



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

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

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

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.

Abstrakt

Nejistoty v předložené habilitační práci jsou roděleny na nejistoty měření a hluboké nejistoty vznikající vlivem budoucí změny klimatického systému. Nerespektování těchto nejistot může negativně ovlivnit návrh a provoz funkčních objemů údolních nádrží.

Nejistoty měření jsou do řešení zavedeny pomocí metody Monte Carlo a postihují všechny vstupní parametry vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže. Analýza hydrologické spolehlivosti zásobního objemu nádrže v podmínkách nejistot je provedena pomocí simulačního modelu nádrže a ohodnocení zabezpečení podle trvání.

Hluboká nejistota je chápána jako nejistota vznikající z odhadu budoucích vývoju emisních koncentrací skleníkových plynů (emisních scénářů) a modelů, které budoucí projekce klimatu vytváří. Pomocí hydrologického bilančního modelu je provedena transformace klimatických činitelů na hydrologické. Vhodně nakalibrovaný bilanční model společně s navazujícím simulačním modelem nádrže dokáží přenést nejistoty změn klimatu do hydrologických průtokových řad a zásobního objemu nádrže. Tyto informace jsou dále podrobeny hydrologické analýze a analýze zásobního objemu nádrže v podmínkách hlubokých nejistot změn klimatu.

Praktická aplikace je provedena na reálně provozované nádrži Vír I v povodí řeky Svratky a v hájeném profilu Hanušovice v povodí řeky Moravy.

Klíčová slova

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

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 transfare 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.

Key words

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

Bibliografická citace

MARTON, Daniel. *Nejistoty zatěžující vodohospodářské řešení zásobního objemu údolní nádrže*. Brno, 2018. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem habilitační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje. V práci se vyskytují převzaté informace a údaje, získané z jiných zdrojů, resp. od jiných autorů. Pokud tomu tak je, je u získaných dat uveden odkaz na zdrojovou literaturu.

V Brně dne

.....

Podpis

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat všem studentům, doktorandům a kolegům za spolupráci na výzkumu, který tvoří základ mé habilitační práce. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu Ústavu vodního hospodářství krajiny prof. Ing. Miloši Starému, CSc. za podporu v mé pedagogické a výzkumné činnosti a cenné připomínky při kompletaci habilitační práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat manželce a rodině za neutuchající podporu mé profesní kariéry.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Nejistoty měření	4
1.2	Nejistoty vývoje klimatického systému	6
1.2.1	Obecná teorie modelování změn klimatu	7
1.2.2	Hydrologické modely, základní dělení a použití v ČR a ve světě	10
1.2.3	Klimatická změna a její dopady na vodní zdroje a vodní nádrže	11
2	Cíl práce	13
3	Metody	13
3.1	Zavedení nejistoty měření	13
3.1.1	Obecná metoda Monte Carlo	14
3.2	Nejistoty změn klimatického systému	16
3.2.1	Zjednodušující předpoklady řešení	17
3.2.2	Modelování ensamble vstupních dat s využitím bilančního modelu	17
3.3	Simulační model chování nádrže	24
3.3.1	Výpočet zásobního objemu s 100% zabezpečeností odtoku z nádrže	24
3.3.2	Výpočet zásobního objemu při zabezpečenosti odtoku z nádrže menší než 100%	24
3.3.3	Výpočet zabezpečenosti odtoku vody z nádrže	25
3.3.4	Zavedení ztráty vody z nádrže	26
3.4	Metody vyhodnocení	26
3.4.1	Výpočet statistických charakteristik	26
3.4.2	Robustnost	28
4	Praktická aplikace	28
4.1	Nejistoty měření a jejich vliv na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže	28
4.1.1	Stávající nádrž – Vír I	28
4.1.2	Návrh nové nádrže – Hanušovice	37
4.2	Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistot změn klimatu	43
4.2.1	Hydrologická, klimatologická data povodí a technické informace o nádrži Vír I	43
4.2.2	Statistický downscaling klimatologických dat	44
4.2.3	Kalibrace a validace hydrologického modelu	47
4.2.4	Hydrologická analýza povodí s uvažováním klimatické změny	51
4.2.5	Analýza vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže Vír I s uvažováním nejistoty klimatické změny	62
5	Shrnutí výsledků	84

5.1	Nádrž Vír I – nejistoty měření.....	84
5.2	Nádrž Hanušovice – nejistoty měření.....	86
5.3	Vliv nejistot budoucího vývoje klimatu na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže - Nádrž Vír I	90
5.3.1	Hydrologická analýza povodí řeky Svratky nad nádrží	90
5.3.2	Vodohospodářské řešení nádrže Vír I v podmínkách nejistoty změn klimatu	94
6	Diskuze.....	106
6.1	Nejistoty měření a jejich vliv na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže	106
6.2	Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistoty změny klimatu.	107
7	Závěr	109
8	Literatura	111
9	Seznam použitých zkratk	117

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 přerozdělení srážkových úhrnů v průběhu roku přispívají 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 popsané 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 překročeno 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 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 otevírá 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 například (Dudek, 1999) narazit na dva základní přístupy v pojetí slova nejistota a tím je nejistota a neurčitost. 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, kterou 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. Za základní zdroje nejistot pak Kiureghian a Ditlevsen považují následující:

1. Nejistota související se základními náhodnými proměnnými, jako je nejistota obsažená v látce, materiálu, hmotě, jejichž vlastnosti, hodnoty zatížení a další lze přímo měřit.
2. Neurčité chyby modelu pramenící z výběru rozdělení pravděpodobnosti popisující základní proměnné.
3. Neurčité chyby modelu pramenící z výběru fyzikálního modelu popisujícího základní proměnné.
4. Statistické nejistoty v odhadu parametrů pravděpodobnosti rozdělení.
5. Statistické nejistoty v odhadu parametrů fyzikálního modelu.
6. Nejistoty vznikající při měření, na základě kterých jsou statistické nejistoty 4. a 5. odhadovány. Tyto nejistoty obsahují i chyby vznikající při nepřímém měření.
7. Nejistota modelovaná náhodnými proměnnými, které odpovídají odvozeným proměnným. Může se jednat o nejistoty vznikající z chyby výpočetní techniky, číselných aproximací, zaokrouhlení, počtu volných číslic za desetinným oddělovačem a další.

Nejistoty s použitím v hydrologii popsali například (Beven a Binley, 1992), kdy poprvé popsali dnes velmi využívanou metodu Generalized Likelihood Uncertainty Estimation známou také pod zkratkou GLUE. Následovalo mnoho publikací, které se danou problematikou zabývaly. Nejistoty průtoků v toku pro potřeby vodohospodářského plánování a výzkumu na povodích ve Velké Británii se zabývali (Westerberg a kol., 2016). K odhadu nejistoty použily metodu Monte Carlo pro sestavení

náhodných měrných křivek koryta. Nejistoty hydrologických dat vstupujících do srážkoodtokových modelů a modelů určených k vodohospodářskému plánování popsali (Westerberg a McMillan, 2015). Pro simulaci a predikci vývoje vodních zdrojů byl vyvinut hydrologický model povodí řeky Kaidu v Číně (Zhang a kol., 2016). Pro tento případ bylo použito tzv. Markov-Chain-Monte-Carlo model založený na víceúrovňové faktoriální analýze, která pracuje s jednotlivými efekty sloučených parametrů vstupů modelu. Ovlivňující faktory ochrany půd byly vlhkost půdy, podíl sněhové pokrývky a obsah vody v něm, infiltrace a výpar.

Vlivem nahodilých chyb výchozích hydrologických podkladů na hodnotu zásobního objemu nádrže se poprvé na území tehdy ještě ČSSR zabýval (Starý, 1984). V rámci výzkumného záměru zadaného podnikem Hydroprojekt byl definován princip zavedení nejistot, resp. nahodilých chyb do časových řad za použití metody Monte Carlo a jejich následné zavedení do výpočtů zásobního objemu nádrže. Pokračování práce vycházející z práce (Starý, 1984) následovalo publikováním článku (Marton, Starý, Menšík, 2011). V článku byl detailně popsán postup zavedení nahodilých chyb, v té době již prezentované pojem nejistot měření do stanovení hodnot průměrných měsíčních průtoků přes měrnou křivku průtoků v toku a časové řady měření vodních stavů v měrném profilu toku. Výsledkem bylo vytvoření náhodných průběhů řady průměrných měsíčních průtoků, které sloužily dále jako vstupní podklad pro vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže. Pro zavedení nejistot měření vodních stavů a měřených bodů měrné křivky průtoků koryta toku byla také použita metoda Monte Carlo. Navazující práci k uvedenému článku pak byl článek (Marton, Starý, Menšík, 2014) popisující výpočet zásobního objemu v podmínkách nejistot s použitím AR a ARMA generátorů umělých průtokových řad průměrných měsíčních průtoků. Oba příspěvky prokázaly, že současné zásobní objemy vody v nádržích mohou být podhodnoceny a v suchých obdobích mohou vyvolat nečekaný výpadek v zásobování povrchovou vodou.

V hydrologických aplikacích zahrnující propagaci nejistot do hydrologických vstupů při měření srážek, přítoků vody do nádrže a výparu na vodní bilanci nádrží se zabýval (Winter, 1981). Vliv nejistot měření přítoku vody do nádrže, odtoku vody z nádrže, výparu a dalších hydrologických a provozních parametrů na objem a chemickou analýzu vody v nádrži zkoumali (LaBaugh, Winter, 1984). Z novějších publikací zkoumajících rizika a vliv nejistoty na zásobní objem nádrže s využitím Monte Carlo simulací se zabývali např. (Campos a kol., 2014). Analýzu nejistot zásobního objemu nádrže s využitím Water Supply Yield Modelu provedli (Kuria a Vogel, 2014). Článek (Sordo-Ward a kol., 2016) je zaměřen na analýzu nejistot hydrologických parametrů srážko-odtokového modelu a navazující aplikace na model systému vodních zdrojů. Simulace nejistot byly provedeny pomocí metody Monte Carlo. Praktická aplikace byla provedena na třech vodohospodářských systémech na řece Duero ve Španělsku. Sekvenční analýzu k sestrojení časových řad pro testování simulačního modelu a vztahu mezi zásobním objemem, výnosem a zabezpečeností popsali (Oskoui a kol., 2015). Model využíval předpovědí časových řad pomocí Monte Carlo metody o 1000 sekvencích a stejné délce jako historická data. Monte Carlo simulace jsou známy i při návrhu a řízení olejových/ropných nádrží. Například simulace parametrů ropné nádrže byla popsána v (Lu a kol., 2016). Pro simulaci nejistot ropné nádrže byla použita metoda zvaná multilevel Monte Carlo (MLMC). Detailní aplikaci nejistot do všech hydrologických, morfologických a provozních dat potřebných pro výpočet zásobního objemu nádrže a výpočty hydrologické spolehlivosti nádrže v podmínkách nejistot byly předmětem publikací (Marton, Starý, Menšík, 2015), (Marton Starý, Paseka, Menšík, 2016) a (Marton a Paseka, 2017).

Jedním z dalších okruhů uplatňující do vodohospodářských simulačních modelů nejistotu je výzkum spojený s nestacionaritou náhodných jevů. Nejistoty a jejich propagace je spojená také s analýzami změn klimatu na vodní zdroje a vodní hospodářství. Zde je však pojem nejistoty chápán odlišným způsobem než nejistoty měření a detailněji bude vysvětlen dále.

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 pojmen hluboká nejistota z anglického deep uncertainty.

1.1 Nejistoty měření

Nejistoty měření byly poprvé formulovány na základě dohody WECC Doc 19-1990 a následovaly další dokumenty, které jasně definovaly zavedení a výpočet nejistot měření jako například „Guide to Expression of Uncertainty in Measurement“, 1993. Dokument ISO GUM Suppl. 1 (DGUIDE 99998) se věnuje distribuci a propagaci nejistot využitím simulace Monte Carlo. V ČR pak nejistoty měření byly zavedeny pod normativem TPM 0051–93. Na nejistoty měření při stanovení průtoků v otevřených korytech pamatuje i norma ČSN EN ISO 748.

Na začátku jakéhokoliv zpracování nejistot však stojí detailní porozumění podstaty prováděného měření, popsaného modelem měření. To samozřejmě znamená nejen nutnost detailní znalosti principů, funkcí a konstrukčních detailů každého měřicího přístroje, ale i znalost metody měření a schopnost se rozhodnout jaké vlivy mohou působit v průběhu měření jako zdroje nejistoty a ovlivnit výsledek. Mnohdy jsou tyto informace obsaženy v návodu k použití konkrétních přístrojů, nebo v popisu již prověřených metod měření (Starý, 2007).

V teorii nejistot měření existují dva základní typy nejistot. Nejistoty měření jsou rozděleny podle způsobu, jakým byly získány, na nejistoty:

- typu A,
- typu B.

Z pohledu matematické statistiky byla jako míra standardní nejistoty měření zvolena směrodatná odchylka příslušného rozdělení pravděpodobnosti pro jednotlivé zdroje nejistot. Nejistoty typu A a typu B se liší jen způsobem, jakým je tato směrodatná odchylka získána (PALSTAT CAQ, 2002).

Stanovení nejistoty typu A je provedeno výpočtem z opakovaně provedených měření. Vychází tedy ze statistického zpracování opakované série měření. Standardní nejistota typu A u_A je vyjádřena pomocí směrodatné odchylky výběrových průměrů (1).

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Kde ve vztahu znamená:

- n ... počet měření dané veličiny,
- i ... i-tá hodnota měřené veličiny,
- x_i ... i-tý opakovaný výběr (opakované měření),
- \bar{x} ... je výběrový průměr neboli střední hodnota stanovená jako (2)

V případě malého počtu měření n je menší než 10 se výsledná nejistota měření koriguje pomocí opravného koeficientu k_s . Součinem směrodatné odchylky výběrových průměrů $s_{\bar{x}}$ a opravného koeficientu k_s vznikne výsledná hodnota standardní nejistoty typu A u_A .

Na rozdíl od nejistoty typu A, která byla stanovena z opakovaných měření, pro složky nejistoty typu B platí, že jsou stanoveny jinak než opakovaným měřením. Rozdíl mezi typem A a typem B je tedy jasný. Problém je však v tom, jak jinak je tedy nejistota typu B stanovena. Zde je nutné nejprve najít všechny možné zdroje nejistot.

Zdroje nejistot typu B mohou být následující (Starý, 2007):

- *Vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení.* Do této skupiny patří například vliv nejistoty kalibrace nebo ověření, stabilita přístrojů. Dynamické chyby přístrojů, vnitřní tření v přístrojích, hystereze, rozlišení odečtu z přístrojů a další.
- *Vlivy okolního prostředí a jejich změny.* Zde se jedná především o tlak, případně změnu tlaku, relativní vlhkost, elektrické pole, magnetické pole, prašnost a další.
- *Vliv metody.* Tato skupina zahrnuje především vliv interakce s měřeným předmětem, použití konstant, odvod či přestup tepla, vlivy reálných parametrů oproti ideálním uvažovaným v modelech a další.
- *Vliv operátora.* Zde jde především o nedodržení metodik, osobní zvyklosti, paralaxa, tepelné vyzářování.
- *Ostatní vlivy.* Převážně sem patří náhodné omyly při odečtech a zápisu hodnot, těžko postihnutelné globální vlivy.

Při určování standardní nejistoty typu B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů u_{Bzj} . Je-li známa maximální odchylka j -tého zdroje nejistoty z_{jmax} je standardní nejistota u_{Bij} určena podle vztahu (2).

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{\chi} \quad (2)$$

Ve vztahu (2) značí:

z_{jmax} ... známá maximální odchylka zdroje nejistoty,

χ ... je součinitel vycházející z daného rozdělení pravděpodobnosti, kterým se daný zdroj řídí (pro normální rozdělení $\chi = 3$).

Výsledná standardní nejistota typu B se určí pro n odpovídající počet zdrojů nejistoty z_1, z_2, \dots, z_n geometrickým součtem nejistot jednotlivých zdrojů (3).

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{Bzj}^2} \quad (3)$$

Takto se standardní nejistota typu B převede do zcela nové podoby, která má opět charakter směrodatné odchylky (Palečar, Vdoleček, Halaj, 2001).

Kombinovaná standardní nejistota u je stanovena geometrickým průměrem standardní nejistoty typu A u_A a standardní nejistoty typu B u_B (4).

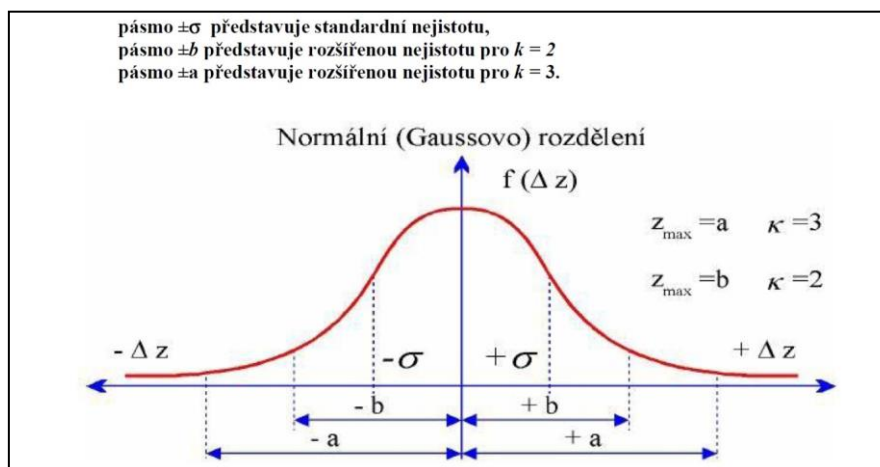
$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4)$$

Standardní kombinovaná nejistota u byla určena s pravděpodobností cca. $P = 68,2\%$, tj. pro koeficient rozšíření $k = 1$. Pro jinou pravděpodobnost se nejistota přepočte vynásobením koeficientem rozšíření k . Vztah pro výpočet rozšířené nejistoty měření U má tvar (5).

$$U = u \cdot k \quad (5)$$

k ... je koeficient rozšíření, jeho hodnota obecně závisí na druhu použitého rozdělení pravděpodobnosti.

Jak již bylo v textu uvedeno, výše popsaným postupem se získá standardní kombinovaná nejistota u . Standardní znamená, že při skládání byly použity hodnoty směrodatných odchylek. Při splnění jistých předpokladů je možné považovat rozdělení takto určené nejistoty za přibližně normální. Z toho pak vyplývá, že takto vypočtená nejistota pokrývá asi 68,2 % možných výsledků, jinak řečeno, asi 1/3 výsledků může padnout mimo takto stanovené pole nejistot. Z paralely s normálním rozdělením jsou vžitá dva základní koeficienty rozšíření $k = 2$ a $k = 3$ pro pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95,4%, resp. 99,6 %. Případy standardní a rozšířené nejistoty jsou ilustrovány pro normální rozdělení na obr. 1 (PALSTAT CAQ, 2002).



Obr. 1. Případy standardní a rozšířené nejistoty pro normální rozdělení pravděpodobnosti.

1.2 Nejistoty vývoje klimatického systému

Obecně zavedená výzkumná praxe problém změny klimatu a její vliv na vodní zdroje zpracovává následovně. Nejdříve je vybrán globální, resp. regionální klimatický model, nebo řada klimatických modelů. Pomocí dostupných metod downscalingu jsou generovány klimatická data pro danou oblast ve formě rozložení srážek, teplot, vlhkosti, výparu a dalších veličin. Klimatická změna je v datech obsažena ve formě zabudovaných emisních scénářů. Pro transformaci srážek na odtok vody závěrovým profilem je použit hydrologický srážko-odtokový model. Hydrologická data ovlivněná scénáři a modely klimatické změny jsou dále aplikována do vodohospodářských simulací. Jedná se především o analýzy vydatnosti vodních zdrojů, politiku řízení vodních zdrojů, dlouhodobé strategické řízení a návrh nádrží a vodohospodářských soustav. I při těchto analýzách je nutné počítat

s tím, že celý proces sestavení analýzy je zatížen značnou mírou nejistoty, kterou je nutné důkladně definovat.

Základní typologie nejistot uplatněná při obecném modelování klimatické změny vychází z (Walker a kol. ,2003) a (Refsgaard a kol. 2013). Autoři vychází z charakteristiky nejistot dělené podle povahy, stupně a zdroje. Povaha nejistot vývoje klimatického systému vychází z nahodilé variability systému nebo prostředí (aleatory uncertainty - nejistota), z nedostateku znalostí, dat a informací o systému (epistemic uncertainty – neurčitost), a nejistoty pramenící z nejasnosti, resp. dvojznačnosti (ambiguity). Stupně nejistoty pak jsou statistické nejistoty, nejistoty scénářů, kvalitativní nejistoty, uznání neznalosti problému a úplná neznalost problému. Refsgaard a kol. (2013) uvádějí, že rozdíl mezi nejistotou a neurčitostí není nikdy zcela jasný a při modelování ensemblových předpovědí se vychází z předpokladu uplatnění jejich kombinace. Dle (Foley, 2010) a (Refsgaard a kol. 2013) při modelování změn klimatu v hydrologických a vodohospodářských úlohách jsou zdrojem nejistot a neurčitostí zejména emisní scénáře, globální a regionální klimatické modely a nejistoty spojené se statistickým downscalingem.

Z tohoto úhlu pohledu jde především o nejistoty plynoucí z vývoje koncentrace skleníkových plynů, vývoje populace, hospodaření s přírodními zdroji a další. Soubor uvedených nejistot a neurčitostí je v podstatě zohledněn v emisních scénářích, které popisují varianty vývoje koncentrací CO₂ v ovzduší. Jde především o vazbu na globální antropogenní a ekonomický vývoji. Další nejistoty a neurčitosti mohou vznikat z výpočtů samotných globálních klimatických modelů a metod downscalingu. Každý model, nebo metoda je svým způsobem unikátní a jejich počet a různé mutace jsou poměrně vysoké. Soubor neboli ensembl vzniklých dat poskytuje široké variační rozpětí, které je nutno ve vodohospodářských výpočtech zohlednit, vhodně vyhodnotit a interpretovat. Jednou z možností vyhodnocení ensmbly dat je použití tzv. robustní analýzy, robustního přístupu k rozhodování známého jako robust decision approach nebo Robust Decision Making (RDM) (Lempert a kol., 2003). V pojetí RDM jsou nejistoty a neurčitosti zohledněny v ensmbly dat a jsou chápány jako tzv. hluboké nejistoty (deep uncertainty). Hluboká nejistota pak popisuje omezenou nebo chybějící pravděpodobnost informace, resp. rozsáhlý interval možností řešení. Lempert a kol. (2003) definuje hlubokou nejistotu jako pojem, kdy analytici neznají, nebo se nemohou shodnout: 1) na vhodných modelech popisujících interakci mezi proměnnými systému. 2) na rozdělení pravděpodobnosti představující nejistotu klíčové proměnné a parametry modelů a 3) jak vyhodnotit vhodnost alternativních výsledků.

1.2.1 Obecná teorie modelování změn klimatu

Jednou z vědeckých organizací, zabývajících se studiem změn klimatu, je IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) Mezivládní panel pro změnu klimatu. Tato instituce byla založena v roce 1988 dvěma organizacemi OSN – Světovou meteorologickou organizací (WMO) a Programem OSN pro životní prostředí (UNEP). Náplní práce IPCC je zejména snaha o popsání nebezpečí antropogenních klimatických změn v závislosti na možném vývoji společnosti a jejich budoucích důsledků. Mimo jiné zkoumá také možnosti přizpůsobení se těmto změnám a navrhuje chování vhodné k zmírnění jejich účinků. Jednou za několik let vydává IPCC hodnotící zprávy, ve kterých definuje současný stav klimatu a možné scénáře jeho budoucího vývoje. První zpráva byla vydána v roce 1990 (First Assessment Report – FAR), druhá v roce 1995 (SAR), třetí 2001 (TAR), čtvrtá v roce 2007 (AR4) a zatím poslední a aktuální v roce 2014 (AR5).

Kromě hodnotících zpráv vydává IPCC i tzv. speciální zprávy, ve kterých jsou popisovány Emisní scénáře. Hodnotící zpráva AR4 definuje emisní scénáře typu SRES (Special Report Emissions Scenarios). Tyto scénáře zohledňují různé aspekty společenského a ekonomického vývoje společnosti a vývoje v oblasti získávání a spotřeby energie. V aktuální páté hodnotící zprávě AR5 jsou používány emisní scénáře typu RCPs (Representative Concentration Pathways), které už v názvech jednotlivých scénářů poskytují informace o budoucích koncentracích skleníkových plynů. Scénáře typu SRES i RCPs jsou klimatické scénáře, které jsou nazvány emisními proto, že budoucí klima charakterizují zejména pomocí možných budoucích koncentrací skleníkových plynů v atmosféře.

Klimatický scénář můžeme obecně popsat jako pravděpodobné vyjádření budoucího klimatu, vytvořené pro použití při studiu potenciálních dopadů antropogenní klimatické změny. Musí zahrnovat antropogenně podmíněnou změnu klimatu i jeho změnu přirozenou. Klimatickými scénáři používanými v této práci jsou emisní scénáře SRES a RCPs.

Emisní scénáře SRES definují 4 základní rodiny scénářů (IPCC, 2007), A1, A2, B1 a B2, které se liší možným směrem vývoje společnosti:

- **Scénář A1** se dá zjednodušeně popsat jako scénář globalizovaného světa s rychlým růstem ekonomiky a vývojem nových technologií. Je rozdělován na dílčí scénáře **A1FI** (Fossil Intensive), který reprezentuje budoucí intenzivní využívání fosilních paliv, **AIT** (Non-Fossil) – bez fosilních paliv a **A1B** (Balanced), který popisuje vyvážené využívání všech zdrojů energie.
- **Scénář A2** reprezentuje heterogenní svět s regionálními rozdíly a silným růstem ekonomiky.
- **Scénář B1** zastupuje globalizovaný svět s rychlým rozvojem služeb a informačních technologií a snahou o udržitelný rozvoj.
- **Scénář B2** je popisován jako scénář světa s regionálními rozdíly, který klade důraz na řešení problémů životního prostředí a snaží se o udržitelný rozvoj.

Pro pátou hodnotící zprávu IPCC definovala vědecká komunita sérii čtyř nových scénářů RCPs - Representative Concentration Pathways (IPCC, 2013). Ty jsou označeny podle přibližného radiačního vlivu v roce 2100 v porovnání s rokem 1750 a mají následovné dělení:

- **Scénář RCP2.6 – nízké emise**
Radiační vliv $2,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, značí razantní omezení vývoje koncentrace skleníkového plynu a oxidu uhličitého v nadcházejících letech.
- **Scénář RCP4.5 – Střední emise**
Radiační vliv $4,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Značí tzv. přechodný scénář budoucího vývoje, kdy emise nebudou striktně omezeny, ale zároveň bude regulován jejich růst. Stabilizace koncentrace CO_2 v atmosféře na nižší úrovni.
- **Scénář RCP6.0 – Střední emise**
Radiační vliv $6,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Stabilizace koncentrace CO_2 v atmosféře na vyšší úrovni.
- **Scénář RCP8.5 - Vysoké emise**
Radiační vliv $8,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Značí scénář s velmi vysokými emisemi oxidu uhličitého v budoucích letech, které nebudou v budoucnu nijak omezeny.

Pro odhad budoucího klimatu jsou vytvářeny a používány klimatické modely. Příprava těchto modelů zahrnuje modelový popis klimatického systému a v něm probíhající procesů na úrovni současného poznání. Následuje odborný odhad předpokládaného vývoje světové makroekonomiky, demografie, využívání zdrojů energie, technologií a dalších socioekonomických faktorů. Potom může být provedena modelová projekce budoucího vývoje. Základními modely jsou takzvané GCM (Global climate model/General Circulation Model) – globální klimatické modely/modely všeobecné cirkulace atmosféry. Jedná se o matematické modely klimatického systému, založené na pohybových a termodynamických rovnicích. Každý globální klimatický model pracuje v určitém horizontálním a vertikálním rozlišení. Dnešní modely mají typické horizontální rozlišení 2 až 4° zeměpisné šířky a délky v atmosférické části modelu a 0,5 - 1° v části oceánické. Jejich vertikální rozlišení je 25 až 40 vrstev nad pevninou a 20 až 30 nad oceány. GCM je schopen popsat pouze klimatické jevy většího měřítka, než je jeho vlastní rozlišení. V začátcích modelování klimatu byly používány pouze modely atmosféry, oceánů a zemského povrchu. Dále se přidávaly modely mořského ledu, síranových částic, ostatních aerosolů, uhlíkový, biochemický cyklus a vegetace, ledový příkrov. Dnes modely pracují i s atmosférickou chemií, horní atmosférou a mořským ekosystémem.

GCM je schopen popsat pouze klimatické jevy většího měřítka, než je jeho vlastní rozlišení. GCM mají poměrně hrubé rozlišení. Proto se k zmenšení měřítka používají různé techniky tzv. klimatického downscalingu. Ten se následně dělí na jednoduchý, statistický a dynamický.

Dynamický downscaling je zmenšování měřítka použitím takzvaných RCM – regionálních klimatických modelů. Jsou to modely klimatu, které provádějí výpočet pouze pro omezenou geografickou oblast. Jejich okrajové podmínky jsou převzaty z některého z GCM. Nejznámějšími projekty zabývající se vývojem regionálních klimatických modelů jsou například pro Evropu projekty ENSEMBLES, PRUDENCE a CORDEX.

Statistický downscaling je tvořen různými přístupy a metodami. Základní metodou je lineární downscaling, kam patří tzv. Delta Metoda, nebo také metody lineární regrese. Další metodou je tzv. Klasifikace počasí (Weather Classification) využívající metody analogu nebo clustrových analýz. Poslední používanou metodou patřící do skupiny využívající statistický downscaling jsou tzv. generátory počasí.

Generátory počasí zkráceně WG. Zkratka vznikla z anglického Weather Generator. Obecně jde o nástroj používaný k zjemnění rozlišení GCM tak, aby bylo možno zkoumat změnu klimatu v konkrétní lokalitě a byly získány denní hodnoty meteorologických veličin. Na rozdíl od GCM se neřídí rovnicemi fyzikálních procesů, ale statistickými charakteristikami skutečných meteorologických časových řad. Jejich použití je méně náročné na výpočetní výkon. Na základě reálné měřené řady dat vytvoří generátor řadu syntetickou o libovolné délce pro konkrétní lokalitu. Většina generátorů počasí pracuje ve dvou krocích. Prvním je modelování denních hodnot srážek a druhým je modelování zbylých proměnných, jako jsou denní maximální a minimální teploty, sluneční záření, vlhkost a rychlost větru. V současnosti se používají dva základní typy generátorů počasí a tím jsou tzv. Richardson a Serial. WGs typu (Richardson, 1981) v prvním kroku modeluje výskyt takzvaných mokrých a suchých dní s využitím Markovova postupu. Ve druhém kroku jsou potom modelovány konkrétní denní úhrny srážek. Nakonec jsou modelovány zbývající proměnné na základě jejich korelací s mokřými/suchými dny a mezi sebou

navzájem. Nevýhodou generátorů typu Richardson je jejich neschopnost adekvátně popsat délky suchých a mokrých období, které mohou být pro projekci budoucího klimatu velmi důležité, zejména když se bavíme o hydrologické bilanci. Proto byl vyvinut alternativní typ generátoru tzv. Serial (Racsko et al., 1991). Ten v prvním kroku modeluje mokrá a suchá období a potom teprve další proměnné v závislosti na nich. Popis základů modelování změn klimatu byl převzat z (Knoppová, 2016).

Známými generátory počasí jsou například americké generátory GEM, USCLIMATE WGEN, britský ClimGen, LARS WG, EARWIG nebo SDSM. Generátorem počasí, který bude v práci používán je LARS WG (Long Ashton Research Station Weather Generator), který patří mezi generátory typu Serial.

Další možností statistického downscalingu GCM modelů jsou datové sady, resp. databáze, které byly pomocí statistických metod zpracovány a převedeny do různých typů souborů. Jednou z takových databází klimatických dat a projekcí je například pro oblast Severní Ameriky databáze NCAR GIS Program 2012 a Climate Change Scenarios. Pro sestavení databáze vyvinul (Hoar a Nychka, 2008) metodu, která se skládá ze tří kroků. Kdy je nejprve sestaven jednoduchý lineární model. Následně je použita autory vyvinutá off-the-shelf metoda, pro nalezení počátečních podmínek modelované oblasti z dat Community Climate System Modelu (CCSM). Na závěr proveden downscaling pomocí lineárního modelu s použitím nalezených počátečních podmínek.

Soubor downscalových klimatických dat pro celý svět je k dispozici v databázi WorldClim (Hijmans et al., 2005). Statistický downscaling je založen na tzv. Delta metodě. Data jsou volně ke stažení v GIS formátu a jsou založena na emisních scénářích RCPs z AR5.

V České republice je možno pro výpočty použít výstupy z projektu Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu (RSCN, 2014), jejichž výsledky jsou uvedeny na stránkách rcsn.vuv.cz. Zde jsou volně ke stažení data klimatických modelů vztahované pro celou Českou republiku. K dispozici jsou však data konstruovaná na základě konzervativního emisního scénáře SRES A1B, což pro obecné úvahy nad budoucím vývojem klimatu je dostatečný podklad. Pokud však mají být postihnuty všechny možnosti budoucího vývoje, je nutností uvažovat hluboké nejistoty vznikající z dostupných klimatických modelů a emisních scénářů. V takovém případě je pak nutné sestojit ensemble klimatických dat, které dané nejistoty postihují.

1.2.2 Hydrologické modely, základní dělení a použití v ČR a ve světě

Pro účely hydrologického modelování průtoků se používají srážko-odtokové modely, kterých je celá řada. Následující dělení vychází z (Starý, 2005):

Rozdělení podle prostorového uspořádání vstupů a hydrologických charakteristik

- Celistvé modely (lumped models)
- Distributivní modely (distributive models)
- Semidistributivní modely (semidistributive models)

Rozdělení podle hloubky a komplikovanosti vazeb simulovaného procesu

- Deterministické modely
- Stochastické modely

V České republice se pro účely operativní hydrologie používají především model AQUALOG od firmy AquaLogic Consulting a HYDROG (Starý, 2017). Oba modely jsou nasazeny v operativním provozu v ČHMÚ a státních podnicích Povodí. Hydrologický model AQUALOG integruje srážko-odtokový model SACRAMENTO (SAC-SMA) včetně jeho sněhové komponenty SNOW17. Kód systému SACRAMENTO je vyvíjen organizací NOAA. Model HYDROG je srážkoodtokový distributivní model určený k simulaci povodňových situací v povodí, vydávání operativních předpovědí průtoků v říční síti povodí a operativnímu řízení vodohospodářských děl. Pro simulaci srážkoodtokového procesu na malém povodí je používán hydrologický model KINFIL. Model je určený pro stanovení návrhových průtoků ovlivněných antropogenní činností a vytvořil jej (Kovář a Váššová, 2011).

Z bilančních hydrologických modelů stojí za zmínku model WBCM (Kovář, 1994), (Kovář, 1998), který je popsán jako deterministický bilanční model používaný pro účely odhadu dynamiky vlhkosti půd, výparu a denních odtoků. Pro účely návrhů a hydrologických bilancí v denním a měsíčním časovém kroku je v ČR hojně užíván model BILAN (VÚV, 2017).

Ve světě je používáno a vyvíjeno velké množství hydrologických srážko-odtokových nebo bilančních modelů. Mezi nejznámější a hojně používané modely patří například HEC - HMS, TOPMODEL, Soil and Water Assessment Tool známý pod zkratkou SWAT, HBV-96, MIKESHE. Model HEC – HMS z dílny US Army Corps of Engineers je jedním z celé řady modelů vyvíjených v Hydrologic Engineer Centre. Jeho úkolem je modelování a simulace hydrologických procesů v povodí. Je schopen modelovat infiltraci, výpočet návrhových a jednotkových hydrogramů a dalších hydrologických veličin. TOPMODEL (Beven a Freer, 2001) je distributivní model simulující hydrologické procesy v povodí. Jde především o infiltraci, nasycení, povrchový odtok, evapotranspiraci a další. Dalším hojně využívaným hydrologickým modelem je model SWAT, který je podporován a vyvíjen v USDA Agricultural Research Service at the Blackland Research & Extension Center v Temple v Texasu (Neitsch a kol., 2002). Hlavními výstupy modelu jsou povrchový odtok, N-letý průtok, evapotranspirace, zásobní objem nádrží, závlahy, znečištění, podzemní odtok a další. Software je určen především pro modelování velkých a komplexních povodí včetně vodních zdrojů, nádrží a závlah. Model HBV-96 (Lindström a kol., 1997) je spíše určen pro hydrologické modelování ve skandinávských zemích. Model je určen k simulacím průtoků v povodí včetně transportu znečištění. Poslední z hojně užívaných modelů je model MIKESHE, který stále vyvíjí společnost DHI, software je schopen výpočtů povrchového a podzemního odtoku a evapotranspirace v povodí.

Hydrologické modely jak srážko-odtokové nebo bilanční pak tvoří základ navazujících vodohospodářských úloh. Pokud existuje vhodný hydrologický model, pak je možné pomocí výše popsaných modelů změny klimatu transformovat srážku na průtok vody závěrovým profilem a provést navazující analýzy vydatnosti vodních zdrojů na změny klimatu.

1.2.3 Klimatická změna a její dopady na vodní zdroje a vodní nádrže

Ve světě, ale i v České republice bylo na dané téma zpracováno již mnoho studií a výzkumných projektů. Z mnoha vytvořeného stojí za zmínku např. projekt TAČR 103/93/0841 Zhodnocení dopadů změn klimatu v hydrologických režimech na hospodaření s vodou v nádržích (Nácházel a kol, 1995). Cílem projektu bylo zhodnocení změn klimatu na hydrologické režimy povodí nad nádrží Švihov a nad nádrží Rozkoš. V publikaci (Nacházel, Fošumpaur, 2010) byl sledován účinek klimatických změn na hydrologický režim v povodí řeky Labe a vodní nádrž Šance v povodí Odry. V uvedém případě byl na neurčitost klimatického systému aplikován princip teorie fuzzy množin (Zadech, 1965) a teorie fuzzy množin rozšířených o řešení možnosti nastání neurčitých jevů (Zadech, 1978), (Klir, 2005). Výzkumný

ústav vodohospodářský T. G. M. byl hlavním řešitelem projektu „TA04020501 Možnosti kompenzace negativních dopadů klimatické změny na zásobování vodou a ekosystémy využitím lokalit vhodných pro akumulaci povrchových vod“ jejichž výstupem je aplikace lapv.vuv.cz. Hlavním cílem projektu bylo zpřesnění podkladů pro aktualizaci Generelu lokalit pro akumulaci povrchových vod (LAPV) a pro 3. kolo aktualizací Plánů povodí. Pro oblast povodí Moravy byla zpracována Studie posouzení změny klimatu na vodohospodářskou soustavu v povodí Moravy (VÚV, 2008). Ve studii byla řešena vodohospodářská bilance v povodí pro výhledové období 2071 – 2100, data byla modelována pomocí modelu RCAO s využitím emisního scénáře SRES A2. Jednou z aktuálních publikací byl článek Možnosti zmírnění dopadů změny klimatu využitím území chráněných pro akumulaci povrchových vod (Kožíň a kol. 2015). Autoři v článku provedli aktualizaci generelu LAPV jako nástroje pro zmírnění dopadů změny klimatu. Provedli posouzení daných lokalit a aktualizaci parametrů objemů výhledových nádrží. Také autoři hydrologického modelu AQUALOG se podíleli na studiích změn klimatu na vodní režim v ČR. Konkrétním výstupem byly simulované průtoky pro vybrané klimatické scénáře. Pro simulace byl používán zmíněný hydrologický modelovací systém. Metodika simulací klimatických změn byla ověřena pro povodí Otavy, Jizery, horní Vltavy, Orlice a Bečvy v rámci projektu „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ (MŽP SP/1a6/108/07 DÚ 3). Jak bylo uvedeno v úvodu, suché roky 2011, 2012, 2014 a 2015 donutily jednat i vládu ČR. Prostřednictvím resortu Ministerstva životního prostředí byla vydána v roce 2015 již zmíněná Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách České republiky (MŽP, 2015). Na základě tohoto dokumentu byly zpracovány dílčí vědecké záměry. Mezi výrazné pak patří projekt Generel vodního hospodářství krajiny (Trnka a kol., 2017). V rámci projektu byly pro vytypované pilotní zemědělské farmy a přilehlá povodí na jihu Moravy a ve středních Čechách zpracovány bilance zdrojů vody. K těmto účelům byl použit model Billan (VÚV, 2017).

Ve světě se na téma změn klimatu a jeho vlivu na vodní zdroje, nádrže a soustavy nádrží věnují poměrně hojně. Hodnotící zpráva IPCC AR5 shrnuje ve třetí kapitole (Jiménez Cisneros a kol., 2014) dopady změn klimatu na celosvětové vodní zdroje. V kapitole se uvádí například 20% pokles obnovitelných vodních zdrojů v příštích 100 letech. Hovoří se o zvýšené četnosti výskytu hydrologických a agronomických such. Vyšší pravděpodobnosti výskytu sucha trvajícího déle než 12 měsíců. Vlivem klimatické změny je předpokládáno zhoršení kvality a vydatnosti vodních zdrojů, dále pak změna sezonality hydrologických režimů, zvýšené riziko povodní po celém světě a další. Z novějších prací stojí za zmínku například práce (Roach a kol., 2016), ve které autoři popsali možnost adaptace vodních zdrojů na změny klimatu a budoucí socio-ekonomický vývoj v UK. Popsali metodu vyhodnocení vodních zdrojů pomocí tzv. metrik resilience/odolnosti v podmínkách hlubokých nejistot. Hluboká nejistota je v práci chápána jako nejistota z budoucího vývoje klimatického systému a nejistota vývoje spotřeby vody v daných regionech Velké Británie. Klimatickou změnou a jejím vlivem na hydrologický režim a řízení nádrže v povodí řeky Mekong popsali (Lauri a kol., 2012). Článek popisuje návrh pravidel řízení soustavy hydroenergetických nádrží v povodí řeky Mekong. Přičemž klimatická změna byla do výpočtů zavedena pomocí downscalingu Delta metodou pěti GCMs modelů uvažujících emisní scénáře B1 a A1B. Pro modelování hydrologických charakteristik byl použit finský hydrologický model VMod. Optimalizační model soustavy nádrží, popisující pravidla řízení, byl sestaven pomocí klasické techniky lineárního programování s cílem maximalizovat roční odtok vody přes turbíny vodní elektrárny.

Vliv klimatických změn na hydrologickou spolehlivost nádrže s přihlédnutím na zásobování vodou v zemědělství publikovali (Ashofer a kol., 2013). Studie autorů se zaměřila na výpočet zranitelnosti, zabezpečení a odolnosti objemu nádrže s přihlédnutím na klimatickou změnu ve Východním Ázerbájdžánu. Klimatická data byla sestavena pro období roku 2026 až 2039 a pomocí klimatického modelu HadCM3. Následná hydrologická řada průměrných měsíčních průtoků byla vypočítána pomocí hydrologického modelu IHACRES a údajů o budoucím průběhu teplot a srážek nad daným územím. Simulační a optimalizační model zásobního objemu nádrže byl zpracován v programovacím prostředí softwaru LINGO 11.

Studii výstavby dvou nových nádrží v oblasti horského povodí na severovýchodě Portugalska se zabývali (Carvalho-Santos a kol., 2017). Autoři se pokusili s použitím modelu SWAT zaměřit na návrh nádrží s přihlédnutím na změny klimatu a budoucích potřeby vodních zdrojů v povodí řeky Alto Sabor. Projekce budoucího klimatu byly provedeny pro scénáře RCP 4,5 a 8,5.

2 Cíl práce

Cílem práce je představit možnosti sestavení a zavedení různých typů nejistot do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže. Jejich analýza a vhodné vyhodnocení. Jak již bylo uvedeno výše. 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 ensamble 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 robustosti řešení.

3 Metody

3.1 Zavedení nejistoty měření

Zavedení nejistot měření do vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže vychází z obecné teorie nejistot měření dle normy (TPM 0051 – 93, 1993) a popsané v (Palečar a kol., 2001). Jak bylo popsáno v (Starý, 2007) účelem stanovení nejistoty při měření dané veličiny je zjištění intervalu možného výskytu jejich hodnot okolo výsledku měření, který lze přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Na začátku jakéhokoliv zpracování nejistot stojí detailní porozumění podstaty prováděného měření, popsaného modelem měření. To samozřejmě znamená nejen nutnost detailní znalosti principů, funkcí a konstrukčních detailů měřících přístrojů, ale i znalost metody měření a schopnost se

rozhodnout jaké vlivy mohou působit v průběhu měření jako zdroje nejistoty a ovlivnit výsledek. Mnohdy jsou tyto informace obsaženy v návodu k použití konkrétních přístrojů, nebo v popisu již prověřených metod měření.

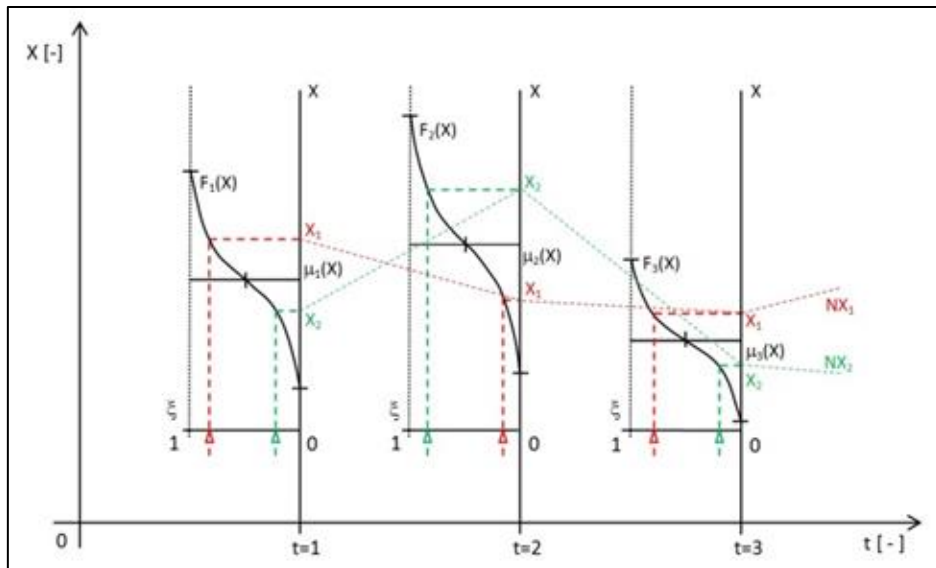
V práci je použito základní rozdělení nejistot typu A a B. Standardní nejistoty typu A a B značeno jako u_A , u_B . Hodnoty rozšířené nejistoty U vycházející z předpokládaného normálního rozdělení pravděpodobnosti. To znamená, že pro rozšířenou nejistotu U_a odpovídá koeficient rozšíření $k = 3$. Pro rozšířenou nejistotu U_b odpovídá koeficient rozšíření $k = 2$.

Teorie byla s různými modifikacemi aplikována na řešení zásobního objemu nádrže v (Marton, Straý, Menšík, 2011), (Marton, 2012) a (Marton, Starý, Menšík, 2015), (Marton a Paseka, 2017). Postup zavedení nejistot do vstupních parametrů vodohospodářského řešení vychází především z použití metody Monte Carlo. Náhodné vstupní parametry zatížené nejistotou měření následně vstupují do simulačního modelu nádrže, který provede opakované výpočty zásobního objemu a zabezpečení odtoku vody z nádrže včetně statistického vyhodnocení.

3.1.1 Obecná metoda Monte Carlo

Pro vytvoření algoritmu generujícího náhodné řady zatížené nejistotami v 1D systému je zapotřebí uvažovat následující předpoklady řešení. 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 $\mu(X) =$ naměřená hodnota X a směrodatné odchyly $\sigma(X) =$ 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 odchyly $\sigma(X)$ je následně dopočítána pomocí odpovídajících matematických vztahů.

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. Princip generování náhodných řad v 1D systému je znázorněn na schématu obrázku 2 a vychází z (Starý, 1984).



Obr. 2. Princip generování nejistot vstupních prvků metodou Monte Carlo v souřadnicovém systému 1D.

Postup generování řady prvků X je následovný:

1. Sestavení linearizovaného průběhu distribuční funkce $F(X)$ normovaného normálního rozdělení. Z funkce hustoty pravděpodobnosti $f(x)$ normovaného normálního rozdělení je pomocí numerické integrace Rombergovou metodou (6) sestaven průběh distribuční funkce $F(x)$.

$$I = \int_a^b f(x) dx \approx \frac{a-b}{2} [f(a) + f(b)] \quad (6)$$

2. Generátorem pseudonáhodných čísel ξ_j jsou vytvářeny náhodné hodnoty ξ_j z intervalu $\xi \in \langle 0,1 \rangle$, pro $j = 1, 2, \dots, PO$, kde PO je počet opakování.
3. Z distribuční funkce normálního normovaného rozdělení $N(0,1)$ jsou lineární aproximací pro hodnoty ξ_j opakovaně stanoveny náhodné parametry η_j , pro $j = 1, 2, \dots, PO$.
4. Vypočet náhodné realizace prvku X_j pro $j = 1, 2, \dots, PO$, stanovíme vztahem (7).

$$X_j = \sigma_i(X) \cdot \eta_j + \mu_i(X) \quad (7)$$

kde ve vztahu (2) $\mu_i(X)$ odpovídá střední hodnotě řady prvků X_i pro $i = 1, 2, \dots, n$, kde n odpovídá počtu prvků X v řadě a směrodatná odchylka $\sigma_i(X)$ je zadána vztahem (8).

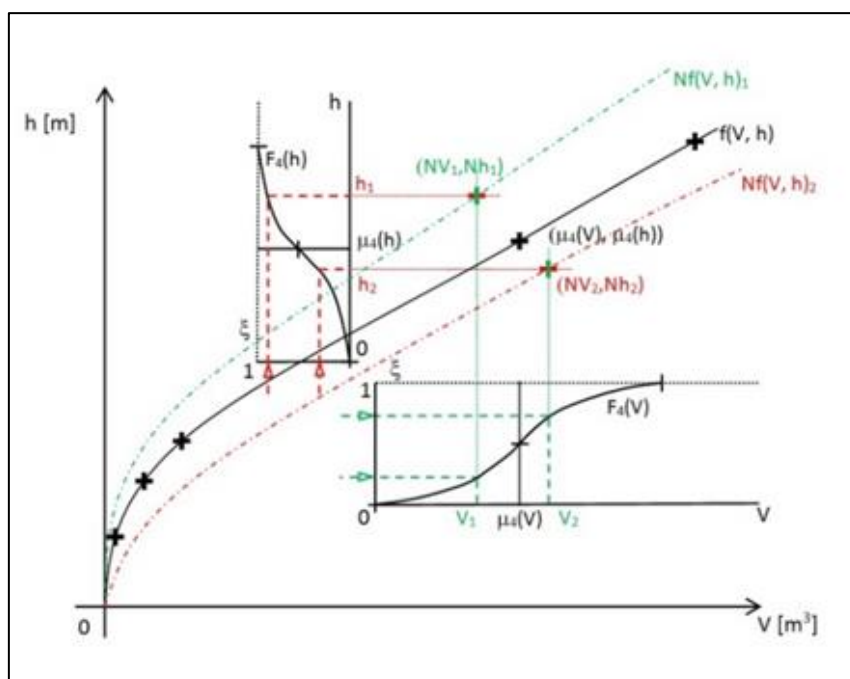
$$\sigma(X) = C_v(X) \cdot X_j \quad (8)$$

Ve vztahu (8) značí $C_v(X)$ koeficient variace.

Vztah (7) provede transformaci náhodné realizace η_j (náhodné realizace odpovídající netransformované hodnotě prvku X) z rozdělení $N(0,1)$ na realizace náhodné veličiny X_j z rozdělení $N(\mu(X), \sigma(X))$. Výsledkem generování vznikají náhodné vygenerované body NX_j pro $j = 1, 2, \dots, PO$, pro všechny body X_i pro $i = 1, 2, \dots, n$.

Obecný postup generování náhodných prvků může být aplikován na měřené veličiny vstupující do vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže jako například řady průměrných měsíčních průtoků Q_m , hodnoty výparu z vodní hladiny E , hodnoty průsaku tělesem hráze a další. Jde také uplatnit při generování náhodných poloh bodů v 2D souřadnicovém systému jako například pro generování náhodných realizací batygrafických křivek (čar zatopených ploch a objemů).

Základní princip generování náhodných poloh bodů v 2D souřadnicovém systému (NX_i, NY_i) je shodný s teorií popsanou v předchozích odstavcích. Následná odlišnost je dána v principu sestavením bodu, který vyžaduje sestavení dvou na sobě nezávislých Monte Carlo generátorů. Každý generátor sestrojí náhodnou polohu bodu NX_i (např. výšku vodní hladiny Nh_i) a k ní náhodnou hodnotu NY_i (objem vody v nádrži NV_i). U čar zatopených objemů je pak výsledkem náhodná souřadnice bodu (NV_i, Nh_i) čar zatopených objemů viz obrázek 3.



Obr. 3. Princip generování nejistot vstupních prvků metodou Monte Carlo v souřadnicovém systému 2D.

3.2 Nejistoty změn klimatického systému

Pro výpočty, které zahrnují analýzu změny klimatu je nutné mít k dispozici tzv. ensamble klimatických dat, ve kterých je klimatická změna zohledněna. Jak je uvedeno v kapitole 1.2. 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 sestavení potřebných ensablů klimatických a následně hydrologických dat bylo nutné učinit následující kroky.

Pomocí nástrojů statistického downscalingu, resp. generátoru počasí LARS WG a ENSEMBLES downscaling portálu jsou sestaveny ensamble klimatických dat. Hydrologická transformace klimatických dat na hydrologická data je provedena pomocí lumped bilančního modelu. Ensamble hydrologických dat jsou následně vloženy do simulačního modelu nádrže, který pro volené období stanoví hydrologickou spolehlivost zásobního objemu nádrže. Výsledkem je množina hodnot hydrologických spolehlivostí, které jsou podrobeny analýze robustnosti.

3.2.1 Zjednodušující předpoklady řešení

Pro sestavení modelů a vytvoření analýzy zásobního objemu nádrže v podmínkách klimatické změny bylo nutné zavést následující 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. A to především předpokladem, že zvýšené koncentrace skleníkových plynů v atmosféře způsobující nárůst teploty jsou vyvolané lidskou činností.

Zjednodušující předpoklady uvažované při tvorbě downscalingových dat. Program LARS WG vychází z informací, závěrů a podkladů z hodnotící zprávy AR4. Neobsahuje novější informace o vývoji klimatického systému zohledněné v hodnotící zprávě AR5. Scénářová data vytvořená pomocí portálu ENSEMBLE downscaling portál mají velký prostorový grid. U těchto dat je tedy nutné zanedbat detailní vliv orografie terénu. Stejně jako LARS WG i data z portálu ENSEMBLE výrazněji zanedbávají vliv a vývoj krajinného pokryvu.

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 výparoměru typu PAN, nebo výpočtem pomocí 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 upraveny, tak aby bylo možné porovnání ensemblových 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 procentuelní 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 ensembl scénářových dat vychází z normálního rozdělení. Výsledky jsou pak prezentovány ve formě střední hodnoty $\mu(X)$, standartní nejistota u je popisována velikostí směrodatné odchylky $\sigma(X)$ a rozšířená nejistota U je dána minimální $min(X)$ a maximální $max(X)$ dosaženou hodnotou.

3.2.2 Modelování ensmbly vstupních dat s využitím bilančního modelu

3.2.2.1 Generátor počasí LARS WG

Princip generátoru počasí LARS WG vychází z typu series weather generator, který popsal (Racsko a kol., 1991). Níže popsaný postup generování klimatických dat vychází z manuálu k programu LARS WG verze 3.0, který popsal (Semenov a Barrow, 2002) následujícím způsobem.

Model využívá tzv. semi-empirických rozdělení pracujících s řadami (sekvencemi) délek suchých a mokrých dní, denních srážek a denní sluneční radiace. Semi-empirické rozdělení $Emp = \{a_0, a_i, h_i, i=1, \dots, 10\}$ je definováno histogramem s deseti intervaly (a_{i-1}, a_i) , kdy $a_{i-1} < a_i$ a h_i popisuje počet uvedených událostí ve sledovaném souboru dat, které padnou do i-tého intervalu. Náhodné hodnoty ze semi-empirického rozdělení jsou voleny prvním výběrem jednoho z intervalů (využitím úměrnosti dané události v každém intervalu jako pravděpodobnost výběru) a pak je ze zvoleného intervalu vybraná hodnota z rovnoměrného rozdělení. Rozdělení je velice flexibilní a vytvoří široký výběr možností tvarů rozdělení nastavením intervalů (a_{i-1}, a_i) . Cena za flexibilitu daného rozdělení je dána 21 parametry (11 hodnot popisuje okrajové podmínky intervalů a 10 hodnot popisuje počet událostí v každém intervalu).

Intervaly (a_{i-1}, a_i) jsou voleny na základě očekávaných vlastností proměnných charakterizující dané počasí. Pro sluneční radiaci jsou intervaly rovny rozmezí mezi minimálními a maximálními hodnotami sledovaných dat v průběhu měsíce. Pro délky řady suchých a mokrých období a srážek se velikost intervalu postupně zvětšuje (prodlužuje), jak narůstá i-tý interval.

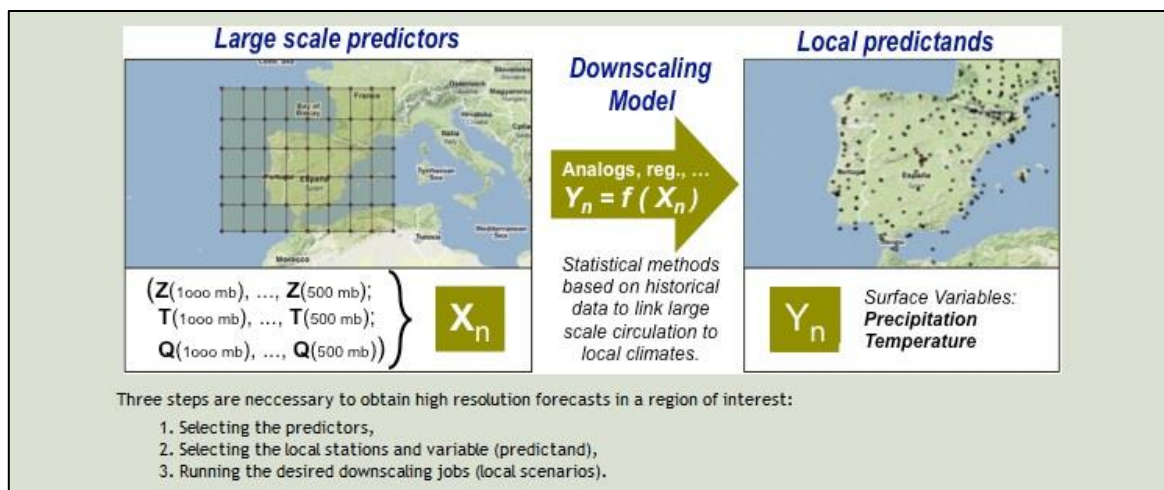
Simulace výskytu srážek je modelována střídáním sekvence mokrého a suchého období, kdy mokrý den je definován jako den se srážkami $> 0.0 \text{ mm}$. Délka každé sekvence je náhodně zvolena ze semi-empirického rozdělení mokrého nebo suchého období pro měsíc, ve kterém sekvence začaly. Pro určení vhodného semi-empirického rozdělení jsou také měřená data mokrých a suchých období situována do stejného měsíce, ve kterém začaly. Pro mokrý den je hodnota srážek generována ze semi-empirického rozdělení srážek pro odpovídající měsíc nezávisle na délce mokrého období nebo na množství srážek z předchozích dnů.

Denní minimální a maximální teploty jsou považovány za náhodné procesy s denním průměrem a denní směrodatnou odchylkou upravené podle toho zda nastal mokrý nebo suchý den. Technika pro simulaci tohoto procesu je velice jednoduchá a představil ji (Racsko a kol., 1991). Sezónní cykly průměrů a jejich směrodatných odchylek jsou modelovány pomocí konečné Fourierovy řady třetího řádu a rezidua jsou proloženy pomocí normálního rozdělení. Fourierovy řady pro průměry jsou přizpůsobeny (je upraven jejich průběh, resp. tvar) k reálným průměrným hodnotám v každém měsíci. Před každým přizpůsobením jsou pro daný měsíc směrodatné odchylky Fourierových řad a měřených dat upraveny (adjustovány) tak, aby daly odhadovanou denní směrodatnou odchylku. Toto je vytvořeno odstraněním odhadovaného efektu změn v průměrech v každém měsíci. Adjustování je počítáno pomocí upravené Fourierovy řady získané z průměrů. Měřená rezidua získaná odstraněním upravených průměrných hodnot z měřených dat jsou použita na analýzu časové autokorelace minimálních a maximálních teplot.

3.2.2.2 ENSEMBLES Downscaling Portal

Cílem portálu je poskytnout výsledky modelování klimatických dat pomocí multi-model climate change global simulations pro účely dalších výzkumů a aplikací z oblasti zemědělství, vodního hospodářství, pojišťovnictví, energetiky a dalších. Portál umožňuje kalibrovat a downscalovat výstupy v zájmových regionech na základě historických měření.

Portál umožňuje přívětivou práci s různými metodami statistického downscalingu a pracuje transparentně s historickým měřením, reanalýzou a globálními klimatickými simulacemi (Gutiérrez a kol, 2012). Titulní strana portálu se základním postupem downscalingu je zobrazena na obrázku 4.



Obr. 4. ENSEMBLE downscaling portal – princip práce s portálem.

Základní práce s portálem se skládá z následujících kroků a vychází z (Gutiérrez a kol, 2012).

1. Nastavení Prediktoru.
2. Nastavení Prediktantu.
3. Výběr a nastavení metody downscalingu.
4. Downscaling.

Kroky 1, 2 a 3 korespondují s provedením kalibrace a validace vybrané downscaling metody. Samotný downscaling provedený v kroku 4 pak koresponduje s vybranou metodou downscalingu, kdy nakalibrovaná metoda se aplikuje na různé GCM modely a emisní scénáře.

Definice a popis procesů tvorby experimentu:

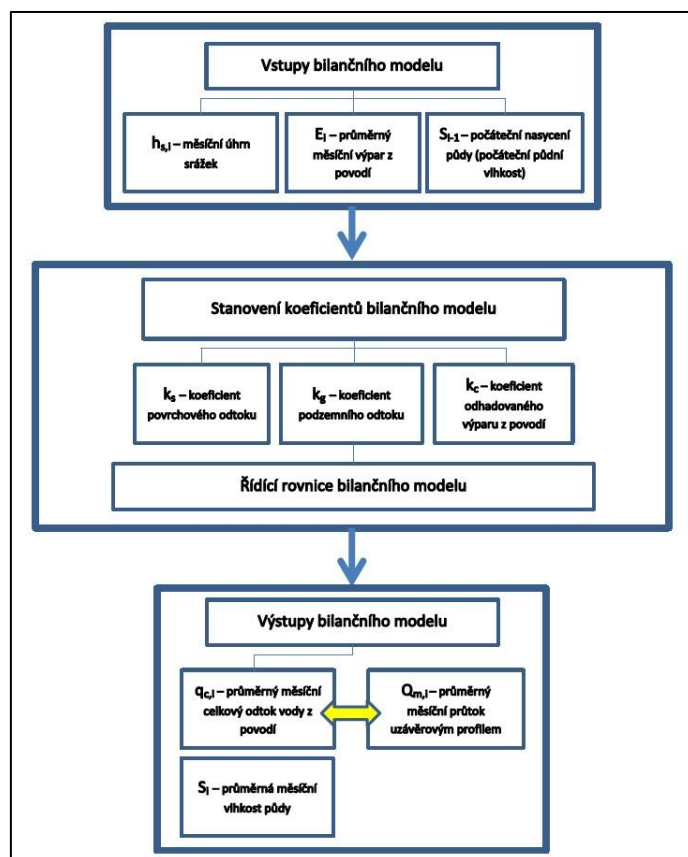
1. Prediktor jako celek popisuje jednak geografický region určený pro downscaling, ale také jednotlivé klimatologické veličiny, které jsou potřeba pro daný experiment. Prediktor je tedy tvořen souborem informací o daném území, velikostí gridu, časových a prostorových informacích klimatologických veličin a informací o kompatibilních typech GCMs modelů.
2. Prediktant popisuje jeden nebo více prediktantů (klimatologických prvků), které budou v experimentu downscalovány. Prediktant je vytvořen pro jednu nebo více klimatologických stanic v dané lokalitě. Každá vybraná stanice obsahuje historické měření. Jakmile je prediktant vytvořen, následuje validace modelu. Validace může být provedena pro předdefinované downscaling metody. Validace provede přímé propojení mezi Prediktorem a Prediktantem.
3. Posledním krokem procesu je výběr a nastavení Downscaling metody, která popisuje jednu nebo více použitých metod, jejich kalibraci a validaci použité v experimentu. Sestavení downscaling metody je provedeno ve dvou krocích. Prvním krokem je sestavení empirických vztahů (statistického modelu) mezi Prediktory (GCMs proměnné) a prediktanty (lokální data z vybraných stanic). Druhým krokem je aplikace statistického modelu na různé GCMs simulace a různé emisní scénáře. ENSEMBLE downscaling portal nabízí dvě možnosti statistického downscalingu:
 - *Non-Generative (algorithmic) metody*, která je dále dělana na *Analogovou metodu* a metodu *Weather types*. Analogová metoda využívá analogii místních a sousedních stanic k sestavení statistického downscalingu. Metoda *Weather types* vychází z podobnosti počasí/klimatu v daném místě určeného z vybraných stanic.

- *Generative (model-based) metoda*, která obsahuje další tři metody založené na modelech Lineární regrese, Generalizovaného lineárního modelu, modelu Neuronových sítí (ELM) a Kvantitativní regrese.

Po nastavení prediktorů, prediktantů a zvolení metody downscalingu proběhne validace vybrané downscaling metody. Validací soubor je rozdělen v poměru 75%/25% na trénovací a testovací data validace. Přesnost validace je popisována pomocí koeficientu korelace, *MAE* (střední absolutní chyby), *RMSE* (střední kvadratické odchylky) a normalizovaného *RMSE*. Po provedení validace je možné provést tzv. downscaling reanalysis. Tento krok ověří vhodnost validace na historických záznamech. Na závěr je proveden downscaling GCMs modelů a emisních scénářů. Teoreticky ENSEMBLE downscaling portál nabízí možnost výběru z 8 GCMs modelů a všech typů emisních RCPs scénářů. Prakticky je však použití GCMs modelů a RCPs emisních scénářů prostorově omezeno. Pro území České republiky je možno aplikovat pouze model CMIP5-NORESM1-M, který postihuje emisní scénáře RCP 4,5 a RCP 8,5.

3.2.2.3 Lumped bilanční model

Základem bilančního modelu jsou upravené řídicí rovnice použité v bilančním modelu dle (Wang a kol., 2013). Tyto 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). Základní schéma bilančního modelu je zobrazeno na obrázku 5.



Obr. 5. Schéma bilančního modelu.

Soustava řídicích rovnic modelu je následující. Nejprve je definována řídicí rovnice plošného povrchového odtoku $q_{s,i}$ (9).

$$q_{s,i} = k_s \cdot \frac{S_{i-1}}{S_{max}} \cdot h_{s,i} \quad (9)$$

Kde v rovnici (9) je:

- $q_{s,i}$... průměrný měsíční plošný povrchový odtok [mm] pro $i = 1, \dots, n$,
- k_s ... koeficient povrchového odtoku [-],
- S_{i-1} ... průměrná měsíční půdní vlhkost v kroku $i-1$ [mm],
- S_{max} ... maximální retenční kapacita půd [mm],
- $h_{s,i}$... průměrný měsíční srážkový úhrn [mm] $i = 1, \dots, n$.

Dále je odvozena řídicí rovnice podzemního odtoku $q_{g,i}$ viz (10).

$$q_{g,i} = k_g \cdot S_{i-1} \quad (10)$$

Kde v rovnici (10) je:

- $q_{g,i}$... průměrný měsíční podzemní odtok [mm],
- k_g ... koeficient podzemního odtoku [-],
- S_{i-1} ... průměrná měsíční půdní vlhkost v kroku $i-1$ [mm].

V dalším kroku je stanovena řídicí rovnice celkového výparu z povodí E_i dle (11).

$$E_i = k_c \cdot \frac{S_{i-1}}{S_{max}} \cdot E_{p,i} \quad (11)$$

Kde v rovnici (11) je:

- E_i ... průměrný měsíční výpar z povodí v kroku i [mm] pro $i = 1, \dots, n$,
- k_c ... koeficient odhadovaného výparu z povodí [-],
- $E_{p,i}$... potenciální měsíční výpar [mm], stanovený dle Thornthwaite metody.

Celkový odtok $q_{c,i}$ z povodí je následně dopočítán jako (12).

$$q_{c,i} = q_{s,i} + q_{g,i} \quad (12)$$

Kde v rovnici (12) $q_{c,i}$ je celkový průměrný měsíční odtok vody z povodí [mm] pro $i = 1, \dots, n$.

Půdní vlhkost S_i je stanovena jako (13).

$$S_i = S_{i-1} + h_{s,i} - q_{c,i} - E_i \quad (13)$$

Kde v rovnici (13) je:

- S_i ... průměrná měsíční půdní vlhkost v kroku i [mm] pro $i = 1, \dots, n$.
- S_{i-1} ... průměrná měsíční půdní vlhkost v kroku $i-1$ [mm].

- $h_{s,i}$... měsíční srážkový úhrn [mm] v kroku $i = 1, \dots, n$.
 $q_{c,i}$... průměrný měsíční celkový odtok z povodí [mm] $i = 1, \dots, n$.
 E_i ... průměrný měsíční výpar z povodí v kroku i [mm] $i = 1, \dots, n$.

Kde ve všech výše uvedených rovnicích n odpovídá konečnému počtu prvků v řadě.

Stanovení množství potenciálního výparu v povodí bylo provedeno pomocí Thornthwaite metody. Kdy v bilančním modelu je nejprve spočítána nekorigovaná hodnota potenciální evapotranspirace $E_{p,j \text{ neopravená}}$ podle (9). $E_{p,j \text{ neopravená}}$ je považována za obecnou hodnotu potenciální evapotranspirace v měsíci vztaženou k 30ti dnům v měsíci a k teoretickému 12ti hodinovému trvání slunečnímu svitu za den. V rovnici (14) není uvažováno s geografickou polohou daného území. Tu je nutné dále adekvátně zohlednit.

$$E_{p,j \text{ neopravená}} = 16 \cdot \left(\frac{10T_a}{I} \right)^\alpha \quad (14)$$

Kde v rovnici (14) je:

- $E_{p,j \text{ neopravená}}$... neopravený potenciální výpar z povodí v daném měsíci [mm/měsíc], pro $j = 1, \dots, 12$ měsíc.
 T_a ... průměrná denní teplota vzduchu v daném měsíci j [°C],
 I ... teplotní index závisící na průběhu průměrných měsíčních teplot $T_{a,j}$ v roce je stanoven dle rovnice (15).
 α ... součinitel definovaný rovnicí (16).

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_{a,j}}{5} \right)^{1,514} \quad (15)$$

Kde v rovnici (15) $T_{a,j}$ je průměrná měsíční teplota pro $j = 1, \dots, 12$ měsíc.

$$\alpha = (6,75 \cdot 10^{-7})I^3 - (7,71 \cdot 10^{-5})I^2 + (1,792 \cdot 10^{-2})I + 0,49239 \quad (16)$$

Kde v rovnici (16) I je teplotní index závisící na průběhu průměrných měsíčních teplot $T_{a,j}$ v roce viz (15). Na závěr se provede výpočet korigované hodnoty potenciální evapotranspirace $E_{p,j}$ (17). Kdy v rovnici (17) je zohledněna geografická poloha daného území.

$$E_{p,j} = E_{p,j \text{ neopravená}} \cdot \left(\frac{N_j}{12} \right) \cdot \left(\frac{d_j}{30} \right) \quad (17)$$

Kde v rovnici (17) je:

- $E_{p,j}$... potenciální výpar z povodí v daném měsíci j dle Thornthwaite metody [mm/měsíc] pro $j = 1, \dots, 12$ měsíc,
 N_j ... průměrný počet hodin denního svitu v příslušném měsíci [h] pro $j = 1, \dots, 12$ měsíc,
 D_j ... počet dní v daném měsíci pro $j = 1, \dots, 12$ měsíc.

Korekce na příslušnou geografickou polohu území je provedena pomocí upraveného průměrného počtu hodin denního svitu v příslušném měsíci N_j . Opravená hodnota N_j je dopočítána pomocí (18).

$$N_j = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_{s,j} \quad (18)$$

Kdy v rovnici (18) $\omega_{s,j}$ je úhel hodin západu slunce [rad] pro $j = 1, \dots, 12$ měsíc, který je vypočítán dle vztahu (19).

$$\omega_{s,j} = \arccos[-\tan(\varphi_j) \cdot \tan(\delta_j)] \quad (19)$$

Kdy v rovnici (19) je:

φ_j ... přepočtená zeměpisná šířka [rad] pro $j = 1, \dots, 12$ měsíc, viz vzorec (20),

δ_j ... sluneční deklinace [rad], pro $j = 1, \dots, 12$ měsíc, vzorec (21).

$$\varphi_j = \frac{\pi}{180} \cdot (\text{z. š}) \quad (20)$$

$$\delta_j = 0,409 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{J_j}{365} - 1,39\right) \quad (21)$$

Kde J_j je výpočet pořadí dne v roce. Pro měsíční výpočty je počítáno J_j pro střed měsíce viz (22).

$$J_j = (30,4 \cdot i - 15) \quad (22)$$

K správné kalibraci bilančního modelu bylo nutné vyřešit soustavu výše popsaných řídicích rovnic modelu. Soustava řídicích rovnic vedla k řešení optimalizačního problému. Kdy kalibrační koeficienty vstupovaly jako proměnné do optimalizace bilančního modelu. V řídicích rovnicích bilančního modelu tedy bylo nutné optimalizovat, reps. kalibrovat 37 parametrů modelu. Z toho 12 parametrů měsíčních koeficientů povrchového odtoku k_c , 12 parametrů měsíčních koeficientů podzemního odtoku k_g a 12 parametrů měsíčních koeficientů evapotranspirace k_e a jeden parametr počáteční půdní vlhkosti S_{i-1} . Optimalizace koeficientů byla řešena dvěma způsoby. Při prvotních testováních modelu byla použita nejprve gradientní optimalizace, kterou nabízí v nástroji Řešitel program MS EXEL. Po prokázání funkčnosti modelu, byl celý systém výpočtu vytvořen v programovacím jazyce FORTRAN a optimalizace koeficientů byla řešena pomocí optimalizační metody evolučních algoritmů (Knoppová, 2018). Kritériem optimalizace bylo maximalizace hodnoty Nash–Sutcliffova koeficientu NSE , který je popsán jako (23).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i,real} - Q_{m,i,pre})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i,real} - \bar{Q}_r)^2} \quad (23)$$

V rovnici (23) pak:

$Q_{m,i,real}$... reálný průměrný měsíční průtok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], pro $i = 1, \dots, n$, kde n odpovídá konečnému počtu prvků v řadě.

$Q_{m,i,pre}$... predikovaný/modelovaný průměrný měsíční průtok [$m^3 s^{-1}$], pro $i = 1, \dots, n$, kde n odpovídá konečnému počtu prvků v řadě.

$\overline{Q_r}$... dlouhodobý průměrný průtok reálné řady [$m^3 s^{-1}$].

Model byl kalibrován a validován. Bylo provedeno rozdělení vstupních dat v poměru 70% kalibrace a 30% validace. Jako vstupní data do modelu byly použity hodnoty průměrných měsíčních teplot vzduchu $T_{a,i}$, řada měsíčních hodnot srážkového úhrnu $h_{s,i}$ a řada průměrných měsíčních průtoků $Q_{m,i}$.

3.3 Simulační model chování nádrže

3.3.1 Výpočet zásobního objemu s 100% zabezpečeností odtoku z nádrže

Simulační model chování nádrže vychází ze základní rovnice nádrže v součtovém tvaru (24).

$$V_n = V_0 + \sum_{i=1}^n (O_i(V_i) - Q_i) \Delta t \quad (24)$$

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 zabezpečenosti odtoku z nádrže menší než 100%

Ve vztahu (25), který je omezující podmínkou typu nerovnosti, představuje výraz mezi znamínky nerovností 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 dosažení 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 prázdnění 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 zabezpečenosti. 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.

$$0 \leq \sum_{i=0}^{k-1} (O_i - Q_i) \Delta t + (O_k - Q_k) \Delta t \leq V_z, \quad (25)$$

3.3.3 Výpočet zabezpečení odtoku vody z nádrže

Zabezpečení podle trvání

Obecnou definici zabezpečení vodohospodářského systému postupně popsali (Kritskiy, Menkel 1952), (Klemeš, 1967) a (Hashimoto, 1982). Klasifikace poruchy zásobního objemu nádrže pro následný výpočet zabezpečení je následující (26).

$$Z_{t,i} = \begin{cases} Z_{t,i} = 1, & O_i \geq O_p \\ Z_{t,i} = 0, & O_i < O_p \end{cases} \quad (26)$$

$Z_{t,i} = 1$ popisuje stav zásobního objemu nádrže v bezporuchovém (vyhovujícím) časovém kroku výpočtu. $Z_{t,i} = 0$ popisuje stav zásobního objemu nádrže v poruchovém (nevyhovujícím) časovém kroku výpočtu. Z hodnot $Z_{t,i}$ je možno dále dopočítat požadovanou zabezpečení. Obecně se počítá jako zabezpečení podle opakování, doby trvání a množství nedodané vody. V práci je použit vzorec pro výpočet zabezpečení podle trvání P_T (27), který je odvozen podle Čegodajeva.

$$P_T = \frac{(\sum_{i=1}^n Z_{t,i}) - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100 \quad (27)$$

Kde n je počet všech měsíců v řešeném období a suma $Z_{t,i}$ pak určuje počet bezporuchových měsíců.

Zabezpečení podle množství nedodané vody

Ve všech měsících, kdy je odtok vody z nádrže O menší než požadovaný odtok vody z nádrže O_p znamená, že nastala porucha v dodávce vody z nádrže. Zabezpečení podle dodávky vody P_D je potom dána poměrem skutečně odtoklého množství vody k plánovanému odtoklému množství v daném období, která je vypočítána opět dle Čegodajeva (28).

$$P_D = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100 \quad (28)$$

kde pro zabezpečení P_D je

m ... skutečné odtoklé množství využití vody [m^3],

n ... plánované odtoklé množství vody při nalepšeném odtoku v daném období [m^3].

Plánované odtoklé množství vody při nalepšeném odtoku v daném období lze stanovit dle vztahu n (29).

$$n = O_p \cdot t \quad (29)$$

Skutečné odtoklé množství využití vody, neboli množství dodané vody bez poruch lze stanovit dle rovnice m (30).

$$m = O_p \cdot t - \sum D, [m^3] \quad (30)$$

kde:

- O_p ...nalepšený, neboli požadovaný odtok vody z nádrže [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 t ... celkový čas v daném období [s],
 $\sum D$... hloubka poruchy, neboli objem vody nedodaný do systému [m^3].

3.3.4 Zavedení ztráty vody z nádrže

Simulační model nádrže do výpočtů zahrnuje i ztráty vody z nádrže. Ztráty jsou uvedeny ve formě ztráty vody výparem z vodní hladiny a průsakem tělesa hráze.

Zavedení ztrát do řešení probíhá ve dvou krocích, při kterých je nutné respektovat počáteční podmínku řešení simulačního modelu, čímž je plná nádrž. V prvním kroku je vypočten maximální zásobní objemu nádrže při daném O_p bez uvažování ztrát vody z nádrže. Tím je nalezen maximální objem vody v nádrži, vstupující do druhého kroku řešení. Maximální objem vody v nádrži je tvořen z objemu zásobního V_z a objemu stálého nadržení V_s . Z maximálního objemu vody v nádrži z prvního kroku se stává počáteční objem pro stavování počáteční zatopené plochy a výšky vodní hladiny v nádrži. Tyto hodnoty jsou odečteny z batygrafických křivek. K zatopené ploše je zjednodušeně dle plochy lichoběžníku stanovena potenciální průsaková, resp. průtočná plocha tělesa hráze. Průměrný měsíční výpar E_m je odvozen z hodnoty průměrného ročního výparu E_A . Velikosti E_m jsou rozpočítány podle procentuálního rozložení měsíčního výparu v průběhu roku dle ČSN 75 2405. Určením počáteční hladiny, zatopené plochy a množství E_m v počátečním měsíci je dopočítána hodnota objemu odpařené vody v daném měsíci, která je následně převedena na ztrátový odtok Q_{EVAP} . K němu je dle zadaných požadavků možno připočíst ztrátový odtok průsakem tělesem hráze Q_{PRUS} , získaný násobkem průtočné plochy a množstvím průsaku tělesem hráze na m^2 průtočné plochy. Výsledná hodnota Q_{EVAP} , nebo Q_{PRUS} , případně kombinace ztrát $Q_{EVAP} + Q_{PRUS}$ je následně odečtena od hodnoty přítoku vody Q_m do nádrže v počátečním měsíci řešení. Takto upravená hodnota přítoku Q_m do nádrže (snížená o celkový ztrátový odtok) ve druhém kroku znovu vstupuje při daném O_p do opakovaného výpočtu prázdnění nádrže na konci řešeného měsíce vzniká tak postupná bilance. Kdy pomocí popsané bilance je do výpočtu zahrnuto postupné snižování aktuální hladiny vody v nádrži v každém měsíci vlivem ztrát vody. Uvedený postup je postupně opakován pro všechny měsíce řešeného období.

3.4 Metody vyhodnocení

3.4.1 Výpočet statistických charakteristik

Střední hodnota $\mu(x)$

O poloze x-ové souřadnice těžiště funkce hustoty pravděpodobnosti $f(x)$ vypovídá střední hodnota $\mu(x)$, odpovídající hodnotě obecného prvního momentu. Odhad střední hodnoty pomocí Metody momentů je uveden ve vztahu (31):

$$\mu(x) \approx \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (31)$$

kde \bar{x} je průměr náhodného výběru, x_i jsou prvky náhodného výběru a n značí počet prvků v náhodném výběru.

Rozptyl (disperze) $D(x)$

Disperze $D(x)$ je hodnota druhého centrálního momentu. Číselným vyjádřením rozptylu hodnot náhodného výběru kolem střední hodnoty je vyjádřeno Metodou momentů jako (32):

$$D(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu(x))^2}{(n-1)}, \quad (32)$$

Směrodatná odchylka $\sigma(x)$

Je vyjádřena jako odmocnina z disperze.

Koeficient variace $C_v(x)$

Vyjádřen jako podíl směrodatné odchylky a střední hodnoty, nebo také vyjádřen jako (33):

$$C_v(x) = \frac{\sigma(x)}{\mu(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - \mu(x))^2}{(n-1)}}, \quad (33)$$

pro $k_i = \frac{x_i}{\mu(x)}$,

Koeficient variace stejně jako směrodatná odchylka a disperze vycházejí z druhého centrálního momentu.

Koeficient asymetrie $C_s(x)$

Vyjádřuje velikost nesouměrnosti k vertikální ose grafu (asymetrii). Určí se jako podíl třetího centrálního momentu a třetí mocniny směrodatné odchylky. Momentovou metodou je popsán v následujícím tvaru (34):

$$C_s(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{(n-1) \cdot C_v(x)^3}, \quad (34)$$

pro $k_i = \frac{x_i}{\mu(x)}$,

Koeficient excese (špičatosti) $E(x)$

Je definován jako podíl čtvrtého centrálního momentu a čtvrté mocniny směrodatné odchylky. Pro normální rozdělení je podíl roven třem. Proto je excese normálního rozdělení rovna nule. Momentovou metodou je koeficient špičatosti popsán vztahem (35):

$$E(x) = \frac{M_4}{\sigma(x)^4} - 3, \quad (35)$$

kde centrální moment čtvrtého řádu je vyjádřen jako (36):

$$M_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu(x))^4}{n}. \quad (36)$$

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 počáteční nastavení, resp. konfigurace" (Wieland a Wallenburg, 2012). Robustost v tomto případě je definována pomocí vzorce (37), který byl převzat z prací Paton a kol. (2014), Roach a kol. (2016).

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (37)$$

Kde:

R ... Robustnost

S_i ... je ohodnocení výsledného systému na okrajové podmínky, které jsou zatíženy nejistotou, $i = 1, \dots, N$ počtů vstupních okrajových podmínek resp. odpovídá počtu řad v ensamble. Ohodnocení je definováno jako (38).

$$S_i = \begin{cases} 1, P_i \geq P, \text{ pro } i = 1, \dots, N \\ 0, P_i < P, \text{ pro } i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (38)$$

Kde:

P_i ... výsledná zabezpečení navrhovaného řešení, $i = 1, \dots, N$ počtů vstupních okrajových podmínek, resp. vstupních řad v ensamble.

P ... požadovaná zabezpečení.

Robustnost popsána v tomto případě může nabývat intervalu od $R \in (0,1)$ a navrhované řešení je robustnější čím více se R 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. 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. Dílčí praktické aplikace popsané dále v práci byly následující. Analýza vlivu nejistot měření na zásobní objem nádrže byla provedena na nádrži Vír I, ale také na výhledovém profilu nádrže Hanušovice. Analýza nejistot dopadů změn klimatu 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

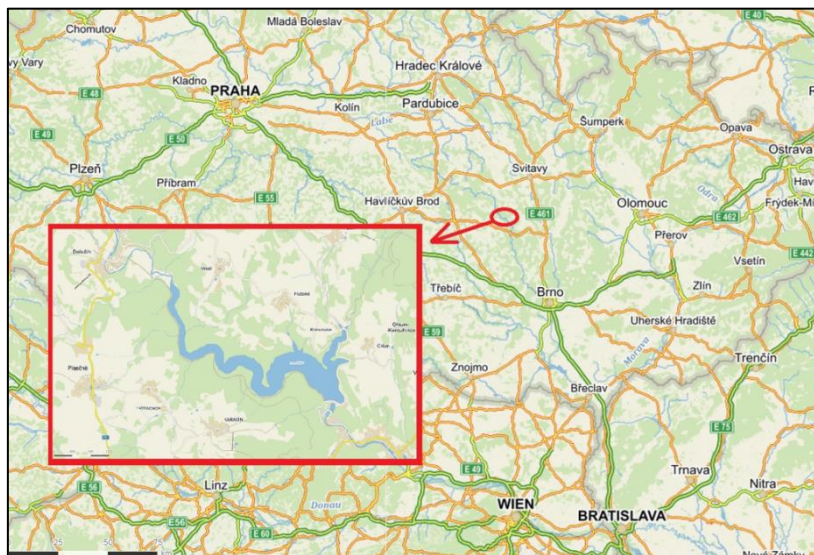
Nádrž Vír I se nachází v České republice v kraji Vysočina a slouží převážně k protipovodňové ochraně, k akumulaci povrchové vody k vodárenským a hydroenergetickým účelům, obrázek 6. Nádrž je vybudována v povodí řeky Svratky a je v provozu od roku 1957. Řeka Svratka je hlavním přítokem vody do nádrže. Vstupní hodnoty pro výpočet tvořila časová řada průměrných měsíčních průtoků v

délce 60 let a období měření 1950 až 2010. Průměrný dlouhodobý přítok vody do nádrže stanovený z této průtokové řady je $Q_a = 3,34 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Roční průměrná hodnota výparu z vodní hladiny $E_A = 613 \text{ mm}$. Hodnoty měsíčního množství výparu z vodní hladiny byly odvozeny zjednodušeně podle procentuálního rozložení hodnot výparu dle ČSN 75 2405 a z hodnoty průměrného ročního výparu pro nádrž Vír I. Měsíční rozložení výparu E_m nádrže Vír I je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1. Rozložení velikosti výparu v průběhu kalendářního roku

Měsíc	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
E_m [%]	6	9	12	14	16	15	11	7	5	2	1	2
E_m [mm]	36,78	55,17	73,56	85,82	98,08	91,95	67,43	42,91	30,65	12,26	6,13	12,26

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. Ekologický odtok z nádrže Q_{ECO} je $0.53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Hodnota průsaku tělesem hráze byla odvozena z empirického pozorování a pro gravitační betonové těleso hráze činí $0,15 \text{ l s}^{-1}$ na 1000 m^2 . Obrázek 6 ukazuje polohu nádrže Vír I.



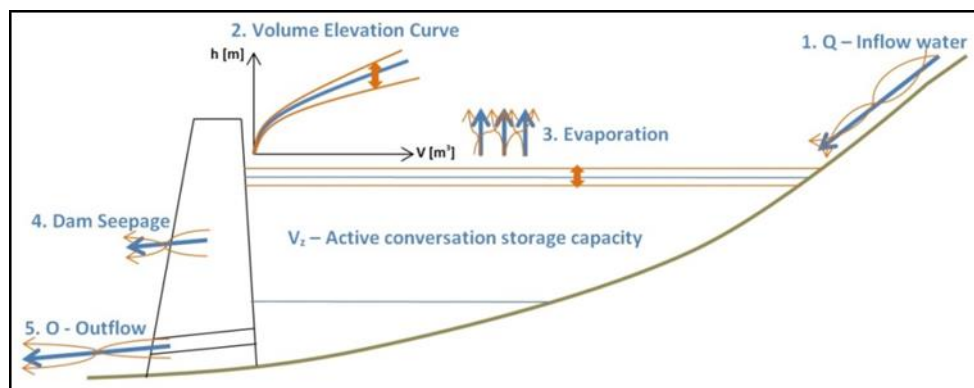
Obr. 6. Poloha nádrže Vír I.

Praktická aplikace pro reálně provozovanou nádrž Vír I byla provedena v následujícím pořadí. Nejprve byl stanoven zásobní objem nádrže v podmínkách nejistot pro 100% zabezpečení odtoku vody z nádrže. Následně byla provedena analýza zabezpečení odtoku vody z nádrže v podmínkách nejistot.

4.1.1.1 Stanovení zásobního objemu s 100% zabezpečeností odtoku z nádrže v podmínkách hydrologických a provozních nejistot

Výsledky byly převzaty z diplomové práce (Paseka, 2016). Citlivostní analýza zásobního objemu s 100% zabezpečeností odtoku vody z nádrže byla provedena v celém rozsahu nalepšeného odtoku O_p v intervalu $O_p \in \langle 0,0; 3,3 \rangle \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Počet opakování generování nejistot $PO = 300$. Celý interval vstupní nejistoty byl zadán $u_a = \pm 0,5$ až $\pm 10 \%$, respektive vyjádřeno hodnotou rozšířené nejistoty $U_a = \pm 1,5$ až $\pm 30 \%$. Analýza byla provedena bez i s uvažováním ztrát vody z nádrže. V následující části jsou prezentovány výsledky analýzy s uplatněním počáteční velikosti nejistot $U_a = \pm 3, \pm 6, \pm 9$ a $\pm 15 \%$. Nejistoty byly zavedeny na vstupní parametry jako přítoky vody do nádrže, batygrafické křivky, výpar vody z nádrže a průsak tělesem hráze a jejich kombinace. Schématické znázornění zavedení

nejistot do vstupních parametrů nádrže Vír I je uvedeno na obrázku 7, obrázek byl převzat z (Marton a kol, 2015).



Obr. 7. Symbolické zavedení uvažovaných veličin zatížených nejistotami na nádrži Vír I.

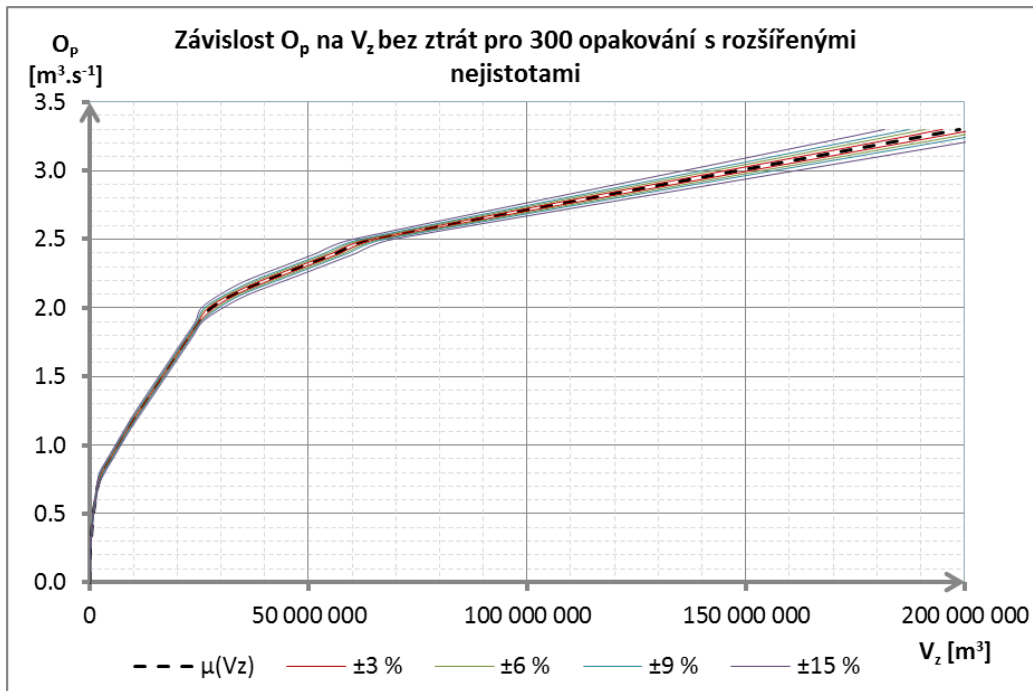
Analýza byla nejprve provedena pro výpočet bez uvažování ztrát vody z nádrže, kdy nejistotou byl zatížen pouze přítok vody do nádrže, následně byl výpočet proveden s uvažováním ztrát vody z nádrže, opět se zavedením nejistoty pouze na přítoku vody do nádrže. Dále jsou uvedeny výsledky se zatížením nejistot jednotlivě na batygrafických křivkách, výparu vody z vodní hladiny a průsaku tělesem hráze vždy s uvažováním ztrát vody z nádrže. Pro prezentaci výsledků byly tyto hodnoty statisticky vyhodnoceny. Střední hodnota $\mu(X)$ každého náhodného souboru je považována za výslednou hodnotu a směrodatná odchylka $\sigma(X)$ je považována za standardní nejistotu vztaženou k danému výsledku. Celková, rozšířená nejistota typu „ U_a “ pokrývající téměř 100%, resp. 99,97% výskytu sledované veličiny odpovídala hodnotě $\mu(X) \pm 3\sigma$.

Tabulka 2 ukazuje výpočet zásobního objemu nádrže bez uvažování ztrát vody z nádrže pro 100% zabezpečení odtoku vody z nádrže s uplatněním nejistot přítoku vody do nádrže.

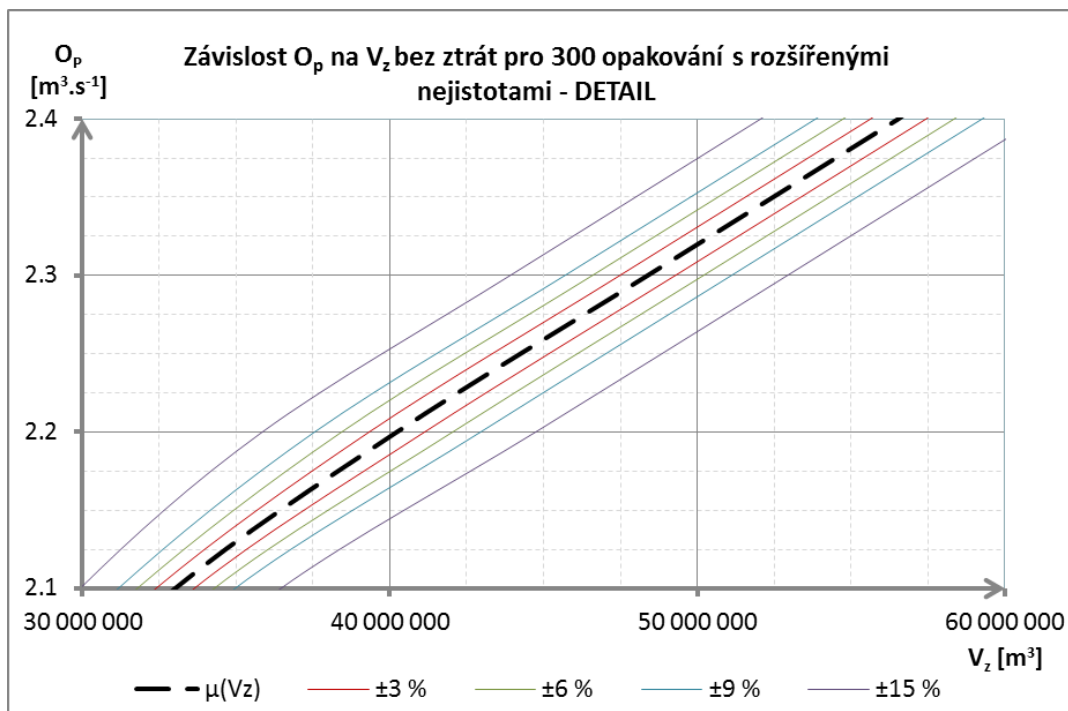
Tab. 2. Výpočet zásobního objemu nádrže bez uvažování ztrát vody z nádrže. Nejistoty měření uplatněny na přítok vody do nádrže.

O_p [m ³ .s ⁻¹]	Nejistota vstupních dat $U_a = 3\sigma$							
	±3 %		±6 %		±9 %		±15 %	
	$\mu(V_z)$ [m ³]	$\pm U_a(V_z)$ [m ³]	$\mu(V_z)$ [m ³]	$\pm U_a(V_z)$ [m ³]	$\mu(V_z)$ [m ³]	$\pm U_a(V_z)$ [m ³]	$\mu(V_z)$ [m ³]	$\pm U_a(V_z)$ [m ³]
0.0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
0.3	0,29E+06	14 580	0,29E+06	29 186	0,29E+06	43 734	0,29E+06	72 873
0.6	1,29E+06	39 394	1,29E+06	78 728	1,28E+06	118 137	1,28E+06	196 892
0.9	4,64E+06	126 772	4,65E+06	253 487	4,65E+06	380 317	4,65E+06	633 812
1.2	10,3E+06	164 553	10,3E+06	326 587	10,3E+06	478 205	10,3E+06	765 364
1.5	16,6E+06	164 553	16,6E+06	329 141	16,6E+06	493 742	16,6E+06	822 926
1.8	22,9E+06	164 553	22,9E+06	329 141	22,9E+06	493 742	22,9E+06	822 926
2.1	33,0E+06	623 019	33,0E+06	1 250 975	33,1E+06	1 898 064	33,2E+06	3 261 539
2.4	56,5E+06	902 525	56,5E+06	1 805 134	56,6E+06	2 707 659	56,6E+06	4 512 717
2.5	64,7E+06	902 523	64,7E+06	1 805 133	64,7E+06	2 707 659	64,8E+06	4 598 412
3.3	199,0E+06	3 927 274	199,0E+06	7 854 253	199,0E+06	11 600 107	200,0E+06	17 831 571

Následující obr 8 a 9 ukazují grafické výsledky výpočtů. Nejprve je na obr. 8 znázorněna závislost nalepšeného odtoku na zásobním objemu pro dané nejistoty a stanovený interval O_p . Obr. 9 pak ukazuje grafický detail závislosti pro interval $O_p \in (2,1; 2,4) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 8. Vztah mezi nalepšeným odtokem vody z nádrže a zásobním objemem nádrže, bez uvažování ztrát vody z nádrže pro vstupní nejistotu ± 3 , ± 6 , ± 9 a $\pm 15\%$.



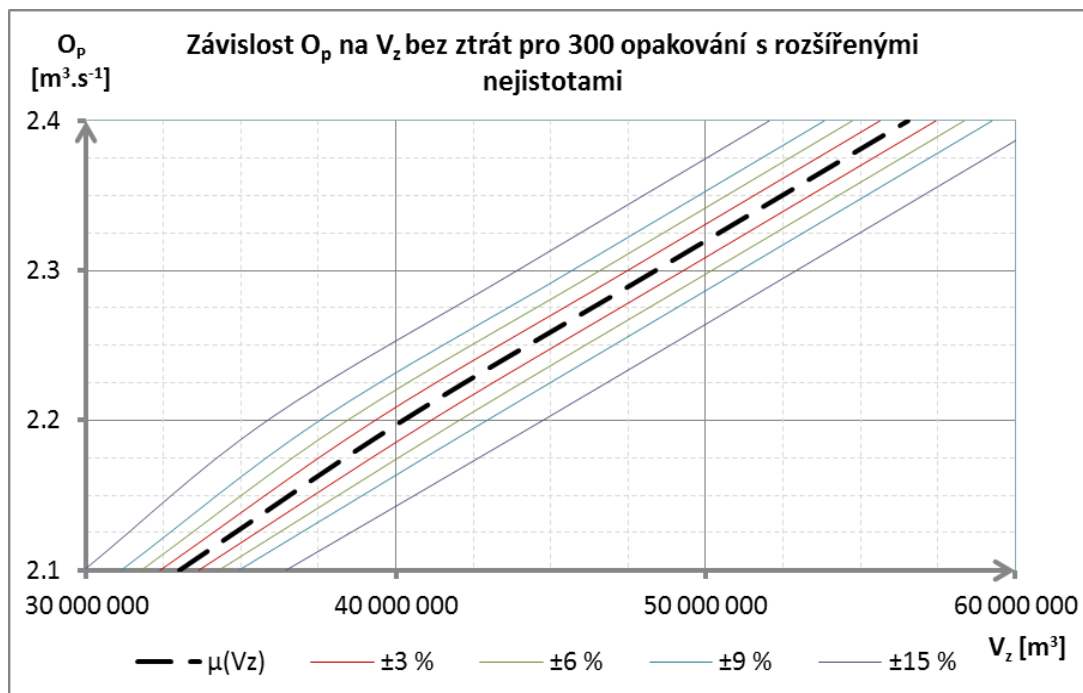
Obr. 9. Detail vztahové křivky mezi nalepšeným odtokem vody z nádrže a zásobním objemem nádrže, bez uvažování ztrát vody z nádrže pro vstupní nejistotu ± 3 , ± 6 , ± 9 a $\pm 15\%$.

Vzhledem k rozsáhlosti celé analýzy jsou dále prezentovány jen detailní výsledky výpočtu v omezeném intervalu řešení hodnot nalepšeného odtoku. Tabulka 3 a obr. 10 ukazují výpočet a graf zásobního objemu nádrže pro interval $O_p \in (2,1; 2,4) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s uvažováním ztrát vody z nádrže pro

100% zabezpečení odtoku vody z nádrže s uplatněním nejistoty na přítoku, batygrafických křivkách, výparu vody z vodní hladiny a na průsaku tělem hráze.

Tab. 3. Výpočet zásobního objemu nádrže s uvažováním ztrát vody z nádrže. Nejistoty uplatněny na přítoku, batygrafických křivkách, výparu a průsaku tělesem hráze pro O_p 2,1 až 2,4 $m^3 \cdot s^{-1}$.

Nejistota vstupních dat $U_\sigma = 3\sigma$, bez uvažování ztrát				
O_p [$m^3 \cdot s^{-1}$]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$\pm U_a(V_z)$ [m^3]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$\pm U_a(V_z)$ [m^3]
	$\pm 3\%$		$\pm 6\%$	
2.1	33 009 566	623 019.3	33 028 602	1 250 974.6
2.2	40 227 196	902 525.3	40 236 464	1 804 719.2
2.3	48 380 180	902 525.1	48 389 404	1 805 131.3
2.4	56 533 176	902 524.7	56 542 428	1 805 133.9
	$\pm 9\%$		$\pm 15\%$	
2.1	33 028 602	1 898 063.8	33 185 772	3 261 539.3
2.2	40 236 464	2 699 518.9	40 296 792	4 444 626.8
2.3	48 389 404	2 707 659.9	48 418 928	4 507 477.5
2.4	56 542 428	2 707 659.4	56 570 164	4 512 716.6

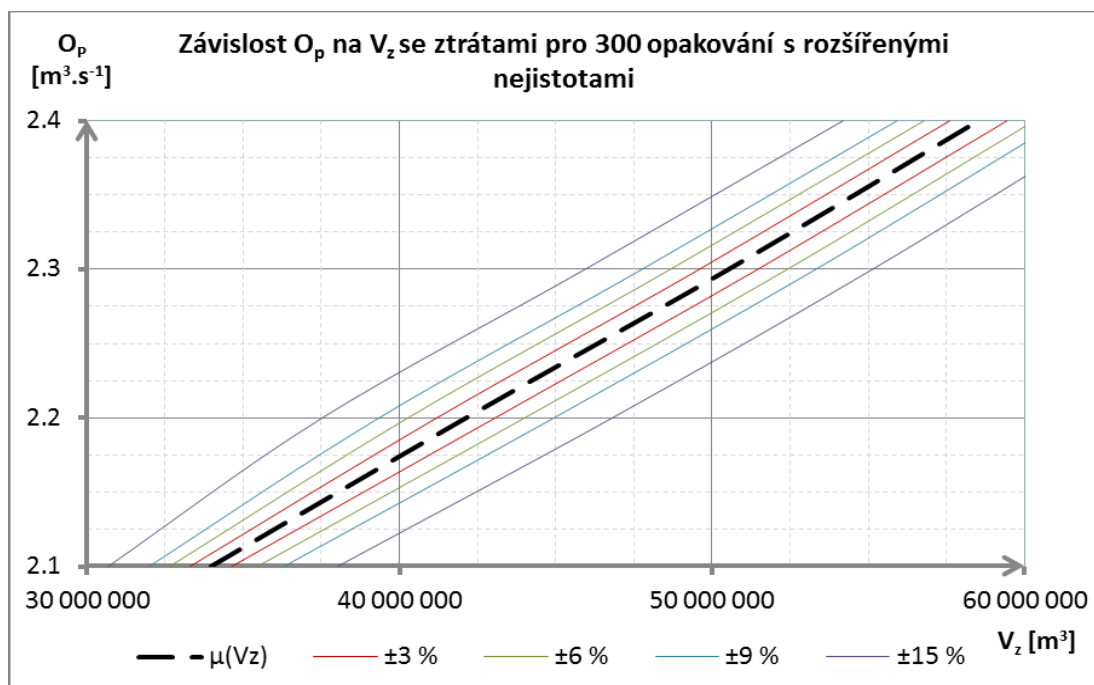


Obr. 10. Detail vztahové křivky mezi nalepšeným odtokem vody z nádrže a zásobním objemem nádrže pro O_p 2,1 až 2,4 $m^3 \cdot s^{-1}$. Nejistoty uplatněny na přítoku, batygrafických křivkách, výparu a průsaku tělesem hráze pro vstupní nejistotu ± 3 , ± 6 , ± 9 a $\pm 15\%$.

Tabulka 4 a obr. 11 ukazují detailní výpočet a graf zásobního objemu nádrže pro interval $O_p \in \langle 2,1; 2,4 \rangle m^3 \cdot s^{-1}$ s uvažováním ztrát vody z nádrže pro 100% zabezpečení odtoku vody z nádrže a s uplatněním nejistoty na všech datech vstupujících do výpočtu. Tedy přítoku, batygrafických křivkách, výparu vody z vodní hladiny a na průsaku tělesem hráze.

Tab. 4. Výpočet zásobního objemu nádrže s uvažováním ztrát vody z nádrže. Nejistoty uplatněny na přítoku, batygrafických křivkách, výparu a průsaku tělesem hráze pro O_p 2,1 až 2,4 $m^3 \cdot s^{-1}$.

Nejistota vstupních dat $U_\sigma = 3\sigma$, s uvažováním ztrát				
O_p [$m^3 \cdot s^{-1}$]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$\pm U_a(V_z)$ [m^3]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$\pm U_a(V_z)$ [m^3]
	$\pm 3\%$		$\pm 6\%$	
2.1	33 968 392	664 824.4	34 052 032	1 404 835.0
2.2	42 131 484	933 329.0	42 139 064	1 866 836.1
2.3	50 529 036	935 541.0	50 537 540	1 871 520.8
2.4	58 520 816	917 176.9	58 546 048	1 765 780.7
	$\pm 9\%$		$\pm 15\%$	
2.1	34 146 628	2 156 935.5	34 351 324	3 670 873.9
2.2	42 146 452	2 798 522.6	42 172 260	4 641 022.1
2.3	50 538 560	2 781 227.8	50 535 320	4 598 034.8
2.4	58 547 516	2 629 551.2	58 543 992	4 353 339.8



Obr. 11. Detail vztahové křivky mezi nalepšeným odtokem vody z nádrže a zásobním objemem nádrže pro O_p 2,1 až 2,4 $m^3 \cdot s^{-1}$. Nejistoty uplatněny na přítoku, batygrafických křivkách, výparu a průsaku tělesem hráze pro vstupní nejistotu ± 3 , ± 6 , ± 9 a $\pm 15\%$.

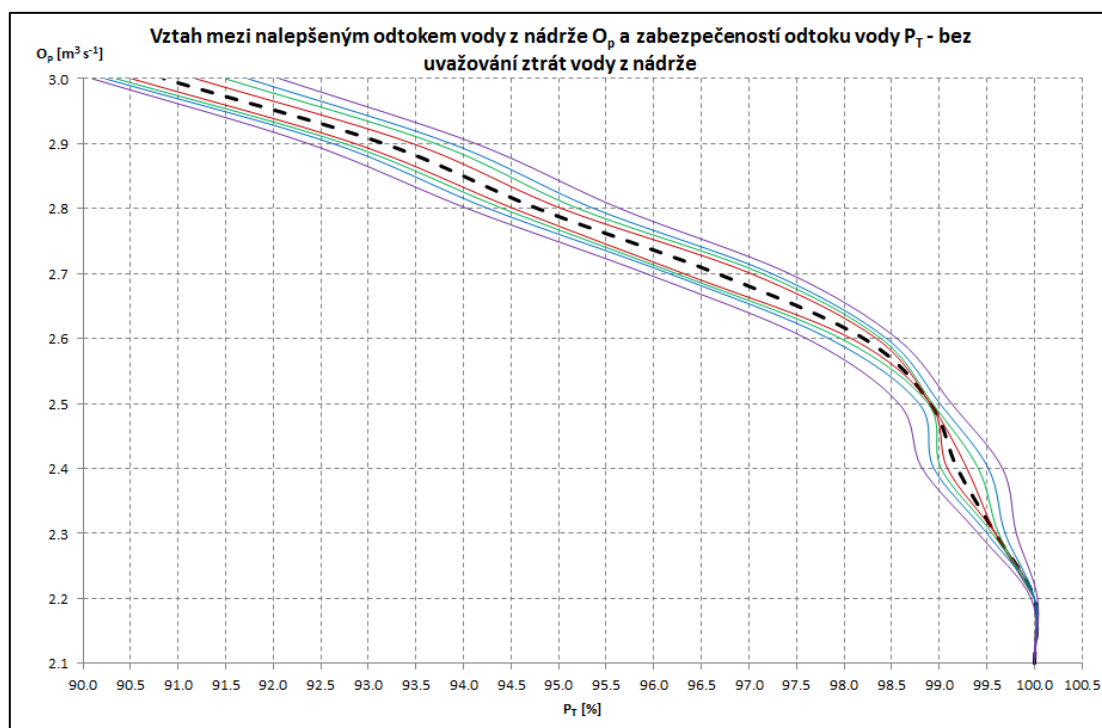
4.1.1.2 Stanovení zásobního objemu při zabezpečení odtoku z nádrže menší než 100% v podmínkách hydrologických a provozních nejistot

Prezentované výsledky byly převzaty z publikace (Marton a kol., 2015). Citlivostní analýza zabezpečení nalepšeného odtoku vody z nádrže byla provedena opět bez a s uvažováním ztrát vody z nádrže. Při uvažování ztrát vody ve výpočtech zabezpečení byly opět uplatněny popsány postupy pro generování nejistotou zatížených hydrologických, morfologických a provozních vstupů. Analýza byla provedena pro hodnoty nalepšeného odtoku O_p ležícího v intervalu $O_p \in (2,2; 3,0) m^3 s^{-1}$. Počet opakování metodou Monte Carlo byl zvolen 300. Vstupní nejistoty pro analýzu se pohybovaly v intervalu ± 3 , ± 6 , ± 9 a $\pm 15\%$. Algoritmus simulující chování nádrže také vypočítal náhodné odtoky NO_i vody z nádrže a zabezpečení podle trvání $NP_{T,i}$. Dále byly vypočteny náhodné průběhy měsíčního

plnění a prázdnění zásobního objemu nádrže. Pro lepší prezentaci výsledků byly opět tyto hodnoty statisticky vyhodnoceny. Střední hodnota $\mu(X)$ každého náhodného souboru je považována za výslednou hodnotu a směrodatná odchylka $\sigma(X)$ je považována za standardní nejistotu vztahenou k danému výsledku. Celková, rozšířená nejistota typu „ U_a “ pokrývající téměř 100%, resp. 99,97% výskytu sledované veličiny odpovídala hodnotě $\mu(X) \pm 3\sigma$. Citlivostní analýza byla provedena pro následující sadu výpočtů. Nejprve výpočet bez uvažování ztrát vody z nádrže, kdy nejistotou byl zatížen pouze přítok vody do nádrže. Tabulka 5. a obrázek 12. ukazují dosažené výsledky.

Tab. 5. Výpočet bez uvažování ztrát vody z nádrže. Nejistoty měření uplatněny na přítok vody do nádrže pro O_p 2,2 až $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

O_p [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]	Nejistota vstupních dat $U_a = 3\sigma$							
	$\pm 3\%$		$\pm 6\%$		$\pm 9\%$		$\pm 15\%$	
	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$
2.2	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	99.999	0.033
2.3	99.590	0.001	99.591	0.033	99.598	0.095	99.611	0.200
2.5	98.907	0.001	98.906	0.024	98.896	0.109	98.852	0.277
2.7	96.668	0.354	96.688	0.453	96.701	0.540	96.672	0.753
2.9	93.165	0.302	93.230	0.479	93.250	0.621	93.250	0.879
3.0	90.849	0.338	90.923	0.573	90.984	0.749	91.084	0.987

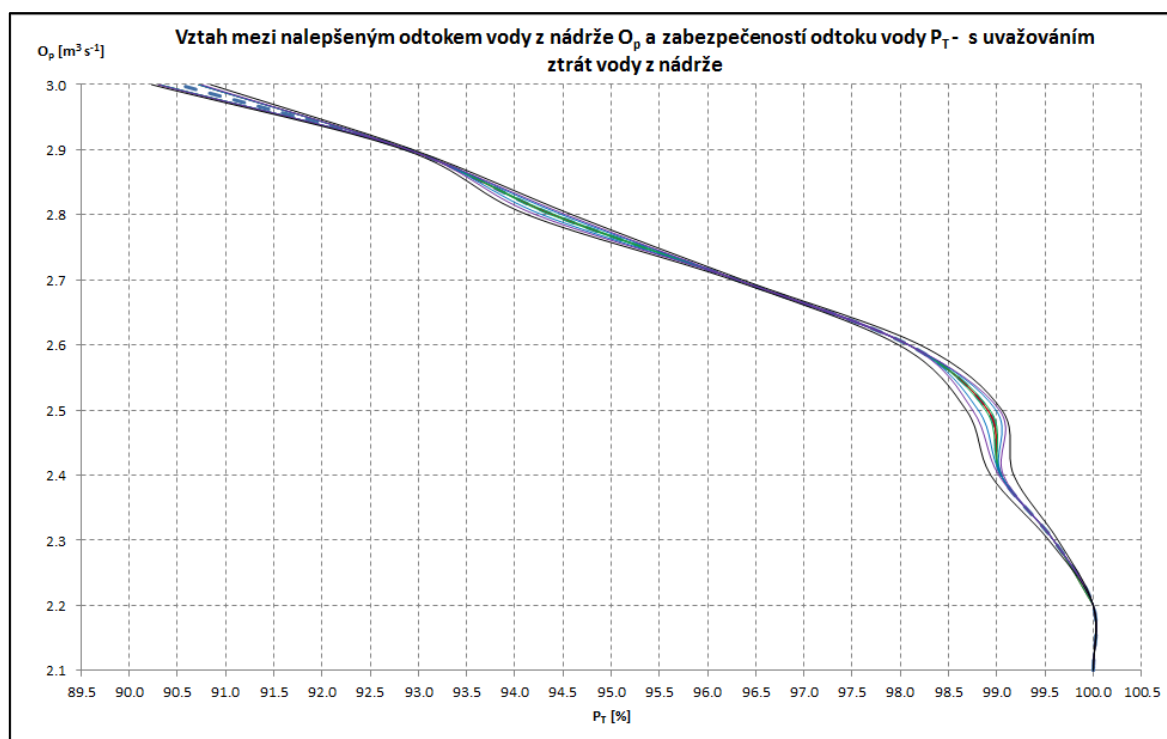


Obr. 12. Vztah mezi nalepšeným odtokem vody z nádrže a zabezpečeností odtoku vody z nádrže, bez uvažování ztrát vody z nádrže pro vstupní nejistotu ± 3 , ± 6 , ± 9 a $\pm 15\%$.

Další kombinací zavedení nejistot do výpočtu byly nejistotou zatíženy hodnoty výparu, batygrafických křivek a průsaku tělesem hráze. Výpočty byly provedeny s uvažováním ztrát vody z nádrže. Tabulka 6. a obrázek 13. ukazují výsledky pro dané nastavení výpočtů.

Tab. 6. Výpočet s uvažováním ztrát vody z nádrže. Nejistoty uvažovány pro kombinace výpar, batygrafické křivky, průsak tělesem hráze pro O_p 2,2 až $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

O_p [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Nejistota vstupních dat $U_a = 3\sigma$					
	$\pm 6\%$		$\pm 9\%$		$\pm 15\%$	
	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$
2.2	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000
2.3	99.590	0.001	99.590	0.001	99.590	0.001
2.5	98.906	0.024	98.899	0.092	98.889	0.140
2.7	96.311	0.001	96.311	0.001	96.311	0.001
2.9	92.896	0.001	92.896	0.001	92.896	0.001
3.0	90.516	0.203	90.514	0.204	90.522	0.224



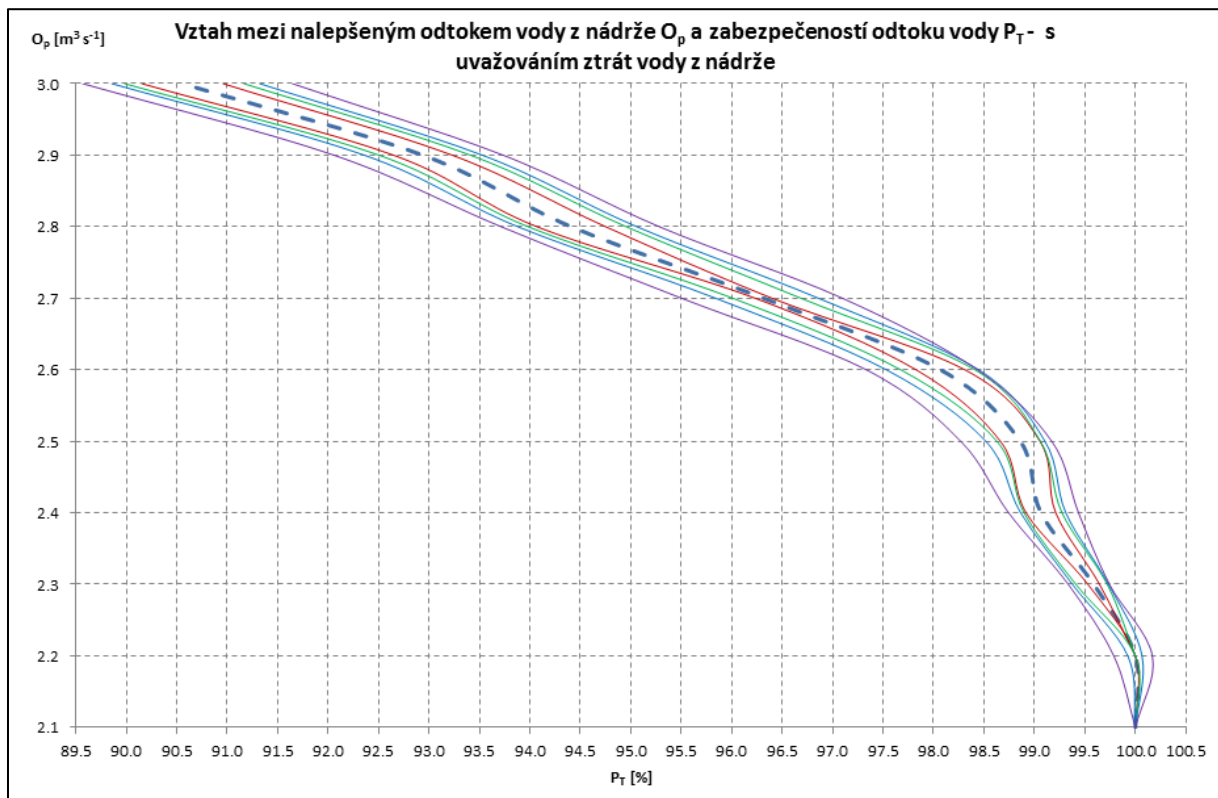
Obr. 13. Vztah mezi nalepšeným odtokem vody z nádrže a zabezpečeností odtoku vody z nádrže, s uvažováním ztrát vody z nádrže pro vstupní nejistotu ± 6 , ± 9 , ± 15 , ± 30 % a kombinaci výparu, batygrafických křivek, průsaku tělesem hráze.

Poslední prezentovanou kombinací byla kombinace zavedení nejistot do výpočtu s uvažováním ztrát vody z nádrže a nejistotou zatížený přítok vody do nádrže, výpar, batygrafické křivky a průsak tělesem hráze. Tabulka 7. a obrázek 14. Ukazuje dosažené výsledky.

Tab. 7. Výpočet s uvažováním ztrát vody z nádrže. Nejistoty uvažovány pro všechny kombinace přítok, výpar, batygrafické křivky, průsak tělesem hráze.

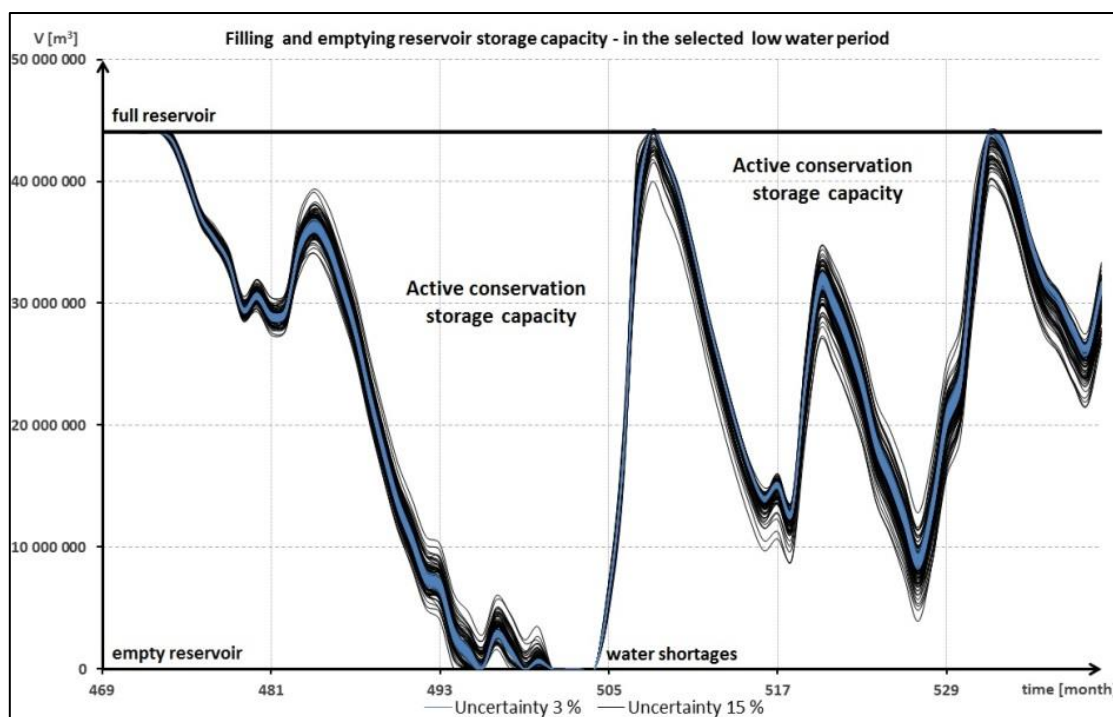
O_p [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Nejistota vstupních dat $U_a = 3\sigma$							
	$\pm 3\%$		$\pm 6\%$		$\pm 9\%$		$\pm 15\%$	
	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$
2.2	100.000	0.000	100.000	0.000	99.996	0.070	99.978	0.191

O_p [$m^3 s^{-1}$]	Nejistota vstupních dat $U_a = 3\sigma$							
	$\pm 3\%$		$\pm 6\%$		$\pm 9\%$		$\pm 15\%$	
	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$	$\mu(P_T)$	$U_a(P_T)$
2.3	99.587	0.057	99.566	0.155	99.555	0.179	99.539	0.204
2.5	98.859	0.196	98.843	0.215	98.811	0.293	98.721	0.451
2.7	96.316	0.084	96.348	0.338	96.350	0.510	96.300	0.797
2.9	92.939	0.290	92.957	0.454	92.943	0.584	92.896	0.838
3.0	90.556	0.402	90.575	0.591	90.589	0.734	90.608	1.038



Obr. 14. 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 $\pm 15\%$ a kombinaci přítoku, výparu, batygrafických křivek a průsaku tělesem hráze.

Zlňení křivek na obracích 12, 13 a 14 v rozmezí $O_p = 2.3 m^3 s^{-1}$ až $O_p = 2.5 m^3 s^{-1}$ je zapříčiněno jednak velkým časovým krokem výpočtu (1 měsíc), ale také skokovým nárůstem počtu poruchových měsíců, kterých je v daném rozmezí nalepšených odtoků vody z nádrže malý počet. Pro hodnoty $O_p = 2.6 m^3 s^{-1}$ a vyšší je patrný plynulý nárůst poruchových měsíců, díky kterému jsou křivky hladké. Výraznější interval rozestupu u křivek na obr. 14 oproti obr. 12 a 13 v oblasti nalepšeného odtoku vody z nádrže $O_p = 2.2 m^3 s^{-1}$ je dán počtem poruchových měsíců vyskytujících se ve vyhodnocovaném souboru. Nahodilost procesu uplatněná při zavedení nejistot do všech vstupních dat řešení má za následek značný nárůst počtu poruchových měsíců ve srovnání s řešením, kde jsou uplatněny pouze nejistoty přítoku vody do nádrže, resp. nejistoty pro kombinaci výparu, batygrafických křivek a průsaku tělesem hráze. Součástí analýzy byly i hodnoty plnění zásobního objemu nádrže. Obr. 15 pak ukazuje průběh plnění nádrže pro uvedený počet opakování a pro vybrané málovodé období.



Obr. 15. Průběh plnění zásobního objemu nádrže v podmínkách zadaných nejistot vstupních dat $U_a = \pm 3\%$ a $\pm 15\%$ pro vybrané málovodé období.

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 poskytnuty v rámci znaleckého posudku k nádrži Hanušovice (Marton, 2017). V rámci výzkumné činnosti pak byl návrh rozšířen o analýzu nejistot nádrže Hanušovice prezentovanou této části praktické aplikace a publikovanou v článkách (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. Jednalo 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. Obrázek 16 ukazuje umístění možných profilů hráze.

Základní hydrologické údaje o povodí pro jednotlivé varianty řešení jsou následující:

- Varianta A

Pro výpočet byla použita vstupní hydrologická řada průměrných měsíčních průtoků jako součet z profilů Vlaské a Habartice za období 1949 – 2014, získaná pro profily od ČHMÚ pobočka Ostrava. Vliv mezipovodí, které leží mezi profily byl zanedbán. Dlouhodobý průměrný průtok byl stanoven na $Q_a = 4.0875 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ekologický průtok tvořící hranici sucha je dán hodnotou Q_{355} odpovídající průtoku $1,04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Hodnota průměrného měsíčního výparu byla odvozena pro střední plnění nádrže a byla brána jako $E_A = 700 \text{ mm}$.

- Varianta B

Vstupní hydrologická řada byla použita řada průměrných měsíčních průtoků stanovená z měření průtoků v profil Habartice na řece Krupá za období 1949 – 2014 – ČHMÚ pobočka Ostrava.

Dlouhodobý průměrný průtok byl stanoven na $Q_a = 2,12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ekologický průtok tvořící hranici sucha je dán hodnotou Q_{355} odpovídající průtoku $0,54 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Hodnota průměrného měsíčního výparu byla odvozena pro střední plnění nádrže a byla brána jako $E_A = 700 \text{ mm}$.

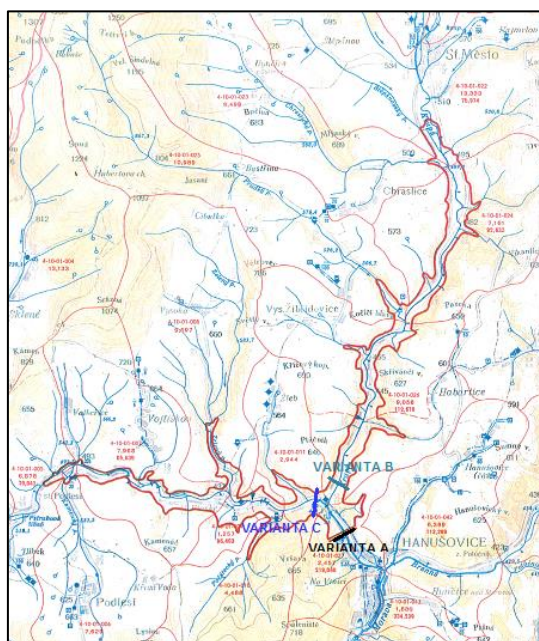
- Varianta C

Vstupní hydrologická řada byla použita řada průměrných měsíčních průtoků z profilu Vlaské na řece Moravě za období 1949 – 2014. Data poskytl ČHMÚ pobočka Ostrava. Dlouhodobý průměrný průtok byl stanoven na $Q_a = 1,88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ekologický průtok tvořící hranici sucha je dán hodnotou Q_{355} odpovídající průtoku $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Hodnota průměrného měsíčního výparu byla odvozena pro střední plnění nádrže a byla brána jako $E_A = 700 \text{ mm}$.

Dále pak průměrná hodnota ročního výparu z vodní hladiny byla stanovená pro odhadovanou průměrnou nadmořskou výšku plnění nádrže 459,25 m n. m. Průměrný roční výpar E_A byl následně rozpočítán na jednotlivé měsíční hodnoty výparu podle normy Vodohospodářské řešení nádrže (ČSN 75 2405 2004), viz tabulka 8. Batygrafické křivky byly stanoveny pomocí GIS softwaru a digitálního modelu terénu odvozeného z vrstevnicové mapy ZABAGED – výškopis grid 10x10.

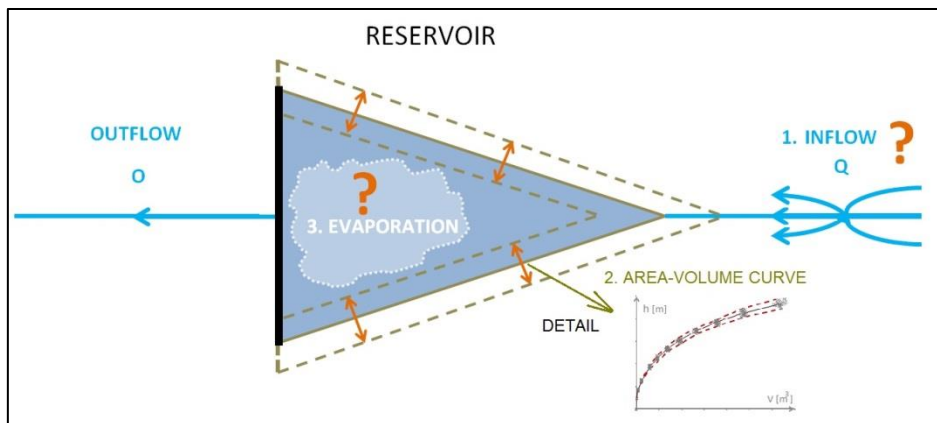
Tab. 8. Rozložení velikosti výparu v průběhu kalendářního roku

Měsíc	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
E_m [%]	6	9	12	14	16	15	11	7	5	2	1	2
E_m [mm]	42	63	84	98	112	105	77	49	35	14	7	14



Obr. 16. Výhledové varianty vodního díla Hanušovice.

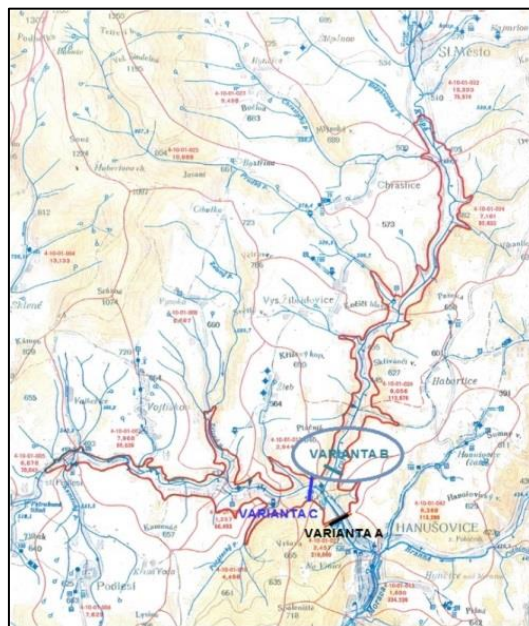
Nejistoty do návrhu zásobního objemu nádrže Hanušovice byly zavedeny pouze na přítoku vody do nádrže, batygrafických křivkách a výparu vody z nádrže. Průsak tělesem nádrže, podložím, netěsností uzávěrů není uvažován. Schéma zavedení nejistot je znázorněno na obrázku 17.



Obr. 17. Symbolické zavedení uvažovaných veličin zatížených nejistotami do návrhu nádrže Hanušovice.

4.1.2.1 Stanovení zásobního objemu s 100% zabezpečeností odtoku z nádrže v podmínkách hydrologických a provozních nejistot

Výsledky uvedené níže jsou přezvaty z publikací (Marton, Starý, Paseka, Menšík, 2016 a) a (Marton, Paseka, Knoppová, 2016 b). Prezentované výsledky výpočtů jsou provedeny pro jednu ze tří požadovaných variant umístění tělesa hráze a to pro variantu B. Umístění profilů nádrže je ukázáno na obrázku 18.



Obr. 18. Profily vodního díla Hanušovice, včetně varianty B na řece Krupá.

Úloha byla počítána s ohledem na výpočet zásobního objemu V_z pro 100% zabezpečenost odtoku vody z nádrže. Nalepšený odtok vody z nádrže O_p byl konstantní pro všechny měsíce v roce a pohyboval se v rozpětí $1,294 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ až $1,725 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Hodnota rozšířené nejistoty byla zadávána konstantně pro všechny vstupní parametry v rozmezí $\pm 3\%$, $\pm 6\%$ a $\pm 9\%$. Počet opakování generace náhodných vstupních parametrů metodou Monte Carlo byl roven 300.

Tabulky 9 a 10 ukazují nejistoty zásobního objemu V_z pro nalepšený odtok O_p v intervalu $1,294 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ až $1,725 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ v závislosti na měnících se hodnotách nejistot vstupních dat. V tabulce je zobrazen průměrný zásobní objem $\mu(V_z)$ ze všech opakování simulací provozu nádrže a maximální odchylka

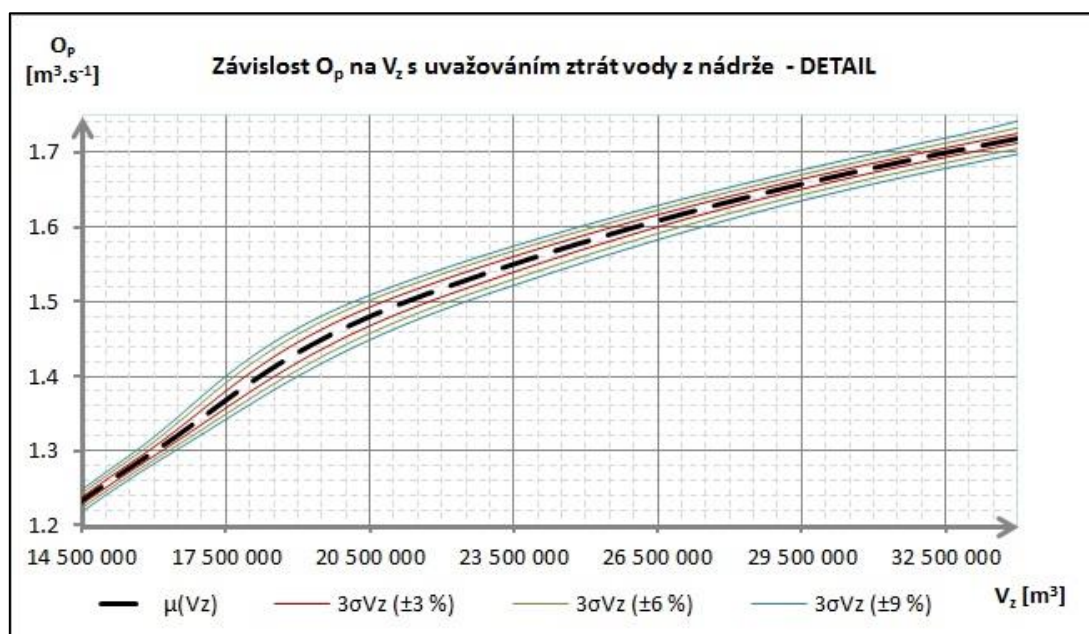
(nejistota) od zásobního objemu $3\sigma(V_z)$. Výpočet je proveden bez uvažování a s uvažováním ztrát vody z nádrže. Obrázek 19 pak ukazuje grafické vyjádření provedených výpočtů.

Tab. 9. Velikosti zásobního objemu nádrže V_z a jeho nejistoty bez uvažování ztrát.

Počáteční nejistota		±3 %		±6 %		±9 %	
α	O_p [$m^3 \cdot s^{-1}$]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$3\sigma(V_z)$ [m^3]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$3\sigma(V_z)$ [m^3]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$3\sigma(V_z)$ [m^3]
0.6	1.294	15 685 173	±136 281	15 683 948	±272 594	15 684 797	±400 799
0.7	1.509	21 015 834	±412 487	21 068 108	±718 562	21 135 526	±999 594
0.8	1.725	33 473 344	±483 191	33 469 528	±966 486	33 469 696	±1 454 790

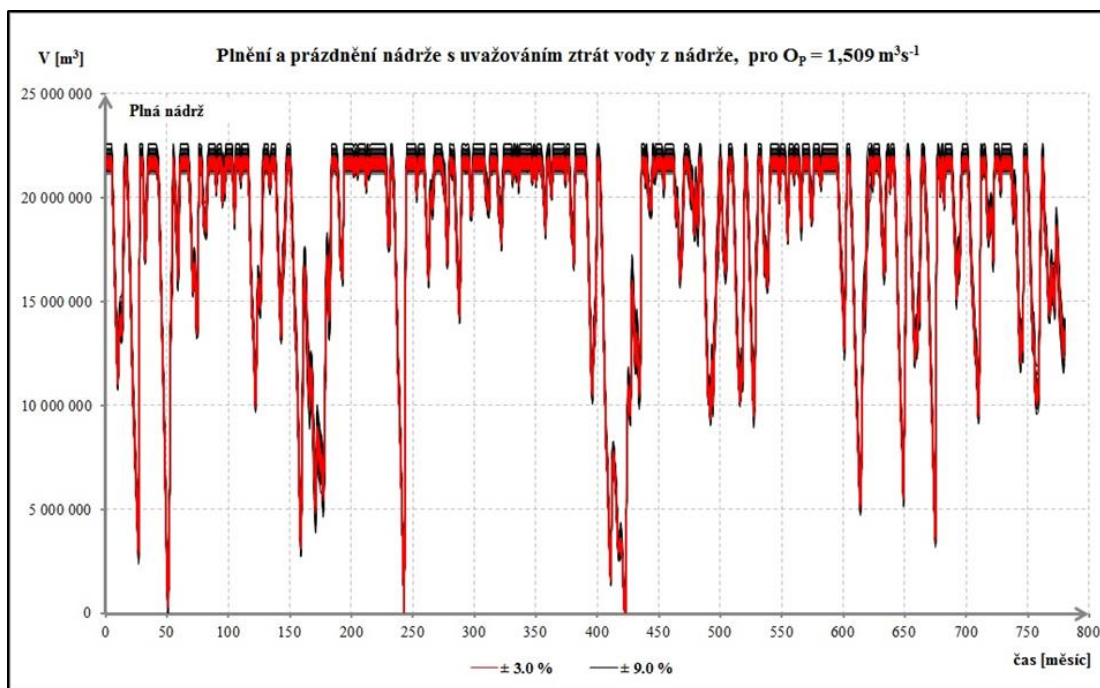
Tab. 10. Velikosti zásobního objemu nádrže V_z a jeho nejistoty s uvažováním ztrát.

Počáteční nejistota		±3 %		±6 %		±9 %	
α	O_p [$m^3 \cdot s^{-1}$]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$3\sigma(V_z)$ [m^3]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$3\sigma(V_z)$ [m^3]	$\mu(V_z)$ [m^3]	$3\sigma(V_z)$ [m^3]
0.6	1.294	15 877 601	±136 885	15 877 352	±269 794	15 883 911	±394 527
0.7	1.509	21 653 918	±487 466	21 676 206	±874 343	21 725 266	±1 194 090
0.8	1.725	34 538 616	±551 613	34 604 240	±1 148 951	34 673 572	±1 753 410



Obr. 19. Závislost nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p a zásobního objemu V_z s uvažováním nejistot vstupních parametrů a ztrát vody z nádrže.

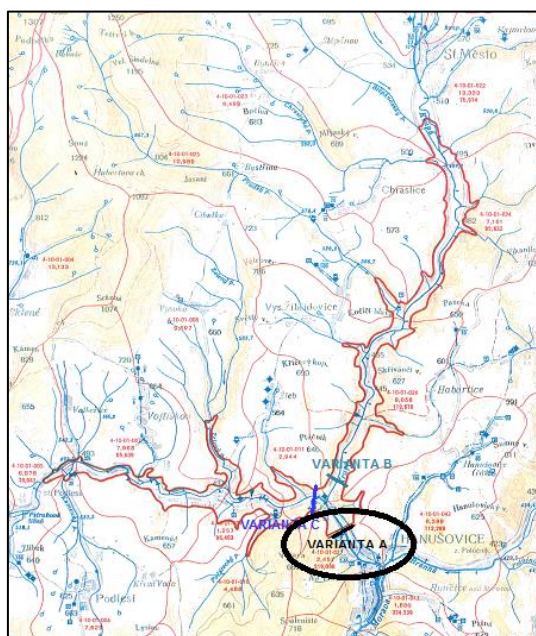
Výsledky byly získány v podobě náhodných zásobních objemů pro volenou nejistotu vstupních parametrů a nalepšený odtok vody z nádrže. Výpočty byly provedeny s a bez uvažování ztrát vody z nádrže. Ukázka výsledků je prezentována na obrázku 20. Kde jsou zobrazeny náhodné průběhy prázdnění nádrže v řešeném období. Výpočet je proveden pro nalepšenou hodnotu odtoku vody z nádrže $O_p = 1,509 m^3 s^{-1}$ a hodnotu nejistoty vstupních parametrů $\pm 3\%$ a $\pm 9\%$. Spektrum průběhu čar ukazuje citlivost náhodných průběhů prázdnění nádrže na zadanou velikost nejistoty vstupních dat a na výsledné spektrum zásobních objemů nádrže.



Obr. 20. Průběh prázdnění a plnění zásobního objemu nádrže Hanušovice v podmínkách nejistot vstupních parametrů.

4.1.2.2 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). Prezentované výsledky výpočtů jsou provedeny pro jednu ze tří požadovaných variant umístění tělesa hráze, pro největší variantu A. Umístění profilů nádrže je ukázáno na obrázku 21.



Obr. 21. Varianta profilu A vodního díla Hanušovice

Návrh nádrže byl proveden s ohledem na výpočet zásobního objemu V_z pro 100% zabezpečení. Dále byla provedena i analýza zabezpečení zásobního objemu nádrže. Hodnota ročního výparu z vodní hladiny $E_{\text{ANNUAL}} = 700$ mm z odhadované nadmořské výšky vodní hladiny přibližně 460 m n. m. 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. Navrhovaný profil nádrže je umístěn pod soutokem řek Moravy a Krupé, nejbližší vodoměrný profil je Raškov. Průtoková řada pro profil hráze byla zjednodušeně uvažována jako součet průtokových řad Vlaské a Habartice. Vliv mezipovodí byl mezi profily zanedbán. Průměrný dlouhodobý průtok Q_a je $4.087 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Tabulka 11 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. 11 Zásobní objem nádrže s uvažováním nejistot pro 100% zabezpečení nádrže.

Počáteční nejistota		$\pm 6 \%$			$\pm 9 \%$		
α	$O_p [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$\mu(V_z) [\text{m}^3]$	$3\sigma(V_z) [\text{m}^3]$		$\mu(V_z) [\text{m}^3]$	$3\sigma(V_z) [\text{m}^3]$	
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 odpovídá 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 generace náhodných vstupních parametrů metodou Monte Carlo byl roven 300.

Tabulka 12 prezentuje výsledky analýzy výpočtů zabezpečení 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. Prvotně byla analýza provedena pro hodnoty nalepšeného odtoku 0,7 až 0,78. V průběhu výpočtů se ukázalo, že pro koeficient nalepšení $\alpha = 0,7$ není výsledná zabezpečení $P_T = 100 \%$, ale pouze 99,90 %. Aby bylo docíleno zabezpečení 100 % pro nejistotu $\pm 6 \%$, byl snížen požadovaný odtok, konkrétně na $\alpha = 0,693$ a pro nejistotu $\pm 9 \%$ až na $\alpha = 0,690$. Nahodilost vstupních hodnot, resp. vstupní nejistota, které v určitém množství případů řadu podhodnotí, způsobí i podhodnocení hodnoty zabezpečení.

Tab. 12. Výpočet zabezpečení odtoku vody z nádrže podle trvání s uvažováním vstupních nejistot.

Počáteční nejistota		$\pm 6 \%$			$\pm 9 \%$		
α	$O_p (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu(R_T) (\%)$	$2\sigma(R_T) (\%)$	$3\sigma(R_T) (\%)$	$\mu(R_T) (\%)$	$2\sigma(R_T) (\%)$	$3\sigma(R_T) (\%)$
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

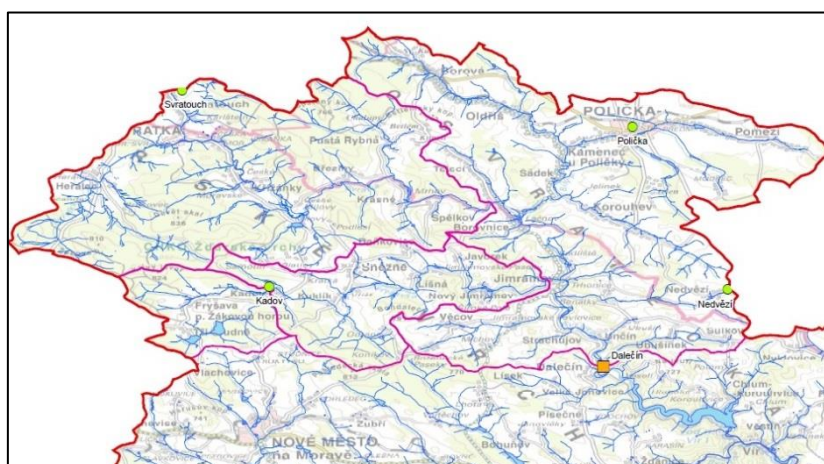
Počáteční nejistota		±6 %			±9 %		
a	$O_p (m^3 \cdot s^{-1})$	$\mu(R_T) (%)$	$2\sigma(R_T) (%)$	$3\sigma(R_T) (%)$	$\mu(R_T) (%)$	$2\sigma(R_T) (%)$	$3\sigma(R_T) (%)$
0.74	3.025	99.30	±0.18	±0.26	99.29	±0.24	±0.36
0.76	3.107	98.49	±0.14	±0.22	98.52	±0.21	±0.31
0.78	3.188	98.06	±0.22	±0.33	98.02	±0.25	±0.38

4.2 Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistot změn klimatu

Průběh sestavení praktické aplikace je následující. Nejprve jsou vygenerována klimatická data v LARS WG. Dále je 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 jsou následně vkládány downscalovaná klimatická data. Bilanční model provede výpočet. Výsledkem výpočtu jsou řady průměrných měsíčních hodnot povrchového, podzemního a celkového odtoku vody v povodí. Opakovaným vkládáním klimatických dat pro různé klimatické modely a emisní scénáře jsou sestrojeny ensembly hydrologických dat zatížené nejistotou klimatických modelů a emisních scénářů. Výsledné ensembly jsou 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 dále uvažuje s daty z meteorologických stanic Polička a Svatouch. Klimatologická data ze stanic Polička a Svatouch byla k dispozici s nejdelším záznamem měření a v kompletním stavu, resp. bez žádné přetržky v měření. Z tohoto důvodu byly v práci použity data pouze ze dvou stanic. Data obsahovali řadu průměrných měsíčních a 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 data za období 1964 - 2016. Klimatická a hydrologická data poskytl Český hydrometeorologický ústav pobočka Brno. Rozmístění klimatologických stanic a vodoměrné stanice v povodí jsou zobrazeny na obrázku 22.



Obr. 22. Rozmístění klimatologických stanic a vodoměrné stanice v povodí řeky Svatky.

Technické parametry nádrže Vír I byly popsány v kapitole 3.1.1. Tedy jen zkráceně. 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 zabezpečenost 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 dílčí odběry pro oblast Žďársko nad Sázavou a odběry do Vířského oblastního vodovodu. Hodnota výparu byla do výpočtů nastavena na hodnotu $E_{\text{ANNUAL}} = 700 \text{ mm}$. 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. Program LARS WG nabízí možnosti sestavení náhodných průběhů klimatologických dat dle klimatologického modelu a emisních scénářů SRES. Standardně jsou v programu obsaženy statistické charakteristiky upravující výsledná generovaná data pro 15 klimatických modelů a tři SRES emisní scénáře A1B, B1 a A2.

Pro další prezentaci budou scénáře prezentovány následovně. Scénář A1B bude dále chápán jako scénář vyrovnaný s pohledu koncentrací CO_2 v atmosféře. Scénář B1 bude považován za optimistický z pohledu snižování koncentrací CO_2 v atmosféře a scénář A2 bude dále brán jako pesimistický scénář s pokračujícím navyšováním koncentrace CO_2 v atmosféře. Podrobný popis významu SRES scénářů vychází ze standardního popisu hodnotící zprávy AR4 a je popsán výše v kapitole 1.2.1. Tabulka 13 ukazuje přehled všech v práci použitých klimatických modelů a jejich kombinací s emisními scénáři.

Tab. 13. Přehled GCMs modelů a emisních scénářů SRES a používaných v programu LARS WG.

IPCC 4 (CMPI3)			
i	Model	Emisní scénář	Instituce
1	BCM2	A1B	Bjerknes Centre for Climate Research, Norway
2		B1	
3	CGMR	A1B	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Canada
4	CNCM3	A1B	Centre National de Recherches Meteorologiques, France
5		A2	
6	FGOALS	A1B	National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Chinese
7		B1	
8	GFCM21	A1B	Geophysical Fluid Dynamics Lab, USA
9		A2	
10		B1	
11	GIAOM	A1B	NASA Goddard Institute, USA
12		B1	
13	HADCM3	A1B	UK Met Office - Hadley Centre for Climate Prediction and Research, UK
14		A2	
15		B1	
16	INCM3	A1B	Institute for Numerical Mathematics, Russia
17		A2	
18		B1	
19	IPCM4	A1B	Institute Pierre Simon Laplace, France
20		A2	

IPPC 4 (CMPI3)			
i	Model	Emisní scénář	Instituce
21		B1	
22	MIHR	A1B	Nation Institute for Enviromental Studies, Japan
23		B1	
24	MPEH5	A1B	Max - Planck Institute for Meteorology, Germany
25		A2	
26		B1	
27	NCCCSM	A1B	National Centre for Atmospheric, USA
28		A2	
29		B1	

Program vždy umožnil generovat klimatologická data pro tři časové úseky nazvané a dále používané jako, Období I tzv. blízká budoucnost, které popisuje období let 2011 až 2030. Období II tzv. středně vzdálená budoucnost charakteristická pro roky 2046 až 2065. Období III je popisováno jako období vzdálené budoucnosti charakteristické pro roky 2080 až 2099.

Jak bylo popsáno výše programem LARS WG byla získána klimatologické data z patnácti různých realizací klimatických modelů a tří možnosti emisních scénářů. Celkem bylo možno sestavit ensemble 29 kombinací klimatických modelů pro tři definovaná časová období I, II a III. Každé časové období bylo odpočítáno tak, aby odpovídalo délce 30 let. Pro větší pokrytí nejistoty budoucího vývoje klimatu byla nastavena délka generované řady v jednom období na trojnásobek délky časové řady každého období. Byla zvolena délka generované řady 90 let, resp. byly generovány tři možné průběhy vývoje klimatického systému v každém časovém období a kombinaci klimatického modelu s emisním scénářem. Výsledný ensemble klimatických dat popisující možnou klimatickou změnu obsahoval soubory 87 průběhů časových řad, který byl dle potřeby upravován. Ensemble klimatických dat byl dále vkládán do kalibrovaného a validovaného bilančního modelu. Výsledkem pak byl ensemble hydrologických dat zatížených klimatickou změnou.

4.2.2.2 ENSEMBLES downcaling portal

Jak bylo popsáno v kapitole 3.2.2.2. pro sestavení downscaling modelu je nutné provést tři základní kroky. Nejprve je nutné vytvořit Prediktor. Soubor informací o daném území, velikosti gridu, časových a prostorových informacích klimatologických veličin a informací o kompatibilních typech GCMs modelů. Obrázek 23 ukazuje výběr a nastavení gridu nad územím ČR. Velikost výběru odpovídá také maximálnímu možnému výběru dostupných klimatologických stanic.



Obr. 23. Tvorba Prediktoru, výběr gridu nad územím ČR.

Pro vytvoření prediktoru bylo zvoleno následující nastavení:

- 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.
- Proměnné max. a min. teploty, teploty 2 m nad povrchem a úhrny srážek byly zvoleny pro prostorově a časové rozlišení 2D/12.
- GCM model, který byl pro dané požadavky k dispozici z možných 8 GCMs modelů, byl norský The Norwegian Earth System Model - CMIP5-NORES-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.

Po nastavení Prediktoru byl následně vytvořen Prediktant. Obrázek 24 ukazuje tvorbu Prediktantu včetně zobrazení dostupných klimatologických stanic v celé vybrané oblasti.



Obr. 24. Tvorba Prediktantu a výběr klimatických stanic.

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. Dále byl zvolen dataset ECA_EUROPE a proměnné srážky resp. srážkové úhrny a průměrné teploty vzduchu 2 m nad povrchem.

Dalším krokem práce s portálem byl výběr downscaling metody. Aby byla postihnuta míra nejistoty generování resp. downscalingu byly nastaveny všechny dostupné metody, které měl portál pro požadovaný výběr Prediktantu a Prediktoru k dispozici. Byly použity následující čtyři metody downscalingu :

- Non-Generative (algorithmic), typ Analogová metoda. Počet analogů nastaven na 1 a metoda analogu průměr.
- Generative (model-based), typ Lineární regrese. Nastavení metody bylo ponecháno tak jak jej metoda nabízela.
- Generative (model-based), typ Generalizovaná lineární metoda. Nastavení metody bylo ponecháno tak jak jej metoda nabízela.
- Generative (model-based), typ Kvantitativní regrese. Nastavení metody bylo ponecháno tak jak jej metoda nabízela.
- Generative (model-based), typ Neuronové sítě (ELM). Nastavení metody bylo ponecháno tak jak jej metoda nabízela. Jen Počet skrytých neuronů v neuronové síti byl nastaven na 100.

Pro každou volenou metodu byla provedena validace downscaling metody a následně byly vytvořeny sady klimatologických dat v podobě řady denních srážkových úhrnů a denních průměrných teplot vzduchu 2 m na povrchem. Tato data byla vytvořena pro BIAS řadu a dále pro dostupné emisní scénáře RCP 4,5 a 8,5. Výsledkem tedy byla jedna BIAS řada dat denních hodnot srážek a teplot. Dále bylo k dispozici osm souborů klimatických dat pro čtyři výše jmenované downscaling metody a dva emisní scénáře RCP 4,5 a 8,5. Délka downscalingových řad byla 89 let za období 2010 - 2099.

Pro jednotlivé downscale metody jsou dále v práci použity zkratky LR - Lineární regrese, AN - Analogová metoda, EML - metoda neuronových sítí a KOMBI - kombinace (Generalizovaná lineární metoda) pro řady srážkových úhrnů a Kvantitativní regrese - řadu teploty vzduchu.

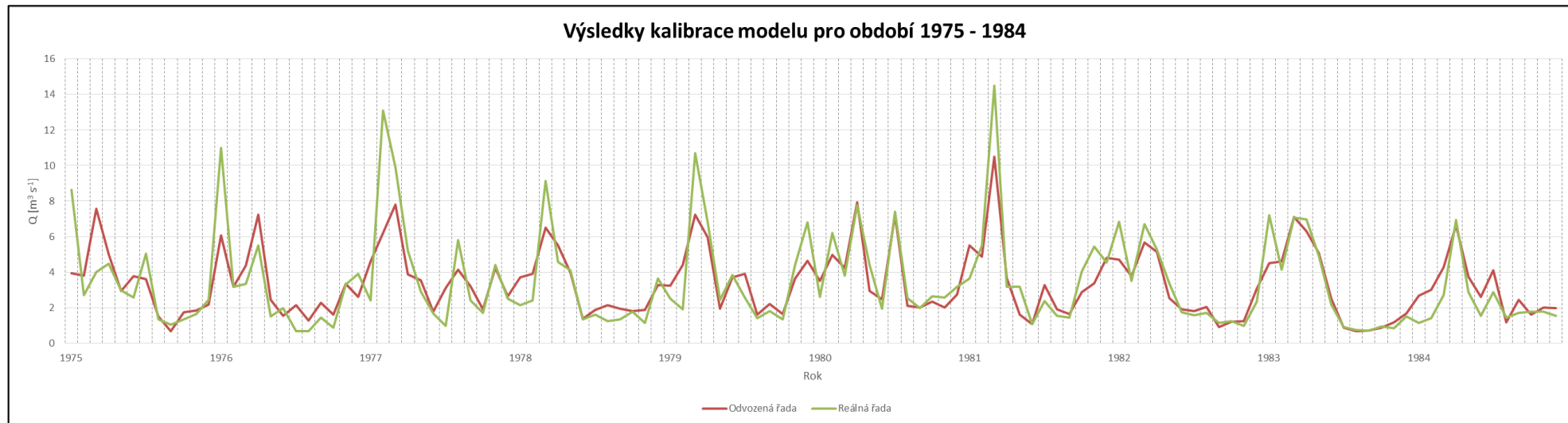
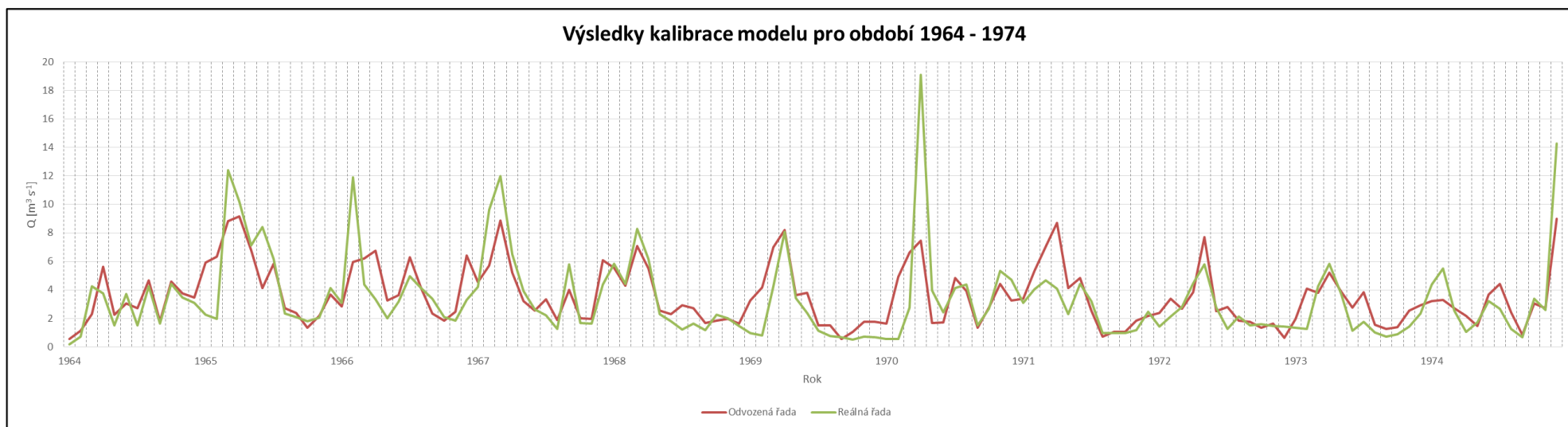
Klimatická data byla na závěr upravena tak, aby jejich hodnoty byly použitelné pro povodí řeky Svatky a odpovídaly podobným klimatologickým parametrům ze stanic Svatouch a Polička. Za tímto účelem byla provedena analogová BIAS korekce klimatologických dat podle dlouhodobých průměrných hodnot srážkových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

4.2.3 Kalibrace a validace hydrologického modelu

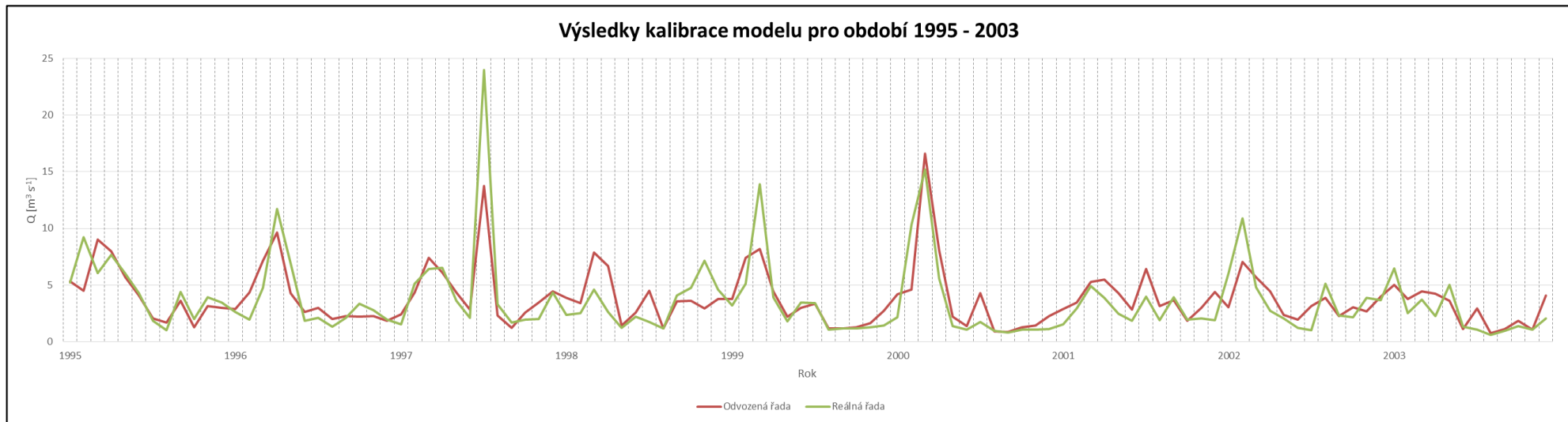
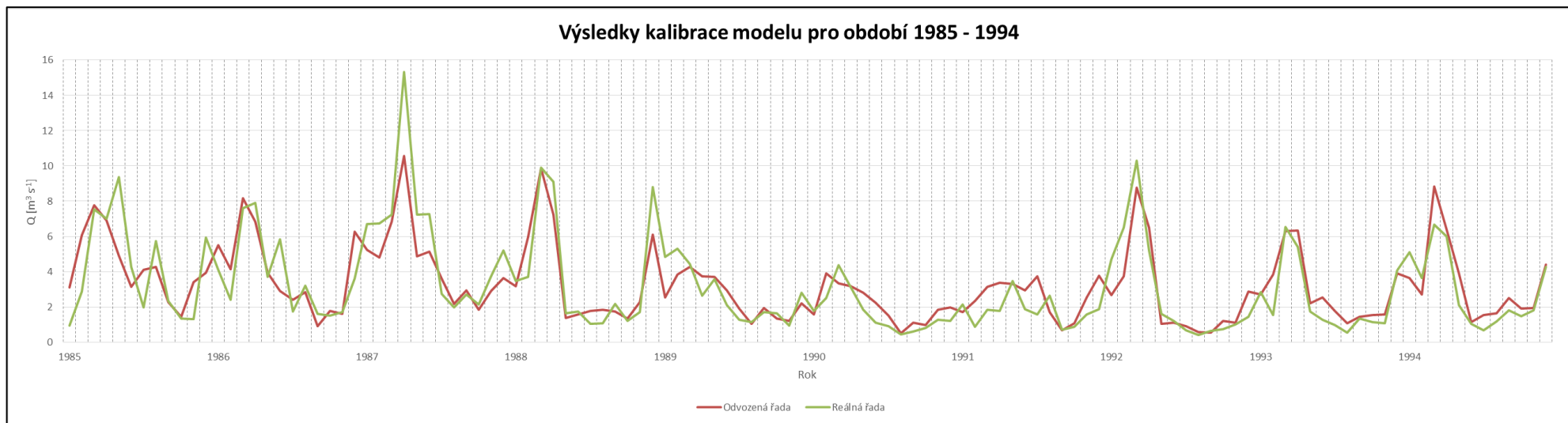
V (Knoppová, 2018) bylo provedeno detailní testování možností kalibrace a validace hydrologického modelu na povodí řeky Svatky. Vstupem do kalibrací byla vždy data průměrných měsíčních teplot, srážek a průtoků. Z práce vyplynuly základní parametry nastavení bilančního modelu. Nejlepších výsledků dosahoval 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 sestaveny dva typy optimalizace použité pro nalezení optimálních hodnot 37 kalibračních koeficientů povrchového odtoku k_c , podzemního odtoku k_b , 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 byl 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 downscaling portálu (emisní scénáře RCPs) byl vytvořen pomocí optimalizace bilančního modelu využitím evolučních algoritmů.

Výsledky kalibrace bilančního modelu pomocí gradientní optimalizační metody byly vytvořeny následovně. Výsledná hodnota Nash Sutcliffova kritéria po optimalizaci byla u kalibrace NSE = 0.699. Validační soubor pak dosáhl Nash Sutcliff kritéria NSE = 0.6. Obrázky 25 a 26 ukazují výsledky kalibrace modelu. Obrázek 27 pak výsledek validace modelu. Zelená křivka odpovídá hodnotám reálného průtoků v profilu Dalečín a červená křivka pak prezentuje odvozená data z bilančního hydrologického modelu.

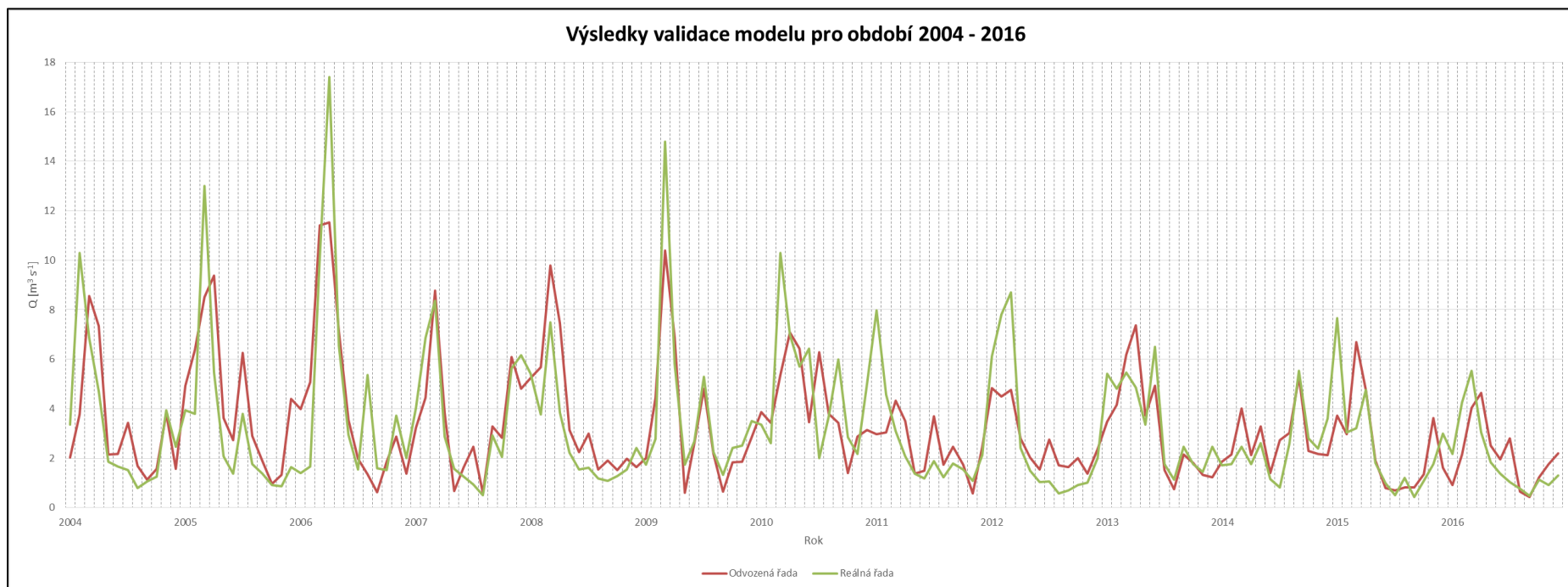
Kalibrace pomocí evolučních algoritmů byla následující. Výsledná hodnota Nash Sutcliffova kritéria a po optimalizaci kalibračních koeficientů byla u kalibrace NSE = 0.6905013. Validační soubor pak dosáhl Nash Sutcliff kritéria NSE = 0,6904778.



Obr. 25. Výsledky kalibrace hydrologického modelu pro období 1964 - 1984.



Obr. 26. Výsledky kalibrace hydrologického modelu pro období 1985 - 2003.



Obr. 27. Výsledky validace hydrologického modelu pro období 2004 – 2016.

4.2.4 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.

4.2.4.1 Emisní scénáře SRES

V průtokových řadách byla provedena tzv. BIAS korekce. V tomto případě byla provedena jednoduchá BIAS korekce mezi BIAS rovinou reálných hydrologických dat a ensembly hydrologických dat zatížených klimatickou změnou a to na základě podobnosti hodnot Q_a . Po provedení BIAS korekce bylo následně možno provést hydrologickou analýzu a porovnat výsledky se současným hydrologickým stavem povodí řeky Svatky.

Tabulka 14 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. Tabulka 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 $Q_a = 3,279 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Pomocí bilančního modelu byly pro jednotlivé použité klimatické modely sestaveny a vyhodnoceny průtokové řady v daných časových obdobích. Dále je v tabulce uveden rozdíl hodnot ΔQ_a jako a přepočítaný procentuální rozdíl mezi dlouhodobými průměrnými průtoky. Obrázek 28 ukazuje grafické vyjádření hodnot dlouhodobých průměrných průtoků. Barvy sloupců v grafu jsou voleny, tak aby byla rozpoznána příslušnost k jednotlivému SRES emisnímu scénáři mezi grafem na obrázku a tabulkou 14.

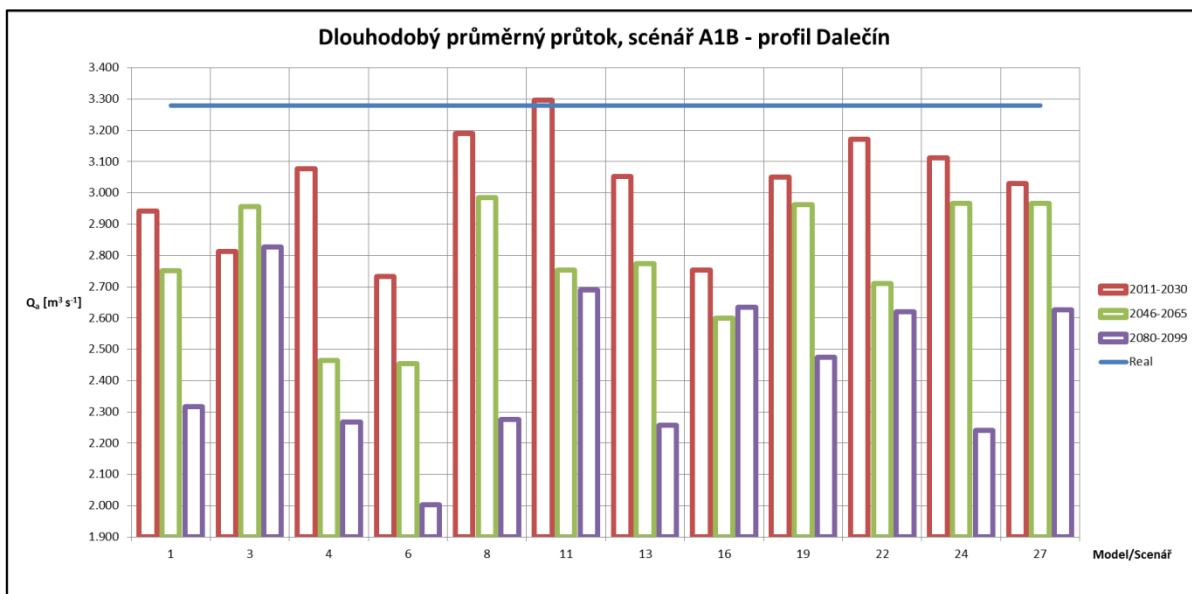
Obrázky 29, 30 a 31 pak ukazují grafické srovnání dlouhodobých průměrných průtoků s reálnou řadou a pro separované emisní scénáře. Obr. 29 znázorňuje srovnání Q_a reálné řady s Q_a pro emisní scénář A1B. V tomto případě jde o srovnání s dlouhodobými průtoky odvozenými z 12-ti výstupů klimatických modelů. Obr. 30 graficky porovnává Q_a sestavené z klimatických modelů s emisním scénářem B1. Celkový počet B1 modelů byl 10. Obr. 31 pak znázorňuje porovnání dlouhodobých průtoků stanovených z emisního scénáře A2. Zde byl počet použitých klimatických modelů 7.

Tab. 14. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady a klimatických modelů a scénářů SRES za období I, II, III.

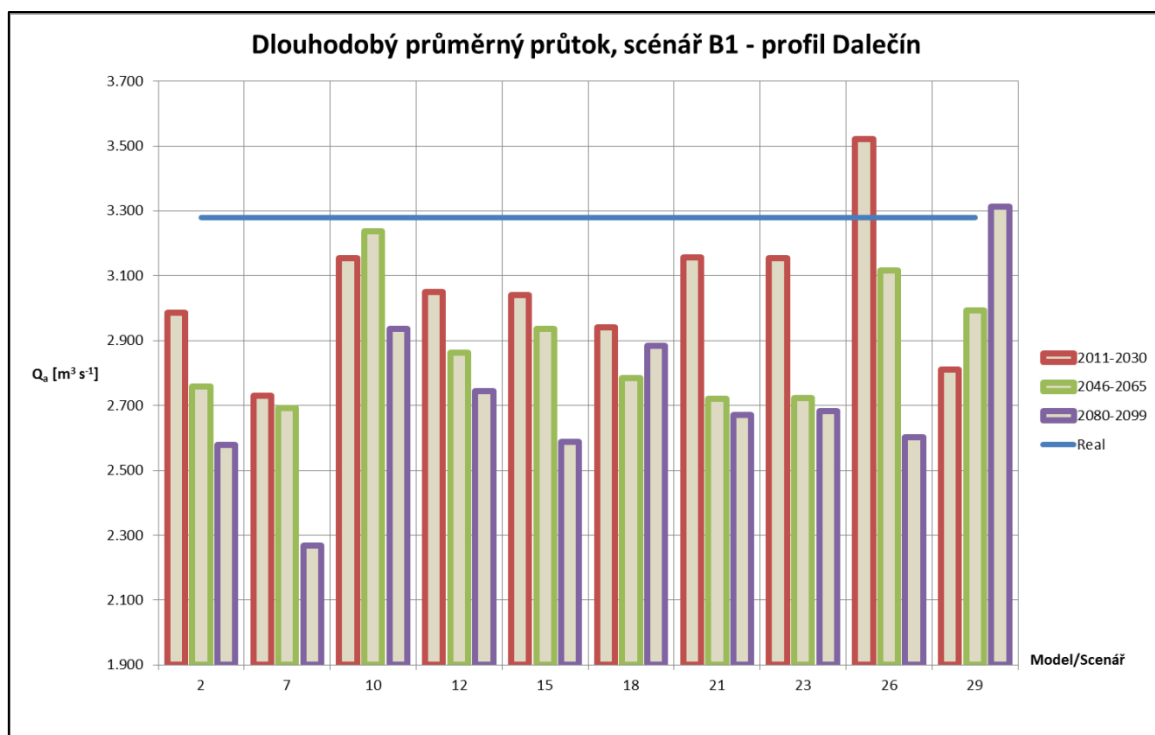
			real	I - období (2011 - 2030)			II - období (2046 - 2065)			III - období (2080 - 2099)		
		i	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]
BCM2	A1B	1	3.280	2.941	-0.339	-10.32	2.752	-0.528	-16.10	2.317	-0.963	-29.35
	B1	2	3.280	2.987	-0.293	-8.93	2.759	-0.521	-15.87	2.579	-0.701	-21.36
CGMR	A1B	3	3.279	2.812	-0.466	-14.22	2.955	-0.324	-9.87	2.827	-0.452	-13.78
CNCM3	A1B	4	3.280	3.077	-0.203	-6.19	2.465	-0.815	-24.85	2.268	-1.011	-30.84
	A2	5	3.280	2.944	-0.336	-10.24	2.633	-0.647	-19.72	1.998	-1.282	-39.08
FGOALS	A1B	6	3.280	2.732	-0.547	-16.69	2.454	-0.826	-25.19	2.003	-1.276	-38.92
	B1	7	3.280	2.731	-0.549	-16.73	2.693	-0.587	-17.89	2.269	-1.011	-30.82
GFCM21	A1B	8	3.280	3.189	-0.091	-2.76	2.985	-0.295	-9.00	2.275	-1.005	-30.63
	A2	9	3.280	3.041	-0.239	-7.29	2.896	-0.384	-11.71	2.036	-1.244	-37.94
	B1	10	3.279	3.153	-0.126	-3.83	3.236	-0.043	-1.30	2.934	-0.344	-10.50
GIAOM	A1B	11	3.280	3.297	0.018	0.54	2.754	-0.525	-16.02	2.689	-0.591	-18.01
	B1	12	3.280	3.051	-0.229	-6.98	2.863	-0.417	-12.72	2.743	-0.536	-16.35
HADCM3	A1B	13	3.280	3.052	-0.228	-6.94	2.773	-0.507	-15.45	2.257	-1.023	-31.18
	A2	14	3.280	2.971	-0.309	-9.41	2.721	-0.559	-17.03	2.301	-0.979	-29.84
	B1	15	3.280	3.041	-0.239	-7.28	2.936	-0.344	-10.48	2.588	-0.692	-21.09
INCM3	A1B	16	3.280	2.753	-0.527	-16.07	2.600	-0.680	-20.73	2.634	-0.645	-19.68
	A2	17	3.279	2.874	-0.405	-12.35	2.797	-0.481	-14.68	2.241	-1.038	-31.66
	B1	18	3.280	2.942	-0.338	-10.31	2.785	-0.495	-15.09	2.883	-0.397	-12.09
IPCM4	A1B	19	3.280	3.051	-0.229	-6.99	2.962	-0.318	-9.69	2.475	-0.804	-24.53
	A2	20	3.280	3.184	-0.096	-2.93	2.647	-0.633	-19.29	2.196	-1.084	-33.05
	B1	21	3.280	3.157	-0.122	-3.73	2.722	-0.558	-17.02	2.672	-0.608	-18.53
MIHR	A1B	22	3.280	3.172	-0.108	-3.28	2.709	-0.570	-17.39	2.620	-0.660	-20.11
	B1	23	3.280	3.153	-0.126	-3.85	2.724	-0.556	-16.95	2.682	-0.598	-18.23
MPEH5	A1B	24	3.279	3.111	-0.167	-5.10	2.966	-0.312	-9.52	2.239	-1.039	-31.70
	A2	25	3.280	3.460	0.180	5.50	2.605	-0.675	-20.58	2.393	-0.887	-27.03
	B1	26	3.280	3.522	0.242	7.38	3.116	-0.163	-4.98	2.601	-0.678	-20.69
NCCCSM	A1B	27	3.280	3.030	-0.250	-7.61	2.967	-0.313	-9.54	2.626	-0.654	-19.94
	A2	28	3.280	3.138	-0.142	-4.33	2.635	-0.645	-19.66	2.362	-0.918	-27.98
	B1	29	3.280	2.810	-0.470	-14.32	2.993	-0.286	-8.73	3.312	0.032	0.98



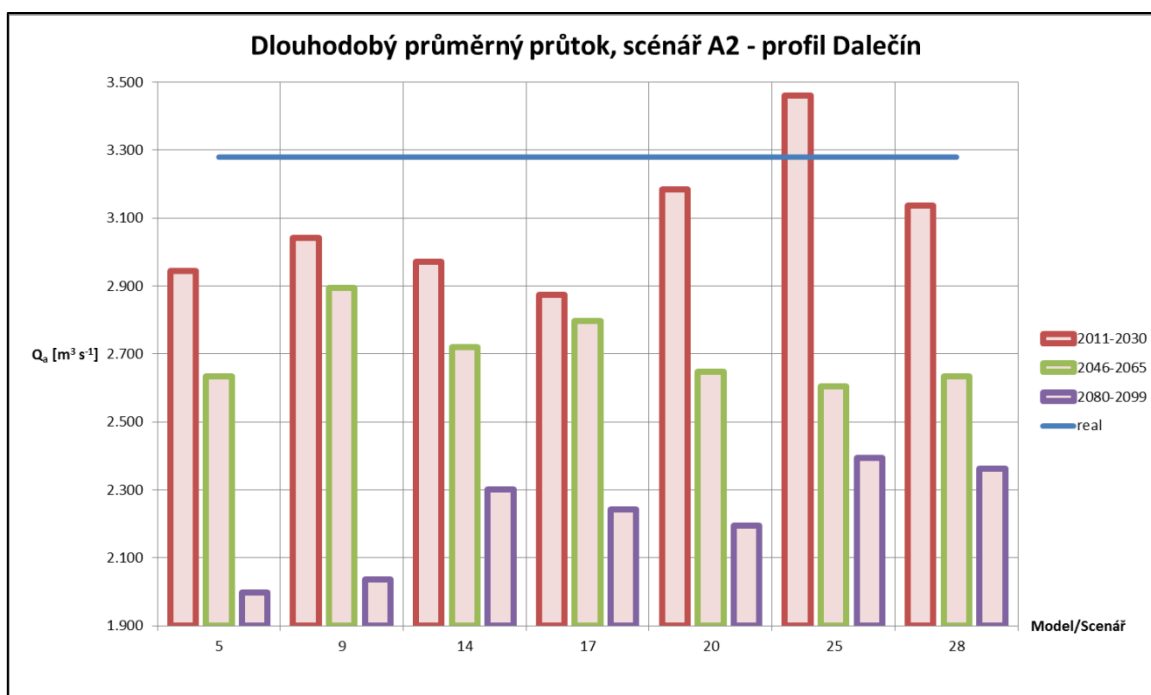
Obr. 28. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III pro všechny klimatické modely a SRES scénáře.



Obr. 29. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III z klimatických modelů s SRES scénářem A1B.



Obr. 30. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III z klimatických modelů s SRES scénářem B1.



Obr. 31. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III z klimatických modelů s SRES scénářem A2.

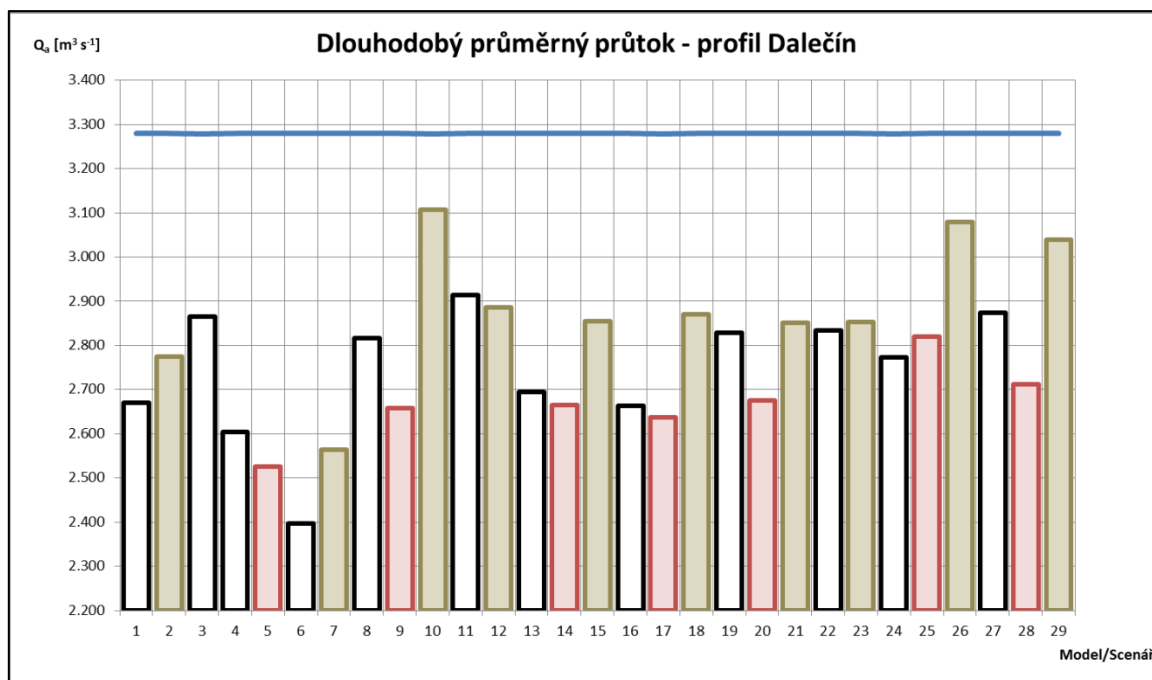
Tabulka 15 ukazuje porovnání dlouhodobých průměrných průtoků Q_a , který je stanovený jednak z reálné průtokové řady a dlouhodobých průměrných průtoků Q_a stanoveného z řady průměrných měsíčních průtoků za celé generované období 2011-2099. Vždy jde o srovnání mezi reálnou řadou 1950 – 2016 a daty zpracovanými pomocí bilančního modelu pro jednotlivé použité klimatické modely. ΔQ_a opět ukazuje rozdíl a přepočítaný procentuální rozdíl mezi dlouhodobými průměrnými průtoky.

Tab. 15. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé generované období 2011-2099 ze všech klimatických modelů a emisních scénářů SRES.

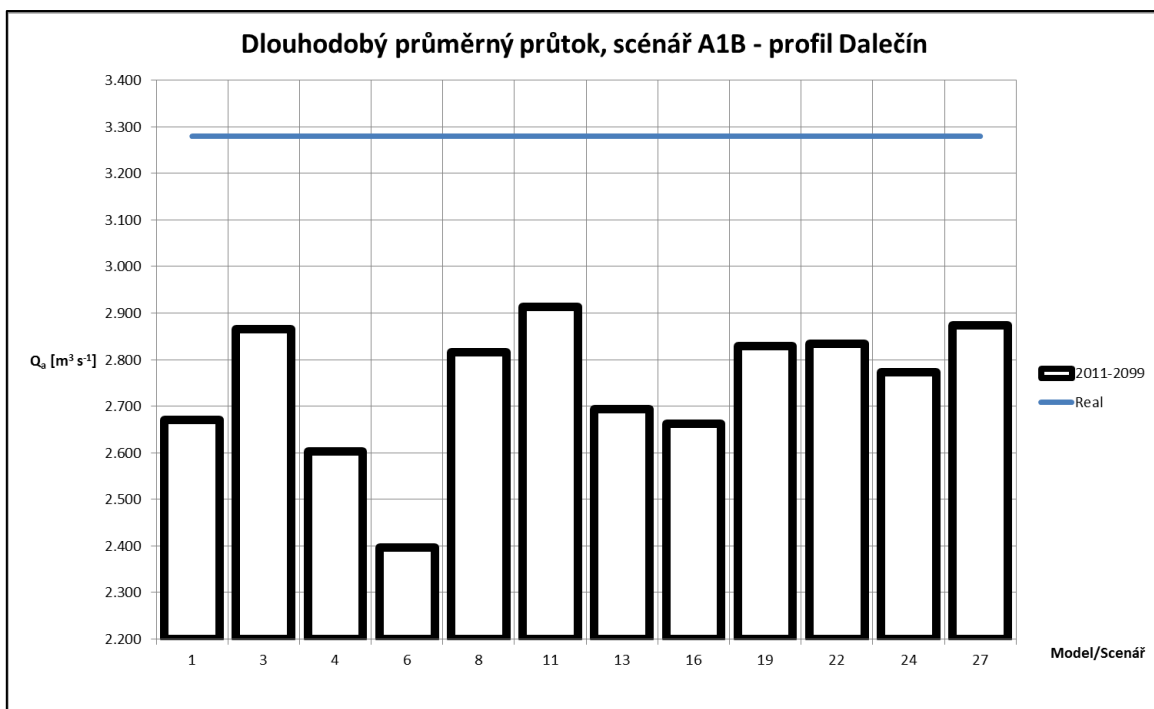
			real	Období jako celek (2011 - 2099)		
			Q_a [$m^3 s^{-1}$]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]
BCM2	A1B	1	3.280	2.670	-0.610	-18.59
	B1	2	3.280	2.775	-0.505	-15.39
CGMR	A1B	3	3.279	2.865	-0.414	-12.62
CNCM3	A1B	4	3.280	2.603	-0.676	-20.63
	A2	5	3.280	2.525	-0.755	-23.01
FGOALS	A1B	6	3.280	2.397	-0.883	-26.93
	B1	7	3.280	2.564	-0.715	-21.82
GFCM21	A1B	8	3.280	2.816	-0.463	-14.13
	A2	9	3.280	2.657	-0.622	-18.98
	B1	10	3.279	3.108	-0.171	-5.21
GIAOM	A1B	11	3.280	2.914	-0.366	-11.16
	B1	12	3.280	2.886	-0.394	-12.02
HADCM3	A1B	13	3.280	2.694	-0.586	-17.86
	A2	14	3.280	2.664	-0.615	-18.76
	B1	15	3.280	2.855	-0.425	-12.95
INCM3	A1B	16	3.280	2.662	-0.617	-18.83
	A2	17	3.279	2.637	-0.641	-19.56

			real	Období jako celek (2011 - 2099)		
			Q_a [$m^3 s^{-1}$]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]
	B1	18	3.280	2.870	-0.410	12.50
IPCM4	A1B	19	3.280	2.829	-0.451	-13.74
	A2	20	3.280	2.675	-0.604	-18.43
	B1	21	3.280	2.850	-0.429	-13.09
MIHR	A1B	22	3.280	2.834	-0.446	-13.59
	B1	23	3.280	2.853	-0.427	-13.01
MPEH5	A1B	24	3.279	2.772	-0.506	-15.44
	A2	25	3.280	2.819	-0.460	-14.04
	B1	26	3.280	3.080	-0.200	-6.09
NCCCSM	A1B	27	3.280	2.874	-0.406	-12.36
	A2	28	3.280	2.712	-0.568	-17.32
	B1	29	3.280	3.039	-0.241	-7.36

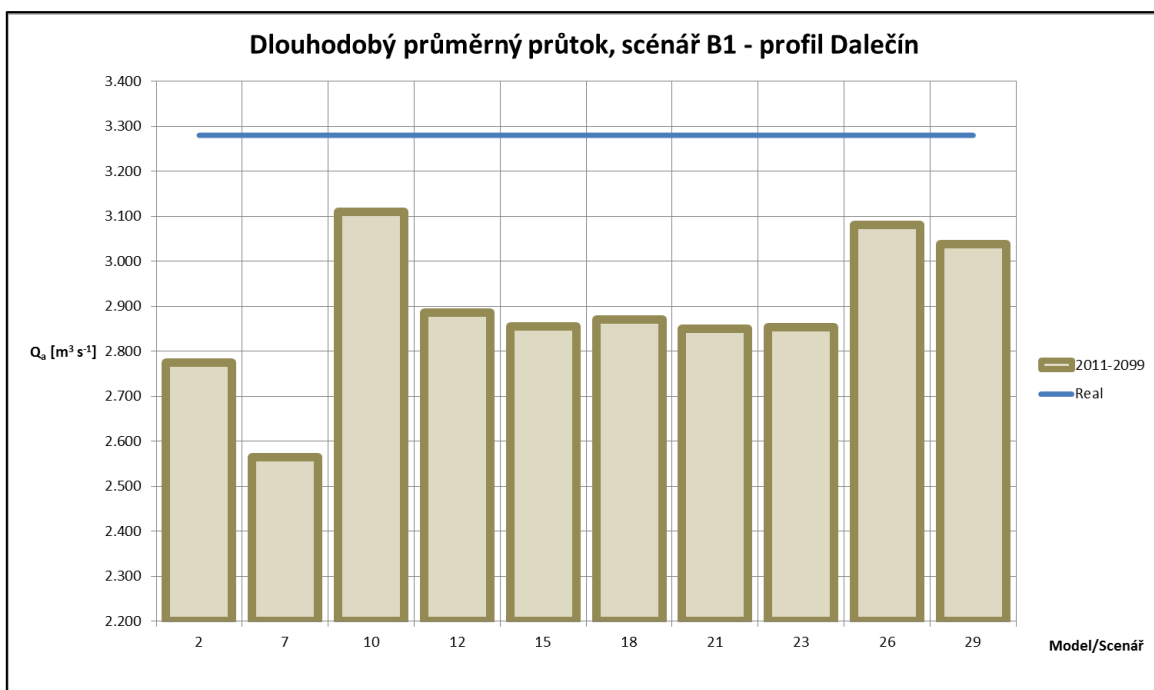
Obrázky 32, 33, 34 a 35 pak ukazují grafické srovnání dlouhodobých průměrných průtoků s reálnou řadou a emisní scénáře. Obr. 32 znázorňuje srovnání Q_a reálné řady s Q_a pro všechny emisní scénáře. Obr. 33 znázorňuje srovnání Q_a reálné řady s Q_a pro emisní scénář A1B. Obr. 34 graficky porovnává Q_a sestavené z klimatických modelů s emisním scénářem B1. Obr. 35 pak znázorňuje porovnání dlouhodobých průtoků stanovených z emisního scénáře A2.



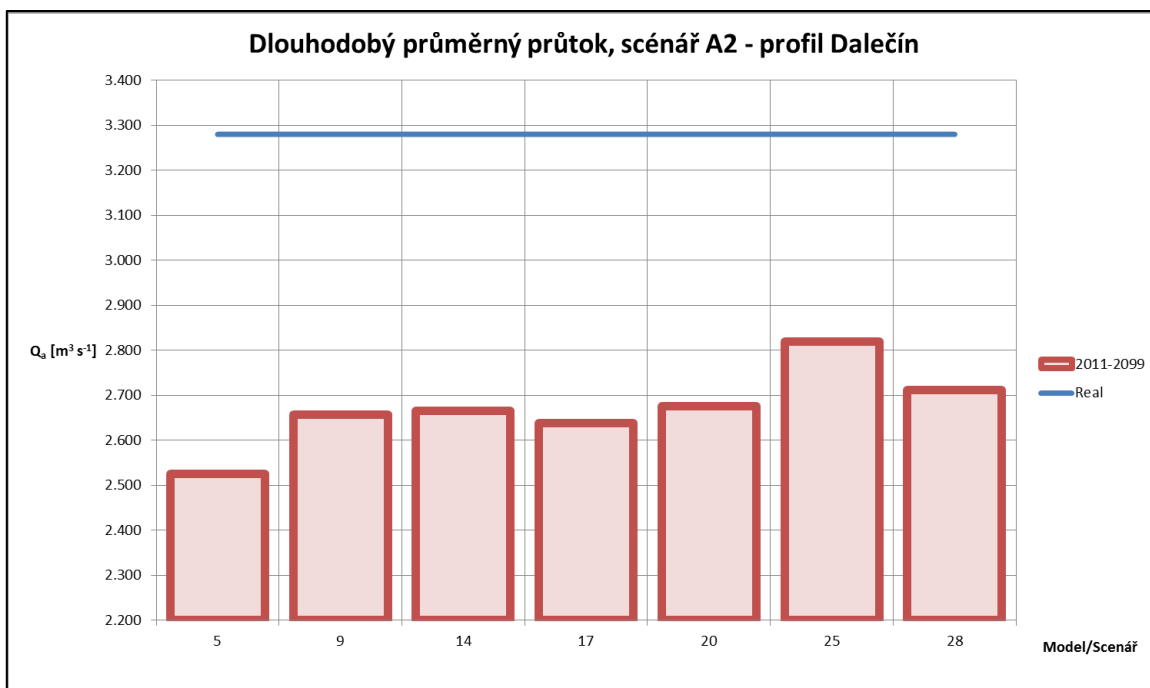
Obr. 32. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoků Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé generované období 2011-2099 ze všech klimatických modelů.



Obr. 33. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_0 z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_0 za celé generované období 2011-2099 z klimatických modelů s SRES scénářem A1B.



Obr. 34. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_0 z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_0 za celé generované období 2011-2099 z klimatických modelů s SRES scénářů B1.



Obr. 35. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé generované období 2011-2099 z klimatických modelů s SRES scénářů A2.

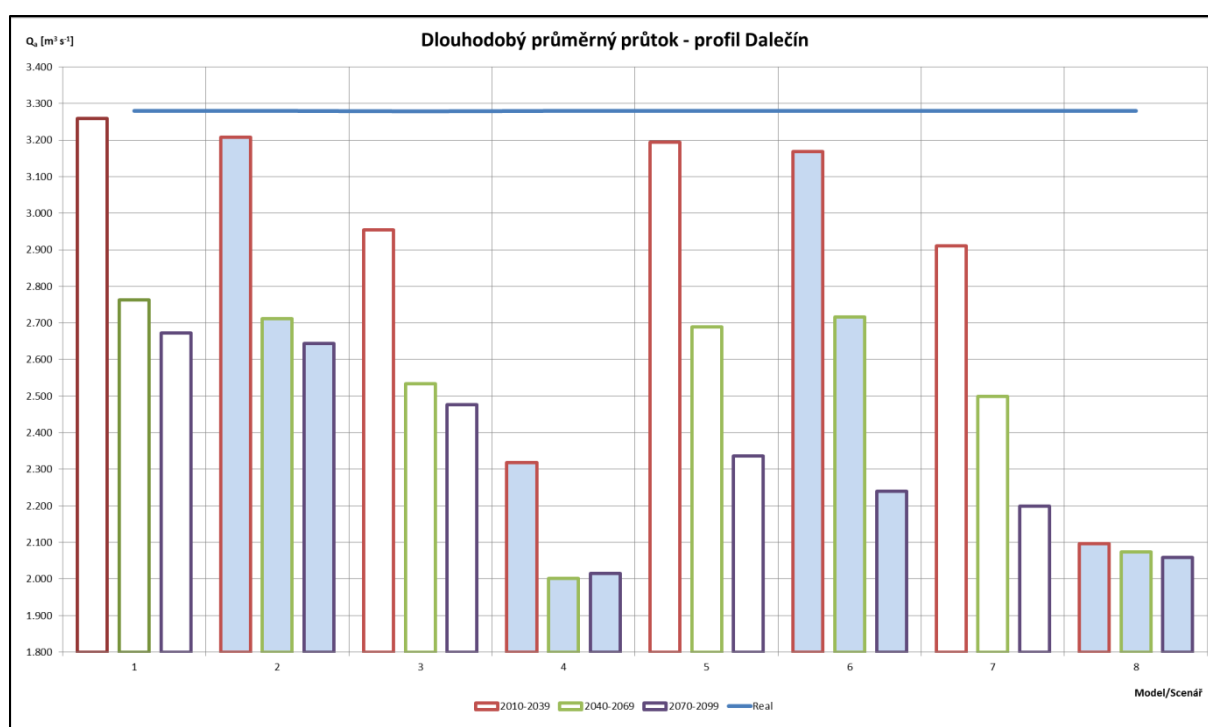
4.2.4.2 Representative Concentration Pathways - RCPs 4,5 a 8,5

Oproti datům vytvořených pomocí emisních scénářů SRES, byla BIAS korekce u dat vytvořených pomocí RCPs 4,5 a 8,5 scénářů provedena na úrovni klimatologických dat. V tomto případě byla jednoduchá BIAS korekce provedena mezi BIAS rovinou historických dat srážkových úhrnů a průměrných teplot vzduchu a ensamble klimatologických dat zatížených klimatickou změnou. Korekce byla provedena na základě podobnosti hodnot ročních průměrných srážkových úhrnů a dlouhodobých průměrných teplot pro stanice Svratouch a Polička. Po provedení BIAS korekce byla následně provedena hydrologická transformace pomocí bilančního modelu. Výsledná data v podobě průměrných měsíčních průtoků byla vyhodnocena a porovnána se současným hydrologickým stavem povodí řeky Svratky.

Tabulka 16 ukazuje srovnání dlouhodobých průměrných průtoků Q_a odvozených pro emisní scénáře RCPs s dlouhodobým průměrným průtokem z reálné průtokové řady za období 1950 až 2016. Tabulka ukazuje srovnání vždy mezi Q_a reálné řady a Q_a zpracovanými pro tři budoucí časové období I reprezentované lety 2010 až 2039, období II reprezentované lety 2040 až 2069 a období III zastoupené roky 2070 až 2099. Hodnota Q_a vypočtená z reálné průtokové řady je $Q_a = 3,279 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Pomocí bilančního modelu byly pro jednotlivé použité downscale metody a RCPs scénáře sestaveny a vyhodnoceny průtokové řady v daných časových obdobích. Dále je v tabulce uveden rozdíl hodnot ΔQ_a a přepočítaný procentuální rozdíl mezi dlouhodobými průměrnými průtoky. Obrázek 36 ukazuje grafické vyjádření hodnot dlouhodobých průměrných průtoků. Barvy sloupců v grafu jsou voleny, tak aby byla rozpoznána příslušnost k jednotlivému RCP emisnímu scénáři mezi grafem na obrázku 36 a tabulkou 16.

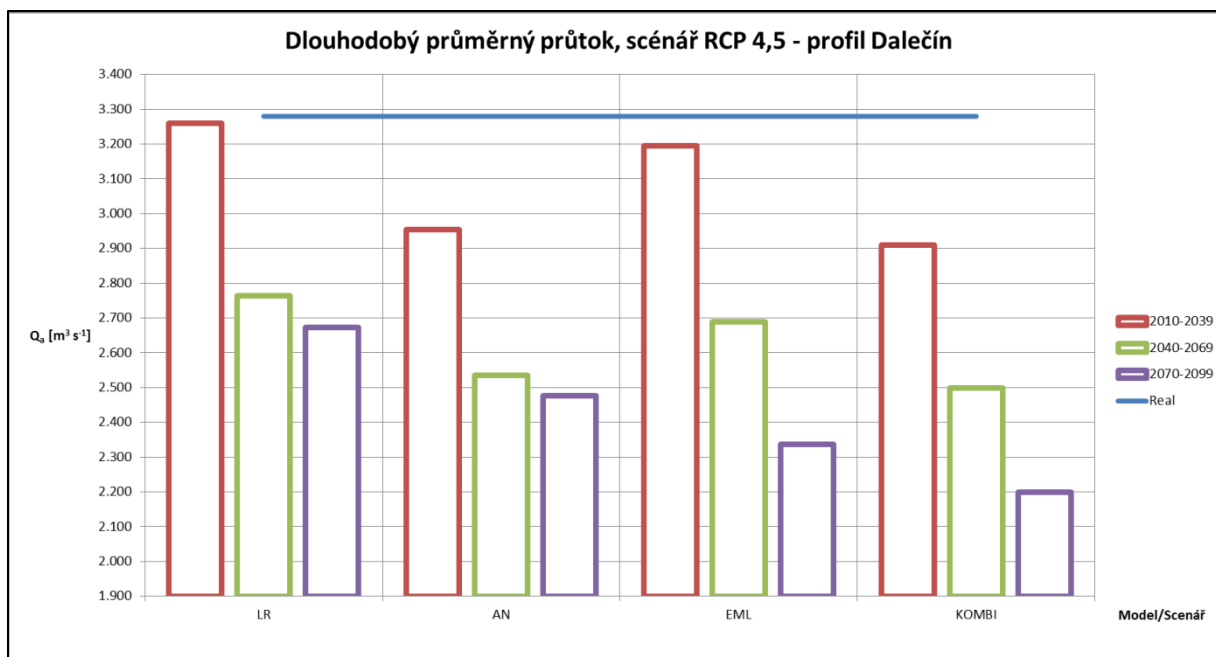
Tab. 16. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady a klimatických modelů a scénářů RCPs za období I, II, III.

	RCPs	i	real	I - období (2010 - 2039)		II - období (2040 - 2069)			III - období (2070 - 2099)			
			Q_a [$m^3 s^{-1}$]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]
LR	4.5	1	3.280	3.259	-0.020	-0.62	2.763	-0.517	-15.75	2.673	-0.607	-18.51
	8.5	2	3.280	3.207	-0.073	-2.21	2.712	-0.568	-17.31	2.643	-0.637	-19.41
AN	4.5	3	3.279	2.954	-0.324	-9.89	2.534	-0.745	-22.71	2.477	-0.802	-24.46
	8.5	4	3.280	2.319	-0.961	-29.31	2.001	-1.278	-38.98	2.014	-1.265	-38.58
EML	4.5	5	3.280	3.194	-0.086	-2.62	2.689	-0.591	-18.02	2.336	-0.944	-28.78
	8.5	6	3.280	3.169	-0.111	-3.39	2.715	-0.564	-17.21	2.240	-1.040	-31.70
KOMBI	4.5	7	3.280	2.910	-0.370	-11.28	2.499	-0.781	-23.81	2.199	-1.081	-32.96
	8.5	8	3.280	2.096	-1.184	-36.09	2.074	-1.205	-36.75	2.058	-1.222	-37.25

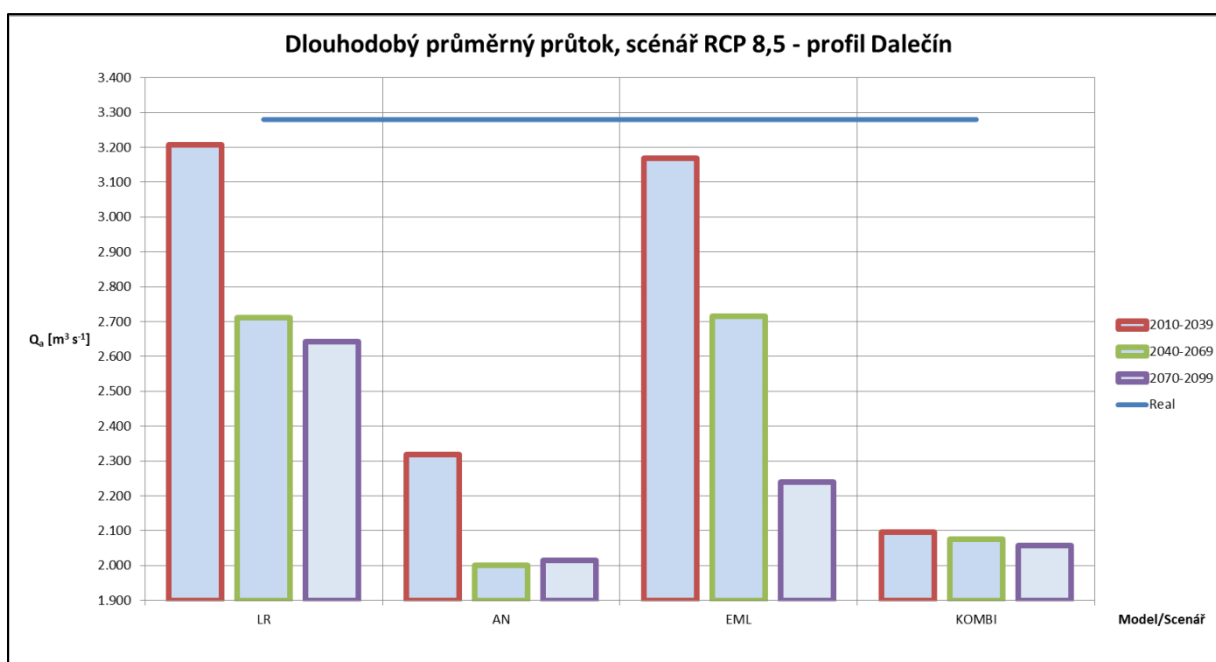


Obr. 36. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a vypočteného z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III pro všechny metody downscalingu a RCPs scénáře.

Obrázky 37 a 38 pak ukazují grafické srovnání dlouhodobých průměrných průtoků s průtoky v reálné řadě a průtoky pro separované emisní scénáře. Obr. 37 znázorňuje srovnání Q_a reálné řady s Q_a pro emisní scénář RCP 4,5. V tomto případě jde o srovnání s dlouhodobými průtoky odvozenými z čtyř výstupů klimatických modelů. Obr. 38 graficky porovnává Q_a sestavené z klimatických modelů s emisním scénářem RCP 8,5. Celkový počet RCP 8,5 ensamble dat byl 4.



Obr. 37. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III pro všechny metody downscalingu a scénář RCP 4,5.



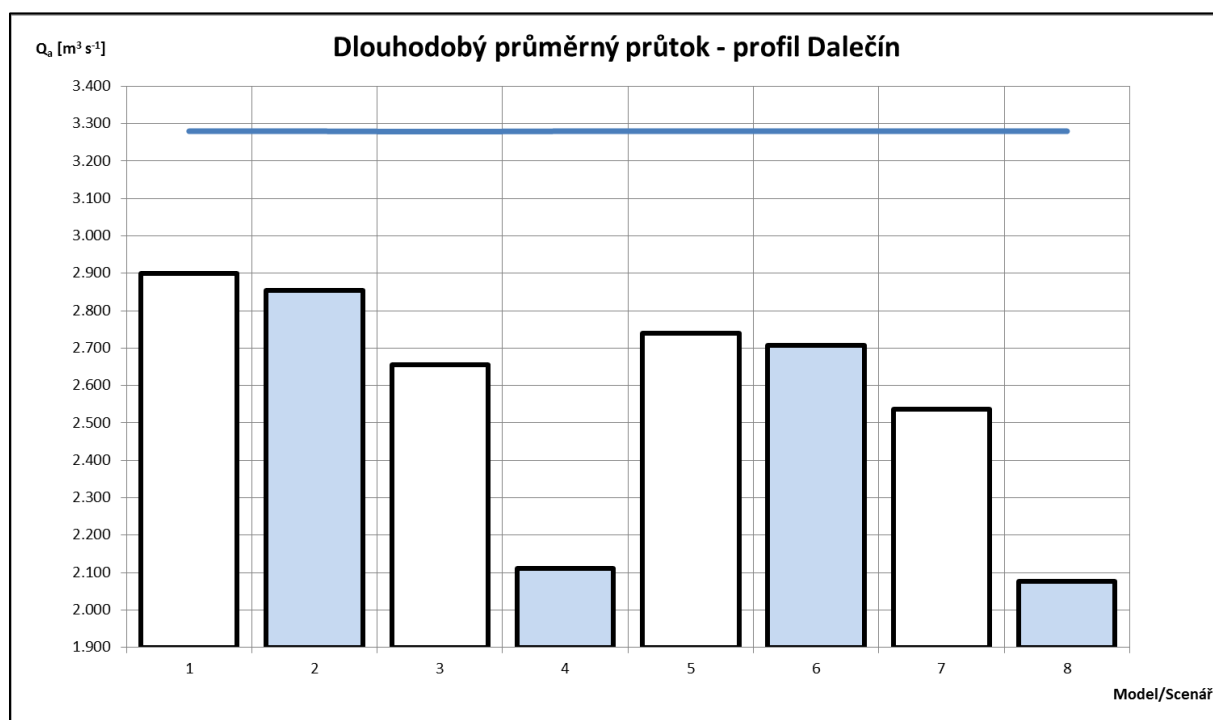
Obr. 38. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III pro všechny metody downscalingu a scénář RCP 8,5.

Tabulka 17 ukazuje porovnání dlouhodobých průměrných průtoků Q_a stanovených z reálné průtokové řady a dlouhodobé průměrné průtoky Q_a stanovené z řady průměrných měsíčních průtoků za celé generované období 2011-2099. Vždy jde o srovnání mezi reálnou řadou 1950 – 2016 a daty zpracovanými pomocí bilančního modelu pro jednotlivé použité downscaling metody a RCPs scénáře. ΔQ_a opět ukazuje rozdíl a přepočítaný procentuální rozdíl mezi dlouhodobými průměrnými průtoky.

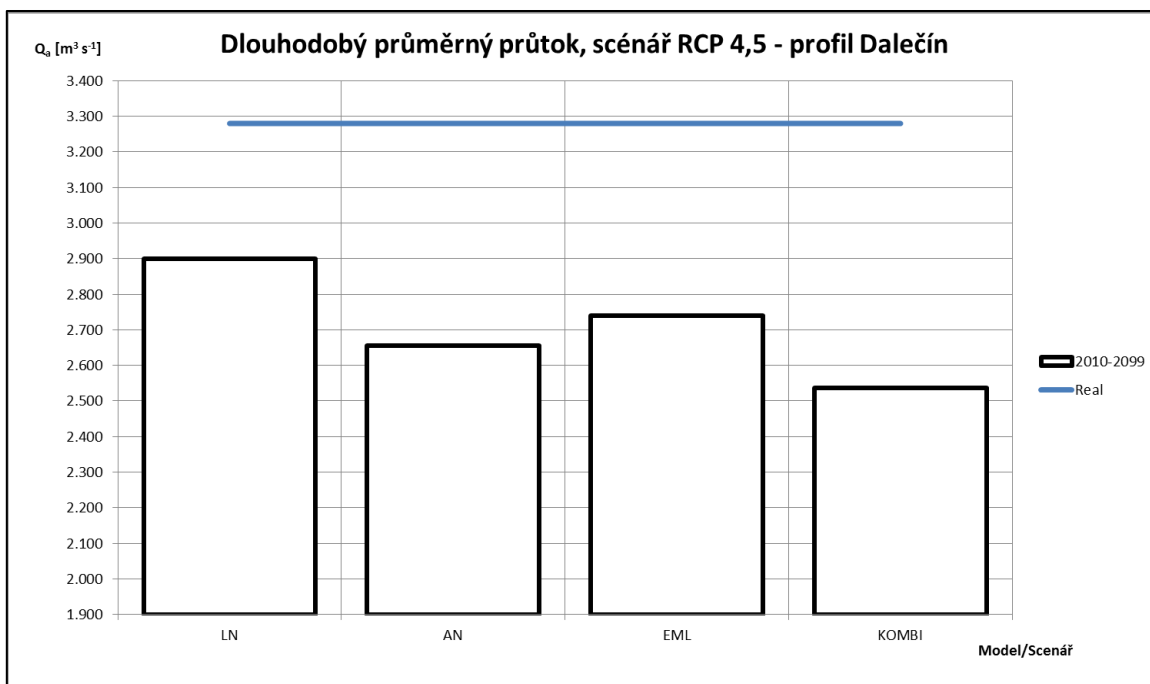
Tab. 17. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé generované období 2010-2099 ze všech klimatických modelů a emisních scénářů RCPs.

	RCPs	i	real	Období jako celek (2010 - 2099)		
			Q_a [$m^3 s^{-1}$]	Q_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [$m^3 s^{-1}$]	ΔQ_a [%]
LR	4.5	1	3.280	2.899	-0.381	-11.63
	8.5	2	3.280	2.854	-0.426	-12.98
AN	4.5	3	3.279	2.655	-0.624	-19.02
	8.5	4	3.280	2.111	-1.168	-35.62
EML	4.5	5	3.280	2.740	-0.540	-16.47
	8.5	6	3.280	2.708	-0.572	-17.43
KOMBI	4.5	7	3.280	2.536	-0.744	-22.68
	8.5	8	3.280	2.076	-1.204	-36.70

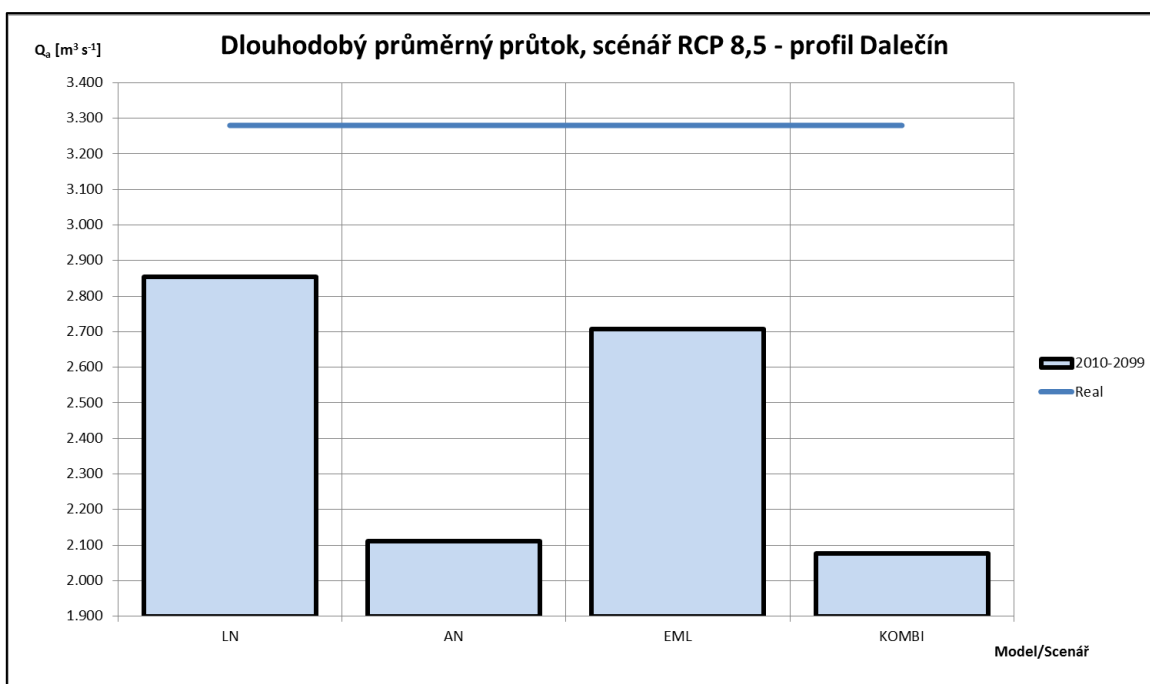
Obrázky 39, 40, 41 pak ukazují grafické srovnání dlouhodobých průměrných průtoků s reálnou řadou a emisní scénáře. Obr. 39 znázorňuje srovnání Q_a reálné řady s Q_a pro všechny emisní scénáře. Obr. 40 znázorňuje srovnání Q_a reálné řady s Q_a pro emisní scénář RCP 4,5. Obr. 41 graficky porovnává Q_a sestavené z klimatických modelů s emisním scénářem RCP 8,5.



Obr. 39. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé období 2010-2099 pro všechny metody downscalingu a RCPs scénáře.



Obr. 40. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé období 2010-2099 pro všechny metody downscalingu a scénář RCP 4,5.



Obr. 41. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé období 2010-2099 pro všechny metody downscalingu a scénář RCP 8,5.

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

Jak bylo popsáno v úvodu kapitoly 3.2. hydrologická data pro analýzu vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže byly získány následovně. Pomocí nástrojů statistického downscalingu byly sestaveny ensembly klimatických dat. Hydrologická transformace klimatických dat na hydrologická data byla provedena pomocí lumped bilančního modelu. Ensembly hydrologických dat byly následně

vloženy do simulačního modelu nádrže, který pro volené období stanovil hydrologickou spolehlivost zásobního objemu nádrže. Výsledkem byla množina hodnot hydrologických spolehlivostí, která byla podrobena analýze robustnosti.

Pomocí simulačního modelu byla provedena analýza zásobního objemu a robustnosti řešení na požadovanou zabezpečenost 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 $O_{p,i} = \alpha \cdot Q_{a,i}$, pro $i = 1, \dots, n$ řadu. Rozsah koeficientu nalepšení α v byl 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 $O_{p,i}$, pro $i = 1, \dots, n$ řad. Rozsah nalepšeného odtoku $O_{p,i}$ se pohyboval v intervalu $O_{p,i} \in \langle 1,8; 2,7 \rangle$.

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 SRES A1B. Deseti řadách scénáře SRES B1 a sedmi řadách pro SRES A2. Časová období byla opět rozdělena na období I (2011-2030), období II (2046-6065), období III (2080-2099) a jejich kombinace období I+II a období 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 stejně jako období I (2010-2039), období II (2040-6069), období III (2070-2099) a jejich kombinace období I+II a období 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 široké spektrum možností vývoje, které působí i na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže. Výsledkem simulací zásobního objemu nádrže bylo spektrum možností vývoje nalepšeného odtoku vody z nádrže pro danou zabezpečenost $P_T \geq 99,5\%$ a daný zásobní objem nádrže $V_z = 44\,056\,000 \text{ m}^3$. To znamená, že nejistoty do výsledků jsou vyčísleny 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 nalepšeného odtoku O_p bylo za vyhovující výsledek považováno splnění kritéria $\min\{\mu(P_T) - (P_T = 99,5\%)\}$. V tabulkách vyznačeno červeně.

4.2.5.1 Emisní scénáře SRES

Tabulky 18. až 37. ukazují výsledky vodohospodářského řešení pro nalepšený odtok O_p , který je odvezený pomocí koeficientu nalepšení α . V tabulce jsou znázorněny základní statistické charakteristiky střední hodnota, směrodatná odchylka \min a \max nalepšeného odtoku O_p . Střední hodnota zabezpečení podle trvání $\mu(P_T)$, minimální hodnoty $\min(P_T)$ a maximální hodnoty $\max(P_T)$. Dále výsledky robustnosti daného návrhu a výsledky zabezpečení množství nedodané vody z nádrže opět střední hodnoty $\mu(P_D)$, minimum $\min(P_D)$ a maximum $\max(P_D)$.

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

Tab. 18. Srovnání výsledků - období I.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.133	0.132	1.912	2.465	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.438	0.151	2.185	2.818	99.791	99.100	99.940	0.862	99.960	99.760	100.000
0.8296	2.528	0.156	2.266	2.922	99.524	98.360	99.940	0.552	99.875	99.520	100.000
0.85	2.590	0.160	2.321	2.994	99.109	97.250	99.940	0.379	99.758	99.280	100.000
0.90	2.743	0.170	2.458	3.170	97.516	94.940	99.560	0.034	99.207	98.160	99.900
0.95	2.895	0.179	2.594	0.000	93.779	89.940	96.700	0.000	97.889	96.080	99.110
1.00	3.048	0.188	0.000	0.000	87.526	84.110	91.140	0.000	95.564	93.610	96.940

Tab. 19. Srovnání výsledků - období II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.958	0.126	1.718	2.266	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.238	0.144	1.963	2.590	99.888	99.470	99.940	0.966	99.985	99.850	100.000
0.847	2.369	0.152	2.078	2.742	99.509	98.080	99.940	0.621	99.877	99.390	100.000
0.85	2.377	0.153	2.086	2.752	99.435	97.900	99.940	0.621	99.864	99.350	100.000
0.90	2.517	0.162	2.208	2.913	98.217	95.770	99.660	0.069	99.408	98.540	99.910
0.95	2.657	0.171	2.331	0.000	94.676	92.440	96.880	0.000	98.166	97.270	99.060
1.00	2.797	0.179	0.000	0.000	88.617	85.960	91.230	0.000	95.899	94.980	96.900

Tab. 20. Srovnání výsledků - období III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.739	0.209	1.399	2.318	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	1.987	0.239	1.598	2.650	99.917	99.560	99.940	1.000	99.992	99.880	100.000
0.85	2.111	0.254	1.698	2.815	99.650	98.640	99.940	0.759	99.903	99.540	100.000
0.860	2.136	0.257	1.718	2.848	99.504	97.990	99.940	0.690	99.860	99.340	100.000
0.90	2.235	0.269	1.798	2.981	98.591	96.140	99.940	0.138	99.541	98.470	100.000
0.95	2.359	0.284	1.898	3.146	95.147	91.980	97.990	0.000	98.317	96.990	99.350

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
1.00	2.484	0.299	1.998	3.312	88.950	85.680	92.720	0.000	95.978	94.560	97.020

Tab. 21. Srovnání výsledků - období I+II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.046	0.101	1.815	2.323	99.970	99.970	99.970	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.338	0.115	2.074	2.655	99.717	98.760	99.970	0.828	99.922	99.620	100.000
0.818	2.390	0.118	2.121	2.715	99.510	97.750	99.970	0.655	99.854	99.290	100.000
0.85	2.484	0.122	2.204	2.821	98.869	95.290	99.970	0.310	99.629	98.270	100.000
0.90	2.630	0.129	2.334	2.987	96.643	90.620	99.230	0.000	98.846	96.460	99.760
0.95	2.776	0.137	2.463	3.153	92.676	85.990	95.850	0.000	97.368	94.270	98.630
1.00	2.922	0.144	2.593	3.319	86.626	80.670	89.650	0.000	95.040	91.940	96.220

Tab. 22. Srovnání výsledků - období I+II+III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.943	0.111	1.678	2.176	99.965	99.730	99.980	1.000	99.995	99.900	100.000
0.771	2.140	0.122	1.848	2.397	99.507	96.520	99.980	0.724	99.841	98.660	100.000
0.80	2.221	0.127	1.917	2.487	98.960	94.730	99.980	0.448	99.620	97.710	100.000
0.85	2.360	0.135	2.037	2.643	97.111	91.620	99.700	0.034	98.912	96.040	99.910
0.90	2.498	0.143	2.157	2.798	94.099	88.440	98.500	0.000	97.730	94.490	99.450
0.95	2.637	0.151	2.277	2.953	89.709	84.490	94.550	0.000	95.993	92.870	98.130
1.00	2.776	0.159	2.397	3.109	84.393	79.240	88.190	0.000	93.765	91.110	95.700

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – Kombinace SRES scénář A1B.

Tab. 23. Srovnání výsledků - období I.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.113	0.119	1.913	2.308	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.415	0.136	2.186	2.638	99.791	99.100	99.940	0.917	99.963	99.860	100.000
0.8296	2.508	0.141	2.271	2.740	99.503	98.640	99.940	0.583	99.883	99.660	100.000

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.85	2.566	0.144	2.323	2.803	99.143	97.990	99.940	0.333	99.775	99.460	100.000
0.90	2.717	0.153	2.459	2.968	97.675	95.860	99.010	0.000	99.260	98.530	99.730
0.95	2.868	0.161	2.596	0.000	93.803	91.330	95.580	0.000	97.914	96.800	98.590
1.00	3.018	0.170	0.000	0.000	87.603	85.870	91.140	0.000	95.563	94.720	96.400

Tab. 24. Srovnání výsledků - období II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.945	0.131	1.718	2.089	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.223	0.150	1.963	2.388	99.900	99.560	99.940	1.000	99.993	99.930	100.000
0.8475	2.355	0.159	2.080	2.530	99.503	98.270	99.940	0.667	99.890	99.650	100.000
0.85	2.362	0.159	2.086	2.537	99.434	98.080	99.940	0.667	99.877	99.610	100.000
0.90	2.501	0.169	2.208	2.686	98.160	96.510	99.290	0.000	99.389	98.820	99.730
0.95	2.640	0.178	2.331	0.000	94.607	92.440	96.330	0.000	98.143	97.560	98.740
1.00	2.779	0.187	0.000	0.000	88.689	86.240	91.230	0.000	95.895	95.330	96.760

Tab. 25. Srovnání výsledků - období III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.705	0.163	1.402	1.980	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	1.949	0.187	1.603	2.262	99.885	99.560	99.940	1.000	99.981	99.880	100.000
0.85	2.071	0.198	1.703	2.404	99.605	98.820	99.940	0.750	99.883	99.600	100.000
0.858	2.090	0.200	1.719	2.426	99.504	98.450	99.940	0.667	99.852	99.510	100.000
0.90	2.193	0.210	1.803	2.545	98.601	97.440	99.560	0.083	99.549	99.010	99.890
0.95	2.314	0.222	1.903	2.686	95.213	93.640	97.620	0.000	98.308	97.770	99.130
1.00	2.436	0.234	2.003	2.828	88.852	86.610	90.680	0.000	95.991	95.200	96.660

Tab. 26. Srovnání výsledků - období I+II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.029	0.103	1.815	2.161	99.970	99.970	99.970	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.319	0.117	2.074	2.470	99.718	98.860	99.970	0.917	99.927	99.630	100.000

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.8218	2.382	0.120	2.131	2.537	99.502	98.250	99.970	0.667	99.850	99.420	100.000
0.85	2.464	0.124	2.204	2.624	98.947	97.280	99.780	0.250	99.665	98.950	99.940
0.90	2.609	0.132	2.334	2.778	96.743	93.490	98.490	0.000	98.897	97.610	99.600
0.95	2.754	0.139	2.463	2.933	92.783	88.900	94.370	0.000	97.413	95.670	98.070
1.00	2.899	0.146	2.593	3.087	86.725	83.210	88.720	0.000	95.076	93.420	95.880

Tab. 27. Srovnání výsledků - období I+II+ III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.921	0.098	1.678	2.040	99.967	99.820	99.980	1.000	99.996	99.950	100.000
0.773	2.122	0.109	1.853	2.252	99.501	98.220	99.950	0.667	99.832	98.470	100.000
0.80	2.196	0.112	1.917	2.331	98.972	96.860	99.850	0.417	99.629	98.800	99.940
0.85	2.333	0.120	2.037	2.477	97.099	93.740	99.480	0.000	98.928	97.400	99.810
0.90	2.470	0.126	2.157	2.622	94.071	90.380	98.500	0.000	97.764	95.780	99.450
0.95	2.607	0.134	2.277	2.768	89.606	86.400	94.550	0.000	96.017	94.090	98.060
1.00	2.744	0.141	2.397	2.914	84.312	81.120	88.190	0.000	93.796	92.210	95.630

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – Kombinace SRES scénář B1.

Tab. 28. Srovnání výsledků - období I.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.138	0.145	1.912	2.465	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.444	0.166	2.185	2.818	99.761	99.290	99.940	0.800	99.944	99.760	100.000
0.822	2.511	0.171	2.245	2.895	99.511	98.640	99.940	0.600	99.870	99.620	100.000
0.85	2.597	0.176	2.321	2.994	98.943	97.250	99.840	0.300	99.698	99.280	100.000
0.90	2.750	0.187	2.458	3.170	97.149	94.940	99.560	0.100	99.068	98.160	99.900
0.95	2.902	0.197	2.594	0.000	93.901	89.940	96.700	0.000	97.864	96.080	99.110
1.00	3.055	0.207	0.000	0.000	87.652	84.110	90.860	0.000	95.610	93.610	96.940

Tab. 29. Srovnání výsledků - období II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.018	0.123	1.885	2.266	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.306	0.141	2.154	2.590	99.836	99.470	99.940	0.900	99.966	99.850	100.000
0.847	2.401	0.146	2.243	2.697	99.511	98.360	99.940	0.700	99.878	99.570	100.000
0.85	2.450	0.149	2.289	2.752	99.251	97.900	99.940	0.500	99.798	99.350	100.000
0.90	2.594	0.158	2.424	2.913	97.907	95.770	99.560	0.100	99.306	98.540	99.850
0.95	2.739	0.167	2.558	0.000	94.345	92.440	96.050	0.000	98.021	97.270	98.830
1.00	2.883	0.175	0.000	0.000	88.152	85.960	90.120	0.000	95.777	94.980	96.600

Tab. 30. Srovnání výsledků - období III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.908	0.183	1.588	2.318	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.181	0.209	1.815	2.650	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	2.318	0.222	1.929	2.815	99.529	98.640	99.940	0.600	99.865	99.540	100.000
0.851	2.320	0.222	1.931	2.819	99.501	98.550	99.940	0.600	99.860	99.530	100.000
0.90	2.454	0.235	2.042	2.981	98.102	96.140	99.380	0.000	99.351	98.470	99.810
0.95	2.590	0.248	2.156	3.146	94.447	91.980	96.700	0.000	98.065	96.990	98.960
1.00	2.726	0.261	2.269	3.312	88.162	85.680	91.050	0.000	95.706	94.560	96.870

Tab. 31. Srovnání výsledků - období I+II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.078	0.114	1.898	2.323	99.970	99.970	99.970	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.375	0.131	2.170	2.655	99.682	98.760	99.970	0.700	99.909	99.620	100.000
0.8175	2.427	0.133	2.217	2.713	99.501	98.530	99.970	0.600	99.848	99.480	100.000
0.85	2.523	0.139	2.305	2.821	98.958	97.510	99.970	0.400	99.657	99.100	100.000
0.90	2.672	0.147	2.441	2.987	97.048	94.780	99.230	0.000	98.987	98.150	99.760
0.95	2.820	0.155	2.576	3.153	93.219	89.180	95.850	0.000	97.604	96.040	98.630
1.00	2.969	0.164	2.712	3.319	86.926	82.790	89.650	0.000	95.276	93.440	96.220

Tab. 32. Srovnání výsledků - období I+II+III.

α	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	$\sigma(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	min(O_p) [m ³ s ⁻¹]	max(O_p) [m ³ s ⁻¹]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
0.70	2.022	0.106	1.795	2.176	99.977	99.950	99.980	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.310	0.121	2.051	2.487	99.646	98.840	99.980	0.700	99.892	99.660	100.000
0.8105	2.341	0.123	2.078	2.520	99.504	98.500	99.950	0.500	99.844	99.500	100.000
0.85	2.455	0.129	2.180	2.643	98.454	96.210	99.700	0.100	99.480	98.640	99.910
0.90	2.599	0.136	2.308	2.798	95.985	91.950	98.130	0.000	98.557	96.900	99.370
0.95	2.744	0.144	2.436	2.953	91.645	87.260	94.300	0.000	96.941	94.870	98.130
1.00	2.888	0.152	2.564	3.109	85.860	82.450	87.850	0.000	94.658	92.620	95.700

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – Kombinace SRES scénář A2.

Tab. 33. Srovnání výsledků - období I.

α	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	$\sigma(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	min(O_p) [m ³ s ⁻¹]	max(O_p) [m ³ s ⁻¹]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
0.70	2.161	0.127	2.012	2.422	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.470	0.146	2.300	2.768	99.833	99.290	99.940	0.857	99.976	99.840	100.000
0.8390	2.590	0.153	2.412	2.903	99.501	98.550	99.940	0.714	99.879	99.520	100.000
0.85	2.624	0.155	2.443	2.941	99.289	97.990	99.940	0.571	99.814	99.410	100.000
0.90	2.779	0.164	2.587	3.114	97.766	95.860	99.190	0.000	99.313	98.530	99.770
0.95	2.933	0.173	2.731	0.000	93.563	91.600	94.940	0.000	97.880	97.000	98.800
1.00	3.088	0.182	0.000	0.000	87.214	86.240	88.270	0.000	95.503	94.860	96.350

Tab. 34. Srovnání výsledků - období II.

α	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	$\sigma(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	min(O_p) [m ³ s ⁻¹]	max(O_p) [m ³ s ⁻¹]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
0.70	1.894	0.069	1.823	2.027	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.164	0.079	2.084	2.317	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	2.299	0.084	2.214	2.461	99.699	99.100	99.940	0.714	99.937	99.820	100.000
0.864	2.337	0.086	2.251	2.502	99.500	98.640	99.940	0.571	99.881	99.670	100.000
0.90	2.435	0.089	2.344	2.606	98.759	97.250	99.660	0.143	99.587	99.110	99.910
0.95	2.570	0.094	2.475	0.000	95.267	93.830	96.880	0.000	98.411	97.700	99.060

Tab. 35. Srovnání výsledků - období III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.553	0.099	1.399	1.675	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	1.775	0.114	1.598	1.915	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	1.885	0.121	1.698	2.034	99.900	99.660	99.940	1.000	99.991	99.940	100.000
0.8899	1.974	0.127	1.778	2.130	99.513	98.820	99.940	0.571	99.887	99.730	100.000
0.90	1.996	0.128	1.798	2.154	99.274	98.450	99.940	0.429	99.797	99.570	100.000
0.95	2.107	0.135	1.898	2.273	96.033	94.010	97.990	0.000	98.691	97.920	99.350
1.00	2.218	0.142	1.998	2.393	90.244	87.900	92.720	0.000	96.346	95.410	97.020

Tab. 36. Srovnání výsledků - období I+II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.027	0.054	1.952	2.123	99.970	99.970	99.970	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.317	0.062	2.231	2.426	99.764	99.230	99.970	0.857	99.933	99.700	100.000
0.817	2.366	0.063	2.278	2.478	99.507	97.840	99.970	0.714	99.847	99.310	100.000
0.85	2.462	0.066	2.370	2.578	98.607	95.290	99.880	0.286	99.529	98.270	99.990
0.90	2.607	0.069	2.510	2.729	95.894	90.620	98.530	0.000	98.559	96.460	99.560
0.95	2.752	0.074	2.649	2.881	91.716	85.990	95.290	0.000	96.951	94.270	98.400
1.00	2.896	0.077	2.789	3.033	86.029	80.670	89.410	0.000	94.641	91.940	96.010

Tab. 37. Srovnání výsledků - období I+II+III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.869	0.057	1.768	1.974	99.944	99.730	99.980	1.000	99.986	99.900	100.000
0.746	1.992	0.061	1.884	2.103	99.504	98.100	99.980	0.714	99.844	99.290	100.000
0.80	2.136	0.065	2.020	2.256	97.960	94.730	99.580	0.143	99.214	97.710	99.860
0.85	2.270	0.069	2.146	2.397	95.213	91.620	97.260	0.000	98.074	96.040	99.000
0.90	2.403	0.073	2.273	2.537	91.453	88.440	94.300	0.000	96.490	94.490	97.650
0.95	2.537	0.077	2.399	2.678	87.120	84.490	90.260	0.000	94.597	92.870	95.920
1.00	2.670	0.081	2.525	2.819	82.436	79.240	85.660	0.000	92.437	91.110	93.980

Tabulky 38. až 57. ukazují výsledky vodohospodářského řešení pro měnící se nalepšený odtok O_p . V tabulce jsou opět znázorněny následující informace. Střední hodnota zabezpečení podle trvání $\mu(P_T)$, minimální hodnoty $\min(P_T)$ a maximální hodnoty $\max(P_T)$. Dále výsledky robustnosti daného návrhu a výsledky zabezpečení množství nedodané vody z nádrže opět střední hodnoty $\mu(P_D)$, minimum $\min(P_D)$ a maximum $\max(P_D)$.

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – Kombinace všech scénářů.

Tab. 38. Srovnání výsledků - období I.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
2.400	99.786	98.270	99.940	0.897	99.952	99.440	100.000
2.491	99.509	97.620	99.940	0.690	99.866	99.200	100.000
2.500	99.449	97.620	99.940	0.655	99.851	99.180	100.000
2.600	98.646	94.570	99.940	0.414	99.605	98.380	100.000
2.700	97.110	90.310	99.940	0.172	99.081	96.760	100.000
2.800	94.876	84.940	99.750	0.034	98.224	94.590	99.980
2.900	91.841	78.550	98.820	0.000	97.081	92.140	99.620

Tab. 39. Srovnání výsledků - období II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
2.200	99.780	98.180	99.940	0.897	99.946	99.340	100.000
2.282	99.504	95.400	99.940	0.793	99.858	98.440	100.000
2.300	99.443	94.840	99.940	0.690	99.830	98.150	100.000
2.400	98.710	90.770	99.940	0.448	99.579	96.600	100.000
2.500	96.995	86.510	99.940	0.172	98.992	94.640	100.000
2.600	94.448	80.680	99.940	0.069	98.044	92.350	100.000
2.700	90.960	72.820	99.750	0.034	96.714	89.340	99.990

Tab. 40. Srovnání výsledků - období III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
1.800	99.921	99.380	99.940	0.966	99.992	99.780	100.000
1.900	99.611	94.940	99.940	0.897	99.897	98.340	100.000
1.923	99.505	94.100	99.940	0.897	99.854	97.980	100.000
2.000	98.927	89.010	99.940	0.759	99.638	96.380	100.000
2.100	97.467	80.130	99.940	0.552	99.087	93.150	100.000
2.200	94.903	70.690	99.940	0.345	98.079	89.250	100.000
2.300	91.458	61.060	99.940	0.138	96.695	85.540	100.000

Tab. 41. Srovnání výsledků - období I+II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
2.200	99.922	99.370	99.970	0.966	99.984	99.790	100.000
2.300	99.792	98.210	99.970	0.862	99.942	99.410	100.000
2.362	99.629	96.960	99.970	0.828	99.888	98.930	100.000
2.400	99.518	96.260	99.970	0.759	99.844	98.630	100.000
2.500	98.772	93.860	99.970	0.345	99.598	97.610	100.000
2.600	97.375	90.250	99.970	0.138	99.110	96.260	100.000

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.700	95.106	83.720	99.780	0.034	98.331	94.140	99.980

Tab. 42. Srovnání výsledků - období I+I+III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.973	99.790	99.980	1.000	99.998	99.930	100.000
1.900	99.870	98.310	99.980	0.897	99.966	99.450	100.000
2.000	99.642	96.340	99.980	0.862	99.879	98.790	100.000
2.035	99.503	95.410	99.980	0.862	99.832	98.470	100.000
2.100	99.146	93.280	99.980	0.724	99.693	97.720	100.000
2.200	98.239	89.670	99.980	0.517	99.339	96.290	100.000
2.300	96.950	85.320	99.980	0.276	98.832	94.650	100.000

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – SRES scénář A1B.

Tab. 43. Srovnání výsledků - období I.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.400	99.738	98.920	99.940	0.833	99.941	99.710	100.000
2.462	99.505	98.550	99.940	0.583	99.866	99.540	100.000
2.500	99.250	97.810	99.940	0.583	99.789	99.440	100.000
2.600	98.263	94.570	99.940	0.417	99.473	98.380	100.000
2.700	96.579	90.310	99.560	0.083	98.893	96.760	99.860
2.800	94.266	84.940	98.920	0.000	97.964	94.590	99.730
2.900	91.118	78.550	98.270	0.000	96.773	92.140	99.500

Tab. 44. Srovnání výsledků - období II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.200	99.638	98.180	99.940	0.833	99.898	99.340	100.000
2.23	99.508	97.440	99.940	0.833	99.857	99.170	100.000
2.300	99.097	94.840	99.940	0.750	99.702	98.150	100.000
2.400	98.068	90.770	99.940	0.417	99.343	96.600	100.000
2.500	96.078	86.510	99.940	0.083	98.653	94.640	100.000
2.600	93.502	80.680	99.750	0.083	97.658	92.350	99.930
2.700	89.986	72.820	98.640	0.000	96.274	89.340	99.570

Tab. 45. Srovnání výsledků - období III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.893	99.380	99.940	0.917	99.982	99.780	100.000
1.900	99.500	94.940	99.940	0.917	99.858	98.340	100.000
2.000	98.904	89.010	99.940	0.750	99.656	96.380	100.000
2.100	97.530	80.130	99.940	0.583	99.174	93.290	100.000
2.200	94.683	70.690	99.940	0.250	98.128	89.440	100.000
2.300	90.994	61.060	99.470	0.000	96.676	85.790	99.890

Tab. 46. Srovnání výsledků - období I+II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
------------------------	----------------	------------------	------------------	------------	----------------	------------------	------------------

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.200	99.819	99.090	99.970	0.833	99.948	99.670	100.000
2.300	99.523	97.420	99.970	0.833	99.844	99.070	100.000
2.301	99.512	97.330	99.970	0.833	99.843	99.070	100.000
2.400	98.934	95.340	99.970	0.583	99.643	98.290	100.000
2.500	97.696	92.330	99.920	0.250	99.222	97.050	100.000
2.600	95.906	88.120	99.600	0.083	98.562	95.440	99.870
2.700	93.302	81.640	98.390	0.000	97.573	93.040	99.490

Tab. 47. Srovnání výsledků - období I+II+III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.964	99.790	99.980	1.000	99.994	99.930	100.000
1.900	99.833	98.310	99.980	0.917	99.953	99.450	100.000
2.000	99.635	96.340	99.980	0.917	99.885	98.790	100.000
2.037	99.501	95.380	99.980	0.917	99.843	98.450	100.000
2.100	99.156	93.280	99.980	0.667	99.718	97.730	100.000
2.200	98.128	89.670	99.980	0.500	99.342	96.290	100.000
2.300	96.675	85.320	99.820	0.250	98.786	94.650	99.960

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – SRES scénář B1.

Tab. 48. Srovnání výsledků - období I.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.400	99.735	98.270	99.940	0.900	99.931	99.440	100.000
2.500	99.511	97.620	99.940	0.700	99.863	99.180	100.000
2.505	99.502	97.620	99.940	0.700	99.857	99.170	100.000
2.600	98.805	96.510	99.940	0.300	99.666	98.810	100.000
2.700	97.111	91.420	99.560	0.100	99.104	97.160	99.910
2.800	94.882	85.310	99.380	0.000	98.254	94.980	99.780
2.900	91.865	79.110	98.820	0.000	97.068	92.500	99.620

Tab. 49. Srovnání výsledků - období II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.200	99.865	99.470	99.940	0.900	99.972	99.850	100.000
2.300	99.652	98.920	99.940	0.700	99.907	99.630	100.000
2.359	99.512	98.450	99.940	0.700	99.852	99.480	100.000
2.400	99.242	97.530	99.940	0.600	99.775	99.240	100.000
2.500	98.334	95.120	99.940	0.400	99.439	98.280	100.000
2.600	96.705	91.980	99.940	0.100	98.833	97.110	100.000
2.700	93.827	87.250	99.750	0.100	97.829	95.490	99.990

Tab. 50. Srovnání výsledků - období III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
2.000	99.893	99.470	99.940	0.900	99.988	99.880	100.000
2.100	99.726	97.990	99.940	0.900	99.929	99.350	100.000

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.141	99.512	96.140	99.940	0.900	99.851	98.720	100.000
2.200	98.948	91.980	99.940	0.700	99.680	97.430	100.000
2.300	97.863	86.050	99.940	0.400	99.256	94.940	100.000

Tab. 51. Srovnání výsledků - období I+II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.200	99.905	99.460	99.970	0.900	99.977	99.830	100.000
2.300	99.775	99.040	99.970	0.800	99.934	99.640	100.000
2.400	99.519	98.120	99.970	0.700	99.855	99.350	100.000
2.402	99.511	98.120	99.970	0.700	99.851	99.340	100.000
2.500	98.954	96.820	99.970	0.500	99.653	98.830	100.000
2.600	97.789	95.110	99.970	0.100	99.251	98.090	100.000
2.700	95.499	90.340	99.640	0.100	98.467	96.460	99.950

Tab. 52. Srovnání výsledků - období I+II+III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.980	99.980	99.980	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.980	99.980	99.980	1.000	100.000	100.000	100.000
2.000	99.964	99.820	99.980	1.000	99.996	99.960	100.000
2.100	99.906	99.300	99.980	0.900	99.976	99.780	100.000
2.200	99.605	96.980	99.980	0.900	99.877	99.030	100.000
2.230	99.501	96.400	99.980	0.900	99.835	98.740	100.000
2.300	99.148	94.730	99.980	0.500	99.704	98.070	100.000

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – SRES scénář A2.

Tab. 53. Srovnání výsledků - období I.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.400	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
2.500	99.700	98.920	99.940	0.714	99.941	99.770	100.000
2.540	99.501	98.450	99.940	0.714	99.886	99.600	100.000
2.600	99.076	97.710	99.940	0.571	99.743	99.260	100.000
2.700	98.019	95.580	99.940	0.429	99.369	98.390	100.000
2.800	95.914	90.770	99.750	0.143	98.629	96.820	99.980
2.900	93.047	85.590	98.730	0.000	97.629	94.930	99.600

Tab. 54. Srovnání výsledků - období II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.200	99.900	99.660	99.940	1.000	99.993	99.950	100.000
2.300	99.739	99.470	99.940	0.571	99.939	99.830	100.000
2.351	99.513	98.920	99.940	0.571	99.873	99.700	100.000
2.400	99.050	98.180	99.840	0.286	99.704	99.450	99.990
2.500	96.654	94.470	99.100	0.000	98.934	98.210	99.800
2.600	92.847	89.290	98.080	0.000	97.579	96.030	99.430

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.700	88.536	83.270	96.140	0.000	95.877	93.710	98.420

Tab. 55. Srovnání výsledků - období III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
1.890	99.516	98.360	99.940	0.714	99.856	99.490	100.000
2.000	97.584	92.530	99.940	0.571	99.109	96.890	100.000
2.100	94.130	83.640	99.380	0.000	97.734	93.150	99.800
2.200	89.501	75.220	98.270	0.000	95.707	89.250	99.390
2.300	83.103	67.630	94.940	0.000	93.069	85.540	98.330

Tab. 56. Srovnání výsledků - období I+II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.200	99.950	99.830	99.970	1.000	99.996	99.970	100.000
2.300	99.871	99.740	99.970	1.000	99.969	99.910	100.000
2.400	99.526	99.090	99.920	0.429	99.853	99.720	99.990
2.405	99.506	99.090	99.920	0.429	99.841	99.710	99.990
2.500	98.204	97.240	99.090	0.000	99.439	99.110	99.780
2.600	95.984	94.180	97.880	0.000	98.656	98.010	99.320
2.700	93.276	90.340	96.310	0.000	97.606	96.830	98.630

Tab. 57. Srovnání výsledků - období I+II+III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.980	99.980	99.980	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.776	99.080	99.980	0.714	99.937	99.760	100.000
1.954	99.511	98.250	99.980	0.714	99.831	99.380	100.000
2.000	99.196	97.510	99.980	0.571	99.703	98.960	100.000
2.100	98.044	94.550	99.790	0.571	99.247	97.720	99.930
2.200	96.477	91.740	99.330	0.000	98.566	96.420	99.780
2.300	94.280	89.210	98.160	0.000	97.664	95.180	99.390

4.2.5.2 Representative Concentration Pathways RCPs

Tabulky 58. až 72. ukazují výsledky vodohospodářského řešení pro nalepšený odtok O_p odvozený pomocí koeficientu nalepšení α . V tabulce jsou znázorněny základní statistické charakteristiky střední hodnota, směrodatná odchylka min a max nalepšeného odtoku O_p . Střední hodnota zabezpečení podle trvání $\mu(P_T)$, minimální hodnoty min(P_T) a maximální hodnoty max(P_T). Dále výsledky robustnosti daného návrhu a výsledky zabezpečení množství nedodané vody z nádrže opět střední hodnoty $\mu(P_D)$, minimum min(P_D) a maximum max(P_D).

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

Tab. 58. Srovnání výsledků - období I.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.022	0.290	1.467	2.282	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.7646	2.209	0.316	1.603	2.492	99.531	98.140	99.810	0.750	99.938	99.560	100.000
0.80	2.311	0.331	1.677	2.608	99.115	97.030	99.810	0.625	99.808	99.240	100.000
0.85	2.455	0.351	1.782	2.771	98.213	95.370	99.810	0.500	99.544	98.700	100.000
0.90	2.600	0.372	1.887	2.934	95.819	90.650	99.810	0.125	98.661	96.980	100.000
0.95	2.744	0.393	1.991	0.000	89.956	83.710	95.920	0.000	96.910	94.750	98.950

Tab. 59. Srovnání výsledků - období II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.749	0.196	1.401	1.934	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	1.999	0.224	1.601	2.211	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	2.124	0.238	1.701	2.349	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.90	2.249	0.252	1.801	2.487	99.531	98.700	99.810	0.625	99.926	99.650	100.000
0.95	2.374	0.266	1.901	0.000	96.510	93.980	98.970	0.000	99.021	98.080	99.840
1.00	2.498	0.280	0.000	0.000	90.128	88.430	92.310	0.000	96.951	96.070	97.720

Tab. 60. Srovnání výsledků - období III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.631	0.163	1.410	1.871	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	1.864	0.187	1.612	2.138	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	1.981	0.199	1.712	2.272	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.90	2.097	0.210	1.813	2.406	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.92	2.144	0.215	1.853	2.459	99.531	98.420	99.810	0.750	99.951	99.710	100.000
0.95	2.214	0.222	1.914	2.539	98.178	95.370	99.810	0.250	99.491	98.550	100.000
1.00	2.330	0.234	2.014	2.673	91.689	89.260	94.260	0.000	97.289	96.260	98.700

Tab. 61. Srovnání výsledků - období I+II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.886	0.241	1.460	2.108	99.900	99.900	99.900	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.155	0.276	1.668	2.409	99.814	99.210	99.900	0.875	99.986	99.890	100.000
0.8339	2.246	0.288	1.739	2.511	99.503	98.380	99.900	0.625	99.898	99.660	100.000
0.85	2.290	0.293	1.772	2.560	99.016	97.540	99.900	0.500	99.753	99.380	100.000
0.90	2.424	0.310	1.877	2.710	95.671	92.550	98.380	0.000	98.726	97.770	99.440
0.95	2.559	0.328	1.981	2.861	90.741	88.380	93.800	0.000	96.963	95.810	97.840
1.00	2.693	0.345	2.085	3.011	83.263	79.640	86.440	0.000	94.274	92.980	95.390

Tab. 62. Srovnání výsledků - období I+II+III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.801	0.207	1.453	2.029	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.058	0.236	1.661	2.319	99.811	99.010	99.940	0.875	99.968	99.760	100.000
0.825	2.122	0.244	1.713	2.391	99.523	97.160	99.940	0.750	99.874	99.210	100.000
0.85	2.187	0.251	1.765	2.464	98.905	95.210	99.940	0.625	99.685	98.570	100.000
0.90	2.315	0.266	1.869	2.609	95.943	90.310	98.730	0.000	98.756	96.910	99.640
0.95	2.444	0.281	1.972	2.754	90.586	84.660	95.680	0.000	96.908	94.760	98.580
1.00	2.572	0.296	2.076	2.899	83.368	78.920	88.640	0.000	94.283	92.400	95.920

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – Kombinace scénář RCP 4,5.

Tab. 63. Srovnání výsledků - období I.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	2.055	0.262	1.623	2.282	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.348	0.299	1.855	2.608	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	2.495	0.318	1.971	2.771	99.600	98.970	99.810	0.750	99.948	99.790	100.000
0.8535	2.505	0.319	1.979	2.782	99.533	98.700	99.810	0.750	99.935	99.740	100.000
0.90	2.642	0.337	2.087	2.934	98.143	97.030	99.810	0.250	99.430	99.110	100.000
0.95	2.788	0.355	2.203	0.000	92.870	88.710	95.920	0.000	97.978	96.840	98.950

Tab. 64. Srovnání výsledků - období II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.752	0.211	1.401	1.934	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.002	0.242	1.601	2.211	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	2.127	0.257	1.701	2.349	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.90	2.253	0.272	1.801	2.487	99.533	98.700	99.810	0.750	99.913	99.650	100.000
0.901	2.255	0.272	1.803	2.490	99.533	98.700	99.810	0.750	99.905	99.620	100.000
0.95	2.377	0.287	1.901	0.000	97.378	93.980	98.970	0.000	99.313	98.080	99.840
1.00	2.503	0.302	0.000	0.000	89.748	88.430	91.760	0.000	97.020	96.070	97.720

Tab. 65. Srovnání výsledků - období III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.716	0.184	1.410	1.871	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	1.961	0.210	1.612	2.138	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	2.084	0.224	1.712	2.272	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.90	2.207	0.237	1.813	2.406	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.9161	2.246	0.241	1.845	2.449	99.533	98.700	99.810	0.750	99.950	99.800	100.000
0.95	2.329	0.250	1.914	2.539	96.895	95.370	98.420	0.000	99.108	98.550	99.550
1.00	2.452	0.264	2.014	2.673	90.300	89.260	91.480	0.000	96.733	96.260	97.340

Tab. 66. Srovnání výsledků - období I+II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.903	0.237	1.512	2.108	99.900	99.900	99.900	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.175	0.270	1.728	2.409	99.900	99.900	99.900	1.000	100.000	100.000	100.000
0.8399	2.284	0.284	1.814	2.529	99.520	98.380	99.900	0.750	99.888	99.550	100.000
0.85	2.311	0.287	1.836	2.560	99.310	97.540	99.900	0.750	99.845	99.380	100.000
0.90	2.447	0.304	1.944	2.710	96.748	94.910	98.380	0.000	99.078	98.390	99.440
0.95	2.583	0.321	2.052	2.861	91.540	89.910	92.960	0.000	97.345	96.640	97.750
1.00	2.719	0.338	2.160	3.011	84.528	83.520	85.740	0.000	94.813	94.220	95.390

Tab. 67. Srovnání výsledků - období I+II+ III.

α	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	$\sigma(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	min(O _p) [m ³ s ⁻¹]	max(O _p) [m ³ s ⁻¹]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P _T) [%]	max(P _T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P _D) [%]	max(P _D) [%]
0.70	1.841	0.219	1.478	2.029	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.104	0.250	1.689	2.319	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	2.236	0.266	1.795	2.464	99.775	99.470	99.940	0.750	99.958	99.890	100.000
0.8625	2.268	0.270	1.821	2.500	99.520	99.010	99.940	0.500	99.880	99.730	100.000
0.90	2.367	0.282	1.900	2.609	97.758	96.880	98.730	0.000	99.335	99.060	99.640
0.95	2.498	0.297	2.006	2.754	92.438	91.330	93.920	0.000	97.580	97.150	98.030
1.00	2.630	0.313	2.111	2.899	84.688	83.460	85.310	0.000	94.920	94.420	95.410

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – Kombinace scénář RCP 8,5.

Tab. 68. Srovnání výsledků - období I.

α	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	$\sigma(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	min(O _p) [m ³ s ⁻¹]	max(O _p) [m ³ s ⁻¹]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P _T) [%]	max(P _T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P _D) [%]	max(P _D) [%]
0.70	1.990	0.312	1.467	2.236	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.742	2.109	0.330	1.555	2.370	99.533	98.700	99.810	0.750	99.945	99.780	100.000
0.80	2.274	0.356	1.677	2.555	98.420	97.030	99.810	0.250	99.615	99.240	100.000
0.85	2.416	0.378	1.782	2.715	96.825	95.370	99.810	0.250	99.140	98.700	100.000
0.90	2.558	0.400	1.887	2.875	93.495	90.650	99.250	0.000	97.893	96.980	99.760
0.95	2.700	0.423	1.991	0.000	87.043	83.710	94.260	0.000	95.843	94.750	98.030
1.00	2.842	0.445	0.000	0.000	81.423	79.550	85.930	0.000	93.220	92.600	94.320

Tab. 69. Srovnání výsledků - období II.

α	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	$\sigma(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	min(O _p) [m ³ s ⁻¹]	max(O _p) [m ³ s ⁻¹]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P _T) [%]	max(P _T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P _D) [%]	max(P _D) [%]
0.70	1.746	0.180	1.452	1.901	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	1.996	0.205	1.660	2.172	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	2.120	0.218	1.763	2.308	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.90	2.245	0.231	1.867	2.444	99.530	99.250	99.810	0.500	99.940	99.820	100.000
0.95	2.370	0.244	1.971	0.000	95.643	95.090	95.920	0.000	98.730	98.420	98.950
1.00	2.494	0.257	0.000	0.000	90.508	89.260	92.310	0.000	96.883	96.340	97.530

Tab. 70. Srovnání výsledků - období III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.546	0.070	1.441	1.635	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	1.767	0.080	1.646	1.869	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.85	1.877	0.085	1.749	1.986	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.90	1.987	0.090	1.852	2.102	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
0.946	2.089	0.095	1.947	2.210	99.530	99.250	99.810	0.750	99.928	99.840	100.000
0.95	2.098	0.095	1.955	2.219	99.460	99.250	99.810	0.500	99.875	99.790	100.000
1.00	2.208	0.100	2.058	2.336	93.078	91.480	94.260	0.000	97.845	97.470	98.700

Tab. 71. Srovnání výsledků - období I+II.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.868	0.245	1.460	2.059	99.900	99.900	99.900	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.135	0.280	1.668	2.354	99.728	99.210	99.900	0.750	99.973	99.890	100.000
0.829	2.212	0.290	1.729	2.439	99.520	98.650	99.900	0.750	99.930	99.740	100.000
0.85	2.268	0.298	1.772	2.501	98.723	97.820	99.760	0.250	99.660	99.380	99.980
0.90	2.402	0.315	1.877	2.648	94.595	92.550	97.400	0.000	98.375	97.770	99.160
0.95	2.535	0.333	1.981	2.795	89.943	88.380	93.800	0.000	96.580	95.810	97.840
1.00	2.668	0.350	2.085	2.942	81.998	79.640	86.440	0.000	93.735	92.980	95.080

Tab. 72. Srovnání výsledků - období I+II+III.

α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\sigma(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\min(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\max(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
0.70	1.761	0.186	1.453	1.918	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
0.80	2.012	0.212	1.661	2.192	99.683	99.010	99.940	0.750	99.935	99.760	100.000
0.808	2.032	0.214	1.678	2.214	99.520	98.450	99.940	0.750	99.885	99.600	100.000
0.85	2.138	0.225	1.765	2.329	98.035	95.210	99.840	0.500	99.413	98.570	99.960
0.90	2.264	0.238	1.869	2.466	94.128	90.310	98.450	0.000	98.178	96.910	99.480
0.95	2.389	0.252	1.972	2.603	88.735	84.660	95.680	0.000	96.235	94.760	98.580
1.00	2.515	0.265	2.076	2.740	82.048	78.920	88.640	0.000	93.645	92.400	95.920

Tabulky 73. až 87. ukazují výsledky vodohospodářského řešení pro nalepšený odtok O_p . V tabulce jsou stanoveny střední hodnota zabezpečení podle trvání $\mu(P_T)$, minimální hodnoty $\min(P_T)$ a maximální hodnoty $\max(P_T)$. Dále výsledky robustnosti daného návrhu a výsledky zabezpečení množství nedodané vody z nádrže opět střední hodnoty $\mu(P_D)$, minimum $\min(P_D)$ a maximum $\max(P_D)$.

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

Tab. 73. Srovnání výsledků - období I.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.671	98.700	99.810	0.875	99.961	99.690	100.000
1.953	99.533	97.590	99.810	0.875	99.894	99.150	100.000
2.000	99.046	93.700	99.810	0.875	99.714	97.710	100.000
2.100	97.624	85.380	99.810	0.750	99.145	94.190	100.000
2.200	95.405	75.670	99.810	0.750	98.484	90.960	100.000
2.300	93.218	65.950	99.810	0.625	97.774	87.750	100.000

Tab. 74. Srovnání výsledků - období II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.8972	99.531	98.420	99.810	0.750	99.943	99.670	100.000
1.900	99.461	97.860	99.810	0.750	99.931	99.640	100.000
2.000	98.249	92.040	99.810	0.750	99.543	97.750	100.000
2.100	96.584	83.440	99.810	0.750	98.943	94.780	100.000
2.200	94.503	74.000	99.810	0.750	98.081	90.990	100.000
2.300	92.318	65.120	99.810	0.750	97.130	87.080	100.000

Tab. 75. Srovnání výsledků - období III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.885	99.533	97.590	99.810	0.875	99.926	99.410	100.000
1.900	99.463	97.030	99.810	0.875	99.891	99.130	100.000
2.000	98.283	90.650	99.810	0.750	99.474	96.680	100.000
2.100	96.375	82.050	99.810	0.750	98.748	93.900	100.000
2.200	93.149	77.330	99.810	0.500	97.561	91.370	100.000
2.300	87.876	69.280	99.810	0.375	95.671	87.760	100.000

Tab. 76. Srovnání výsledků - období I+II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	$\min(P_D)$ [%]	$\max(P_D)$ [%]
1.800	99.779	98.930	99.900	0.875	99.960	99.680	100.000
1.895	99.503	96.990	99.900	0.875	99.876	99.050	100.000
1.900	99.450	96.710	99.900	0.750	99.864	99.010	100.000
2.000	98.513	92.680	99.900	0.750	99.530	97.370	100.000
2.100	96.743	85.330	99.900	0.750	98.891	94.600	100.000
2.200	94.556	76.860	99.900	0.750	98.095	91.350	100.000
2.300	92.353	68.110	99.900	0.625	97.250	87.890	100.000

Tab. 77. Srovnání výsledků - období I+I+III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.859	99.290	99.940	0.875	99.974	99.790	100.000
1.900	99.523	97.810	99.940	0.750	99.874	99.340	100.000
1.902	99.511	97.810	99.940	0.750	99.869	99.330	100.000
2.000	98.504	94.100	99.940	0.750	99.511	97.950	100.000
2.100	96.594	86.140	99.940	0.750	98.809	95.110	100.000
2.200	93.944	77.630	99.940	0.500	97.850	91.590	100.000
2.300	90.669	68.190	99.940	0.375	96.635	87.910	100.000

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – scénář RCP 4,5.

Tab. 78. Srovnání výsledků - období I.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
2.000	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
2.050	99.533	98.700	99.810	0.750	99.890	99.560	100.000
2.100	99.045	96.750	99.810	0.750	99.743	98.970	100.000
2.200	97.035	88.710	99.810	0.750	99.228	96.910	100.000
2.300	95.370	82.050	99.810	0.750	98.633	94.530	100.000

Tab. 79. Srovnání výsledků - období II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.600	98.970	99.810	0.750	99.953	99.810	100.000
1.913	99.533	98.700	99.810	0.750	99.883	99.530	100.000
2.000	97.868	92.040	99.810	0.750	99.438	97.750	100.000
2.100	95.718	83.440	99.810	0.750	98.695	94.780	100.000
2.200	93.358	74.000	99.810	0.750	97.748	90.990	100.000
2.300	91.138	65.120	99.810	0.750	96.770	87.080	100.000

Tab. 80. Srovnání výsledků - období III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.866	99.533	98.700	99.810	0.750	99.933	99.730	100.000
1.900	99.115	97.030	99.810	0.750	99.783	99.130	100.000
2.000	97.520	90.650	99.810	0.750	99.170	96.680	100.000
2.100	95.370	82.050	99.810	0.750	98.475	93.900	100.000
2.200	94.190	77.330	99.810	0.750	97.843	91.370	100.000
2.300	92.248	69.560	99.810	0.750	96.940	87.760	100.000

Tab. 81. Srovnání výsledků - období I+II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.900	99.900	99.900	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.798	99.490	99.900	0.750	99.975	99.900	100.000

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.946	99.520	98.380	99.900	0.75	99.855	99.420	100.000
2.000	98.930	96.020	99.900	0.750	99.718	98.870	100.000
2.100	97.228	89.210	99.900	0.750	99.133	96.530	100.000
2.200	94.973	80.190	99.900	0.750	98.353	93.410	100.000
2.300	92.890	71.860	99.900	0.750	97.538	90.150	100.000

Tab. 82. Srovnání výsledků - období I+II+III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.940	99.940	99.940	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.638	98.730	99.940	0.750	99.913	99.650	100.000
1.914	99.523	98.270	99.940	0.750	99.865	99.460	100.000
2.000	98.528	94.290	99.940	0.750	99.535	98.140	100.000
2.100	96.490	86.140	99.940	0.750	98.843	95.370	100.000
2.200	94.363	77.630	99.940	0.750	98.050	92.200	100.000
2.300	92.325	69.480	99.940	0.750	97.188	88.750	100.000

Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – scénář RCP 8,5.

Tab. 83. Srovnání výsledků - období I.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.533	98.700	99.810	0.750	99.923	99.690	100.000
1.912	99.533	98.700	99.810	0.750	99.908	99.630	100.000
2.000	98.283	93.700	99.810	0.750	99.428	97.710	100.000
2.100	96.203	85.380	99.810	0.750	98.548	94.190	100.000
2.200	93.775	75.670	99.810	0.750	97.740	90.960	100.000
2.300	91.065	65.950	99.810	0.500	96.915	87.750	100.000

Tab. 84. Srovnání výsledků - období II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.880	99.533	98.700	99.810	0.750	99.938	99.750	100.000
1.900	99.323	97.860	99.810	0.750	99.910	99.640	100.000
2.000	98.630	95.090	99.810	0.750	99.648	98.590	100.000
2.100	97.450	90.370	99.810	0.750	99.190	96.760	100.000
2.200	95.648	83.160	99.810	0.750	98.415	93.660	100.000
2.300	93.498	74.560	99.810	0.750	97.490	89.960	100.000

Tab. 85. Srovnání výsledků - období III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.900	99.810	99.810	99.810	1.000	100.000	100.000	100.000
1.977	99.533	98.700	99.810	0.750	99.890	99.560	100.000
2.000	99.045	96.750	99.810	0.750	99.778	99.110	100.000
2.100	97.380	90.370	99.810	0.750	99.020	96.120	100.000

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
2.200	92.108	79.830	99.530	0.250	97.280	92.070	99.890
2.300	83.505	69.280	95.370	0.000	94.403	88.260	98.410

Tab. 86. Srovnání výsledků - období I+II.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.658	98.930	99.900	0.750	99.920	99.680	100.000
1.837	99.520	98.380	99.900	0.750	99.858	99.430	100.000
1.900	99.103	96.710	99.900	0.750	99.753	99.010	100.000
2.000	98.095	92.680	99.900	0.750	99.343	97.370	100.000
2.100	96.258	85.330	99.900	0.750	98.650	94.600	100.000
2.200	94.140	76.860	99.900	0.750	97.838	91.350	100.000
2.300	91.815	68.110	99.900	0.500	96.963	87.890	100.000

Tab. 87. Srovnání výsledků - období I+II+III.

O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost	$\mu(P_D)$ [%]	min(P_D) [%]	max(P_D) [%]
1.800	99.778	99.290	99.940	0.750	99.948	99.790	100.000
1.878	99.523	98.270	99.940	0.750	99.860	99.440	100.000
1.900	99.408	97.810	99.940	0.750	99.835	99.340	100.000
2.000	98.480	94.100	99.940	0.750	99.488	97.950	100.000
2.100	96.698	87.070	99.940	0.750	98.775	95.110	100.000
2.200	93.525	77.910	99.840	0.250	97.650	91.590	99.960
2.300	89.013	68.190	98.450	0.000	96.083	87.910	99.470

5 Shrnutí výsledků

5.1 Nádrž Vír I – nejistoty měření

Z provedené analýzy je zřejmé, že velikosti vstupních nejistot ovlivňují zásobní objem nádrže. S narůstající velikostí vstupních nejistot roste i rozptyl hodnot zásobního objemu.

Z tabulky 2 na straně 30 je možno vyčíst následující výsledky. Pokud budou uvažovány nejistoty uplatněné pouze na přítoku do nádrže, při zabezpečení odtoku vody z nádrže 100%, bez uvažování ztrát vody z nádrže se mohou výsledky prezentovat takto: Pro vstupní nejistotou $U_a = \pm 6\%$ uplatněnou na přítoku a $O_p = 2,4 m^3 \cdot s^{-1}$ je výsledný zásobní objem nádrže $56\,500\,000 \pm 1\,805\,134 m^3$, procentuálně $\pm 3,2\%$, zásobní objem tedy může nabývat hodnot $V_z \in \langle 54\,694\,866 m^3; 58\,305\,134 m^3 \rangle$. Pro vstupní nejistotou $U_a = \pm 9\%$ uplatněnou na přítoku a $O_p = 2,4 m^3 \cdot s^{-1}$ je výsledný zásobní objem nádrže $56\,600\,000 \pm 2\,707\,659 m^3$, procentuálně $\pm 4,78\%$, zásobní objem tedy může nabývat hodnot $V_z \in \langle 53\,892\,341 m^3; 59\,307\,659 m^3 \rangle$.

Z grafu na obrázku 9 na straně 31 lze odečíst hodnoty, které jsou bližší stávající hodnotě zásobního objemu nádrže Vír I uvedené v manipulačním řádu. Opět kombinace uplatnění nejistot a ztrát vody je totožná s předchozím odstavcem. Pro vstupní nejistotou $U_a = \pm 6\%$ uplatněnou na přítoku, bez uvažování ztrát a $O_p = 2,2 m^3 \cdot s^{-1}$ je výsledný zásobní objem nádrže $40\,236\,464 \pm 1\,804\,719 m^3$, procentuálně $\pm 4,49\%$, zásobní objem tedy může nabývat hodnot $V_z \in \langle 38\,431\,745 m^3; 42\,041\,183 m^3 \rangle$. Pro ilustraci stejný případ avšak s uplatněním nejistot $U_a = \pm 6\%$ na všech vstupech a s uvažováním ztrát vody z nádrže pak zásobní objem pro $O_p = 2,2 m^3 \cdot s^{-1}$ vychází $42\,139\,064$

$\pm 1\,866\,836\text{ m}^3$, procentuálně $\pm 4,43\%$, zásobní objem tedy nabývá hodnot $V_z \in \langle 40\,272\,228\text{ m}^3; 44\,005\,900\text{ m}^3 \rangle$ viz tabulka 4 straně 33. Stejně pak v tabulce 4 na straně 33 možno zjistit, že pokud bude uvažováno stejné uplatnění vstupních nejistot $\pm 6\%$, může zásobní objem nádrže pro hodnotu $O_p = 2,4\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nabývat přibližně hodnot $V_z \in \langle 56\,780\,267\text{ m}^3; 60\,311\,829\text{ m}^3 \rangle$, neboli $V_z = 58\,546\,048 \pm 1\,765\,781\text{ m}^3$, což odpovídá $\pm 3,01\%$ a pro rozšířenou nejistotou $\pm 9\%$ zásobní objem může nabývat dokonce hodnot $V_z \in \langle 55\,917\,965\text{ m}^3; 61\,177\,067\text{ m}^3 \rangle$, neboli $V_z = 58\,547\,516 \pm 2\,629\,551\text{ m}^3$, tedy $\pm 4,49\%$.

Z tabulky 4 je patrné, že s uvažováním ztrát vody z nádrže opět pro kombinaci uplatnění nejistot na přítoku, batygrafických křivkách, výparu a průsaku tělesem hráze dochází logicky při navýšení vstupní nejistoty pro odpovídající O_p k nárůstu rozšířených nejistot. Ovšem v porovnání stejné kombinace, ale bez uvažování ztrát tabulka 3, došlo k nárůstu střední hodnoty zásobního objemu přibližně od 2,8 až 4,5%. Ve většině případů došlo i k nárůstu rozšířených nejistot, například pro $O_p = 2,1\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ o 6,3 až 12,0%, ale pro $O_p = 2,4\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ došlo u velikosti rozšířených nejistot ± 6 , ± 9 a $\pm 15\%$ k poklesu o 2,2 až 3,7%.

Z testovaných vstupních nejistot má nejvýznamnější vliv na rozšířené nejistoty zásobního objemu přítok vody do nádrže, dále cca 10 x až 20 x nižší vliv mají batygrafické křivky nádrže, těsně následuje výpar z vodní hladiny, který je ovšem s batygrafickými křivkami vyrovnanější. Nejmenší vliv má průsak tělesem hráze, který je přibližně cca 10 x až 20 x nižší než výpar z vodní hladiny. Tento vliv při velikosti zásobního objemu je téměř zanedbatelný. Faktem také je, že kombinace nejistot batygrafických křivek, výparu a průsaku tělesem hráze má několikanásobně menší vliv než samotné nejistoty přítoku vody do nádrže.

Z prezentované analýzy zásobního objemu s 100% zabezpečeností odtoku vody z nádrže v podmínkách nejistot měření plyne doporučení, že na stranu bezpečnou se v pravděpodobnostním řešení, resp. v řešení s uvažováním nejistot dostaneme tehdy, pokud k výsledné střední hodnotě zásobního objemu nádrže přičteme hodnotu nejistoty.

Shrnutí výsledku 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 $O_p = 3,0\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kde je vliv zřetelně odstupňovaný. Zabezpečení podle trvání pro $O_p = 2,5\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vychází ve variantě bez uplatnění ztrát vody z nádrže v intervalu $P_T \in \langle 98,906\%; 98,908\% \rangle$ tedy $P_T = 98,907\% \pm 0,001\%$ pro vstupní nejistotu $\pm 3\%$ a v intervalu $P_T \in \langle 98,575\%; 99,129\% \rangle$ $P_T = 98,852\% \pm 0,277\%$ pro vstupní nejistotu $\pm 15\%$. Pro $O_p = 3,0\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se interval zabezpečení podle trvání pohybuje v intervalu $P_T \in \langle 90,511\%; 91,187\% \rangle$ $P_T = 90,849\% \pm 0,338\%$ pro 3% vstupní nejistotu a $P_T \in \langle 90,097\%; 92,071\% \rangle$ $P_T = 91,084\% \pm 0,987\%$ pro vstupní nejistotu 15%. Ve variantě 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 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 $O_p = 3,0\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 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 $O_p = 2,5\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v řešení bez uvažování nejistot a s uvažováním ztrát vody z nádrže odpovídá 8 poruchovým měsícům a pro $O_p = 3,0\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pak 70 měsícům. Při uvažování vstupních nejistot $\pm 3\%$ je počet poruchových měsíců v rozmezí 8 až 9 měsíců pro $O_p = 2,5\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a 66 až 72 měsíců pro

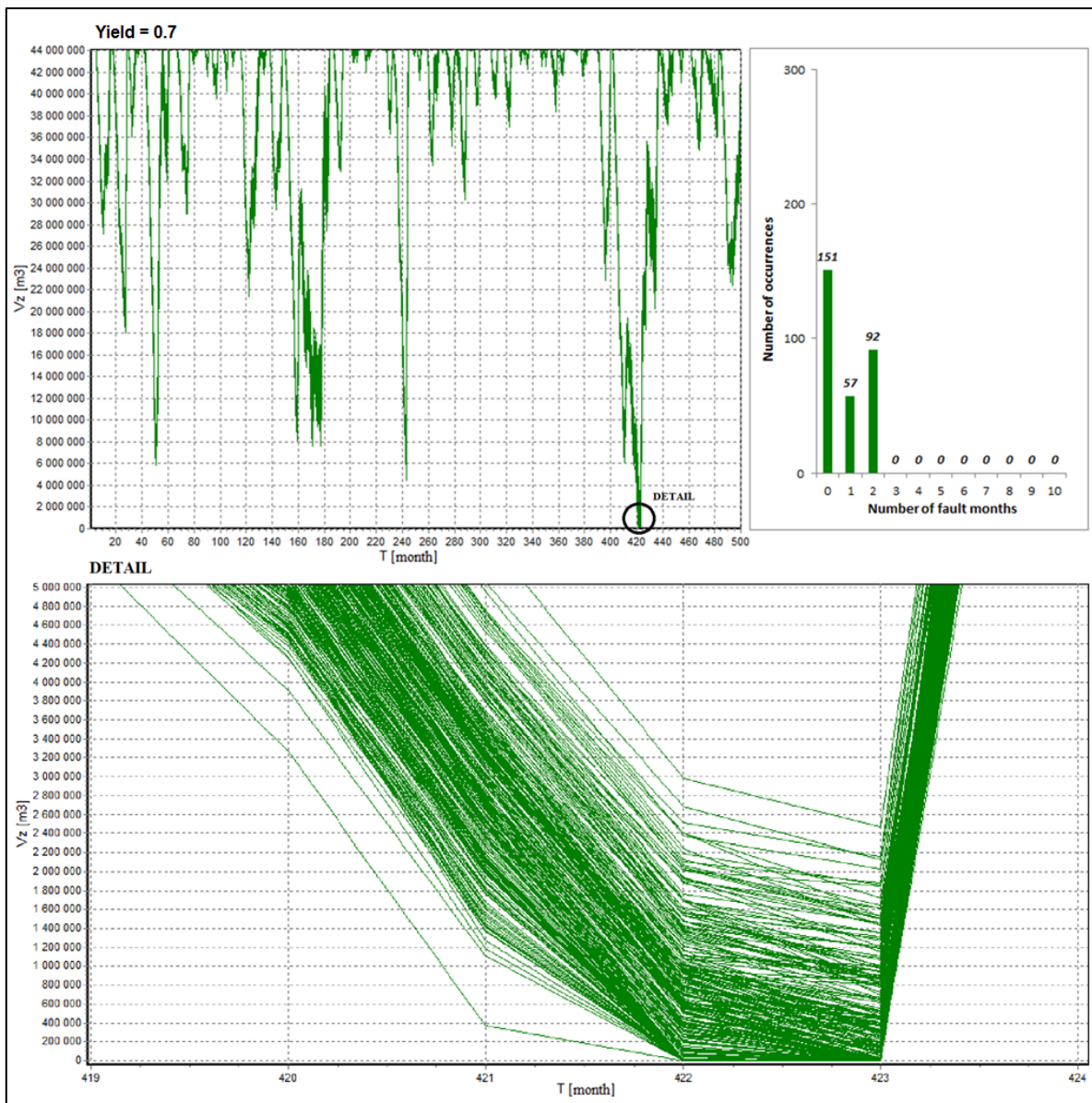
$O_p = 3,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Pro nejistotu vstupních dat $\pm 15\%$ je počet možných poruchových měsíců 8 až 12 pro $O_p = 2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a 60 až 76 měsíců pro $O_p = 3,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Z prezentovaných výsledků je vidět jak mohou nejistoty ovlivnit nárůst počtu poruchových měsíců a jakých intervalů může následně zabezpečení nabývat.

5.2 Nádrž Hanušovice – nejistoty měření

Z výsledků prezentovaných v praktické aplikaci je opět patrné, že nejistoty vstupních dat mohou výsledky zásobního objemu nádrže podhodnotit. Vyhodnocení pro profil B. Například zásobní objem V_z pro $O_p = 1,509 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s uvažováním ztrát se pohybuje pro $\pm 3\%$ velikosti nejistoty vstupních parametrů v rozmezí $\pm 2,25\%$. Zásobní objem může nabývat hodnot $V_z \in (21\,166\,452 \text{ m}^3; 22\,141\,384 \text{ m}^3)$. Pro $\pm 6\%$ vstupní nejistoty je rozmezí V_z přibližně $\pm 4\%$ a pohybuje se v intervalu $V_z \in (20\,801\,863 \text{ m}^3; 22\,550\,549 \text{ m}^3)$. Pro $\pm 9\%$ se pohybuje zásobní objem v rozmezí $\pm 5,5\%$ v intervalu $V_z \in (20\,531\,176 \text{ m}^3; 22\,919\,356 \text{ m}^3)$, viz tabulka 9 na straně 40. Je jisté, že se vzrůstající nejistotou bude narůstat i interval zásobního objemu nádrže V_z . Podle dosažených výsledků je možné, že hodnota zásobního objemu určeného bez uvažování nejistot vstupních dat může být výrazně podhodnocena.

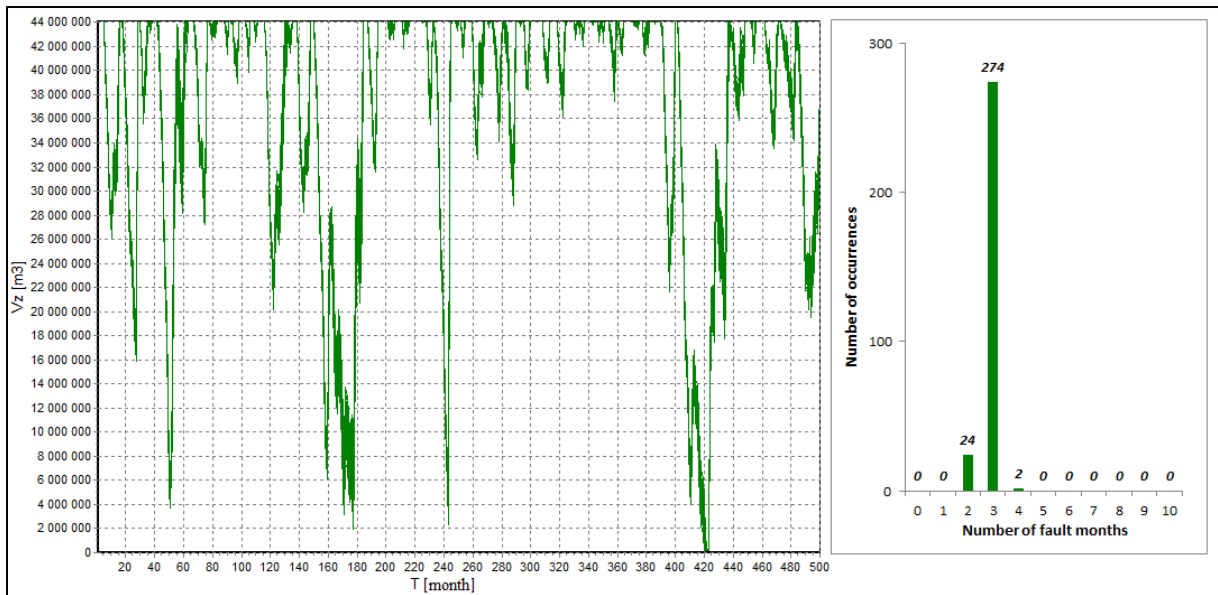
Výpočty provedené pro profil umístění hráze A pak byly následující. Nejprve byly v prvním kole výpočtů stanoveny zásobní objemy nádrže velikosti nalepšeného odtoku odpovídající koeficientu nalepšení 0,6 a 0,8. Zabezpečení odtoku vody z nádrže byla počítána dle trvání. Objem, který definoval hranici maximálního 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 $O_p = 2,861 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 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 v 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 zkrusovat. 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 $V_z \in (42\,281\,741 \text{ m}^3; 45\,942\,059 \text{ m}^3)$ 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 $V_z \in (41\,362\,777 \text{ m}^3; 46\,848\,575 \text{ m}^3)$.

Na obrázku 42 je zobrazen průběh prázdnění nádrže za celé řešené období. Dále je ukázán histogram rozdělení počtu poruchových měsíců v nádrži a detail poruchové události, kde je vidět rozložení množství poruchových měsíců.

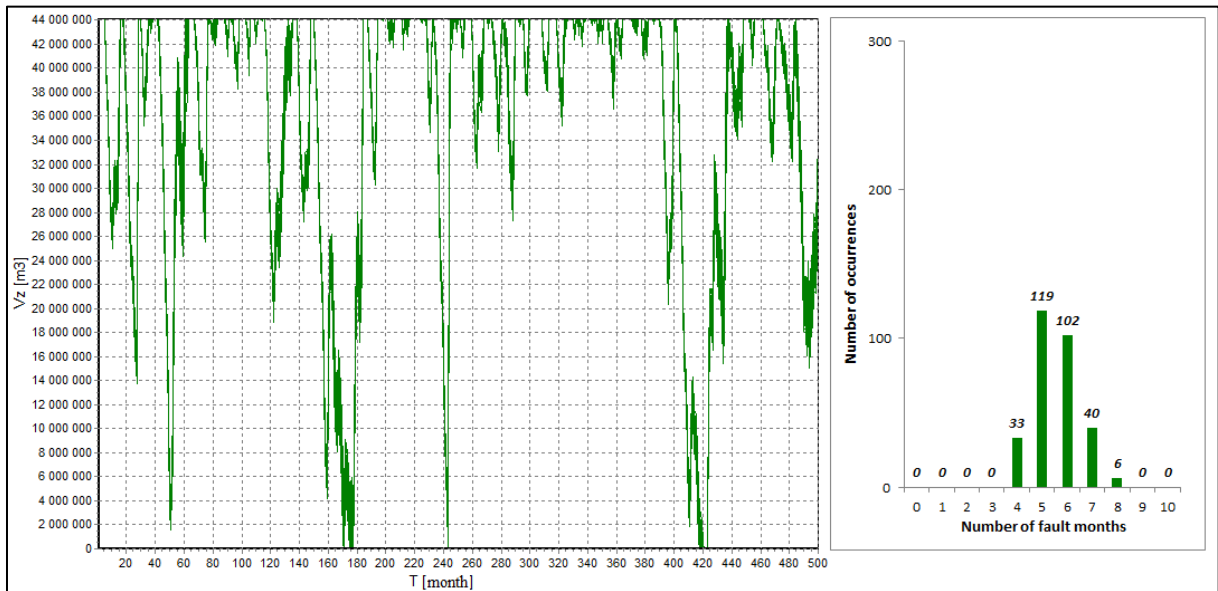


Obr. 42. Průběhy plnění nádrže s uvažováním ztrát vody z nádrže a histogram poruchových měsíců, včetně detailu poruchy zásobního objemu nádrže.

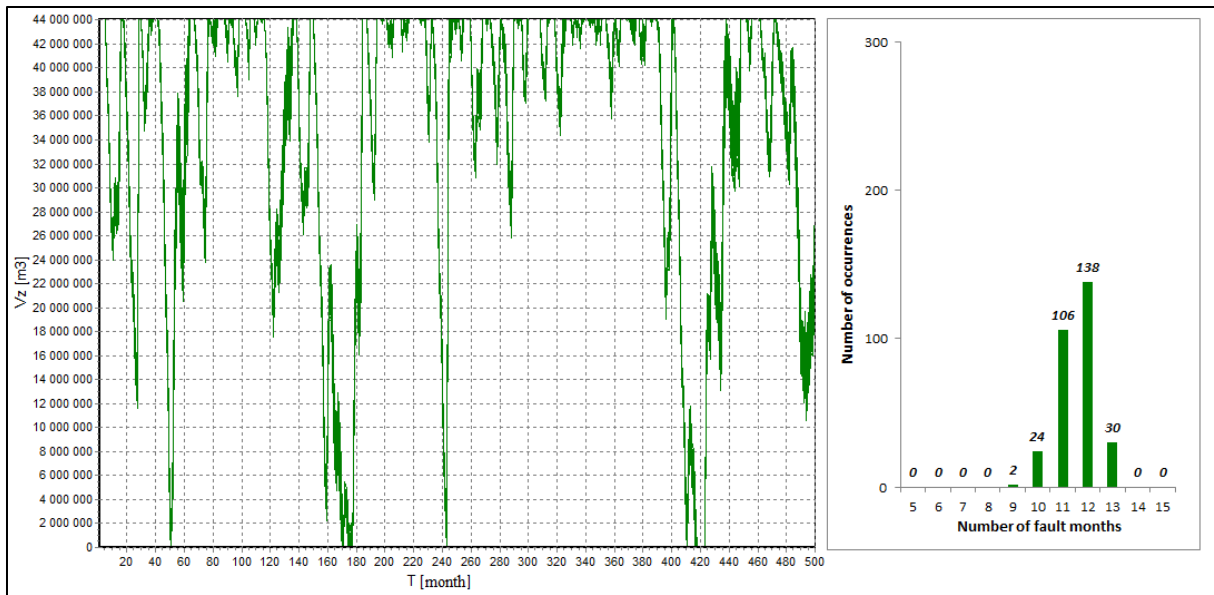
Obrázky 43 až 46 znázorňují průběh plnění nádrže s uvažováním ztrát vody z nádrže pro počáteční nejistoty $\pm 9\%$ a pro měnící se koeficient nalepšení $\alpha = 0,72$ až $0,78$. Histogramy vedle ukazují rozložení počtu poruchových měsíců v průběhu výpočtu.



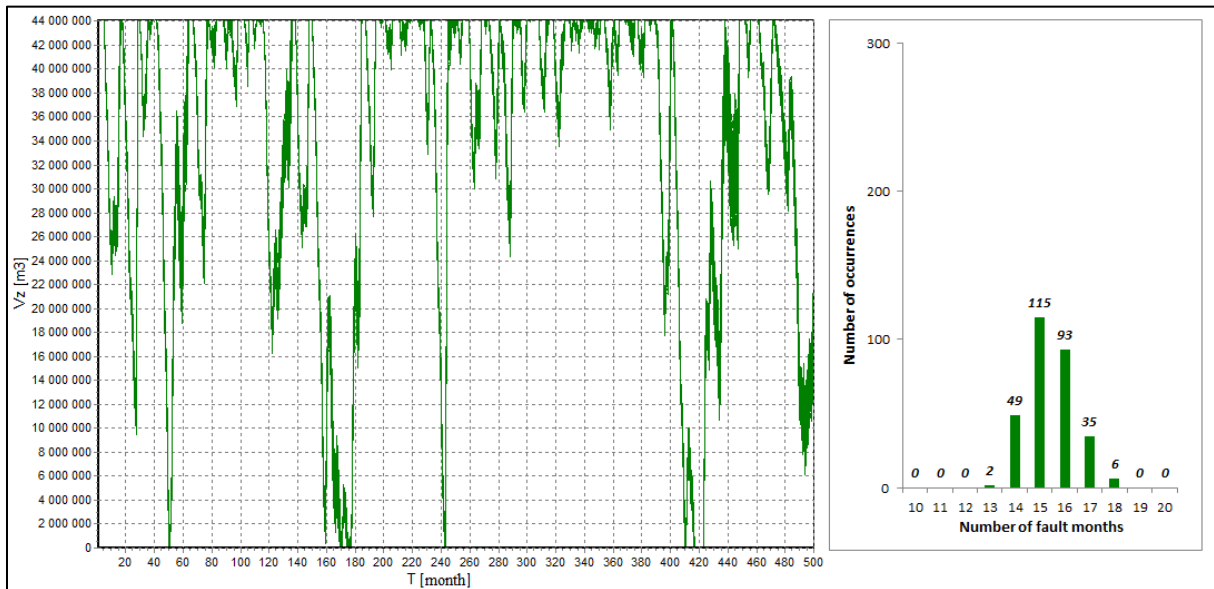
Obr. 43. Průběhy plnění nádrže pro $\alpha = 0,72$ a histogram poruchových měsíců.



Obr. 44. Průběhy plnění nádrže pro $\alpha = 0,74$ a histogram poruchových měsíců.



Obr. 45. Průběhy plnění nádrže pro $\alpha = 0,76$ a histogram poruchových měsíců.



Obr. 46. Průběhy plnění nádrže pro $\alpha = 0,78$ a histogram poruchových měsíců.

Zabezpečení podle trvání s uvažováním vstupních nejistot lze pro vstupní nejistotu $\pm 6\%$ a $O_p = 2,984 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ uvažovat jako $P_T = 99,53\% \pm 0,18\%$, neboli bude ležet v intervalu $P_T \in (99,35\%; 99,71\%)$ a pro $\pm 9\%$ vstupní nejistoty pak vychází $P_T = 99,54\% \pm 0,20\%$, neboli nachází se v intervalu $P_T \in (99,34\%; 99,74\%)$. Obrázek 42 popisuje průběh plnění nádrže s uvažováním ztrát vody z nádrže pro počáteční nejistoty $\pm 9\%$ a pro koeficient nalepšení $\alpha = 0,70$. Histogram vedle průběhu pak ukazuje rozložení počtu poruchových měsíců v průběhu výpočtu.

Podle dalších zpracovaných výsledků prezentující průběhy plnění a prázdnění nádrže s histogramy poruchových měsíců můžeme zabezpečení podle trvání prezentovat také právě podle četnosti výskytů poruchových měsíců. Např. z histogramu na obr. 43, tedy můžeme říci, že zabezpečení $P_T = 99,74\%$ odpovídající pro náhodné řešení s 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 kategorii 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 kategorii 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

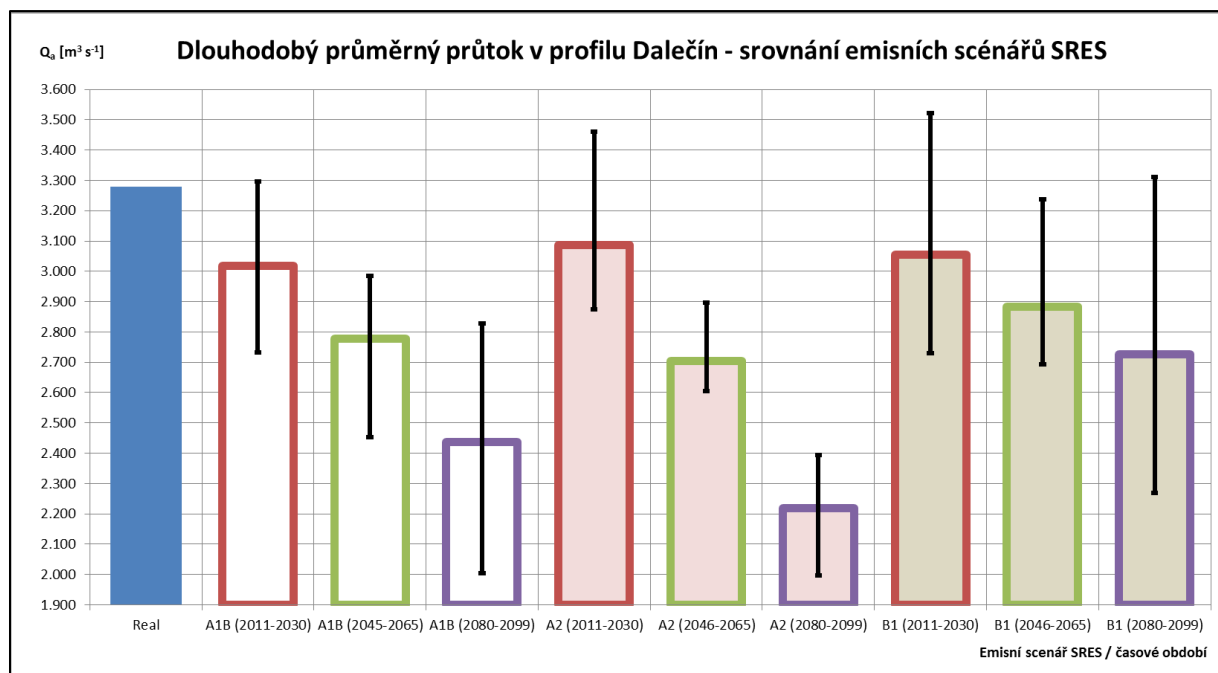
K pochopení vlivu změn klimatu na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže bylo nutné nejprve provést detailní hydrologickou analýzu vývoje dlouhodobých průměrných průtoků v povodí řeky Svratky. Hydrologická analýza byla vztažena k průměrnému dlouhodobému průtoku Q_a stanoveného z průtokové řady průměrných měsíčních průtoků ve vodoměrném profilu Dalečín. Tabulka 88 ukazuje shrnutí výsledků analýzy vztažené k jednotlivým obdobím I, II a III a skupině emisních scénářů A1B, B1 a A2.

Tab. 88. Výsledky hydrologické analýzy v povodí Svratky vodoměrný profil Dalečín nad nádrží Vír I.

Scénář (období)	$\mu(Q_a)$ [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	$\min(Q_a)$ [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	$\max(Q_a)$ [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	ΔQ_a [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	ΔQ_a [%]
Real Q_a (1950-2016)	3.280	-	-	-	-
A1B (2011-2030)	3.018	2.732	3.297	-0.261	-7.970
A1B (2045-2065)	2.779	2.454	2.985	-0.501	-15.279
A1B (2080-2099)	2.436	2.003	2.828	-0.844	-25.722
A2 (2011-2030)	3.087	2.875	3.460	-0.192	-5.865
A2 (2046-2065)	2.705	2.605	2.896	-0.575	-17.524
A2 (2080-2099)	2.218	1.998	2.393	-1.062	-32.369
B1 (2011-2030)	3.055	2.731	3.522	-0.225	-6.859
B1 (2046-2065)	2.883	2.693	3.237	-0.397	-12.104
B1 (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 ensamble a procentuální pokles průtoků 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 47 pak 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 ensamble jednotlivých SRES scénářů a různá období. V grafu jsou znázorněny i chybové úsečky popisující maximální $\max(Q_a)$ a minimální $\min(Q_a)$ meze dlouhodobého průtoku Q_a . Z grafu je opět zřejmý pokles dlouhodobých průtoků. 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. Liší se od sebe v řádech 1% až 2%. V období II a III však pesimistický A2 scénář dosahuje nejvýraznějšího poklesu $\mu(Q_a)$ jak oproti současnému Q_a tak i proti $\mu(Q_a)$ z scénářů A1B a B1.



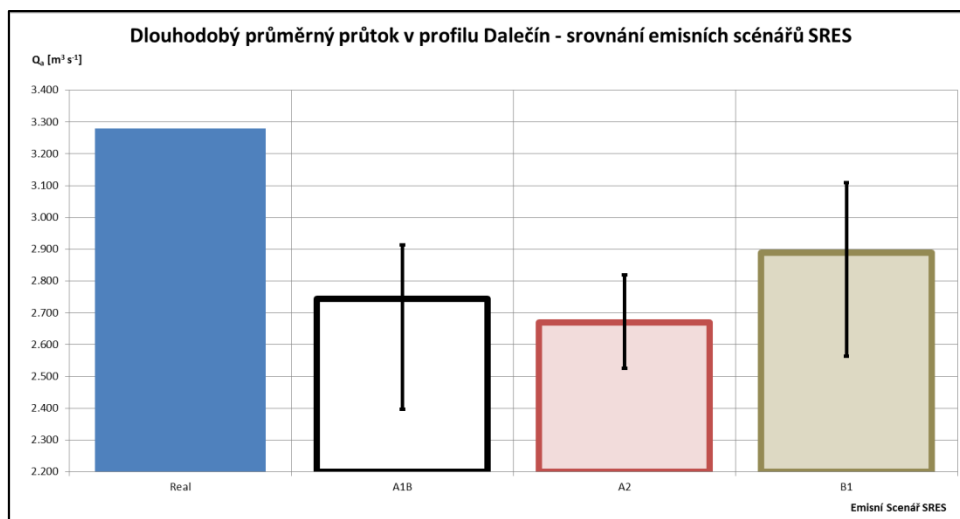
Obr. 47. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III dle emisních scénářů SRES včetně max. a min. intervalu.

Tabulka 89 ukazuje shrnutí výsledků hydrologické analýzy vztahené k celému, resp. sloučenému období (2011 - 2099) a skupině emisních scénářů A1B, B1 a A2.

Tab. 89. Výsledky hydrologické analýzy v povodí Svratky vodoměrný profil Dalečín nad nádrží Vír I.

Období jako celek (2011 - 2099)					
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	-16.324
A2	2.670	2.525	2.819	-0.670	-18.586
B1	2.888	2.564	3.109	-0.431	-11.944

Opět je zde zjevný pokles dlouhodobých průtoků $\mu(Q_a)$ jak oproti realitě, tak mezi jednotlivými $\mu(Q_a)$ SRES A1B, B1 a A2 scénářů. Obrázek 48 ukazuje grafické srovnání dlouhodobých průtoků Q_a . Opět na grafu je zřejmý pokles, ale také rozdíl mezi jednotlivými skupinami SRES scénářů. Kdy $\mu(Q_a)$ z pesimistického scénáře A2 je nejnižší.



Obr. 48. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé generované období 2011-2099 podle emisních scénářů SRES včetně max. a min. intervalu.

5.3.1.2 Representative Concentration Pathways RCPs

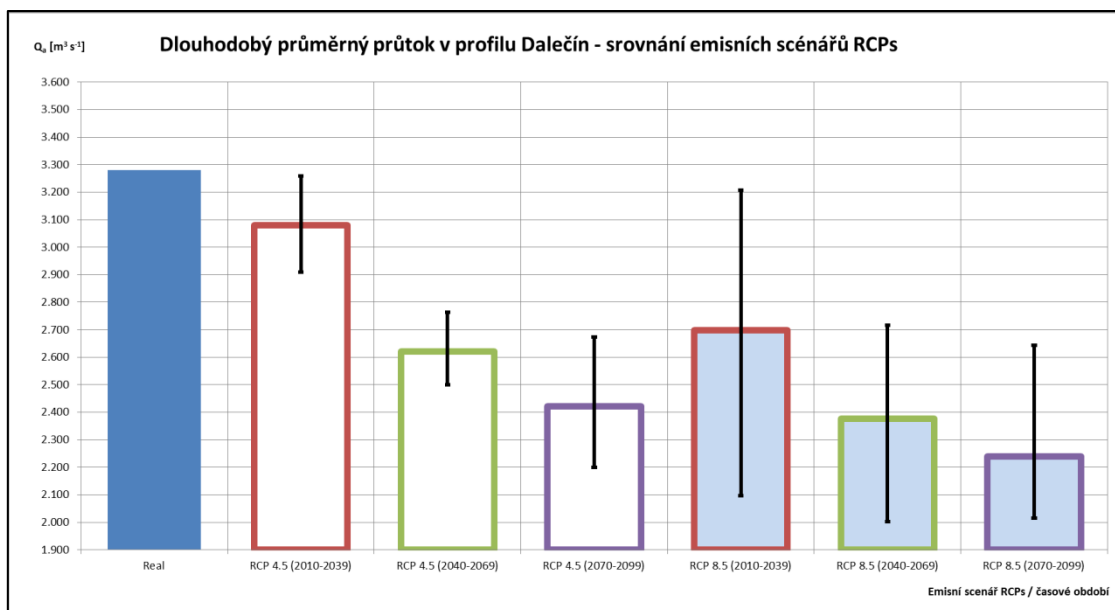
Hydrologická analýza byla vztažena k průměrnému dlouhodobému průtoku Q_a stanoveného z průtokové řady průměrných měsíčních průtoků ve vodoměrném profilu Dalečín. Tabulka 90 ukazuje shrnutí výsledků analýzy vztažené k jednotlivým obdobím I (2010-2039), II (2040-2069) a III (2070 - 2099) a skupině emisních scénářů RCP 4,5 a 8,5.

Tab. 90. Výsledky hydrologické analýzy v povodí Svatky 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

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 $\min(Q_a)$ a maxima $\max(Q_a)$, které nastaly v daném ensamble a procentuální pokles průtoků oproti reálné hodnotě Q_a . Z výsledků je zřetelný pokles dlouhodobých průtoků, který se pohybuje pro ensemble dat z emisního scénáře RCP 4,5 (vyrovnaný scénář) od -6% v období I, -20% v období II až po -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 49 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. 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 .



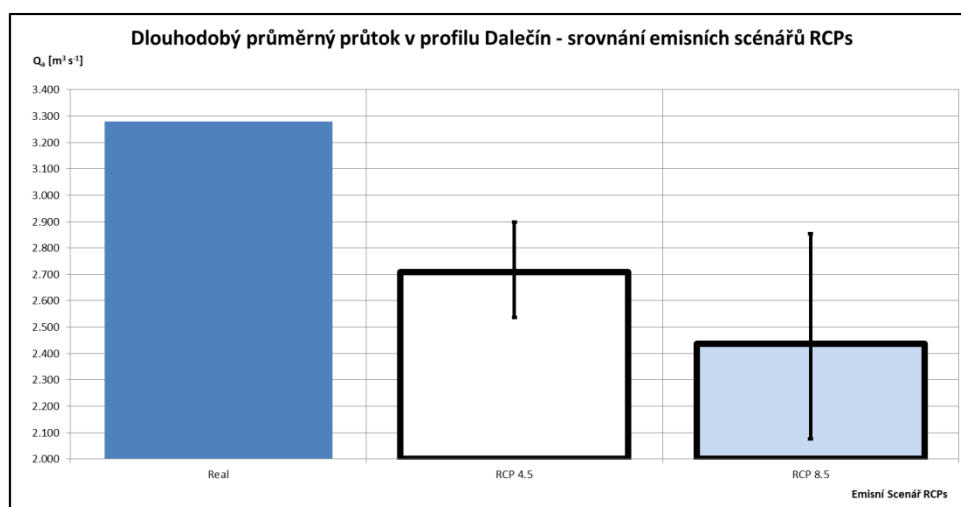
Obr. 49. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za období I, II, III dle emisních scénářů RCPs včetně max. a min. intervalu.

Tabulka 91 ukazuje shrnutí výsledků hydrologické analýzy vztahené k celému, resp. sloučenému období (2010 - 2099) a skupině emisních scénářů RCP 4,5 a 8,5.

Tab. 91. Výsledky hydrologické analýzy v povodí Svratky vodoměrný profil Dalečín nad nádrží Vír I.

Období jako celek (2010 - 2099)					
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 oproti realitě, tak vzájemně mezi jednotlivými $\mu(Q_a)$ RCPs scénářů. Pokles je o -17,5% pro RCP 4,5 a o -25,6% u scénáře RCP 8,5. Obrázek 50 ukazuje grafické srovnání dlouhodobých průtoků Q_a . Na grafu je zřejmý pokles, ale také rozdíl mezi jednotlivými skupinami RCPs scénářů.



Obr. 50. Srovnání dlouhodobého průměrného průtoku Q_a z reálné průtokové řady s dlouhodobými průtoky Q_a za celé období 2010-2099 dle emisních scénářů RCPs včetně max. a min. intervalu.

5.3.2 Vodohospodářské řešení nádrže Vír I v podmínkách nejistoty změn klimatu

5.3.2.1 Emisní scénáře SRES

Tabulky 92 až 95 ukazují shrnutí výsledků vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pro různé možnosti emisních scénářů a délky období. Zásobní objem nádrže byl počítán pomocí koeficientu nalepšení. V tabulkách je vždy uvedena střední hodnota nalepšeného odtoku $\mu(O_p)$, protože nalepšený odtok je počítán z ensemblu hydrologických dat. 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 Vír I dle manipulačního řádu a řazení díla do třídy významnosti. Posledním výsledkem v tabulkách je výpočet robustnosti daného řešení. Tab. 92 ukazuje řešení s uvažováním všech možností emisních scénářů a klimatických modelů.

Tab. 92. 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

Tab. 93. až 95. ukazují řešení s uvažováním jednotlivých emisních scénářů a klimatických modelů. V tabulkách je opět uveden výsledný koeficient nalepšení střední hodnota nalepšeného odtoku, střední hodnota zabezpečení podle trvání, minimální a maximální dosažené hodnoty a robustnost daného řešení.

Tab. 93. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – SRES scénář A1B.

	α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	0.8296	2.508	99.503	98.640	99.940	0.583
II období	0.8475	2.355	99.503	98.270	99.940	0.667
III období	0.858	2.090	99.504	98.450	99.940	0.667
I+II období	0.8218	2.382	99.502	98.250	99.970	0.667
I+II+III období	0.773	2.122	99.501	98.220	99.950	0.667

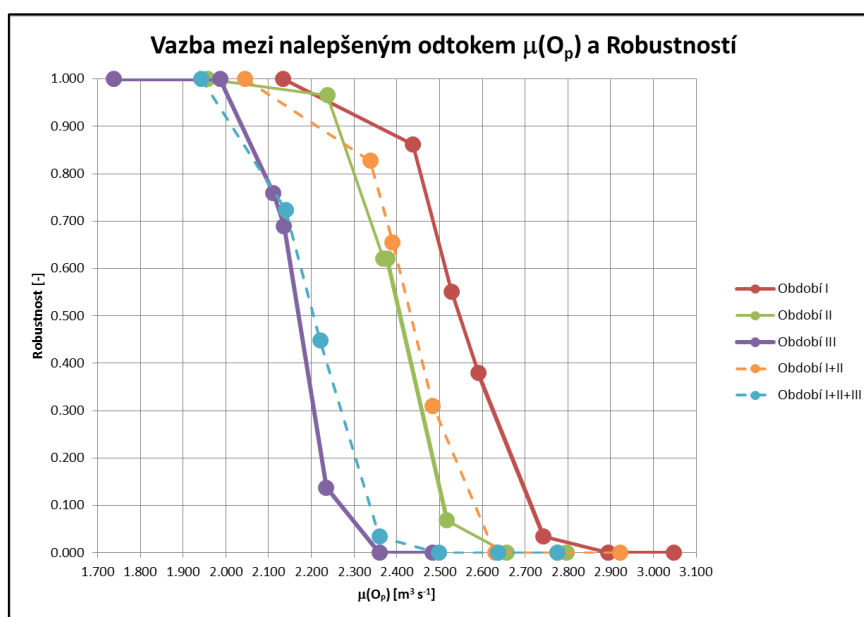
Tab. 94. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – SRES scénář B1.

	α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	0.822	2.511	99.511	98.640	99.940	0.600
II období	0.833	2.401	99.511	98.360	99.940	0.700
III období	0.851	2.320	99.501	98.550	99.940	0.600
I+II období	0.8175	2.427	99.501	98.530	99.970	0.600
I+II+III období	0.8105	2.341	99.504	98.500	99.950	0.500

Tab. 95. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – SRES scénář A2.

	α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost
I období	0.839	2.590	99.501	98.550	99.940	0.714
II období	0.864	2.337	99.500	98.640	99.940	0.571
III období	0.8899	1.974	99.513	98.820	99.940	0.571
I+II období	0.817	2.366	99.507	97.840	99.970	0.714
I+II+III období	0.746	1.992	99.504	98.100	99.980	0.714

Závislost mezi nalepšeným odtokem $\mu(O_p)$ a robustností je zobrazen na obrázku 51. Vstupní data sloužily výsledky výpočtů s uvažování všech 29 ensemblů hydrologických dat zatížených klimatickou změnou a výpočet zásobního objemu nádrže pomocí koeficientu nalepšení α . V podstatě se jedná o výsledky prezentované v tab. 18. až 22. z kapitoly 4. Praktická aplikace.



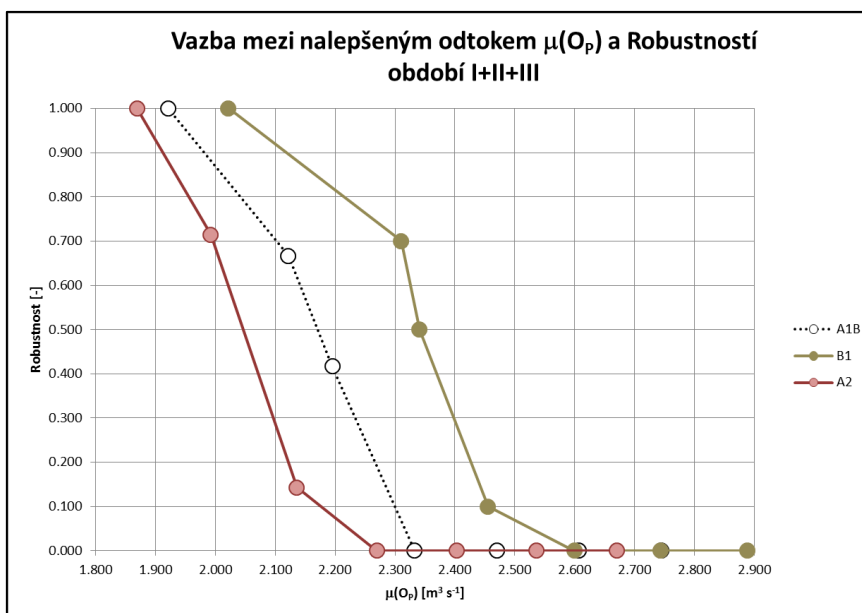
Obr. 51. Vazba $\mu(O_p)$ a Robustností – kombinace všech scénářů.

Graf na obrázku 51 ukazuje vazbu mezi Robustností a střední hodnotou nalepšeného odtoku $\mu(O_p)$. Z grafu je zřejmé, že s narůstající Robustností navrhovaného řešení klesá nalepšený odtok O_p . Jinými slovy nalepšený odtok O_p reaguje poklesem tak, aby vyhověl požadavku na dodržení zabezpečení odtoku vody z nádrže $P_T \geq 99,5\%$ při zachování současné hodnoty zásobním objemu nádrže $V_2 = 44\,056\,000\ m^3$ v co největším počtu vstupních hydrologických řad. Dále graf na obrázku 51 ukazuje celkový pokles nalepšeného odtoku O_p v závislosti na řešeném časovém období. Nalepšený odtok se snižuje postupně pro daná období I, II a III a kombinace období I+II a I+II+III. Výsledek tak koresponduje s poklesem dlouhodobého průtoku Q_a pro jednotlivá období.

Pokud bude nalepšený odtok stanoven z koeficientu nalepšení α pro všech 29 možností ensemblu vstupních dat z emisních scénářů SRES, kdy je uplatněna hluboká nejistota budoucího vývoje v celém možném spektru výskytů (viz tabulka 92), pak lze výsledky prezentovat takto. V období I je výsledný nalepšený odtok z nádrže $2,528\ m^3\ s^{-1}$ s Robustností $R = 0,522$. Oproti současné platné hodnotě $O_p = 2,53\ m^3\ s^{-1}$ je pokles minimální a činní $-0,064\%$. Na první pohled se zdá, že odtok vody z nádrže se v tomto případě nezměnil oproti současné hodnotě. Nicméně Robustnost řešení je poměrně nízká. Z celkových 29 realizací časových řad v ensemblu jich 15 nevyhoví požadovaným podmínkám pro

zachování zabezpečení a zásobního objemu. Pro posílení Robustnosti řešení je tedy nutné snížit hodnotu O_p a zvýšit hodnotu zabezpečení P_T , viz graf na obrázku 51. Posílením Robustnosti dojde k změně řešení, které pak bude následující. Nalepšený odtok klesne na hodnotu $O_p = 2,438 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pro $P_T = 99,791\%$ a Robustnost 0,862. Pro kombinaci období I+II je výsledný nalepšený odtok z nádrže $2,390 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s Robustností 0,655. Oproti současné hodnotě nalepšeného odtoku $2,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ je pokles o -5,5%. Robustost řešení se zvýšila, kdy 19 stupujících hydrologických řad z celkových 29 jsou vyhovující požadovaným podmínkám. 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%. Robustost řešení v tomto případě je poměrně silná. Jinými slovy 21 vstupujících hydrologických řad z celových 29 je vyhovující požadovaným podmínkám.

Z jiného úhlu pohledu můžou být dosažené výsledky prezentovány na obrázku 52. Graf zde ukazuje vazbu mezi nalepšeným odtokem O_p a Robustností pro celkovou kombinaci období I+II+III. Výsledky jsou zpracovány pro ensembly hydrologických řad modelovaných pro jednotlivé varianty emisních scénářů A1B, B1 a A2 dostupných v programu LARS WG. Graf je prezentován z toho důvodu, že je zde opět pozorovatelná vazba mezi nalepšeným odtokem O_p a Robustností, ale také je zde vidět i řazení výsledků dle závažnosti jednotlivých emisních scénářů. Nejlepších výsledků a poměrně nízkých změn v nalepšeném odtoku je dosaženo pro optimistický scénář B1. Nejhorších výsledků je pak dosaženo pro pesimistický scénář A2. Detailní vyhodnocení výsledků nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p a jejich pokles vůči aktuální hodnotě dané manipulačním řádem k vodnímu dílu je prezentován v tabulce 106.



Obr. 52. Vztah mezi $\mu(O_p)$ a Robustností – porovnání jednotlivých emisních scénářů.

Tabulky 96. až 99. ukazují 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 tabulkách 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 $\mu(P_T)$, $\min(P_T)$ a $\max(P_T)$. 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. 96. ukazuje řešení s uvažováním všech možností emisních scénářů a klimatických modelů.

Tab. 96. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – kombinace všech scénářů.

	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	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

Tab. 97. až 99. ukazují řešení s uvažováním jednotlivých emisních scénářů a klimatických modelů. V tabulkách je opět uvedena hodnota O_p , střední hodnota zabezpečení podle trvání, minimální a maximální dosažené hodnoty a Robustnost daného řešení.

Tab. 97. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – SRES scénář A1B.

	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	2.462	99.505	98.550	99.940	0.583
II období	2.23	99.508	97.440	99.940	0.833
III období	1.900	99.500	94.940	99.940	0.917
I+II období	2.301	99.512	97.330	99.970	0.833
I+II+III období	2.037	99.501	95.380	99.980	0.917

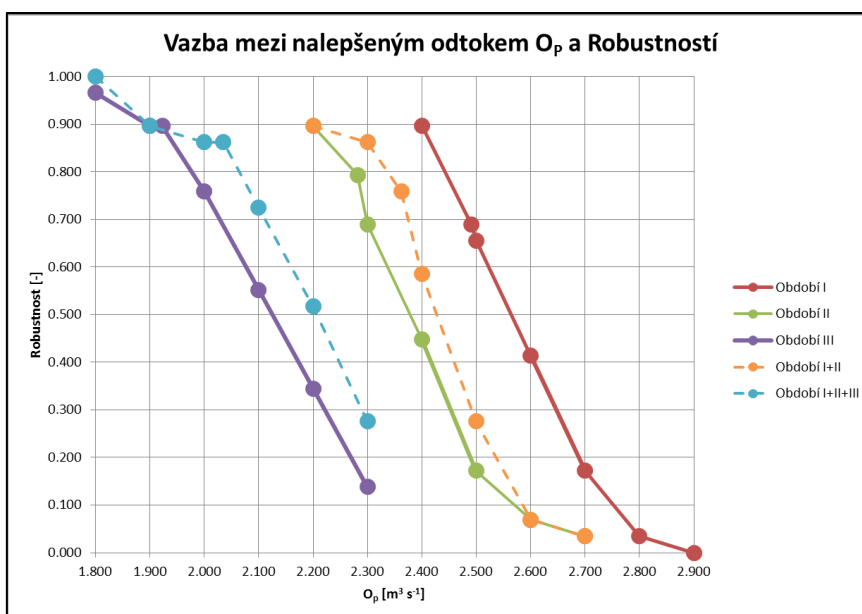
Tab. 98. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – SRES scénář B1.

	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	2.505	99.502	97.620	99.940	0.700
II období	2.359	99.512	98.450	99.940	0.700
III období	2.141	99.512	96.140	99.940	0.900
I+II období	2.402	99.511	98.120	99.970	0.700
I+II+III období	2.230	99.501	96.400	99.980	0.900

Tab. 99. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – SRES scénář A2.

	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	2.540	99.501	98.450	99.940	0.714
II období	2.351	99.513	98.920	99.940	0.571
III období	1.890	99.516	98.360	99.940	0.714
I+II období	2.405	99.506	99.090	99.920	0.429
I+II+III období	1.954	99.511	98.250	99.980	0.714

Závislost mezi nalepšeným odtokem O_p a Robustností je zobrazena na obrázku 53. Jako vstupní data sloužily výsledky výpočtů s uvažováním všech 29 ensemblů hydrologických dat zatížených klimatickou změnou a výpočet zásobního objemu nádrže je proveden pomocí fixní hodnoty O_p . Jedná se o shrnutí výsledků prezentovaných v tab. 38. až 42. z kapitoly 4. Praktická aplikace.

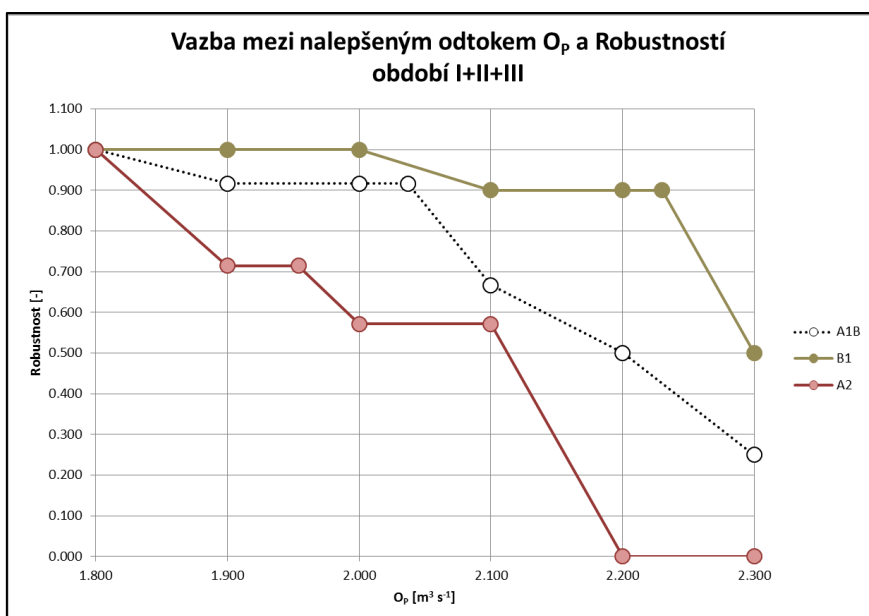


Obr. 53. Vazba O_p a Robustností – kombinace všech scénářů.

Graf na obrázku 53 ukazuje jednak vazbu mezi Robustností a nalepšeným odtokem O_p . Z grafu je zřejmé, že s narůstající Robustností navrhovaného řešení klesá O_p . Jinými slovy hodnota O_p reaguje poklesem tak, aby vyhověla požadavku na dodržení zabezpečení odtoku vody z nádrže $P_T \geq 99,5\%$ při současném zásobním objemu nádrže $V_z = 44\ 056\ 000\ m^3$ v co největším počtu vstupních hydrologických řad. Dále graf na obrázku 53 ukazuje celkový pokles O_p v závislosti na řešeném časovém období. Nalepšený odtok se snižuje postupně pro daná období I, II a III a kombinace období I+II a I+II+III. Výsledek tak koresponduje s pozorovaným poklesem Q_a pro jednotlivá období.

Pokud bude O_p brán jako fixní hodnota pro všechny řady v ensamble vstupních dat pak výsledky budou vypadat takto. Výsledný nalepšený odtok z nádrže pro období I je $O_p = 2,491\ m^3\ s^{-1}$ s Robustností 0,690. Oproti současné platné hodnotě $O_p = 2,53\ m^3\ s^{-1}$ je pokles -1,5%. Avšak Robustnost řešení je poměrně vysoká 20 stupujících hydrologických řad z celových 29 vyhoví požadovaným podmínkám. Pro kombinaci období I+II je výsledný $O_p = 2,362\ m^3\ s^{-1}$ s Robustností 0,759. V porovnání s platnou hodnotou O_p je pokles -6,6%. Robustnost řešení se ještě více zvýšila, když 22 stupujících hydrologických řad z celových 29 jsou vyhovující požadovaným podmínkám. Pro kombinaci období I+II+III je výsledný $O_p = 2,035\ m^3\ s^{-1}$ s Robustností 0,862. Oproti současné platné hodnotě O_p je pokles -19,6%. Robustnost řešení v tomto případě je velmi silná. Znamená to, že 25 vstupujících hydrologických řad z celkových 29 je vyhoví požadovanému kritériu.

Výsledky, které jsou prezentovány na obrázku 54, ukazují vazbu mezi O_p a Robustností pro celkovou kombinaci období I+II+III. Výsledky jsou zpracovány pro ensembl hydrologických řad modelovaných pro jednotlivé varianty emisních scénářů A1B, B1 a A2. Na grafu je opět prezentována vazba mezi O_p a Robustností a řazení výsledků dle závažnosti jednotlivých emisních scénářů. Nejlepších výsledků a malých změn hodnot O_p je dosaženo pro optimistický scénář B1 a nejhorších výsledků je dosaženo pro pesimistický scénář A2. Detilní vyhodnocení výsledků změn O_p a jejich pokles vůči aktuální hodnotě O_p dané manipulačním řádem k vodnímu dílu je dán v tabulce 107.



Obr. 54. Vztah mezi O_p a Robustností – porovnání jednotlivých emisních scénářů.

5.3.2.2 Representative Concentration Pathways RCPs

Tabulky 100 až 102 ukazují 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 Víř I. Tab. 100 ukazuje řešení s uvažováním všech emisních scénářů RCPs a všech možností downscalingu.

Tab. 100. 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

Tab. 101. až 102. ukazují řešení s uvažováním jednotlivých emisních scénářů.

Tab. 101. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – scénář RCP 4,5.

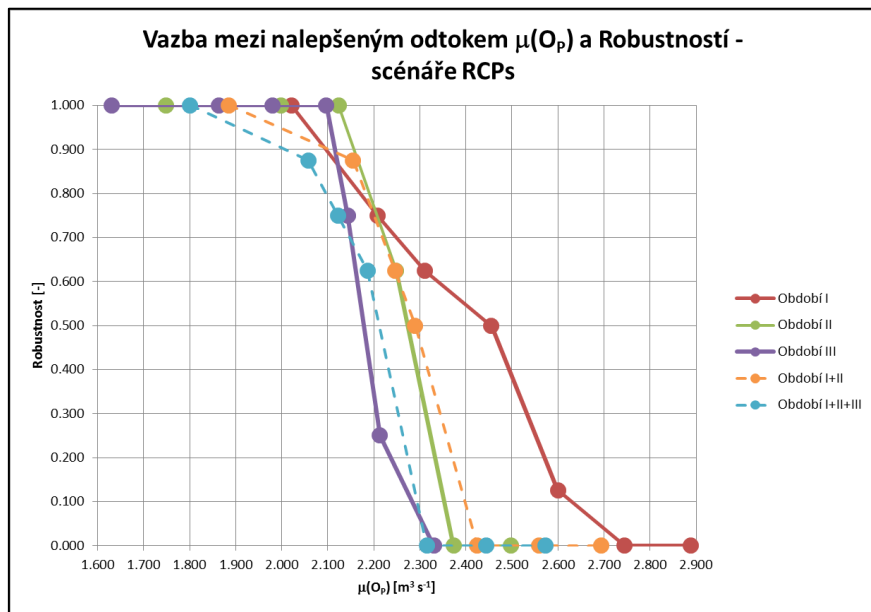
	α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	0.854	2.505	99.533	98.700	99.810	0.750
II období	0.901	2.255	99.533	98.700	99.810	0.750
III období	0.916	2.246	99.533	98.700	99.810	0.750
I+II období	0.840	2.284	99.520	98.380	99.900	0.750
I+II+III období	0.773	2.122	99.520	99.010	99.940	0.500

Tab. 102. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže, O_p odvozen pomocí koeficientu nalepšení α – scénář RCP 8,5.

	α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	0.742	2.109	99.533	98.700	99.810	0.750

	α	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	min(P_T) [%]	max(P_T) [%]	Robustnost
II období	0.9	2.245	99.530	99.250	99.810	0.500
III období	0.946	2.089	99.530	99.250	99.810	0.750
I+II období	0.829	2.212	99.520	98.650	99.900	0.750
I+II+III období	0.808	2.032	99.520	98.450	99.940	0.750

Závislost mezi O_p a Robustností je zobrazena na obrázku 55. Jako vstupní data do grafu sloužily výsledky výpočtů z ensamble zahrnujícího všech 8 hydrologických dat zatížených klimatickou změnou. V podstatě se jedná o výsledky prezentované v tab. 58. až 62. z kapitoly 4. Praktická aplikace.



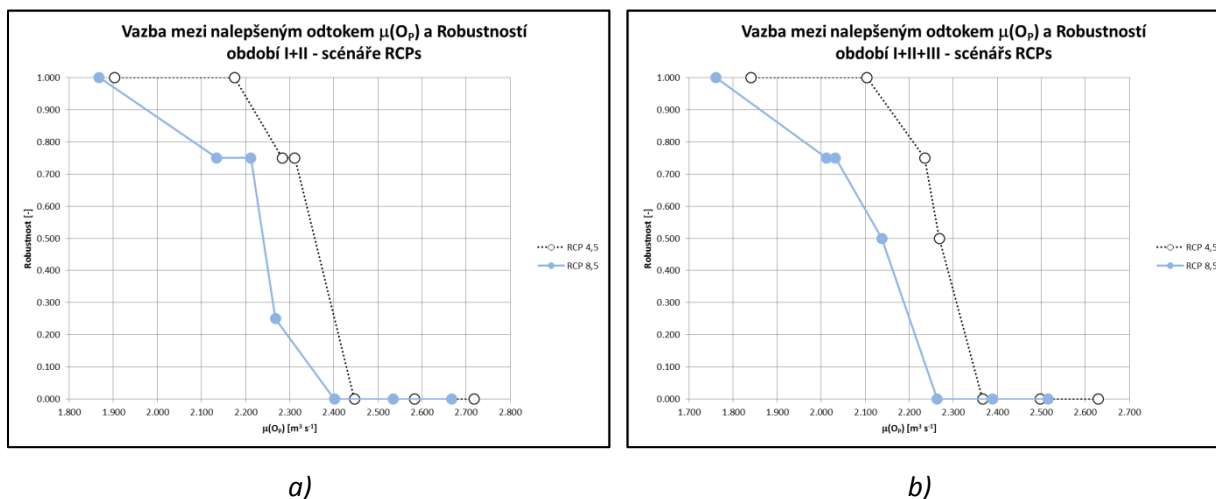
Obr. 55. Vazba mezi $\mu(O_p)$ a Robustností – kombinace všech RCPs scénářů.

Graf na obrázku 55 ukazuje vazbu mezi Robustností a střední hodnotou nalepšeného odtoku $\mu(O_p)$, kdy s narůstající Robustností navrhovaného řešení klesá hodnota $\mu(O_p)$. Jinými slovy hodnota $\mu(O_p)$ reaguje poklesem tak, aby vyhověla požadavku na dodržení zabezpečení odtoku vody z nádrže $P_T \geq 99,5\%$ při současném $V_z = 44\ 056\ 000\ m^3$ v co největším počtu vstupních hydrologických řad z ensamble.

Z pohledu RCPs emisních scénářů lze výsledky prezentovat takto. Vstupní ensemble dat je 8. V tomto případě je opět postihnuta maximální hluboká nejistota budoucího vývoje klimatického systému. 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 Robustost řešení je poměrně vysoká. Šest z osmi vstupujících hydrologických řad vyhoví požadovanému kritériu. 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% a i Robustost řešení klesla. Pět z osmi stupujících 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%. Robustost řešení v tomto případě je poměrně silná. Šest z osmi vstupujících hydrologických řad vyhoví.

Z jiného úhlu pohledu mohou být dosažené výsledky prezentovány na obrázku 56. Graf ukazuje vazbu mezi $\mu(O_p)$ a Robustností pro kombinace období I+II viz obr. 56 a) a I+II+III viz obr. 56 b). Výsledky

jsou zpracovány pro ensembles hydrologických řad modelovaných pro jednotlivé varianty emisních scénářů RCP 4,5 a RCP 8,5. Graf je prezentován z toho důvodu, že je zde opět pozorovatelná vazba mezi nalepšeným odtokem O_p a Robustností, ale také je zde vidět i řazení výsledků dle závažnosti jednotlivých emisních scénářů na nalepšený odtok O_p . Nejlepších výsledků a poměrně nízkých změn v $\mu(O_p)$ je dosaženo pro scénář RCP 4,5 a nejhorších výsledků je pak dosaženo pro scénář RCP 8,5. Detailní vyhodnocení výsledků $\mu(O_p)$ a jejich změna vůči aktuální hodnotě dané manipulačním řádem k vodnímu dílu je dán v tabulce 108.



Obr. 56. Vztah mezi $\mu(O_p)$ a Robustností – porovnání jednotlivých emisních scénářů RCP 4,5 a RCP 8,5.

Tabulky 103. až 105. ukazují 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. 103. 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

Tab. 104. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – scénář RCP 4,5.

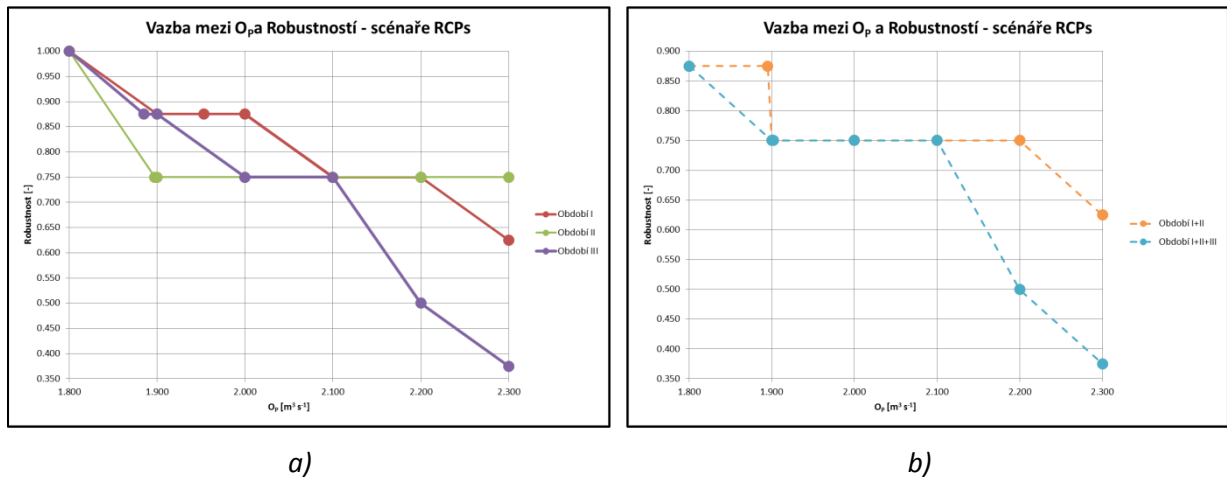
	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	2.050	99.533	98.700	99.810	0.750
II období	1.913	99.533	98.700	99.810	0.750
III období	1.866	99.533	98.700	99.810	0.750
I+II období	1.946	99.520	98.380	99.900	0.750
I+II+III období	1.914	99.523	98.270	99.940	0.750

Tab. 105. Vyhodnocení vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže pomocí nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p – scénář RCP 8,5.

	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
I období	1.912	99.533	98.700	99.810	0.750

	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(P_T)$ [%]	$\min(P_T)$ [%]	$\max(P_T)$ [%]	Robustnost
II období	1.88	99.533	98.700	99.810	0.750
III období	1.977	99.533	98.700	99.810	0.750
I+II období	1.837	99.520	98.380	99.900	0.750
I+II+III období	1.878	99.523	98.270	99.940	0.750

Závislost mezi nalepšeným odtokem O_p a Robustností je zobrazena na obrázku 57. Výsledky jsou zpracovány pro celý vstupní ensembl hydrologických řad. Tedy společně pro emisní scénáře RCPs 4,5 a RCPs 8,5. Jedná se o shrnutí výsledků prezentovaných v tab. 73. až 77. z kapitoly 4. Praktická aplikace.

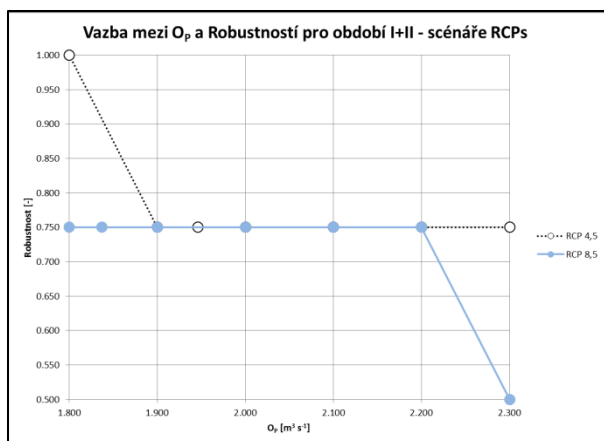


Obr. 57. Vazba nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p a Robustností – kombinace všech RCPs scénářů.

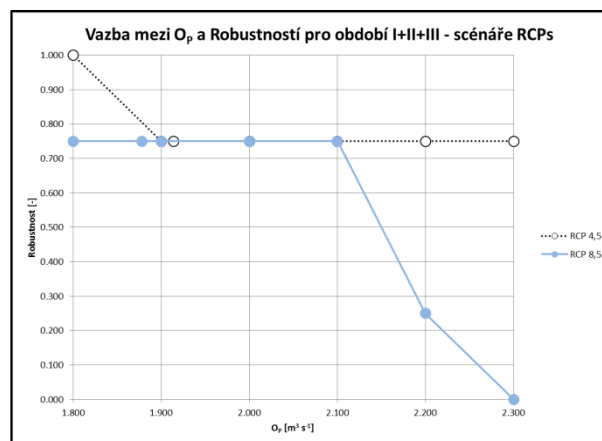
Graf na obrázku 57 ukazuje vazbu mezi Robustností a nalepšeným odtokem O_p , kdy s narůstající Robustností navrhovaného řešení klesá nalepšený odtok O_p . Jinými slovy nalepšený odtok O_p reaguje poklesem tak, aby vyhověl požadavku na dodržení zabezpečení odtoku vody z nádrže $P_T \geq 99,5\%$ při současném zásobním objemu nádrže V_z v co největším počtu vstupních hydrologických řad. Obrázek 57 a) odpovídá výpočtům v jednotlivých obdobích I, II a III. Obrázek 57 b) odpovídá výpočtům v kombinaci období I+II a I+II+III.

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, viz obrázek 57 a), resp. tabulka 103. Oproti současné platné hodnotě O_p je pokles výrazný a v procentuálním vyjádření je -22,8%. Robustnost řešení je poměrně vysoká. Sedm z osmi stupujících hydrologických řad vyhoví danému kritériu. Pro 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 stupujících hydrologických řad je vyhovující. 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 stupujících hydrologických řad vyhoví požadovaným podmínkám, viz obrázek 57 b), nebo detailněji viz tabulka 103.

Výsledky, které jsou prezentovány na obrázku 58 opět ukazují vazbu mezi O_p a Robustností pro celkovou kombinaci období I+II viz obr. 58 a) a období I+II+III obr. 58 b). Výsledky jsou zpracovány pro ensembl hydrologických řad modelovaných pro jednotlivé varianty emisních scénářů RCPs 4,5 a RCPs 8,5. Detailní vyhodnocení výsledků O_p a jejich pokles vůči aktuální hodnotě dané manipulačním řádem k vodnímu dílu je dán v tabulce 109.



a)



b)

Obr. 58. Vztah mezi O_p a Robustností – porovnání jednotlivých emisních scénářů RCP 4,5 a RCP 8,5.

Tab. 106. Vyhodnocení poklesu nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p mezi reálnou hodnotou z manipulačního řádu a výsledky z ensemblů hydrologických dat zatížených klimatickou změnou – střední hodnota nalepšeného odtoku $\mu(O_p)$ odvozena pomocí koeficientu nalepšení α .

	Real	Všechny scénáře			A1B			B1			A2		
	O_p [m ³ s ⁻¹]	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [%]	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [%]	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [%]	$\mu(O_p)$ [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [%]
I období	2.53	2.528	-0.002	-0.064	2.508	-0.022	-0.860	2.511	-0.019	-0.747	2.590	0.060	2.388
II období	2.53	2.369	-0.161	-6.366	2.355	-0.175	-6.920	2.4014	-0.129	-5.083	2.337	-0.193	-7.617
III období	2.53	2.136	-0.394	-15.574	2.090	-0.440	-17.385	2.320	-0.210	-8.285	1.974	-0.556	-21.976
I+II období	2.53	2.390	-0.140	-5.519	2.382	-0.148	-5.847	2.427	-0.103	-4.075	2.366	-0.164	-6.477
I+II+III období	2.53	2.140	-0.390	-15.399	2.122	-0.409	-16.146	2.341	-0.189	-7.482	1.992	-0.538	-21.265

Tab. 107. Vyhodnocení poklesu nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p mezi reálnou hodnotou z manipulačního řádu a výsledky z ensemblů hydrologických dat zatížených klimatickou změnou – nalepšený odtok O_p zadán jedinou hodnotou.

	Real	Všechny scénáře			A1B			B1			A2		
	O_p [m ³ s ⁻¹]	O_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [%]	O_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [%]	O_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [%]	O_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [m ³ s ⁻¹]	ΔO_p [%]
I období	2.53	2.491	-0.039	-1.542	2.462	-0.068	-2.688	2.505	-0.025	-0.988	2.540	0.010	0.395
II období	2.53	2.282	-0.248	-9.802	2.230	-0.300	-11.858	2.359	-0.171	-6.759	2.351	-0.179	-7.075
III období	2.53	1.923	-0.607	-23.992	1.900	-0.630	-24.901	2.141	-0.389	-15.375	1.890	-0.640	-25.296
I+II období	2.53	2.362	-0.168	-6.640	2.301	-0.229	-9.051	2.402	-0.128	-5.059	2.405	-0.125	-4.941
I+II+III období	2.53	2.035	-0.495	-19.565	2.037	-0.493	-19.486	2.230	-0.300	-11.858	1.954	-0.576	-22.767

Tab. 108. Vyhodnocení poklesu nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p mezi reálnou hodnotou z manipulačního řádu a výsledky z ensemblů hydrologických dat zatížených klimatickou změnou – střední hodnota nalepšeného odtoku $\mu(O_p)$ odvozena pomocí koeficientu nalepšení α .

	Real	Všechny scénáře			RCP4.5			RCP8.5		
	O_p [$m^3 s^{-1}$]	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [%]	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [%]	$\mu(O_p)$ [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [%]
I období	2.53	2.209	-0.321	-12.703	2.505	-0.025	-0.988	2.109	-0.421	-16.650
II období	2.53	2.249	-0.281	-11.117	2.255	-0.275	-10.879	2.245	-0.285	-11.265
III období	2.53	2.144	-0.387	-15.277	2.246	-0.284	-11.225	2.089	-0.441	-17.431
I+II období	2.53	2.246	-0.284	-11.225	2.284	-0.247	-9.743	2.212	-0.318	-12.569
I+II+III období	2.53	2.122	-0.408	-16.122	2.122	-0.409	-16.146	2.032	-0.498	-19.674

Tab. 109. Vyhodnocení poklesu nalepšeného odtoku vody z nádrže O_p mezi reálnou hodnotou z manipulačního řádu a výsledky z ensemblů hydrologických dat zatížených klimatickou změnou – nalepšený odtok O_p zadán jedinou hodnotou.

	Real	Všechny scénáře			RCP 4.5			RCP 8.5		
	O_p [$m^3 s^{-1}$]	O_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [%]	O_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [%]	O_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [$m^3 s^{-1}$]	ΔO_p [%]
I období	2.53	1.953	-0.577	-22.806	2.050	-0.480	-18.972	1.912	-0.618	-24.427
II období	2.53	1.897	-0.633	-25.012	1.913	-0.617	-24.387	1.88	-0.650	-25.692
III období	2.53	1.885	-0.645	-25.494	1.866	-0.664	-26.245	1.977	-0.553	-21.858
I+II období	2.53	1.895	-0.635	-25.099	1.946	-0.584	-23.083	1.837	-0.693	-27.391
I+II+III období	2.53	1.902	-0.628	-24.822	1.914	-0.616	-24.348	1.878	-0.652	-25.771

6 Diskuze

6.1 Nejistoty měření a jejich vliv na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže

V manipulačním řádu k nádrži Vír I se uvádí zabezpečenost 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.

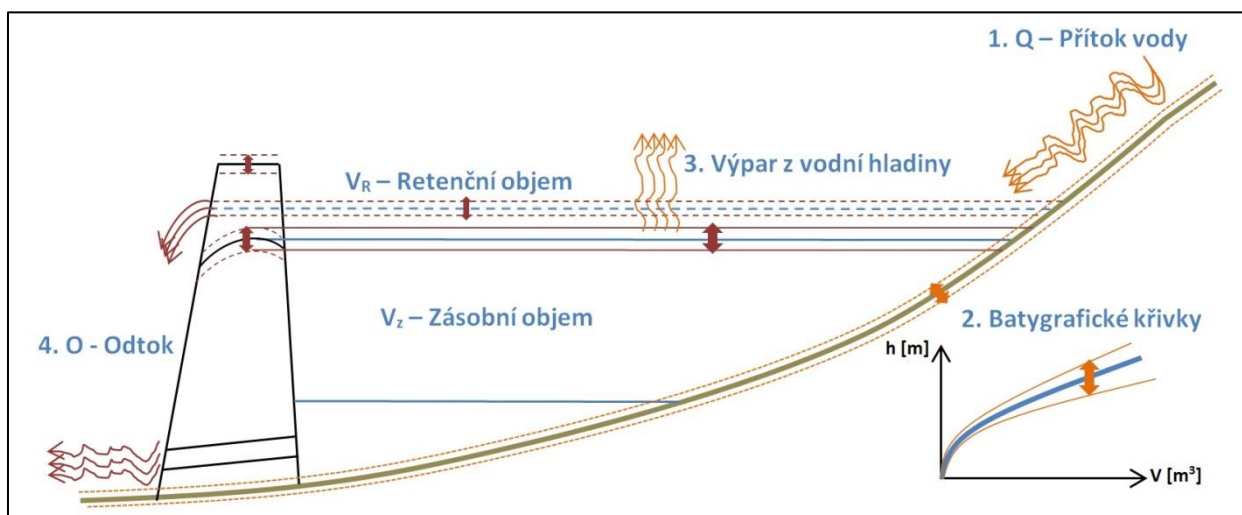
Prvním výrazným závěrem je, že současné vodohospodářské řešení nádrže je podhodnocené o přibližně 1% oproti výpočtům, které byly pro danou nádrž provedeny. Podhodnocení je možné vysvětlit délkou vstupní průtokové řady zavedenou do výpočtů, která nebyla aktualizována o data do roku 2016. Přitom v první 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 Vír 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 $\geq 98.5\%$. Nejen tedy, že je nádrž z aktuálního pohledu odběru vody podhodnocena, 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 12 na straně 38, tak pro případ nejistoty $\pm 6\%$ a $\pm 9\%$, $\alpha = 0,73$ jsou střední hodnoty zabezpečení $\mu(PT)$ 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 i 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 navrhnout 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 s více než z poloviny ovlivněn nejistotou návrhu zásobního

objemu. S tím je spojen i návrh výšky koruny hráze, která se může pohybovat v rozmezí $\pm 1,2$ m celkové výšky hráze. Obrázek 59 pak 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. Nutné je také dodat, že do řešení retenčního objemu nádrže nebyly uvažovány nejistoty vstupních parametrů. Byly zanedbány například nejistoty povodňových průtoků, které mohou dosahovat hodnot 10 až 20%.



Obr. 59. 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. Výsledky tak mohou být odlišné, a tím mohou být odlišné i intervaly popisující výskyt vypočtené zabezpečení P_T .

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 alikované 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 však 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 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 k 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 ensembly vstupních hydrologických dat a provede statistické vyhodnocení dosažených výsledků. V praktické aplikaci je také přistoupeno k vyhodnocení výsledku zatížených hlubokou nejistotou pomocí tzv. principu Robustnosti. Zjednodušeně Robustost 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 k 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 až 27% v třetím období u nejpesimističtějšího scénáře A2. Nabízí se i porovnání dosažených výsledků analýzy zásobního objemu na klimatické změny s výsledky publikovanými v (Marton a Starý, 2018). Předmětem publikace bylo posouzení funkčních objemů vodního díla Vír I na aktuální hydrologické podmínky. Výsledky článku vycházely 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 publikované v článku ukázaly na podhodnocení nalepšeného odtoku vody o 8,3% na hodnoty $O_p = 2,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ oproti odtoku $2,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ uváděným 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 ucelělý 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 k 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 zásoní 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 i 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 Literatura

- [1] Beven, K.J. and Binley, A.M., *The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*, Hydrological Processes, 1992, 6, p.279–298.
- [2] Beven, K. and Freer, J. (2001), *A dynamic TOPMODEL*. Hydrol. Process., 15: 1993–2011. doi:10.1002/hyp.252
- [3] Campos, J.N.B., Souza Filho, F.A., and Lima, H.V.C., 2014. *Risks and uncertainties in reservoir yield in highly variable intermittent rivers: case of the Castanhão Reservoir in semi-arid Brazil*. Hydrological Sciences Journal, 59 (6), 1184–1195.
- [4] Carvalho-Santos, Claudia et al. *Climate Change Impacts On Water Resources And Reservoir Management: Uncertainty And Adaptation For A Mountain Catchment In Northeast Portugal*. Water Resources Management (2017): n. pag. Web.
- [5] Česká technická norma ČSN 75 2405 *Vodohospodářské řešení vodních nádrží*, ICS 93.160; 13.060.10, Český normalizační institut, Praha 2004.
- [6] Česká technická norma ČSN EN ISO 748 - *Hydrometrie - Měření průtoku kapalin v otevřených korytech – metody rychlostního pole*, Český normalizační institut, 2001.
- [7] Dantan J.Y., Gayton N., Qureshi A.J., Lemaire M., Etienne A., *Tolerance Analysis Approach based on the Classification of Uncertainty (Aleatory/Epistemic)*, Procedia CIRP, Volume 10, 2013, Pages 287-293, ISSN 2212-8271, doi.org/10.1016/j.procir.2013.08.044.
- [8] Dlabka, J., Baudišová, B., *Nejistoty a neurčitosti při aplikaci probitových funkcí v oblasti prevence závažných havárií : část I*. Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti [online], 2012, roč. 5, č. 3-4. Dostupný z WWW: <<http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-03-04-2012/aplikace-probit-funkci-havarie.html>>. ISSN 1803-3687.
- [9] Dubois D., Prade H., *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*, Plenum Press, New York, NY, USA, 1988.
- [10] Dudek, I., *Poznání a neurčitost základní racionální přístupy a praktické metody*. E-logos : Electronic journal for philosophy, 1999. ISSN 1211-0442.
- [11] Foley A.M., *Uncertainty in regional climate modelling: A review*. Prog Phys Geogr 34(5):647–670, (2010).
- [12] Gutiérrez, J.M., San-Martín, D., Cofiño, A.S., Herrera, S., Manzananas, R., and Frías, M.D. (2012) *User Guide of the ENSEMBLES Downscaling Portal. Version 3*. Technical Note 2/2012. Santander Meteorology Group. Santander.
- [13] Hashimoto T., Stedinger J. R., Loucks D. P., *Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation*, Water Resources Research, Vol 18, NO 1, pages 14-20, February 1982.
- [14] Hester, P., *Epistemic Uncertainty Analysis: An Approach Using Expert Judgment and Evidential Credibility*. International Journal of Quality, Statistics, and Reliability, vol. 2012, Article ID 617481, 8 pages, 2012. doi:10.1155/2012/617481
- [15] Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. *Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas*. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.
- [16] Hoar, T., Nychka, D., 2008. *Statistical downscaling of the community climate system model (CCSM) monthly temperature and precipitation projections*. White paper preprint, Institute for Mathematics Applied to Geosciences/National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307.

- [17] HUDEC, M. *Klimatická změna a její vliv na vodohospodářské řešení zásobního objemu nádrže* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2018. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] ISO, *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement* (International Organisation for Standardization), Geneva, Switzerland, 1993.
- [21] ISO GUM Suppl. 1 (DGUIDE 99998) *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) — Supplement 1: Numerical methods for the propagation of distributions*, ISO 2004.
- [22] Jiménez Cisneros, B.E., T. Oki, N.W. Arnell, G. Benito, J.G. Cogley, P. Döll, T. Jiang, and S.S. Mwakalila, 2014: *Freshwater resources. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.
- [23] Kant I, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können*. Riga, Lithuania: Friedrich Hartknoch, 1783.
- [24] Kašpárek, L. a kol. (2003): *Vliv klimatických změn na množství a kvalitu vodních zdrojů a na hydrologické poměry v ČR. Závěrečná zpráva úkolu VaV/650/3/02*. VÚV T.G.M., Praha, 192 s.
- [25] Kiureghian A., Ditlevsen O., *Aleatory or epistemic? Does it matter?*, Structural Safety, Volume 31, Issue 2, 2009, Pages 105-112, ISSN 0167-4730, doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020.
- [26] Klemes, V. (1967) *Reliability estimates for a storage reservoir with seasonal input*. J. Hydrol. 7, 198-216.
- [27] Klir G. J., *Uncertainty and Information: Foundations of Generalized Information Theory*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 499 pp. , 2005. DOI: 10.1002/0471755575.
- [28] Knight, F. H., *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston, Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, Boston 1921.
- [29] KNOPPOVÁ, K. *Srážko-odtokový proces v podmínkách klimatické změny* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2018. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [30] KNOPPOVÁ, K. *Stochastické generování srážek pomocí vybraných generátorů počasí* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2016 [cit. 2017-04-07]. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [31] Kovář P., 1994: *Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích*. Doktorská disertační práce, LF ČZU Praha.

- [32] Kovář P., 1998: *Water Balance Modelling on Small Forested Catchments*. In: Environment Forest Science (Editor K. Sassa), Kluwer Academic Publishers, London.
- [33] Kovář P., Vaššová D., 2011: *Model KINFIL – Manuál*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, pp. 16.
- [34] Kožin, R., Hanel, M., Kašpárek, L., Peláková, M., Vizina, A. a Tremel, P. *Možnosti zmírnění dopadů změny klimatu využitím území chráněných pro akumulaci povrchových vod*. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2015, roč. 57, č. 4–5, str. 11–16. ISSN 0322-8916.
- [35] Kritskiy, S. N. & Menkel, M. F. (1952) *Water Management Computations (in Russian)*. GIMIZ, Leningrad.
- [36] Kuria, F.W. and R.M. Vogel, *A Global Reservoir Water Supply Yield Model With Uncertainty*, Environmental Research Letters, 9 095006 doi:10.1088/1748-9326/9/9/095006, 2014.
- [37] LaBaugh J. W., Winter T. C. , (1984), *The impact of uncertainties in hydrologic measurement on phosphorus budgets and empirical models for two Colorado reservoirs*, Limnology and Oceanography, 2, doi: 10.4319/lo.1984.29.2.0322.
- [38] Lauri, H. et al., *Future Changes In Mekong River Hydrology: Impact Of Climate Change And Reservoir Operation On Discharge*. Hydrology and Earth System Sciences 16.12 (2012): 4603-4619. Web. 16 May 2017.
- [39] Lempert, R.J., Popper S.W., Bankes S.C., *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative Long-term Strategy Analysis*, MR-1626-RPC, (2003), The RAND Pardee Center, Santa Monica, California.
- [40] Lindström, G., Gardelin, M., Johansson, B., Persson, M. and Bergström, S. 1997. *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model*. Journal of Hydrology, 201, 272-288.
- [41] Lu, D., G. Zhang, C. Webster, and C. Barbier (2016), *An improved multilevel Monte Carlo method for estimating probability distribution functions in stochastic oil reservoir simulations*, Water Resour. Res., 52.
- [42] MARTON, D. *Vliv nejistot průtokových řad průměrných měsíčních průtoků na vypočtené hodnoty zásobního objemu nádrže*. Disertační práce, Brno: VUT v Brně -Fakulta stavební, 2012, 104 s.
- [43] MARTON, D. *Posudek Technicko–ekonomické studie vodního díla Hanušovice*, Brno 2016, HČ 126 54 035 L.
- [44] Marton, D.; Paseka, S. *Uncertainty Impact on Water Management Analysis of Open Water Reservoir*. Environments 2017, 4, 10. ISSN: 2076-3298.
- [45] MARTON, D.; PASEKA, S.; KNOPPOVÁ, K; *Reservoir Storage Capacity Aanalysis Under Conditions of Uncertainty and Climate Change*. In CCWI (2016 b) Conference Proceeding. International conference CCWI 2016, Amsterdam, Holandsko.
- [46] MARTON, D. a STARÝ, M. *Posouzení funkčních objemů vodního díla Vír I na aktualizovaná vstupní data*. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2018, roč. 60, č. 2, str. 4–7. ISSN 0322-8916.
- [47] Marton, D., Starý, M., Menšík, P., 2011. *The influence of uncertainties in the calculation of mean monthly discharges on reservoir storage*, Journal of Hydrology and Hydromechanics. Volume 59, Issue 4, Pages 228–237, ISSN (Print) 0042-790X, DOI: 10.2478/v10098-011-0019-3.
- [48] D. Marton, M. Starý, P. Menšík, *Water Management Solution of Reservoir Storage Function Under Condition of Measurement Uncertainties in Hydrological Input Data*, Procedia

- Engineering, Volume 70, 2014, Pages 1094-1101, ISSN 1877-7058, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.121>.
- [49] MARTON, D.; STARÝ, M.; MENŠÍK, P. *Analysis of the influence of input data uncertainties on determining the reliability of reservoir storage capacity*. Journal of Hydrology and Hydromechanic, 2015, roč. 63, č. 4, s. 287-294. ISSN: 0042-790X.
- [50] MARTON, D., STARÝ M., MENŠÍK P. *Přepočet funkčních objemů vodního díla Vír I*, Brno 2016, HČ 126 54 54 052 L.
- [51] MARTON, D.; STARÝ, M.; PASEKA, S.; MENŠÍK, P. *Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže v podmínkách nejistotami zatížených vstupních dat*. In XXXV. Přehradní dny 2016 Sborník příspěvků - svazek 1. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, (2016 a). s. 120-127. ISBN: 978-80-01-05969-2.
- [52] McMahon T. A., Adeloye A. J., *Water Resources Yield, Water Resources Publication*, 2005, ISBN 9781887201384.
- [53] MŽP, *Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod a základní zásady využití těchto území*, Ministerstvo životního prostředí a Ministerstvo zemědělství ČR, Praha (2011).
- [54] MŽP, *Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR*. Ministerstvo životního prostředí (MŽP - Ministry of the Environment of the Czech Republic) [online]. 2015 [cit. 2016-10-10].
- [55] Nácházel K., Přenosilová E., Toman M., *TAČR 103/93/0841 Zhodnocení dopadů změn klimatu v hydrologických režimech na hospodaření s vodou v nádržích*, Praha (1994).
- [56] Nácházel k., Fošumpaur P., *Possibility Theory in Hydrology and Water Management*. J. Hydrol. Hydromech. 58, 2010, 2; 40 Refs., 8. DOI: 10.2478/v10098-010-0008-y
- [57] Neitsch S.L.; Arnold J.G.; Kiniry J.R.; Williams J.R.; King K.W. (2002), *Soil Water Assessment Tool Theoretical Documentation*.
- [58] Oskoui, I. S., Abdullah, R., & Montaseri, M. (2015). *Multiple regression model using performance indices for storage capacity of a reservoir system in johor catchment*. Applied Mechanics and Materials, 802, 563-568.
- [59] Palečar, R.; Vdoleček F.; Halaj M. *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot*. Automa, číslo 7-8, ročník 2001, <http://www.odbornecasopisy.cz/>.
- [60] PALSTAT CAQ, *Vyjadřování nejistot měření při kalibracích*, PALSTAV s.r.o, Vrchlabí, 2002.
- [61] Parisa Sadat A., Haddad B. O., and Mariño M. A.. *Climate Change Impact On Reservoir Performance Indexes in Agricultural Water Supply*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 139.2 (2013): 85-97. Web.
- [62] Paseka S., *Analýza nejistot hydrologických a provozních parametrů na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže*. Brno, 2016. 76 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [63] Paté-Cornell, M. E., *Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment*. Reliability Engineering & System Safety, Volume 54, Issues 2–3, 1996, Pages 95-111, ISSN 0951-8320, [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(96\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(96)00067-1).
- [64] Paton, F. L., H. R. Maier, and G. C. Dandy (2014), *Including adaptation and mitigation responses to climate change in a multiobjective evolutionary algorithm framework for urban water supply systems incorporating GHG emissions*, Water Resour. Res., 50, 6285–6304, doi:10.1002/2013WR015195.

- [65] Racsco, P., Szeidl, L., & Semenov, M. (1991). *A serial approach to local stochastic weather models*. *Ecological Modelling*, 57(1-2), 27-41. DOI: 10.1016/0304-3800(91)90053-4.
- [66] Refsgaard, J.C., Arnbjerg-Nielsen, K., Drews, M. et al., *The role of uncertainty in climate change adaptation strategies—A Danish water management example*, *Mitig Adapt Strateg Glob Change* (2013) 18: 337. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9366-6>
- [67] Richardson, C. W., *Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation*, *Water Resour. Res.*, (1981), 17(1), 182–190, doi:10.1029/WR017i001p00182.
- [68] Roach, T., Kapelan, Z., Ledbetter, R., Ledbetter, M., *A Comparison Of Robust Optimization and Info-Gap Methods for Water Resource Management Under Deep Uncertainty*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142 (9), (2016), 04016028.
- [69] Semenov, M.A., Barrow, E.M., *LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies User Manual - version 3.0*. Rothamsted Research, UK, 2002.
- [70] Smolík, L. *Vodohospodářské řešení vodní nádrže v podmínkách klimatické změny*. Brno, 2018. 54 str. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.
- [71] Sordo-Ward, Á., Granados, I., Martín-Carrasco, F. et al. (2016), *Impact of Hydrological Uncertainty on Water Management Decisions*, *Water Resour Manage* 30: 5535.
- [72] Starý, M. *HYDROG - Software pro simulaci a operativní řízení odtoku vody z povodí, 1991 – 2017* Brno.
- [73] Starý, M. *Hydrologie*. BRNO: Skripta byla vydána v el. podobě, 2005.
- [74] Starý, M. *Vybrané kapitoly z vodního hospodářství krajiny (MODUL 03)*, VUT v Brně - Fakulta stavební, Brno, 2007.
- [75] Starý M. 1984: *Zpráva o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu HDP VH 83/6 RÚ*, VUT FAST v Brně, Brno, 1984.
- [76] Tannert C, Elvers H.D., Jandrig B. The ethics of uncertainty. In the light of possible dangers, research becomes a moral duty. *EMBO Reports*. 2007;8(10):892-896. doi:10.1038/sj.embor.7401072).
- [77] *TPM 0051 – 93 Stanovení nejistot při měřeních*, podnikové normy ÚNMZ – TPM, Český metrologický institut, 1993.
- [78] Trnka M., Dumbrovský M., Růžek P., Žalud Z., Drbal K., Vizina A., Novotný I., Chuchma F., Trantinová M., a kol., *Generel vodního hospodářství krajiny ČR (2017)*, dostupný na: <http://www.spucr.cz/voda-sucho/generel-vodniho-hospodarstvi-krajiny-ceske-republiky>.
- [79] VÚV pobočka Brno, *Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu v povodí Moravy*, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. – pobočka Brno, 2008.
- [80] Walker WE, Harremoës P, Rotmans J, Van der Sluijs JP, Van Asselt MBA, Janssen P, Kreyer von Krauss MP, *Defining uncertainty a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support*. *Integr Assess*, (2003) 4(1):5–17.
- [81] 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, China*, *Hydrometeorol.*, 14 (5) (2013), pp. 1553–1561 <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-081.1>
- [82] Westerberg, I. K. and McMillan, H. K.: *Uncertainty in hydrological signatures*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 3951-3968, doi:10.5194/hess-19-3951-2015, 2015.

- [83] Westerberg, I. K., T. Wagener, G. Coxon, H. K. McMillan, A. Castellarin, A. Montanari, and J. Freer (2016), *Uncertainty in hydrological signatures for gauged and ungauged catchments*, *Water Resour. Res.*, 52, 1847–1865, doi:10.1002/2015WR017635.
- [84] WECC Doc. 19-1990 : *Guidelines for Expression of the Uncertainty in Calibrations*, 1990.
- [85] Wieland, A., Wallenburg, C.M., 2012. *Dealing with supply chain risks: Linking risk management practices and strategies to performance*. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 42(10).
- [86] Winter, T. C. (1981), *UNCERTAINTIES IN ESTIMATING THE WATER BALANCE OF LAKES*. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 17: 82–115. doi: 10.1111/j.1752-1688.1981.tb02593.x
- [87] ZADEH, L.A. *Fuzzy sets*. *Information and Control*. 1965, vol. 8, issue 3, s. 338-353. DOI: 10.1016/s0019-9958(65)90241-x.
- [88] ZADEH L.A.. *Fuzzy sets as a basic for a theory of possibility*. *Fuzzy Sets and Systems*, 1978, 1, 1, p. 3–28. doi.org/10.1016/S0165-0114(99)80004-9.
- [89] Zahradníček, P., Trnka, M., Brázdil, R., Možný, M., Štěpánek, P., Hlavinka, P., Žalud, Z., Malý, A., Semerádová, D., Dobrovolný, P., Dubrovský, M. and Řezníčková, L. (2014), *The extreme drought episode of August 2011–May 2012 in the Czech Republic*. *Int. J. Climatol.* doi: 10.1002/joc.4211.
- [90] Zhang, Junlong, Yongping LI, Guohe Huang, Xi Chen a Anming Bao (2016). *Assessment of parameter uncertainty in hydrological model using a Markov-Chain-Monte-Carlo-based multilevel-factorial-analysis method*. *Journal of Hydrology*, 538, 471-486.

9 Seznam použitých zkratk

$C_v(X)$	.....	koeficient variace náhodného prvku,
$C_s(x)$	.....	koeficient asymetrie,
D_j	.....	počet dní v daném měsíci,
$D(x)$	.....	rozptyl (disperze),
E_A	.....	roční průměrná hodnota výparu z vodní hladiny [mm],
E_i	.....	průměrný měsíční výpar z povodí v kroku i [mm],
$E_{p,i}$	.....	potenciální výpar z povodí v daném měsíci [mm/měsíc],
$E_{p,i} \text{ neopravená}$	.....	neopravený potenciální výpar z povodí v daném měsíci [mm/měsíc],
$E(x)$	.....	koeficient excese,
$f(x)$	.....	hustota pravděpodobnosti,
$F(x)$	.....	distribuční funkce,
$h_{s,i}$	.....	průměrný měsíční srážkový úhrn [mm],
I	.....	teplotní index závisící na průběhu průměrných měsíčních teplot $T_{a,j}$ v roce
k_c	.....	koeficient odhadovaného výparu z povodí [-],
k_g	.....	koeficient podzemního odtoku [-],
k_s	.....	koeficient povrchového odtoku [-],
$max(X)$	.....	maximální hodnota,
$min(X)$	.....	minimální hodnota,
N_j	.....	průměrný počet hodin denního svitu v příslušném měsíci [h],
$N(\mu(X), \sigma(X))$	.....	Normální rozdělení pravděpodobnosti,
Nh	.....	náhodné realizace výšky vodní hladiny v nádrži [m],
NV	.....	náhodné realizace objemu vody v nádrži [m ³],
NX	.....	náhodný prvek,
$N(0,1)$	.....	normované (standardizované) normální rozdělení pravděpodobnosti,
NSE	.....	Nash–Sutcliffe koeficient [-],
O_K	.....	řízený odtok [m ³ s ⁻¹],

O_P	.....	nalepšený odtok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
P_D	.....	zabezpečenosť odtoku vody z nádrže podľa množstva nedodanej vody [%],
PO	.....	počet opakovaní,
P_T	.....	zabezpečenosť odtoku vody z nádrže podľa trvania [%],
Q_a	.....	dĺhodobý priemerný prútok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
$q_{c,i}$	.....	celkový priemerný mesačný odtok vody z povodia [mm],
Q_{ECO}	.....	Ekologický odtok vody z nádrže [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
$q_{g,i}$	.....	priemerný mesačný podzemný odtok [mm],
Q_m	.....	priemerný mesačný prútok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
$Q_{m,i,real}$	.....	reálny priemerný mesačný prútok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
$Q_{m,i,pre}$	.....	predikovaný/modelovaný priemerný mesačný prútok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
$q_{s,i}$	.....	priemerný mesačný plošný povrchový odtok [mm],
\overline{Q}_r	.....	dĺhodobý priemerný prútok reálnej rady [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$],
R	.....	robustnosť,
S_i	.....	priemerná mesačná pôdna vlhkosť v kroku i [mm],
S_{i-1}	.....	priemerná mesačná pôdna vlhkosť v kroku $i-1$ [mm],
S_{max}	.....	maximálna retenčná kapacita pôd [mm],
T_a	.....	priemerná denná teplota vzduchu v danom mesiaci j [$^{\circ}\text{C}$],
U	.....	rozšírená neistota,
U_a	.....	rozšírená neistota pre $k = 3$,
$U_a(V_Z)$	.....	rozšírená neistota zásobného objemu nádrže,
$U_a(P_T)$	.....	rozšírená neistota zabezpečenia odtoku vody z nádrže podľa trvania,
U_b	.....	rozšírená neistota pre $k = 2$,
u_B	.....	standardná neistota typu B,
V_n	.....	objem vody v nádrži [m^3],
V_0	.....	počátečný objem vody v nádrži [m^3],
V_R	.....	ochranný objem nádrže [m^3],

V_z	.....	zásobní objem nádrže [m^3],
$Z_{t,i}$	.....	stav zásobního objemu nádrže,
α	.....	koeficient nalepšení,
δ_i	.....	sluneční delkinace [rad],
ε_i	.....	náhodná odchylka,
η_j	.....	náhodná realizace netransformované hodnoty,
$\mu(P_T)$	.....	střední hodnota zabezpečení odtoku vody z nádrže podle trvání [%],
$\mu(V_z)$	.....	střední hodnota zásobního objemu nádrže [m^3],
$\mu(x)$	.....	střední hodnota,
ξ	.....	pseudonáhodné číslo z intervalu $N \in \langle 0,1 \rangle$,
$\sigma(V_z)$	.....	směrodatná odchylka zásobního objemu nádrže [m^3],
$\sigma(X)$	.....	směrodatná odchylka náhodného prvku,
ΣD	.....	hloubka poruchy neboli objem vody nedodaný do systému [m^3],
φ_i	.....	přepočtená zeměpisná šířka [rad],
$\omega_{s,j}$	.....	úhel hodin západu slunce [rad],