783.
- [12] KIUREGHIAN A., DITLEVSEN O. *Aleatory or epistemic? Does it matter?*. Volume 31, Issue 2, Pages 105-112. Elsevier Amsterdam: Structural Safety, 2009. ISSN 0167-4730.
- [13] KLEMEŠ, V. *Reliability estimates for a storage reservoir with seasonal input*. Volume 7, pages 198-216. Elsevier Amsterdam: Journal of Hydrology, 1967. ISSN: 0022-1694
- [14] KLIR G. J. *Uncertainty and Information: Foundations of Generalized Information Theory*. Pages 499. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2005. ISBN: 978-0-471-74867-0.
- [15] KNIGHT, F. H. *Risk, Uncertainty, and Profit*. Pages 445. Boston USA: Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, 1921.
- [16] KNOPPOVÁ, K. *Srážko-odtokový proces v podmínkách klimatické změny* [online]. Brno, 2018. 67 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

- [17] KRITSKIY, S. N., MENKEL, M. F. *Water Management Computations (in Russian)*. Leningrad: GIMIZ, 1952.
- [18] MARTON, D. *Posudek Technicko-ekonomické studie vodního díla Hanušovice*, Brno 2016, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, HČ 126 54 035 L.
- [19] MARTON, D., PASEKA, S. *Uncertainty Impact on Water Management Analysis of Open Water Reservoir*. Volume 4, issue 10. MDPI Basel: Environments, 2017. ISSN 2076-3298.
- [20] MARTON, D., STARÝ, M., MENŠÍK, P. *Analysis of the influence of input data uncertainties on determining the reliability of reservoir storage capacity*. Roč. 63, č. 4, s. 287-294. Bratislava: Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015. ISSN: 0042-790X.
- [21] MARTON, D., PASEKA, S., KNOPPOVÁ, K. *Reservoir Storage Capacity Aanalysis Under Conditions of Uncertainty and Climate Change*. Amsterdam, Holandsko: In CCWI (2016 b) Conference Proceeding. International conference CCWI 2016, 2016.
- [22] MARTON, D., STARÝ, M., PASEKA, S., MENŠÍK, P. *Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistotami zatížených vstupních dat*. Svazek 1. 1., s. 120-127. Praha: In XXXV. Přehradní dny 2016 Sborník příspěvků. České vysoké učení technické v Praze, 2016 a). ISBN: 978-80-01-05969-2.
- [23] MARTON, D. a STARÝ, M. *Posouzení funkčních objemů vodního díla Vír I na aktualizovaná vstupní data*. Ročník 60, č. 2, str. 4–7. Praha: Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2018. ISSN 0322-8916.
- [24] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR. *Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR* [online]. Praha. 2015. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie.
- [25] PATÉ-CORNELL, M. E. *Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment*. Volume 54, Issues 2–3, Pages 95-111. Elsevier: Reliability Engineering & System Safety, 1996. ISSN 0951-8320.
- [26] PATON, F. L., MAIER H.R., DANDY G. C. *Including adaptation and mitigation responses to climate change in a multiobjective evolutionary algorithm framework for urban water supply systems incorporating GHG emissions*, Volume 50, pages 6285–6304. AGU: Water Resour. Res., 2014. ISSN 1944-7973.
- [27] TANNERT C., ELVERS H.D., JANDRIG B. *The ethics of uncertainty. In the light of possible dangers, research becomes a moral duty*. Volume 8, issue 10, pages 892-896. Rockville Pike USA: EMBO Reports. 2007. ISSN 1469-221X.
- [28] RACSKO, P., SZEIDL, L., SEMENOV, M. *A serial approach to local stochastic weather models*. Volume 57(1-2), pages 27-41. Elsevier Amsterdam: Ecological Modelling, 1991. ISSN 0304-3800.
- [29] ROACH, T., KAPELAN, Z., LEDBETTER, R., LEDBETTER, M., *A Comparison Of Robust Optimization and Info-Gap Methods for Water Resource Management Under Deep Uncertainty*. Volume 142, issue 9. ASCE: Journal of Water Resources Planning and Management, 2016. ISSN 1943-5452.
- [30] SEMENOV, M.A., BARROW, E.M., *LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies User Manual - version 3.0*. Pages 28. Rothamsted Research, UK, 2002. Dostupné z: <http://resources.rothamsted.ac.uk/>
- [31] SMOLÍK, L. *Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách změny klimatu* [online]. 61 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2018. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [32] STARÝ M., *Zpráva o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu HDP VH 83/6 RÚ*. Brno: VUT FAST v Brně, 1984.
- [33] STARÝ M., *Nádrže a vodohospodářské soustavy – Modul 01 a 02 Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. M01 120 s., M02 114 s. ES VUT Brno: VUT FAST v Brně, 2006.

- [34] WANG G., ZHANG J., XUAN Y., LIU J., JIN J., BAO Z., HE R., LIU C., LIU Y., YAN X. *Simulating the impact of climate change on runoff in a typical river catchment of the Loess Plateau*. Volume 4, issue 5, pages 1553–1561. AMS USA: Journal of Hydrometeorology, 2013. ISSN: 1525-755X.
- [35] WIELAND, A., WALLENBURG, C.M. *Dealing with supply chain risks: Linking risk management practices and strategies to performance*. Volume 42, issue 10. Emerald Publishing: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2012. ISSN 0960-0035
- [36] ZADEH, L.A. *Fuzzy sets*. Volume 8, issue 3, pages 338-353. Elsevier: Information and Control. 1965. ISSN 0019-9958.
- [37] ZADEH L.A. *Fuzzy sets as a basic for a theory of possibility*. Volume 1, Issue 1, pages 3–28. Elsevier Amsterdam: Fuzzy Sets and Systems 1, 1978. ISSN: 0165-0114.
- [38] ZAHRADNÍČEK, P., TRNKA, M., BRÁZDIL, R., MOŽNÝ, M., ŠTĚPÁNEK, P., HLAVINKA, P., ŽALUD, Z., MALÝ, A., SEMERÁDOVÁ, D., DOBROVOLNÝ, P., DUBROVSKÝ, M. a ŘEZNÍČKOVÁ, L. *The extreme drought episode of August 2011–May 2012 in the Czech Republic*. Vol. 35, Issue 11. Int. J. Climatol., 2015. ISSN:1097-0088.

ABSTRACT

In given habilitation thesis the uncertainty are divided to uncertainty of measurement and deep uncertainty. Deep uncertainty arise from the future climate system changes. Unrespecting of these uncertainties would negatively affected reservoir design and management.

Uncertainty of measurement have been introduced into the calculation using Monte Carlo method. These kind of uncertainty affected all data which water management analysis of reservoir storage capacity are using as input data. The hydrologic reliability analysis of reservoir storage capacity under uncertainty of measurement has been made using reservoir simulation model and evaluation of reservoir temporal reliability.

Deep uncertainty has been understood as uncertainty emerging from estimation of the future climate change projections of greenhouse gases (emission scenarios) and models, which the future projections generates. Using hydrological balance model the transformation between climatological data and hydrological data have been created. Appropriate calibration of the hydrologic balance model together with reservoir simulation model can transfer the uncertainty of climate change into the hydrologic time series and reservoir storage capacity. These information are further submitted to the hydrological analysis and the water management analysis of reservoir storage capacity under deep uncertainty of climate change.

Practical application is provided on the real-life reservoir Vír I in the Svatka river basin and the intended profile in Hanusovice in the Morava river basin.