VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

STANOVENÍ FUNKČNÍCH OBJEMŮ NÁDRŽE S UVAŽOVÁNÍM NEJISTOT VSTUPNÍCH DAT
DETERMINATION OF THE FUNCTIONAL VOLUMES OF THE RESERVOIR CONSIDERING INPUT DATA UNCERTAINTIES

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE Ing. STANISLAV PASEKA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. DANIEL MARTON, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2020

KLÍČOVÁ SLOVA

Zásobní objem nádrže, retenční objem nádrže, nejistota měření, metoda Monte Carlo, zabezpečenost podle trvání, Klemešova metoda, transformace povodňové vlny, mřížková optimalizační metoda.

KEYWORDS

Active Storage Capacity, Flood Storage Capacity, Uncertainty of Measurement, Monte Carlo Method, Temporal Reliability, Klemes method, Flood Wave Transformation, Grid Optimization Method.

OBSAH

1 ÚVOD 1

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ 3

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 5

4 METODIKA 6

4.1 Nejistoty měření 6

4.1.1 Možné nejistoty vstupující do vodohospodářského řešení nádrže a jejich vyčíslení 7

4.1.2 Aplikování vstupních nejistot metodou Monte Carlo 9

4.2 Simulační modely nádrže 10

4.2.1 Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečenost 100 % 10

4.2.2 Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečenost menší než 100 % 10

4.2.3 Optimalizace 11

4.2.4 Zavedení ztráty vody z nádrže do vodohospodářského řešení zásobního objemu . 11

4.2.5 Stanovení retenčního prostoru nádrže 12

4.3 Metody pro vyhodnocení 13

4.3.1 Střední hodnota 13

4.3.2 Rozptyl a směrodatná odchylka 13

4.3.3 Koeficient variace 13

4.3.4 Koeficient asymetrie 13

4.3.5 Kvantil 13

4.3.6 Čára pravděpodobnosti překročení 14

4.3.7 Transformační efekt 14

5 VYVÍJENÝ SOFTWARE 14

5.1 UNCE_RESERVOIR 14

5.2 TRANSFORM_WAVE 15

5.3 Propojení UNCE_RESERVOIR a TRANSFORM_WAVE 15

6 PRAKTICKÁ APLIKACE 15

6.1 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečenost 100 % 17

6.2 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečenost menší než 100 % 18

6.3 Retenční prostor nádrže 19

6.4 Komplexní řešení funkčních prostorů nádrže 21

7 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ 23

7.1 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečenost 100 % 23

7.2 Zásobní prostor nádrže pro zabezpečenost menší než 100 % 23

7.3 Retenční prostor nádrže 23

7.4 Komplexní řešení funkčních prostorů nádrže 24

8 ZÁVĚR 25

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 26

1 ÚVOD

Aktuálně v celosvětovém měřítku velmi rychle narůstá nedostatek vody a také ve větším počtu vznikají oblasti postižené suchem a četnost suchých epizod. Tento jev souvisí s procesem globální klimatické změny. Problémy se zabezpečením vodních zdrojů se začínají projevovat i v oblastech, kde si obyvatelstvo dosud ataky sucha příliš neuvědomovalo, ale začíná je už čím dál výrazněji pociťovat (Trnka a kol., 2017).

Podle aktuálních vyhodnocených dat o stavu počasí a podnebí ve světě Světovou meteorologickou organizací WMO (WMO, 2020) pokračuje oteplování, které je pozorovatelné již několik desetiletí. Rok 2016 byl ve světě prozatím nejteplejším rokem v historii měření a poslední vyhodnocený rok 2019 druhým nejteplejším. Prvních 5 nejteplejších let ve světě se vyskytly v posledních 5 letech a 19 z 20 nejteplejších roků bylo naměřeno ve 21. století. Tyto údaje z WMO jsou počítány od doby moderních přístrojových měření za posledních cca 150 let.

Suchá období se u nás ve větší míře začala objevovat přibližně od roku 2011 (Zahradníček a kol., 2014) a přetrvávají, ba se dokonce prohlubují dodnes. Kromě toho s rostoucí teplotou, kterou zažíváme poslední roky i na našem území, roste výpar. V našem podnebí ovšem v průměru nezaznamenáváme snížení průměrného množství srážek, ale objevují se změny v rozložení srážek. Jinými slovy se prodlužují období výskytů sucha, které se střídají s kratšími, ale intenzivnějšími úhrny srážek, které mohou způsobovat lokální povodně. Voda rychle odtéká pryč a po několika dnech je situace obdobná jako před srážkami. Výše zmíněné je dále podtrženo zejména rozsáhlými regionálními povodněmi v letech 1997, 2002, 2009, 2010 a 2013, ale i výskyty přívalových povodní.

Česká krajina prochází neustálým vývojem. Ve velkém měřítku byl ráz krajiny měněn především v druhé polovině minulého století. Necitlivé zásahy do krajiny mají negativní vliv na její vodní režim. To celé v kombinaci s působením nejistot pramenících ze změny klimatického systému, které s sebou přináší zvýšené riziko v podobě extrémních povodní a výskytů dlouho trvajícího období sucha nebo také nejistot vznikajících z měření může ovlivnit data sledující pokles průtoků. Nejenom nejistoty změny klimatického systému, ale i nejistoty měření by měly být nedílnou součástí při odvození hydrologických veličin a je nezbytné s nimi uvažovat v současném vodohospodářském provozu a také při sestavování výhledových hydrologických analýz.

V budoucnu je možný pokles průtoků zejména v málo vodných obdobích (Hanel a kol., 2011) a hodnota dlouhodobého průměrného průtoku může klesnout k hodnotě 0,8 až 0,6 Q_a (Kašpárek, 2005). Další výhled do následujících let s ohledem na četnosti a délky suchých období a výskyty přívalových srážek není příliš optimistický, a to ani v případě, kdyby se odhady z klimatických modelů plně nenaplnily.

Obecně můžeme sucho klasifikovat na zemědělské sucho, hydrologické sucho, meteorologické a sociálně-ekonomické. V podobě zemědělského sucha dochází především ke snižování úrodnosti a k degradaci půdy vlivem větrné a vodní eroze. Hydrologické sucho nás trápí v sektorech krajinného a vodního hospodářství, kdy pociťujeme hlavně pokles vydatnosti vodních zdrojů, a to jak povrchových, tak i podzemních vod. Kromě toho dochází i k zanášení vodních toků a nádrží. Při nízkých vodních stavech se snižuje kvalita vody v tocích i v nádržích, protože se tolik neředí vypuštěné odpadní vody. Tím dochází ještě k většímu kyslíkovému deficitu, což vede k lokálním ekologickým haváriím. Navíc za poslední 3 až 4 roky byl na několika oblastech České republiky zaznamenán

výrazný srážkový deficit, tedy sucho meteorologické. V nejohroženějších oblastech ČR už nastalo i sociálně-ekonomické sucho, kde byl nedostatek pitné vody pro obyvatelstvo. Zaznamenaná sucha a povodně v posledních desetiletích způsobily a způsobují škody na majetku, ale také ohrožují životy obyvatel. Výše zmíněné potvrzuje, že Česká republika není zcela připravena na změnu klimatického systému. Z hlediska této nepříznivé tendence je nezbytné krajinu připravit tak, aby se dokázala vyrovnat s nepříznivými vlivy.

Česká republika musí hospodařit s velmi omezenými vodními zdroji. V našich podmínkách se musíme zaměřit na zvyšování retenční schopnosti vody v krajině, ať už lepším hospodařením, vhodnými dotačními tituly ze strany vlády, ale také technickými kroky. Mezi tyto kroky řadíme např. výstavbu a obnovu tůní, mokřadů, rybníků a v neposlední řadě jsou vhodným řešením v boji proti změně klimatu jednoznačně vodní nádrže. Tyto stavby dokáží čelit oběma hydrologickým extrémům a zmírňovat jejich negativní dopady. Při povodních vodní nádrže účelně a viditelně transformují povodňové vlny a naopak při probíhajících suchých obdobích byly vodní toky pod nádržemi výrazně dotovány akumulovanou vodou z nádrží s dostatečným zásobním prostorem, a tím byl zajištěn minimální zůstatkový průtok. V případech, kdy hladina vody v nádrži klesne pod úroveň zásobního objemu, musí provozovatelé reagovat speciálními provozními manipulacemi. Takto tomu bylo v posledních letech např. na vodní nádrži Vranov, Vír, Hubenov, Znojmo a Nová Říše v povodí řeky Moravy (Viskot, 2019).

Vodní zdroje podzemních vod slouží převážně k zásobování obyvatelstva pitnou vodou. Tyto zdroje však nestačí k pokrytí všech potřeb odběrů pitné vody. Z tohoto důvodu jsou potřeby odběrů doplněny dodávkou surové vody z povrchových zdrojů v podobě vodárenských nádrží. Omezenost a zranitelnost vodních zdrojů vedla již dříve vodohospodáře k ochraně území formou vytipování tzv. hájených lokalit akumulace povrchových vod. Tato území by v budoucnu umožnila dalším generacím vybudovat nové nádrže v morfologicky, hydrologicky a geologicky vhodných lokalitách (Tůma, 2017).

Když se neumíme vypořádat s poklesem podzemní vody, tak je otázkou, kdy nastane okamžik, že podzemní zdroje vody nebudou schopny dodávat vodu do stávajících systémů. Proč si tedy nezadržovat vodu zásobními objemy a zároveň nevytvářet retenční prostory pro eliminaci extrémních jevů v krajině výstavbou nových víceúčelových nádrží? Jak bylo řečeno, ruku v ruce s technickými opatřeními je ale nutné realizovat i přírodní opatření a zaměřit se na současné problémy komplexněji.

V reakci na popsané problémy začaly na podnět vlády vznikat strategické dokumenty. V roce 2015 byl připraven a schválen materiál Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody (VODA-SUCHO, 2015) nebo dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR (MŽP – Strategie přizpůsobení, 2015). Tento dokument představuje národní adaptační strategii ČR a také zhodnocuje pravděpodobné dopady změny klimatu včetně návrhů konkrétních adaptačních opatření. Obsažený výčet strategií v tomto dokumentu je velmi rozsáhlý a z pohledu projekce a vědy vyčerpávající. Mimo jiné je zde i bod *3.3.3.7 Optimalizace funkce stávajících nádrží a vodohospodářských soustav*. Tento bod je jedním z klíčových adaptačních opatření ve vodním hospodářství a vede k lepší připravenosti na oba hydrologické extrémy pomocí přehodnocení stávajícího využití vodních nádrží a vodohospodářských soustav. Dále vede k optimalizaci řízení nádrží tak, aby co nejlépe plnily funkci nově definovaných požadavků i s výhledem do budoucnosti. Za tímto účelem je doporučeno provádět simulační modelování a matematickou optimalizaci a výsledky

zohlednit v úpravách manipulačních řádů vodních děl. V roce 2017 byl dále vládou schválen Národní akční plán adaptace na změnu klimatu (MŽP – Národní akční plán, 2015) nebo Koncepce na ochranu před následky sucha pro území České republiky (MZE – Koncepce, 2017). Na situaci intenzivních výskytů hydrologických extrémů také zareagovaly státní podniky povodí, které zadaly ke zpracování Technicko-ekonomické studie nádrží ve vybraných profilech toků na celém území ČR (Zadání Technicko-ekonomické studie PMO, 2015). Všechny zmíněné dokumenty mají především za cíl vypořádat se a čelit problémům se suchem a povodněmi.

V ČR byly vodní nádrže vždy navrhovány podle historických nebo odvozených hydrologických časových řad. Manipulační řády velkých vodních děl byly většinou schvalovány v době své výstavby a následně revidovány na dané hydrologické podmínky. Problémem je, že dříve užívaný přístup nezohledňuje nejistoty vznikající v důsledku zpracování vstupních dat a nejistoty vznikající z budoucích hydrologických a klimatických změn. Neurčitosti a nejistoty změny klimatu a nejistoty měření mohou vytvářet potenciální nejistotu, která by mohla ohrozit spolehlivost dodávek vody. Z pohledu adaptace je nezbytné přerozdělovat stávající prostory vody v nádržích, pokud to bude z kapacitních a technických důvodů možné. Jinými slovy je nutné provádět důkladné revize manipulačních řádů nádrží a novelizovat normu (ČSN 75 2405, 2017). Snažit se navyšovat zásobní objemy nádrží za účelem zajištění odběrů vody a eliminovat dopady sucha na toku pod nádržemi, zkapacitnit technické objekty a navyšovat retenční objemy pro bezpečné převádění a účinné transformace povodní. Je zřejmé, že téma pokročilého managementu a řízení povrchových vodních zdrojů je velmi aktuální a celosvětově se rozvíjí.

Negativním faktorem ovlivňujícím přesnost vodohospodářských výpočtů a také provoz nádrží v extrémních situacích je vodohospodářské řešení nádrže v podmínkách nejistot. Ať už nejistot vznikajících ze změn klimatu nebo z měření. Výzkumy vedoucí ke zdokonalování návrhů a managementu nádrží v podmínkách nejistot, analýzy nejistot u plánovaných nebo přerozdělení stávajících prostorů vody u nádrží jsou v této době velmi žádané a důležité. Tato práce se zabývá stanovením funkčních objemů nádrže v podmínkách nejistot, konkrétně nejistot z měření na datech vstupujících do vodohospodářského řešení nádrže.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Celkový koncept nejistoty může být v současné době vnímán z více hledisek a uplatnění nejistot je celá řada. Nejistotu lze klasifikovat podle (Kiureghiana a Ditlevsen, 2009) do dvou kategorií, konkrétně jako nejistotu z anglického aleatoric uncertainty a jako neurčitost z anglického epistemic nebo také knowledge based uncertainty, jak bylo popsáno v (Marton, 2018). Nejistoty měření spadají do skupiny nejistot tzv. aleatoric uncertainty. Tato kategorie nejistot je vázána k určitému rozdělení pravděpodobnosti a zobrazuje variabilitu spojenou se systémem nebo prostředím. Tuto nejistotu lze popsat pomocí stochastických simulací (Dantan a kol., 2013). Naopak nejistoty z budoucí změny klimatu lze chápat jako nejistotu vznikající při modelování odhadu budoucích vývojů emisních koncentrací skleníkových plynů neboli emisních scénářů označovanou jako tzv. hlubokou nejistotu z anglického deep uncertainty. Pohled na typologii nejistoty a neurčitosti je v technických úlohách složitý a může ji určit sám autor při tvorbě modelu na základě mnoha faktorů, znalostí, rozhodování a dalších (Kiureghian a Ditlevsen, 2009).

Samotné nejistoty z pohledu současného poznání byly nejprve popsány v práci Risk, uncertainty, and Profit (Knight, 1921). Nejistoty měření v podobě, jaké známe dnes, se do běžné praxe kalibračních laboratoří dostaly až v roce 1990 vydáním dokumentu WECC 19/90 Západoevropským kalibračním sdružením (WECC, 1990), ve kterém byly poprvé nastíněny obecné principy nejistoty a definovány další postupy k zavedení teorie nejistoty do metrologické praxe. Po něm následovaly další předpisy, jako Směrnice pro vyjadřování nejistoty při měření (Guide to the Expression of Uncertainty, 1993), kde byla položena základní definice a teorie nejistoty měření, dále Metodika vyjadřování nejistot při kalibracích (Expression of Uncertainty, 1997) nebo rozšiřující dokument (ISO GUM, 2004), který se věnuje distribuci a propagaci nejistot měření využitím simulace Monte Carlo. Vstupem ČR do Evropské unie bylo nutné dodržet zmíněné dokumenty, které definovaly zcela nový pohled na do té doby u nás zažitý pojem chyby vzniklé měřením. Základem bylo nahrazení názvosloví novým pojmem nejistoty měření. Z dokumentů byly sestaveny národní předpisy a normy, které jsou pro ČR závazné. Český přepis má název Stanovení nejistot při měřeních (TPM 0051, 1993).

Odhad nejistoty v podobě nejistých a neúplných dat nebo neznalosti systémů v hydrologii byly nejprve popsány metodou GLUE (Beven and Binley, 1992) a následně např. (Beven, 2007), kde je mimo jiné popsáno, jak nejlépe prezentovat nejisté predikce uživatelům a rozhodujícím činitelům. Výzkumů, které se zabývají přímo nejistotami při měření nebo nejistotami při předpovědi obecně v hydrologii, možným vlivem těchto nejistot na jednotlivé prostory vody v nádržích či vlivem nejistých scénářů změn klimatu na komplexní řešení rozsáhlých systémů vodních zdrojů, je mnoho a jsou z celého světa.

Nejistoty měření samotných průtoků nebo možné přístupy k doplnění chybějících průtokových řad byly zkoumány v (Baldassarre a Montanari, 2009), (Shrestha a Simonovic, 2010), (Tomkins, 2014) a (Westerberg a McMillan, 2016). Dále nejistoty konkrétně metodou Monte Carlo byly aplikovány pro předpovídání proudění vody v toku v (Whitehead a kol., 2009) nebo předpovídání povodní v (Gholam a kol., 2012).

Hydrologické aplikace zahrnující propagaci nejistot do hydrologických vstupů při měření srážek, přítoků vody do nádrže a výparu na vodní bilanci nádrží byly testovány v práci (Winter, 1981) nebo později v (LaBaugh a Winter, 1984). Novější publikace zkoumající rizika nejistoty na zásobní objem nádrže s využitím Monte Carlo simulace se zabývají v (Campos a kol., 2014) nebo v (Kuria a Vogel, 2014), kde byla provedena analýza nejistot zásobního objemu nádrže s využitím Water Supply Yield Model. Na základě nejistých povodňových přítoků vody do nádrže byla v (Li a kol., 2016) provedena analýza pravděpodobnostních rizik nádrže nebo v (Chen a kol., 2018) analýza rizik protipovodňové kontroly s nejistou prognózou přítoků vody simulací Monte Carlo.

Řešení současně zásobního a retenčního prostoru v nádrži v podmínkách nejistot bylo zkoumáno v článku (Ngo a kol., 2007), kde byla použita optimalizace komplexní evolucí na největší víceúčelové vodní nádrži ve Vietnamu. V tomto případě optimalizace soustředí pozornost na kompromis mezi povodňovou regulací a vodní elektrárnou v povodňové sezóně. Výsledky ukazují, že lze nalézt optimalizovanou regulaci, která snižuje povodňové špičky a zároveň udržuje vysokou úroveň vodní hladiny pro výrobu vodní energie. Dalším článkem, který hodnotí nový přístup rozhodovacích metod pro navrhování nových víceúčelových nádrží, je (Paseka, Kapelan, Marton, 2018). Studie představuje nový přístup k optimálnímu návrhu víceúčelové nádrže pro kvantifikaci odolnosti a robustnosti na zásobování vodou. Nejistoty jsou interpretovány jako možné budoucí změny

v klimatickém systému s využitím výstupů z regionálních klimatických modelů. Byl vyvinut simulační model, který byl propojen s programem GANetXL, aby bylo možné provádět optimalizaci provozu vodní nádrže s využitím genetických algoritmů.

Dnešním trendem je komplexní řešení rozsáhlých propojených systémů vodních zdrojů s náklady na rekonstrukce nebo výstavbu nových vodních zdrojů. K tomu slouží optimalizační metody s odhadovanými scénáři budoucí poptávky vody a scénáři změny klimatu jako v (Maiolo a kol., 2017), (Roach a kol., 2017) nebo (Kapelan a kol., 2017).

V ČR se první zmínky o vlivu nahodilých chyb výchozích hydrologických podkladů na hodnotu zásobního objemu nádrže poprvé objevují na území tehdy ještě ČSSR ve zprávě o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu z roku 1984 (Starý, 1984). V rámci tohoto 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. Další publikace vycházející z této zprávy (Marton a kol., 2011) ukazuje, že nejistoty vstupních hydrologických podkladů mohou negativně ovlivnit neboli podhodnotit velikost zásobního objemu nádrže a reálně způsobit i neočekávaný provozní výpadek nádrže.

V současné praxi se v ČR při vodohospodářských výpočtech s nejistotami změn klimatu nebo s nejistotami měření příliš nesetkáváme. Nejistoty jsou nanejvýš uvažovány velmi zjednodušeně například empirickým zavedením mezí nebo koeficientů. Nejsou známy ani konkrétní velikosti nejistot vstupních dat do vodohospodářských řešení. Dokonce ani nejistoty průtokových řad nejsou v běžné praxi detailněji zohledňovány a není přesně známý jejich dopad. V rámci bakalářské práce (Paseka, 2014) byly na jednom zkoumaném profilu stanoveny velikosti rozšířených nejistot měsíčních průtoků v řádech jednotek %.

Z výzkumu na Ústavu vodního hospodářství krajiny, Fakulty stavební, VUT v Brně, viz články (Marton, 2012), (Marton a kol., 2015 (a),(b)), (Paseka, 2016), (Paseka a kol., 2016) a (Marton a Paseka, 2017) bylo potvrzeno, že vstupní velikosti mají vliv na velikosti zásobního prostoru, ale i na výslednou zabezpečenost. Hodnoty zabezpečeností určené bez nejistot vstupních dat mohou být výrazně podhodnoceny a za určitých podmínek mohou být nádrže a jejich zásobní objemy mylně zařazeny do tříd významnosti vodních děl pro účely zásobování. Dále se ukázalo, že přítok vody do nádrže je nejvýznamnějším zdrojem nejistot, po něm následovala batygrafie, nakonec výpar a průsak.

Provozování víceúčelových nádrží je složité kvůli konfliktu mezi různými cíli. Nádrže v optimálním návrhu a provozu mohou zefektivnit hospodaření s vodou. Řešením může být nalezení vhodného poměru mezi velikostí zásobního a retenčního prostoru vody v nádrži v podmínkách nejistot. Oba tyto prostory je ovšem žádoucí maximalizovat.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Záměrem je nejprve popsat a odhadnout hodnoty příslušných nejistot měření. Zavedením těchto nejistot do uvažovaných vstupů vodohospodářského řešení nádrže je i výsledek zatížen nejistotami. Je tedy důležité, jak výsledky zatížené nejistotami vyhodnotit, uchopit a interpretovat.

Prvním cílem je k vyvinutému softwaru UNCE_RESERVOIR (Marton a kol., 2015d) vytvořit uživatelské rozhraní a na základě výpočtů a testování na několika profilech vodních nádrží obecně odhadnout potenciální nejistotu zásobního objemu nádrže.

Druhým cílem je software UNCE_RESERVOIR rozšířit o výpočet, který bude počítat optimální zásobní objem nádrže pro zabezpečenost menší než 100 % v podmínkách

nejistot. Poté tento simulačně optimalizační model otestovat, zanalyzovat a vyhodnotit výsledky v podmínkách nejistot na reálných datech vybraných vodních nádrží.

Třetím cílem je vyvinout zcela nový software pro transformaci povodňových vln modifikováním grafické Klemešovy metody. Dále naprogramovat do softwaru zavádění vstupní nejistoty metodou Monte Carlo. Tento software poté umožní stanovit retenční objem nádrže v podmínkách nejistot. Poté bude cílem na základě výpočtů a testování na reálné nádrži vhodně vyhodnotit velikost retenčního objemu nádrže v podmínkách nejistot.

Posledním cílem je komplexně stanovit funkční objemy nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat na vybrané reálné vodní nádrži. Úkolem bude provázat 2 výše zmíněné softwary pro výpočet zásobního objemu nádrže a pro výpočet retenčního objemu nádrže a v závislosti na sobě stanovit vhodný návrh objemů vody v nádrži v podmínkách nejistot měření. Dále vhodně výsledky vyhodnotit a interpretovat. Závěrem doporučit konkrétní hodnoty funkčních objemů analyzovaného vodního díla při řešení na aktualizovaných datech a v podmínkách nejistot měření. Komplexní řešení nádrže v podmínkách nejistot měření přispěje k redukci nebezpečí vzniku nedostatku vody při provozu vodních nádrží v extrémních podmínkách.

4 METODIKA

4.1 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Samotné měření a technologie jsou během vývoje modernizovány a zdokonalovány, což snižuje chybu měření. Velikosti chyb měření se odvíjí od dvou faktorů ovlivňujících měřicí proces. Prvním je samotná metoda měření a druhým jsou podmínky při měření. Při jakémkoliv měření je v prvé řadě velmi důležité detailně rozumět postupům, principům, funkcím přístroje a znalosti metody měření. To umožní vhodně vyhodnotit potenciální vlivy, které mohou působit v průběhu měření jako zdroje nejistot a ovlivnit výsledek.

V teorii nejistot měření klasifikujeme tzv. nejistotu typu A a nejistotu typu B. Tato klasifikace je určena na základě způsobu získání dané nejistoty. Z matematické statistiky byla jako míra standardní nejistoty zvolena směrodatná odchylka příslušného rozdělení pravděpodobnosti pro jednotlivé zdroje nejistot. Rozdíl mezi nejistotami typu A a typu B je dán způsobem, jakým je směrodatná odchylka získána (Palstat s.r.o., 2002).

Nejistota typu A, která je značená jako u_A, se stanovuje výpočtem z opakovaně provedených měření dané veličiny a nejistota typu B se stanovuje jinak než opakovaným měřením. Nejprve je nutné najít a stanovit nebo případně odhadnout všechny možné zdroje nejistot (Palstat s.r.o., 2002). Možné zdroje nejistot podle (Starý, 2005a) jsou vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení, vlivy okolního prostředí a jejich změny, vliv metody, vliv operátora a ostatní vlivy.

Nejprve se vytipují všechny možné zdroje nejistot z jednotlivých zdrojů Z_1, Z_2,…, Z_n a určí se standardní nejistoty typu B značeny jako u_{BZj}. Poté se odhadne maximální rozsah změn tak, že se volí taková hodnota, aby bylo její překročení málo pravděpodobné. Standardní nejistota u_{BZj} se potom určí podle vztahu (1)

$$u_{BZj} = \frac{Z_{jmax}}{\chi} \tag{1}$$

kde Δz_{jmax} je maximální odchylka j-tého zdroje nejistoty a χ je konstanta, která plyne z rozdělení pravděpodobnosti, kterým se daný zdroj řídí. Pro normální rozdělení tato konstanta χ odpovídá hodnotě 3.

Celková standardní nejistota typu B, která je značená jako u_B, se určí pro n odpovídající počet zdrojů nejistoty Z_1, Z_2,…, Z_n geometrickým průměrem nejistot jednotlivých zdrojů podle vztahu (2)

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} u_{B_{Zj}}^2} \tag{2}$$

Následně je standardní nejistota typu B převedena do podoby, která má opět charakter směrodatné odchylky (Palenčár a kol., 2001a).

V případě kombinace nejistot typu A a typu B se zavádí tzv. kombinovaná standardní nejistota u, která je dána geometrickým průměrem standardní nejistoty u_A a u_B.

Pro normální rozdělení se používají základní koeficienty rozšíření, kterým dosáhneme pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností. Konkrétně k = 1,0; k = 2,0; k = 2,58 a k = 3,0 pro pravděpodobnosti pokrytí přibližně 68 %, 95 %, 99 % a 99,7 %. V praxi se nejvíce uplatnil koeficient k = 2,0 (Palstat s.r.o., 2002).

4.1.1 Možné nejistoty vstupující do vodohospodářského řešení nádrže a jejich vyčíslení

- Přítok vody do nádrže

Přítok vody do nádrže neboli stanovení reálné průtokové řady pro určení zásobního objemu nádrže vychází z měření na příslušném vodoměrném profilu. V běžné praxi se členy reálných průtokových řad udávají jako průměrné hodnoty „spojitě“ naměřených průtoků. Na přítocích do nádrží jsou zřízeny vodoměrné stanice, které se vybavují nejmodernější technikou. Především tlakovými sondami, případně ultrazvukovými nebo bublinkovými přístroji. Dosažené měření je dnes velmi přesné v porovnání s plovákovým zápisem nebo při odečtech z vodočetné latě. Přesnost měření tlakových sond neboli velikost standardní nejistoty měření výšky hladiny např. podle výrobce Fiedler uváděna pro horní mez lze uvažovat do ± 0,50 %.

Měřením tlakovými sondami získáme pouze hodnotu vodního stavu. K převedení vodního stavu na hodnotu průtoku je zapotřebí měrná křivka průtoku koryta toku. Pro konstrukci měrné křivky potřebujeme mít naměřený vhodný vzorek tzv. *Qh* bodů v měrném profilu. Přesnost odvození průtokové řady je tedy ovlivněna mnoha vlivy nejen při samotném měření výšky vodního stavu, ale také převedením vodního stavu na průtok.

V disertační práci (Marton, 2012) a práci (Marton a kol., 2011) byla na 3 anonymních profilech testována vstupní nejistota měsíčních průtoků na výsledný zásobní objem nádrže. Vstupní nejistoty typu B byly zadány na plovákovém zařízení ± 0,133 % měřené hodnoty a pro hydrometrické měření ± 2,0 %. Rozšířená nejistota hodnot měsíčních průtoků pro koeficient rozšíření k = 3,0 dosahovala v průměru ± 2,69 %, ± 1,65 % a ± 1,52 % pro jednotlivé profily. Obdobně v bakalářské práci (Paseka, 2014) zabývající se odhadem nejistot měření v měrném profilu Prostřední Poříčí dosahovaly výsledné rozšířené nejistoty měsíčních průtoků hodnot přibližně ± 1,4 až ± 2,3 %. Tedy celkový rozptyl výsledných měsíčních průtoků lze uvažovat přibližně do 5 %.

Oproti tomu jsou charakteristiky povodňových režimů v porovnání s měsíčními průtoky zatíženy výrazně vyšší nejistotou. Stanovení teoretických povodňových vln se během let měnilo. V dnešní době pro vypracování teoretických povodňových vln bývá nejčastěji použita klasická metoda nebo metoda podmíněných pravděpodobností překročení objemu. Metody se liší způsobem odvození tvaru a objemu teoretické povodňové vlny.

Podle třídy spolehlivosti hydrologických údajů se pohybují pravděpodobné chyby pro $Q1$ až Q_{10} v rozmezí ± 15 % až ± 50 % a pro Q_{20} až Q_{100} dokonce ± 25 % až ± 60 % (ČSN 75 1400, 2014). V těchto chybách je mimo jiné zahrnuta nepřesnost při měření velkých průtoků. Nižší hranice je udávána pro hodnoty dlouhodobě pozorovaných přímo v daném profilu nebo v jiném velmi blízkém profilu na témže toku. Naopak vyšší hranice chyb jsou pro údaje odvozené z pozorovaných hodnot do profilu mimo pozorovaný tok nebo ze srážek mimo jeho povodí.

- Batygrafické křivky nádrže

Dříve se pro stanovení batygrafických křivek vycházelo z mapových podkladů a morfologie údolí nádrže. Křivky se určovaly při stavbách nádrží, ale po naplnění se už měří obtížně. V projekci se při návrhu běžně vychází z digitálního modelu reliéfu DMR, jehož zpracování probíhalo z leteckého laserového skenování. U staršího modelu ze 4. generace DMR 4G je deklarovaná přesnost 0,3 m v terénu bez souvislé vegetace a 1,0 m v terénu pokrytém vegetací. U novějšího modelu z 5. generace DMR 5G je přesnost 0,18 m v terénu bez souvislé vegetace a 0,3 v terénu pokrytém vegetací (Technická zpráva k DMR, 2016). Při realizaci se pak většinou vychází z geodetického zaměření.

Během provozu nádrží ovšem dochází ke změnám morfologie, ať už boční erozí, sesuvem půdy, splavem a zanášením z okolních ploch, také dochází k zanášení tokem nebo může naopak nastávat vymílání proudem vody na přítoku vody do nádrže. Otázkou tedy je, jak se morfologie údolí nádrže mění během několikaletého provozu nádrže. Na tuto otázku lze částečně odpovědět základním rozdělením typických nánosů splavenin v nádrži na základě dnových splavenin z přítoku vody do nádrže podle (Morris a Fan, 1998). Konkrétně mohou nastat 4 varianty a to (i) delta nános, kdy se dnové sedimenty usadí na začátku nádrže, (ii) zužující se nános, kdy se splaveniny usazují postupně na přítoku a nános se zužuje směrem do nádrže, (iii) rovnoměrný nános, kdy se plaveniny usazují postupně a rovnoměrně po celé délce dna nádrže a (iiii) klínový nános, kdy se plaveniny budou usazovat až v nejhlubším místě nádrže, tedy v mrtvém prostoru nádrže.

Vývoj zanášení nádrží lze také řešit moderní měřicí technikou. V dnešní době například Povodí Moravy, s.p. provozuje speciální motorové plavidlo, které je určeno k měření hloubek vodních nádrží s přesností v řádech cm (Měřicí loď – Povodí Moravy, 2012). Dále firma Vars nabízí zaměření hloubek a sedimentů v tocích a nádržích moderně vybavenou lodí s přesností odpovídající běžnému měření na souši (Systém měření – firma Vars, 2018).

Zmiňované moderní měření se zatím dlouhodobě neprovádí a výsledky nejsou běžně dostupné a nijak známé. Můžeme tedy pouze odhadovat nepřesnost batygrafických čar a zanášení nádrží během provozu. Na druhou stranu pod zásobním prostorem je ještě prostor stálého nadržení, který například zanášení nádrže do značné míry eliminuje, a tudíž nemusí mít zmiňované vlivy až takové následky na návrh zásobního prostoru nádrže.

- Výpar z vodní hladiny

Pro odhad výparu existuje řada přímých a nepřímých metod. Přímé metody jsou určeny měřením. Pokud ovšem není měření k dispozici, tak se výpar z vodní hladiny určuje především ze závislosti na nadmořské výšce hladiny a tabulky % ročního výparu v určitých měsících dle (ČSN 75 2405, 2017). Jedná se pouze o přibližné stanovení ztráty vody výparem, a navíc tyto údaje nebyly během posledních let zpřesněny například na vývoj změny teplot vzduchu v čase, proto se následující vyhodnocení musí uvažovat s patřičnou rezervou. Kromě toho ještě dochází k mnoha ovlivňujícím faktorům, jako

například vliv rostlin na vodní hladině, zamrznutí vodní hladiny apod. Především u velkých vodních ploch představuje každý mm výparu nezanedbatelné množství vody, která se vypaří, a proto je třeba při vodohospodářském řešení uvažovat a pracovat s nejistotou výparu z vodní plochy.

- Průsak tělesem hráze a podložím

Průsak vody tělesem hráze je možno orientačně spočítat, odhadnout podle zkušeností v obdobných podmínkách nebo přímo měřit v rámci monitoringu hrází.

- Ostatní

Ztráty vznikají i v dalších případech, jako jsou ztráty vody netěsností uzávěrů nebo ztráty vody tvořením ledu

4.1.2 Aplikování vstupních nejistot metodou Monte Carlo

Pro generování nejistotou zatížených vstupních hydrologických a provozních parametrů je pro zavedení nejistoty všech vstupních veličin do výpočtů použito metody Monte Carlo, která je metodou stochastickou. Pro generování dat je třeba generátor pseudonáhodných čísel s konstantní hustotu pravděpodobnosti generovaných čísel, tzv. bílý šum.

Pro vytvoření algoritmu, který generuje náhodné řady se zatížením nejistot, jsou zavedeny následující předpoklady. Obecná vstupní hodnota X vzniklá z měření je považována za náhodnou (stochastickou) veličinu. Tento předpoklad umožňuje generovat nové hodnoty X_i okolo vstupní hodnoty X vzniklé z měření naprosto náhodně a nezávisle na sobě. Veličina X_i je tedy náhodnou a nezávislou na hodnotě X_{i-1} a X_{i+1}. Náhodné generované veličiny X_i jsou výsledkem většího počtu vzájemně nezávislých jevů, což umožňuje popsat vstupní hodnotu odpovídajícím normálním rozdělením pravděpodobnosti $N(\mu(X),\sigma(X))$. Zavedení normálního rozdělení pravděpodobnosti umožňuje zadávat v okolí výsledné hodnoty náhodné veličiny pomocí střední hodnoty $\mu(X)$ jako naměřená hodnota a směrodatné odchylky $\sigma(X)$ jako standardní nejistota. Při výpočtech je uvažováno pouze se standardní nejistotou měření typu B $u_{B,X}$. Na závěr je zavedeno zjednodušení, kdy je standardní nejistota měření $u_{B,X}$ zaváděna pomocí relativní hodnoty koeficientu variace $C_v(X)$, viz vztah (12) a výsledná směrodatná odchylka $\sigma(X)$ je následně dopočítána dle vztahu (11).

Podstatou generátoru náhodných řad je opakované použití metody Monte Carlo. Následně jsou ke každé střední hodnotě $\mu_t(X)$ vytvořeny distribuční křivky $F_t(X)$ normálního normovaného rozdělení pravděpodobnosti $N(\mu(X),\sigma(X))$ pro $t = 1, 2, \ldots, PP$, kde PP je celkový počet prvků (např. celkový počet průměrných měsíčních přítoků nebo celkový počet bodů čar zatopených objemů $V(h)$). Použitím generátoru, který generuje náhodná čísla z intervalu $\xi \in \langle 0,1 \rangle$, jsou opakovaně generovány náhodné průběhy řady prvků $X_{t,i}$, označovány jako náhodné polohy hodnot $NX_{t,i}$ v intervalu zadané nejistoty pro $i = 1, 2, \ldots, PO$, kde PO je celkový počet opakování (generování). Tento princip aplikace nejistot včetně vychází z (Starý, 1984) a následně z (Marton, 2011).

Pro případ, kdy se jedná o 2D souřadnicový systém, je odlišnost dána pouze sestrojením bodu, který vyžaduje sestavení dvou na sobě nezávislých Monte Carlo generátorů. Každý generátor sestrojí náhodnou polohu bodu, např. výšku vodní hladiny a hodnotu objemu vody v nádrži. Společně náhodné polohy dvou bodů pak vytvoří náhodnou souřadnici bodu čáry zatopených objemů.

4.2 SIMULAČNÍ MODELY NÁDRŽE

4.2.1 Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečenost 100 %

Pro tento typ úlohy platí, že se řešení provádí v jediné variantě jednorázovou simulací provozu nádrže. Počáteční podmínkou je plná nádrž v začátku testovaného období a okrajovou podmínkou je řada přítoků vody do nádrže v příslušném časovém kroku. V každém kroku je prováděna bilance mezi požadovaným odtokem O_{Pi} a přítokem vody do nádrže Q_i. Jestliže platí $O_{Pi} > Q_i$, nádrž se prázdní a jestliže $O_{Pi} < Q_i$, potom dochází k plnění nádrže.

Provedením simulace prázdnění nádrže v řešeném časovém období je nalezena maximální hodnota prázdnění nádrže za celé řešené období, která je považována za zásobní objem nádrže V_Z se zabezpečeností $P = 100$ %. To znamená, že v nádrži pro řešené období nevznikne nedodávka vody vyvolaná nedostatečným přítokem vody do nádrže, resp. málo vodným či suchým obdobím. Základem simulačního modelu nádrže je upravená základní rovnice nádrže v součtovém tvaru převedená do následující nerovnosti (3) (Starý, 2006a)

$$0 \leq \sum_{i=0}^{k-1} (O_i - Q_i)\Delta t + (O_k - Q_k)\Delta t \tag{3}$$

kde O_i je odtok vody z nádrže [m^3 s^{-1}] a Q_i je přítok vody do nádrže [m^3 s^{-1}] v daném měsíci pro $i = 1, \ldots, k$; Δt je časový krok výpočtu jeden měsíc. Nerovnost je z levé strany omezena hodnotou 0, která značí plný zásobní objem nádrže.

4.2.2 Stanovení zásobního prostoru nádrže pro zabezpečenost menší než 100 %

Tento typ úlohy nelze řešit přímo v jedné variantě. Pro stanovení optimálního zásobního objemu $V_Z = f(O_P, P)$ pro $P < 100$ %, který je funkcí požadovaného odtoku O_P a předem dané zabezpečenosti, která je menší než 100 %, slouží opakované výpočty stanovení zabezpečenosti $P = f(O_P, V_Z)$ pro předem daný požadovaný odtok O_P a zásobní objem V_Z.

Hledaným parametrem je tedy zásobní objem V_Z a kritériem je zabezpečenost nádrže, která je stanovena dle manipulačního řádu, ale nižší než 100 %. Pro každou volenou hodnotu parametru V_Z se řeší dílčí úloha $P = f(O_P, V_Z)$. Pro tento typ vodohospodářského řešení jsou povoleny poruchy vody z nádrže dle významnosti nádrže. Počáteční podmínkou je opět plná nádrž v začátku testovaného období a okrajovou podmínkou je řada přítoků vody do nádrže. V každém kroku je prováděna bilance mezi požadovaným odtokem O_P a přítokem vody do nádrže Q. Hlavním rozdílem oproti předchozí úloze je, že se navíc testuje omezující podmínka $\sum(O_p\text{-}Q)$, neboli zda nedojde na konci každého měsíce k vyprázdnění nádrže, resp. voleného objemu nádrže. Základem simulačního modelu dílčí úlohy $P = f(O_P, V_Z)$ je upravená rovnice nádrže v součtovém tvaru převedená do následující nerovnosti (4) (Starý, 2006a)

$$0 \leq \sum_{i=0}^{k-1} (O_i - Q_i)\Delta t + (O_k - Q_k)\Delta t \leq V_{z,max} \tag{4}$$

kde O_i je odtok vody z nádrže [m^3 s^{-1}] a Q_i je přítok vody do nádrže [m^3 s^{-1}] v daném měsíci pro $i = 1, \ldots, k$; $V_{Z,max}$ prázdný zásobní objem nádrže [m^3] a Δt je časový krok výpočtu jeden měsíc. Vypočtením hodnoty výrazu je získáno aktuální prázdnění zásobního objemu, které je následně testováno, zda leží v daném intervalu $\langle 0, V_{Z,max} \rangle$. Pokud ne, vznikne porucha vody v nádrži (Starý, 2006a).

V ČR se nejvíce používá zabezpečenost podle trvání P_T, která je udávána i v manipulačních řádech nádrží, kterou lze stanovit z hodnot $Z_{t,i}$ podle vztahu (5) a dle Čegodajeva, viz vztah (6) (Starý, 2005b)

$$Z_{t,i} = \begin{cases} Z_{t,i} = 1, & O_i > O_P \\ Z_{t,i} = 0, & O_i < O_P \end{cases} \tag{5}$$

kde $Z_{t,i} = 1$ popisuje stav V_z nádrže v bezporuchovém (vyhovujícím) a $Z_{t,i} = 0$ v poruchovém (nevyhovujícím) časovém kroku výpočtu

$$P_T = \frac{\left(\sum_{i=1}^{k} Z_{t,i}\right) - 0{,}3}{k + 0{,}4} \cdot 100, [\%] \tag{6}$$

kde $\sum_{i=1}^{k} Z_{t,i}$ je součet záznamů poruchových a bezporuchových měsíců a k je počet všech měsíců vstupní časové řady. Vstupní hodnotou pro řešení úlohy $V_Z = f(O_P, P)$ pro $P < 100$ % je výsledný zásobní objem pro zabezpečenost 100 %. Poté je volena hodnota parametru (zásobní objem) a opakovaně simulována nová varianta provozu nádrže dle nerovnice (4) a následně je vyhodnoceno sledované kritérium π (pokles zabezpečenosti) dle rovnic (5) a (6). Řešením je varianta, ve které se kritérium shoduje s požadovanou hodnotou. V této variantě se volený parametr stává výsledkem řešení. Úloha vede k optimalizaci, ve které je neznámou řešený parametr a kritériem je rozdíl mezi vypočtenou a požadovanou zabezpečeností, který se minimalizuje (Starý, 2006a).

4.2.3 Optimalizace

Pro hledání zásobního objemu nádrže pro pro $P < 100$ % byla použita jednoduchá optimalizační metoda tzv. jednotná mřížková metoda (klasický simulační model), kdy jsou na přípustných intervalech voleny parametry s pevným krokem. Řešených variant je pak konečný počet, který si lze předem určit. Výhodou mřížkové metody je to, že je systematicky prohledávaná celá oblast řešení, což umožňuje nalézt vždy globální extrém kriteriální funkce. Na druhou stranu je nevýhodou velký počet řešených variant. Přesnost závisí na velikosti kroku změn parametrů. Za účelem snížení času výpočtu se řešení může provádět nejprve s většími kroky a poté s menšími kroky parametrů.

4.2.4 Zavedení ztráty vody z nádrže do vodohospodářského řešení zásobního objemu

Model vodohospodářského řešení zásobního objemu nádrže do výpočtů zahrnuje mimo jiné i ztráty vody z nádrže, konkrétně ztráty vody výparem z vodní hladiny a průsakem tělesa hráze. Princip zavedení ztrát vody z nádrže je stejný jako v habilitační práci (Marton, 2018). Ztrátové průtoky jsou započítány pomocí opakované simulace, jinými slovy ve dvou krocích. Nejprve je proveden výpočet zásobního objemu nádrže při požadovaném odtoku bez uvažování ztrát vody z nádrže. Tím je nalezen maximální objem vody v nádrži, který je tvořen z objemu zásobního a objemu stálého nadržení, který následně vstupuje do druhého kroku řešení. Z maximálního objemu vody v nádrži z prvního kroku se stává počáteční objem pro stanovení počáteční zatopené plochy a výšky vodní hladiny v nádrži. Pomocí počáteční hladiny, zatopené plochy a velikosti měsíčního výparu v počátečním měsíci je dopočítána hodnota objemu odpařené vody v daném měsíci, která je následně převedena na ztrátový odtok. Dále je k výšce vodní hladiny zjednodušeně stanovena potenciální průsaková plocha tělesa hráze, která slouží ke stanovení ztrátového odtoku průsakem tělesa hráze. Výsledná hodnota ztrátového

odtoku vody z výparu vodní hladiny a průsaku tělesem hráze je následně odečtena od hodnoty přítoku vody do nádrže v počátečním měsíci řešení.

Takto upravená hodnota přítoku vody do nádrže, která je snížena o celkový ztrátový odtok, znovu ve druhém kroku vstupuje při daném O_P do opakovaného výpočtu simulace nádrže. Tím vzniká postupná bilance, kdy je do výpočtu po sobě zahrnuto snižování aktuální hladiny vody v nádrži v každém měsíci vlivem ztrát vody. Uvedený postup je postupně opakován pro všechny měsíce řešeného období.

4.2.5 Stanovení retenčního prostoru nádrže

V této práci se pro stanovení retenčního prostoru nádrže v podmínkách nejistot vycházelo z grafické Klemešovy metody (Klemeš, 1960) z důvodu jednoduchosti a rychlosti. Grafická metoda byla pro účely výpočtů disertační práce matematizována. Princip metody vychází z diferenciální rovnice nádrže, která vyjadřuje vztah mezi přítokem vody do nádrže Q jako funkcí času t, odtokem vody z nádrže O jako funkcí času t a objemem zadržené vody v nádrži V. Diferenciální rovnice nádrže je pak pro Klemešovu metodu upravena na následující tvar (7)

$$Q\Delta t - O\Delta t = \Delta V \tag{7}$$

Mimo jiné jsou zaváděna následující zjednodušení, přestože se hodnoty přítoku a odtoku v průběhu děje za časový interval Δt spojitě mění, považujeme je za konstantní. Křivky přítoku a odtoku metoda nahrazuje stupňovitými čarami. Samotná Klemešova metoda vstupuje do výpočtu až tehdy, kdy je překročen bezpečnostní přeliv. Pokud je voda pod úrovní bezpečnostního přelivu, tak výpočet pouze bilancuje objem přítoku a odtoku vody k předchozímu objemu nádrže.

Hlavními podklady pro Klemešovu metodu jsou hydrogram povodně, informace o spodních výpustích, bezpečnostním přelivu a čára zatopených objemů pro zkonstruování tzv. transformační křivky, která vyjadřuje celkový odtok vody z nádrže v závislosti na jejím plnění. Transformační křivka charakterizuje potenciální odtok vody z nádrže. Pro její určení je dle (Jandora a Šulc, 2006) kapacita spodních výpustí vypočtena podle rovnice (8) a kapacita bezpečnostního přelivu podle rovnice (9):

$$O_v = \mu\, S \sqrt{2\, g\, h_v} \tag{8}$$

$$Q_{BP} = m\, b \sqrt{2\, g}\, h_p^{3/2} \tag{9}$$

kde μ je součinitel odtoku [-], S plocha výtokového otvoru (spodních výpustí) [m^2], g tíhové zrychlení [m s^{-2}], h_v výška vody nad spodními výpustěmi [m], m součinitel přepadu [-], b šířka bezpečnostního přelivu [m] a h_p výška vody nad přelivem[m].

Pro transformaci je nutné zkonstruovat tzv. redukční úhel α, který vychází z velikosti průtoku a časového intervalu a charakterizuje úměrnost mezi vytvořenou plochou obklopenou přítokem a odtokem v daném Δt a délkou vodorovné úsečky transformační křivky daného Δt. Redukční úhel α se zkonstruuje tak, že je k libovolnému průtoku Q vynesenému na svislici přiřazena vodorovná osa o velikosti průtoku Q vynásobeném Δt. Spojením koncových bodů je získána směrnice přímky svírající redukční úhel α.

Grafická konstrukce Klemešovou metodou probíhá postupně v jednotlivých časových intervalech přes zmíněnou transformační křivku a redukční úhel α. Konkrétně při překročení bezpečnostního přelivu je vedena pro daný přítok vody do nádrže z nulové svislice transformační křivky směrnice přímky svírající redukční úhel α a je hledán

průsečík právě s transformační křivkou, který zároveň charakterizuje první hodnotu transformovaného odtoku vody z nádrže. V tomto průsečíku je vytvořena nová svislice pro další krok. Poté je dále postupováno pro každý přítok vody do nádrže v časovém intervalu ze svislice určené z předchozího kroku na transformační křivce vedením směrnice přímky svírající vždy redukční úhel α a hledáním průsečíku opět s transformační křivkou.

4.3 METODY PRO VYHODNOCENÍ

Vygenerované vstupní nejistoty na podkladech do výpočtu vodohospodářského řešení nádrže poskytují spektra velikostí zásobních a retenčních objemů obdobně jako spektra odtoků vody z nádrže. Pro vhodnou prezentaci dosažených výsledků jsou výpočty statisticky vyhodnoceny. Pro další zpracování a vyhodnocení výsledků byly ještě použity kvantily, čára pravděpodobnosti překročení a transformační efekt nádrže. Tato kapitola je zpracována podle (Starý, 2005a) a (Sadílek a kol, 2010).

4.3.1 Střední hodnota

Střední hodnota je hodnota prvního obecného momentu značena jako $\mu(X)$ a patří k tzv. charakteristikám polohy a její hodnota je x-ovou souřadnicí těžiště hustoty pravděpodobnosti. Metodou momentů je odhad střední hodnoty vyjádřen vztahem (10)

$$\mu(x) \approx \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{10}$$

kde $\bar{x}$ je výběrový průměr, x_i prvky náhodného výběru a n počet prvků náhod. výběru.

4.3.2 Rozptyl a směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka se vyjadřuje jako odmocnina z disperze $D(X)$ neboli rozptylu a taktéž vychází z druhého centrálního momentu. Značí se $\sigma(x)$ a metodou momentů je směrodatná odchylka vyjádřena vztahem (11)

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu(x))^2}{(n-1)}} \tag{11}$$

4.3.3 Koeficient variace

Koeficient variace vychází z druhého centrálního momentu a značí se $C_v(x)$. Vyjadřuje se jako podíl směrodatné odchylky a střední hodnoty, viz vztah (12)

$$C_v(x) = \frac{\sigma(x)}{\mu(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(k_i - \mu(x))^2}{(n-1)}}, \quad pro\ k_i = \frac{x_i}{\mu(x)} \tag{12}$$

4.3.4 Koeficient asymetrie

Koeficient asymetrie se značí $C_s(x)$ a je definován jako třetí centrální moment dělený třetí mocninou směrodatné odchylky. Momentovou metodou je popsán vztahem (13)

$$C_s(x) = \frac{M_3(x)}{\sigma(x)^3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(k_i - 1)^3}{(n-1)C_v(x)^3}}, \quad pro\ k_i = \frac{x_i}{\mu(x)} \tag{13}$$

4.3.5 Kvantil

Kvantil udává míru polohy rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Jinými slovy kvantily popisují body, ve kterých distribuční funkce náhodné proměnné prochází danou hodnotou. V případě spojitého rozdělení, které má distribuční funkci $F_X(x)$, je p-kvantil x_p taková hodnota náhodné veličiny X, pro niž platí, že výskyt hodnot menších než x_p nastane

pouze s pravděpodobností p, tj. pro niž je distribuční funkce $F_X(x_p)$ rovna pravděpodobnosti p (14)

$$P(X < x_p) = F_x(x_p) = p \tag{14}$$

4.3.6 Čára pravděpodobnosti překročení

Funkce pravděpodobnosti překročení neboli čára pravděpodobnosti překročení určuje, s jakou pravděpodobností bude náhodná veličina větší nebo rovna hodnotě A. Čára pravděpodobnosti překročení je funkce klesající a nabývá hodnoty od jedné do nuly. Z hustoty pravděpodobnosti integrací zprava je dána funkce pravděpodobnosti překročení a její tvar je uveden ve vztahu (15):

$$P(A) = P[x \geq A] = \int_b^A f(x)dx \tag{15}$$

4.3.7 Transformační efekt

Transformačním efektem nádrže neboli transformačním účinkem nádrže je myšlena procentuální změna maximálního transformovaného odtoku O_{maxTP} [m^3 s^{-1}] ke kulminaci povodňové vlny Q_{maxPV} [m^3 s^{-1}], jak je popsáno ve vztahu (16)

$$transformační\ efekt = 100 - \frac{Q_{maxTP}}{Q_{maxPV}} 100 \tag{16}$$

Kapitola METODIKA je v disertační práci zpracována mnohem podrobněji a použité metody, jako je princip zavedení vstupních nejistot metodou Monte Carlo, vodohospodářská řešení apod., jsou detailněji popsány a v mnoha případech doplněny názornými obrázky.

5 VYVÍJENÝ SOFTWARE

5.1 UNCE_RESERVOIR

Pro vodohospodářské řešení zásobního objemu s uvažováním ztrát vody z nádrže a nejistot parametrů vstupujících do řešení byl využíván software UNCE_RESERVOIR (Marton a kol., 2015d), který byl vytvořen na Ústavu vodního hospodářství krajiny VUT v Brně. Úloha programu vychází z řešení základní rovnice nádrže v součtovém tvaru, kdy je podstatou úlohy výpočet maximálního zásobního objemu nádrže při 100 % zabezpečenosti odtoku vody z nádrže a úloha, kdy je stanovena zabezpečenost podle trvání a množství nedodané vody pro známé hodnoty nalepšeného odtoku a zásobního objemu. Řešení uvažuje ztráty vody z nádrže, ale také nejistoty všech vstupujících parametrů do výpočtu. Software UNCE_RESERVOIR je napsán v programovacím jazyce FORTRAN.

Autorem disertační práce bylo vytvořeno uživatelské rozhraní v programu Delphi 7, které uživateli umožní jednoduše zadávat vstupy, nastavovat a provádět výpočty a přehledně zobrazovat výstupy. Dále byla autorem do softwaru nově naprogramována úloha na stanovení optimálního zásobního objemu nádrže $V_Z = f(O_P, P_T)$ pro $P_T < 100$ %. Tato úloha je zobrazena v horní části vývojového diagramu na Obr. 1. Optimalizace je v optimalizačním modelu provedena mřížkovou metodou.

Hlavní vstupy jsou přítoky, batygrafické křivky, výpar a průsak. Zbývajícími vstupy jsou po výběru typu úlohy hodnoty požadovaného odtoku, uvažování nejistot na vstupních

datech včetně zadání konkrétní velikosti nejistoty měření, volba ztrát vody z nádrže a zbývající informace o objemech vody v nádrži.

5.2 TRANSFORM_WAVE

Pro stanovení retenčního prostoru v podmínkách nejistot byl autorem disertační práce vytvořen software TRANSFORM_WAVE. Tento software transformuje povodňovou vlnu na principu modifikování grafické Klemešovy metody. Grafická Klemešova metoda byla zmatematizována v programovacím jazyce FORTRAN. Tato úloha je zobrazena v dolní části vývojového diagramu na Obr. 1.

Při výpočtu neboli transformaci povodňové vlny v čase lze provádět manipulace se spodními výpustěmi, a to i s plynulou manipulací k postupnému zavírání a otvírání spodních výpustí. Plynulá manipulace je na principu optimalizace mřížkovou metodou a slouží k optimálnímu přivírání spodních výpustí při překročení bezpečnostního přelivu na začátku povodně a po opadnutí povodně zase k postupnému otvírání za účelem lepší transformace. Software TRANSFORM_WAVE byl dále vybaven taktéž grafickým uživatelským rozhraním v programu Delphi 7.

Hlavní vstupy jsou povodňová vlna, batygrafické křivky, technické údaje vodního díla (specifikace spodních výpustí a nehrazeného přelivu) a výška hladiny po zásobní prostor, výška hladiny po bezpečnostní přeliv a výška maximálního dosahu povodně. Zbývajícími vstupy jsou možnosti manipulace se spodními výpustěmi, neškodný odtok, startovací výška hladiny vody v nádrži a časový krok výpočtu

5.3 PROPOJENÍ UNCE_RESERVOIR A TRANSFORM_WAVE

Pro komplexní stanovení zásobního a retenčního objemu nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat musí být oba prostory řešeny integrovaně, tedy propojením dvou výše popsaných softwarů UNCE_RESERVOIR a TRANSFORM_WAVE. Vývojový diagram komplexního řešení funkčních objemů nádrže je na Obr. 1. V disertační práci je textový a grafický postup pro práci s oběma softwary (vstupy, výpočet a výsledky).

Softwary byly testovány na vybraných nádržích spadajících do Povodí Moravy, s. p. Konkrétně na vodních dílech Vranov, Vír, Brno, Mostiště, Karolinka a Hubenov.

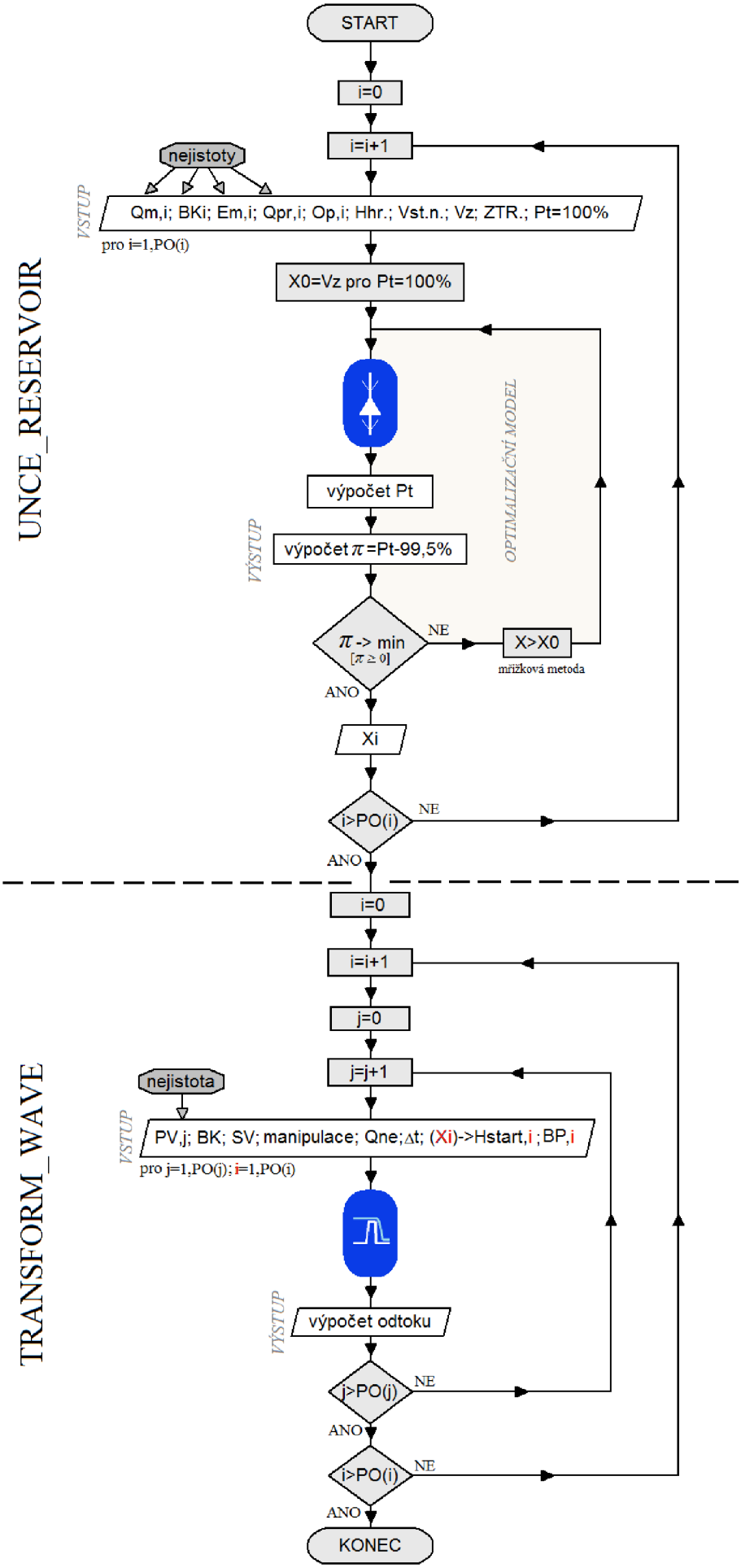
6 PRAKTICKÁ APLIKACE

ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY

Nejprve je nutné zmínit, že analýzy byly provedeny pouze na V_Z a V_R. Jinými slovy nebyly aplikovány nejistoty na mrtvém prostoru a ani na prostoru stálého nadržení.

V celé práci jsou velikosti nejistot vstupujících do řešení zadávány jako standardní nejistoty typu B značeny jako u_B a výsledky jsou prezentovány jako rozšířená standardní nejistota U přenásobena koeficientem $k = 2$, tedy s pravděpodobností pokrytí 95 %.

První úloha zásobního prostoru nádrže pro zabezpečenost 100 % má svým pojetím odhadnout potenciální nejistotu zásobního objemu nádrží. Zvoleným přístupem, kdy jsou výsledky vyhodnoceny pouze procentuálně, je možnost úlohu testovat na větším počtu vodních děl. Ovšem další úlohy z pohledu hlubší problematiky, složitosti řešení, a především z nárůstu rozsahu vyhodnocení a většího obsahu výsledků je úloha zásobního prostoru nádrže pro zabezpečenost menší než 100 % testována pouze na 2 nádržích, respektive na 1 nádrži pro řešení retenčního prostoru nádrže a komplexního řešení funkčních prostorů nádrže.



Obr. 1 *Vývojový diagram komplexního řešení funkčních objemů nádrže*

6.1 ZÁSOBNÍ PROSTOR NÁDRŽE PRO ZABEZPEČENOST 100 %

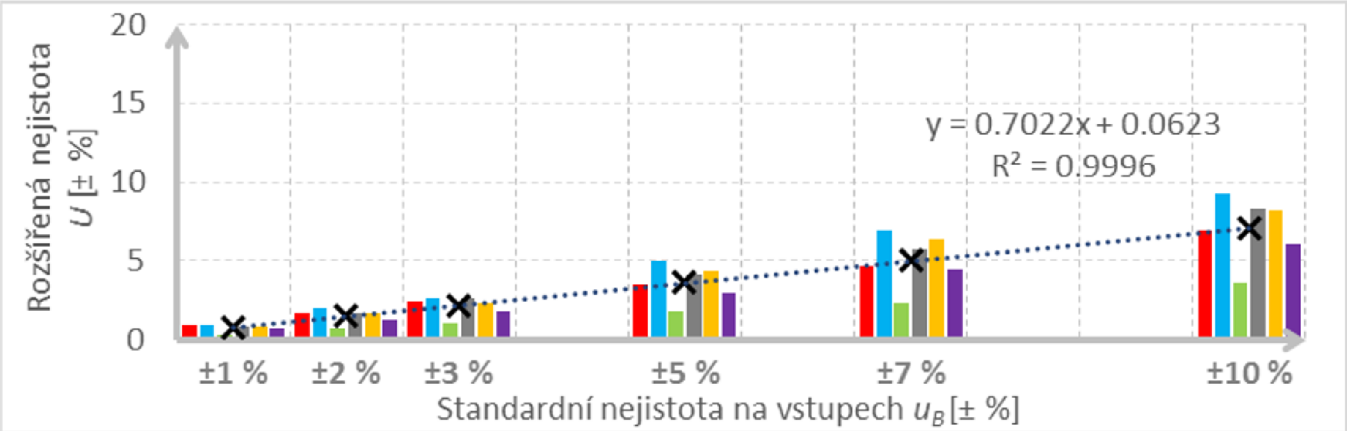
V této kapitole byly pomocí programu UNCE_RESERVOIR provedeny analýzy k odhadnutí potenciální nejistoty zásobního objemu nádrží pro 100 % zabezpečenost na všech 6 zmíněných profilech vodních děl.

Požadované odtoky pro dané profily byly za účelem sjednocení a souhrnného vyhodnocení zadávány podle součinitele nalepšení α [-]. Byly počítány varianty s požadovanými odtoky od $\alpha = 0{,}1\ Q_a$ s krokem 0,1 až po možnou kapacitu profilu neboli kapacitu batygrafických křivek. Z tohoto důvodu není v této kapitole pracováno s konkrétními velikostmi V_Z, ale pouze s procentuálními velikostmi koeficientu variace. Tyto procentuální velikosti jsou stanoveny podílem vypočtených rozšířených směrodatných odchylek zásobních objemů ku středním hodnotám zásobních objemů.

Velikosti výparů byly zjednodušeně zadávány ročním výparem a velikosti průsaku tělesem hráze podle manipulačního řádu. U chybějících profilů byly výpary zadávány podle nadmořské výšky hladiny středního plnění nádrže a průsaky odvozeny od podobných nádrží. Velikosti standardních vstupních nejistot na vstupních datech byly zadávány vždy konstantně o velikostech $u_B = \pm 1$, ±2, ±3, ±5, ±7 a ±10 %. Konkrétně na přítoku vody do nádrže, batygrafických křivkách, na výparu z vodní hladiny a průsaku tělesem hráze. Počet opakování byl vždy nastaven na 300.

Pro jednotlivé vstupní nejistoty u_B byly pozorovány vyšší rozšířené nejistoty u krajních součinitelů nalepšení. Dle očekávání a dosažených výsledků platí, že při vyšších uplatněných nejistotách u_B na vstupech rostou i výsledné rozšířené nejistoty zásobního objemu U. Tyto výsledky se vyskytovaly ve všech vyhodnocovaných profilech.

Vzhledem k nevyskytující se žádné závislosti napříč profily byly výsledky všech profilů zprůměrovány, což je pro paušální odhad velikosti potenciální nejistoty zásobního objemu vhodná volba. Pro zprůměrovaný průběh rozšířených nejistot U ze všech profilů pozorujeme téměř lineární závislosti mezi nárůstem rozšířených nejistot U a standardních vstupních nejistot u_B pro všechny vyhodnocené α. Na Obr. 2 je ukázka pro α =0,4.



Obr. 2 *Výsledky rozšířených nejistot zásobního objemu U [± %] pro vstupní nejistoty u_B [± %] a α = 0,4 [%] všech vyhodnocovaných profilů včetně průměrné hodnoty*

Odchylka mezi zásobním objemem řešeným deterministicky a průměrem středních hodnot zásobních objemů řešených stochasticky dosahovala hodnot pro všechny profily testovaných VD od -0,40 % do +1,90 %. Celkový průměr těchto odchylek pro všechny profily byl cca +0,24 %. Získané výsledky stochastických zásobních objemů tedy dosahují o něco vyšších čísel než při deterministickém řešení. Takto malý rozdíl je ovšem téměř zanedbatelný, což potvrzuje správnost generátoru náhodných čísel a použité metody

Monte Carlo. Naopak byl výrazný rozdíl ve výsledcích zásobních objemů mezi řešením bez ztrát a se ztrátami. Při uvažování ztrát vody z nádrže byl nárůst zásobního objemu v rozmezí od 2 do 15 %.

6.2 ZÁSOBNÍ PROSTOR NÁDRŽE PRO ZABEZPEČENOST MENŠÍ NEŽ 100 %

V této kapitole byly pomocí programu UNCE_RESERVOIR provedeny analýzy ke stanovení zásobního objemu nádrže pro zabezpečenost menší než 100 % v podmínkách nejistot na 2 vybraných profilech, a to na VD Vír 1 a VD Vranov.

Velikosti výparů byly zadávány ročním výparem podle manipulačních řádů, konkrétně pro VD Vír 613 mm a VD Vranov 650 mm. Velikosti průsaku tělesem hráze byly odvozeny od podobných nádrží, konkrétně 0,15 $l\,s^{-1}$ na 1 000 m^2. Velikosti u_B byly zadávány konstantně o velikostech u_B = ±1, ±2, ±3, ±5 a ±7 % a rozdílně, označeno jako dle očekávání. Konkrétně jsou v tomto případě voleny u_B na přítoku ±3 %, batygrafických křivkách ±5 %, na výparu ±4 % a průsaku tělesem hráze ±3 % pro oba zvolené profily. Počet opakování byl nastaven na 300 opakování. Výsledkem, který nás v této analýze zajímá, je výsledný V_Z deterministického řešení a optimalizované střední hodnoty se směrodatnými odchylkami pro statistické řešení včetně zabezpečenosti podle trvání P_T.

Nejprve bylo nutné pro P_T najít vyhovující odběry (požadované odtoky) pro aktualizované řady přítoků. Zabezpečenost P_T je pro oba profily 99,5 %, protože dle významnosti nádrže klasifikovaných v (ČSN 75 2405, 2017) spadají do kategorie A. Dle manipulačního řádu nádrže Vír I je pro tuto P_T požadovaný odtok O_P = 2,5 $m^3\,s^{-1}$ a pro nádrž Vranov je situace obtížnější, protože je nádrž řízena podle regulačních stupňů, a navíc je požadovaný odtok O_P odlišný pro jednotlivé měsíce.

Použitím aktuální řady přítoků vody a požadovaného odtoku O_P byla u obou nádrží P_T výrazně pod hranicí 99,5 %. Z tohoto důvodu byl O_P postupně snižován, abychom zabezpečili požadovanou P_T na zmiňovaných 99,5 %. Výsledný optimalizovaný V_Z by se měl blížit skutečnému objemu nádrže. Na základě optimalizovaného V_Z se skutečným V_Z byl ještě O_P měněn. Stanovení O_P bylo provedeno deterministicky a bez u_B včetně ztrát.

V Tab. 1 a 2 jsou vypočtené střední hodnoty optimalizovaných zásobních objemů včetně směrodatných odchylek. Dále jsou tyto výsledky vyhodnoceny formou přičtení horní meze koeficientem rozšíření k = 2. V posledním řádku je ještě uveden 95 % kvantil optimalizovaného zásobního objemu nádrže Vír I.

Tab. 1 *Výsledky analýzy optimálních zásobních objemů V_Z nádrže Vír I*

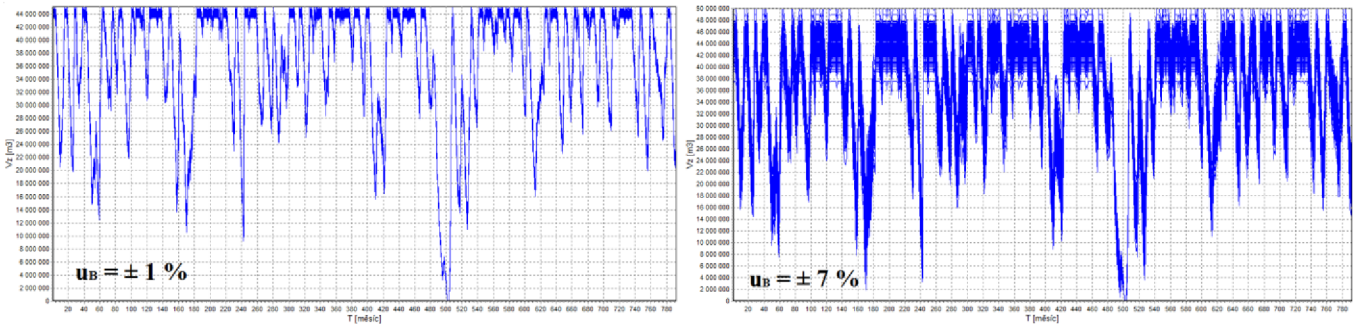
[m³]	u_B = ± 0 %	u_B = ± 1 %	u_B = ± 2 %	u_B = ± 3 %	u_B = ± 5 %	u_B = ± 7 %	u_B očekávaná
μ (Vz)	44 069 000	44 098 652	44 121 960	44 154 544	44 010 168	44 078 572	44 148 504
± 2σ (Vz)	±0	±545 346	±1 137 567	±1 627 581	±2 574 596	±3 958 923	±1 621 724
$Vz^{horní\ 2\sigma\ (Vz)}$	**44 069 000**	**44 643 998**	**45 259 527**	**45 782 125**	**46 584 764**	**48 037 495**	**45 770 228**
95% kvantil Vz	**44 069 000**	**44 673 900**	**45 114 800**	**45 496 700**	**46 569 400**	**47 560 700**	**45 628 200**

Tab. 2 *Výsledky analýzy optimálních zásobních objemů V_Z nádrže Vranov*

[m³]	u_B = ± 0 %	u_B = ± 1 %	u_B = ± 2 %	u_B = ± 3 %	u_B = ± 5 %	u_B = ± 7 %	u_B očekávaná
μ (Vz)	79 783 744	76 935 488	77 206 264	76 725 512	77 816 296	78 125 344	76 839 928
± 2σ (Vz)	±0	±6 188 641	±6 443 697	±7 012 693	±8 474 134	±10 482 423	±7 069 587
$Vz^{horní\ 2\sigma\ (Vz)}$	**79 783 744**	**83 124 129**	**83 649 961**	**83 738 205**	**86 290 430**	**88 607 767**	**83 909 515**
95% kvantil Vz	**79 783 744**	**80 546 688**	**81 381 168**	**81 989 744**	**85 219 168**	**87 685 168**	**82 411 744**

Na stranu bezpečnou je žádoucí při stochastickém řešení uvažovat s výsledným horním intervalem, tedy s vyšším zásobním objemem. Relativně bezpečná, a tedy doporučená výsledná hodnota zásobního objemu je pro nádrž Vír I 45,770 mil. m^3 a nádrž Vranov 83,910 mil. m^3. Na základě aktualizované vstupní řady přítoků vody do nádrže a zavedení vstupních nejistot včetně uvažování ztrát vody z nádrže je tedy doporučeno navýšení stávajícího zásobního objemu nádrže Vír I o téměř 3,9 %, přesně o 1,714 mil. m^3 a nádrže Vranov o více jak 5,3 %, konkrétně o 4,239 mil. m^3.

Na Obr. 3 jsou pro ukázku znázorněny průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu V_Z nádrže Vír I pro celou řadu přítoků vody do nádrže a pro $u_B = \pm 1$ a ± 7 %. Na průbězích lze pěkně vidět nárůst rozptylu možných řešení s rostoucí u_B.



Obr. 3 *Průběhy plnění a prázdnění optimalizovaného zásobního objemu V_Z nádrže Vír I pro $u_B = \pm 1$ a ± 7 %*

6.3 RETENČNÍ PROSTOR NÁDRŽE

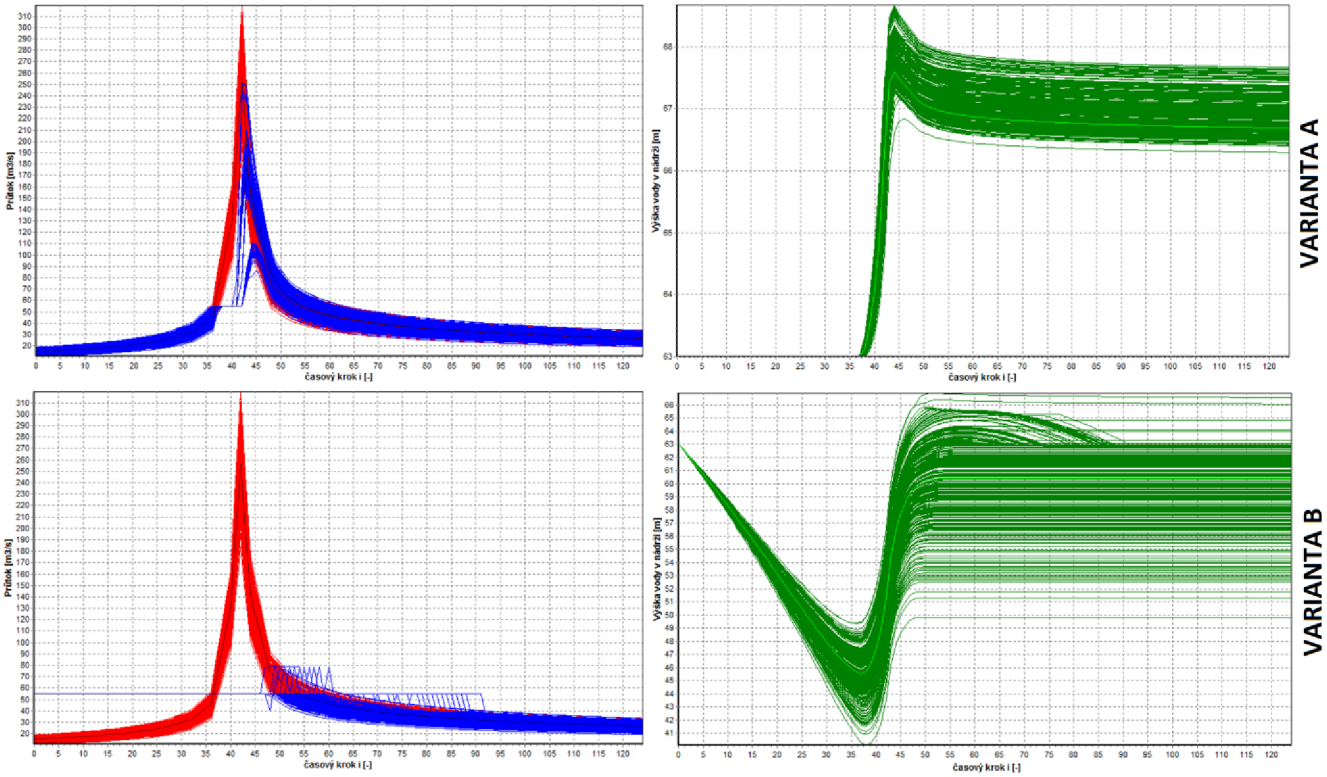
V této kapitole je pomocí programu TRANSFOM_WAVE provedena analýza ke stanovení retenčního objemu nádrže Vír I pomocí transformace povodňových vln.

V této úloze byly aplikovány standardní vstupní nejistoty pouze na přítoku vody do nádrže neboli na povodňových vlnách o velikostech $u_B = \pm 5, \pm 10, \pm 15$ %. Počet opakování byl stejně jako u zásobního objemu nádrže vždy nastaven na 300 opakování. Výsledky, které jsou u této aplikace zajímavé, jsou střední hodnoty a směrodatné odchylky kulminací transformovaných povodní a dosažených kulminačních výšek vody v nádrži.

Pro výpočet byly použity aktualizované povodňové vlny poskytnuté ČHMÚ z roku 2008. Pro testování byly použity konkrétně povodňové vlny Q_{100}, $Q_{1.000}$ a $Q_{10.000}$ dle klasické regrese bez rozlišení sezonality s časovým krokem 360 min. Další doplňující informace pro výpočet jsou následující: i) určení tzv. kontrolní max. hladiny KMH v nádrži dle (ČSN 75 2935, 2014) a (Manipulační řád VD Vír I, 2011). Tato KMH je na úrovni koruny hráze, tedy 470,45 m n. m. ii) Startovací hladina byla na úrovni max. V_Z, tedy 464,45 m n. m. iii) Při max. hladině je průtok spodními výpustěmi 2 x 40 $m^3 s^{-1}$. iiii) Bezpečnostní přeliv na kótě 467,05 je konstrukce korunové nehrazené o celkové délce 60,5 m (5 x 12,1 m). Na základě uvedených informací a rovnic (8) a (9) byl stanoven výtokový součinitel spodních výpustí neboli součinitel odtoku μ a součinitel přepadu m.

Byly provedeny 2 varianty řízení nádrže při povodni. Varianta A bez předpouštění nádrže a varianta B s předpouštěním nádrže. Ve variantě A je držena hladina na úrovni plného V_Z, jakmile je tato úroveň hladiny překročena, spodní výpusti jsou otevřeny na neškodný odtok Q_{NE}. Při překročení bezpečnostního přelivu jsou spodní výpusti plynule zavírány a po opadnutí povodně plynule otvírány do výšky vody 0,5 m nad bezpečnostní přeliv. Naopak při variantě B je povoleno předpouštění spodními výpustěmi, které jsou otevřeny na Q_{NE} a voda může klesat i pod úroveň V_Z. Spodní výpusti jsou plynule zavírány

až při překročení bezpečnostního přelivu do výšky vody 0,5 m nad přeliv a po opadnutí povodně jsou opět spodní výpustě v tomto rozmezí plynule otvírány. Na Obr. 4 je vykreslena ukázka průběhů transformací (modře) a výšek vody v nádrži (zeleně) pro varianty řízení A a B pro 300 vygenerovaných povodňových vln $Q_{1.000}$ (červeně).



Obr. 4 *Výsledky průběhu transformací a průběhu výšek vody v nádrži vygenerovaných 300 povodňových vln $Q_{1.000}$ zatížených vstupní nejistotou uB = ± 10 % pro obě varianty řízení nádrže*

Z Obr. 4 můžeme vidět výrazný rozdíl ve výsledcích podle manipulace se spodními výpustěmi. Opět byl pozorovatelný větší rozptyl výsledků s rostoucí nejistotou ve všech případech. Výsledky provedené analýzy jsou vyhodnoceny v Tab. 3 a v Tab. 4.

Tab. 3 *Výsledky středních hodnot a směrodatných odchylek kulminací průtoků [$m^3 s^{-1}$]*

Q_{kulm} [m^3s^{-1}]			VARIANTA A bez předpouštění			VARIANTA B s předpouštěním		
Q_N	determin.	u_B = ± 5 %	u_B = ± 10 %	u_B = ± 15 %	determin.	u_B = ± 5 %	u_B = ± 10 %	u_B = ± 15 %
Q_{100}	**65.264**	**75.429 ± 12.027**	**76.789 ± 18.038**	**76.898 ± 25.841**	55.000	55.000 ± 0.000	55.000 ± 0.000	55.000 ± 0.000
$Q_{1.000}$	**177.671**	**176.671 ± 22.659**	**172.111 ± 62.536**	**168.576 ± 94.067**	55.000	55.000 ± 0.000	**56.268 ± 10.708**	**58.801 ± 20.877**
$Q_{10.000}$	**294.301**	**303.285 ± 51.456**	**303.158 ± 84.726**	**305.981 ± 113.346**	**155.216**	**149.930 ± 51.127**	**149.946 ± 98.589**	**153.803 ± 146.913**

Tab. 4 *Výsledky středních hodnot a směrodatných odchylek kulminací výšek vody v nádrži [m]*

H_{kulm} [m^3s^{-1}]			VARIANTA A bez předpouštění			VARIANTA B s předpouštěním		
Q_N	determin.	u_B = ± 5 %	u_B = ± 10 %	u_B = ± 15 %	determin.	u_B = ± 5 %	u_B = ± 10 %	u_B = ± 15 %
Q_{100}	66.816	66.426 **± 0.938**	66.312 **± 1.197**	66.234 **± 1.625**	63.000	63.000 ± 0.000	63.000 ± 0.000	63.000 ± 0.000
$Q_{1.000}$	**67.601**	**67.725 ± 0.401**	**67.802 ± 0.641**	**67.808 ± 0.891**	63.000	63.030 ± 0.309	63.308 ± 1.504	63.625 ± 2.344
$Q_{10.000}$	**68.687**	**68.263 ± 0.533**	**68.256 ± 0.567**	**68.256 ± 0.677**	**67.644**	**67.843 ± 1.135**	**67.693 ± 2.111**	**67.478 ± 3.360**

V Tab. 3 a Tab. 4 můžeme vidět výsledky kulminací testovaných povodní, resp. výsledky kulminací výšek vody v nádrži s různými vstupními nejistotami a dvěma variantami řízení. Tučně jsou zobrazeny výsledky, kde je překročen neškodný odtok Q_{NE}, resp. překročen stávající retenční prostor nádrže V_R. Z výsledků je patrné, že pro variantu A je vždy překročen Q_{NE} a ve variantě B není překročen Q_{NE} pouze pro stoletou povodeň a pro tisíciletou povodeň bez u_B a s nejnižší testovanou nejistotou $u_B = \pm 5$ %. Na stávající V_R vyhoví pouze Q_{100} ve variantě A bez vstupních nejistot a ve variantě B pro Q_{100} a $Q_{1.000}$ včetně nejistot. Naopak při porovnání výsledků na KMH, nevyhoví pouze ve variantě B pro $Q_{10.000}$ při vstupní nejistotě $u_B = \pm 10$ % a ± 15 %, v těchto případech by nastalo přelití samotné hráze. Tyto výsledky jsou v Tab. 4 zvýrazněny tučně a podtrženě.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že při povodních $Q_{10.000}$ ve variantě B vzniká větší riziko přelití nádrže než ve variantě A. To je způsobeno tím, že při kulminacích generovaných povodňových vln je výška vody v nádrži v této variantě výrazně níže, než ve variantě A. To znamená, že při této nižší výšce vody v nádrži při kulminaci povodně je pak rychlejší nárůst vody v nádrži, což je způsobeno čárou zatopených objemů.

Pokud bychom chtěli navrhnout V_R nádrže např. na $Q_{1.000}$ s $u_B = \pm 10$ % a variantu A bez zásahu do velikosti stávajícího V_Z, pak by podle Tab. 4 byl V_R na úrovni 67,80 ± 0,64 m. Na stranu bezpečnou je žádoucí přiklonit se na horní mez intervalu, tedy na 68,44 m. Tato hodnota by odpovídala novému celkovému V_R cca 11,842 mil. m^3, tedy navýšení o 3,505 mil. m^3 neboli o 42 %. Pokud bychom uvažovali s variantou B pro $Q_{1.000}$, pak by byl stávající V_R dostačující pro všechny testované u_B.

6.4 KOMPLEXNÍ ŘEŠENÍ FUNKČNÍCH PROSTORŮ NÁDRŽE

V této kapitole je nutné vypočítat optimalizovaný zásobní objem nádrže V_Z pomocí UNCE_RESERVOIR a následně stanovit retenční objem nádrže V_R přes transformace povodňových vln pomocí TRANSFOM_WAVE. Pro aplikaci byl zvolen profil VD Vír I, protože u tohoto profilu byly provedeny izolovaně výpočty V_Z a V_R.

Výsledky optimálních V_{Zoptim} byly použity z kapitoly 6.2, konkrétně pro řešení s očekávanými vstupními nejistotami. V_{Zoptim} byl optimalizován pro O_P = 2,305 m^3 s^{-1} a $P_T \geq 99{,}5$ %, kdy na základě výpočtů byla doporučena relativně bezpečná hodnota V_{Zoptim}, která odpovídá 45,770 mil. m^3.

Za účelem zjištění, jak může navýšení V_Z ovlivnit transformaci povodňové vlny a změnu V_R, bude uvažováno s více variantami návrhu V_Z. Teoreticky UNCE_RESERVOIR umožňuje podle počtu nastavených opakování uložit všechny V_{Zoptim} a poté ke každému z nich pomocí TRANSFORM_WAVE vypočítat V_R pro libovolný počet opakování. Za účelem zjednodušení a zkrácení doby výpočtu bylo pro komplexní řešení funkčních objemů vybráno jen několik V_{Zoptim} z 300 řešení s očekávanými vstupními nejistotami u_B. Konkrétně byly vybrány výsledné optimální V_{Zoptim} 75 %, 80 %, 85 %, 90 % a 95 % kvantilů a zmíněná horní mez výsledné rozšířené nejistoty $+2\sigma$. V důsledku nárůstu V_{Zoptim} dochází k poklesu retenčního prostoru ovladatelného V_{RO}.

Z důvodu navýšení V_Z a vlivu na V_{RO} byly provedeny transformace nejistých povodňových vln $Q_{1.000}$ s $u_B = \pm 10$ %. Byla zvolena varianta A bez předpouštění nádrže a počet generování povodňové vlny byl zvolen 300 opakování. Startovací hladina vody v nádrži na začátku řešení transformace povodňové vlny byla vždy na plném V_{Zoptim}.

Z porovnání výsledků se stejnou manipulací totožné povodňové vlny pro stejnou vstupní nejistotu $u_B = \pm 10$ % při startovací výšce 63 m ze stávajícího V_Z je patrný mírný

pokles kulminací výšek vody v nádrži. Tento pokles je potvrzen i v Tab. 5, konkrétně ve sloupci výška h_{RN} neboli výška retenčního prostoru neovladatelného, resp. dosažené kulminace výšky vody v nádrži během transformací povodňových vln.

Tab. 5 *Ukázka výsledných objemů vody v nádrži a jejich odpovídající výška vody v nádrži pro vybrané optimální V_Z [m³] včetně velikostí kulminací transformovaných povodňových vln $Q_{1.000}$*

	výška h_{Vz}	V_{Zoptim}	výška h_{RO}	V_{RO}	výška h_{RN}	V_{RN}	V_R	V_{celk}	Q_{kulm} (PV $Q_{1.000}$)	výška po KMH
	[m]	[m³]	[m]	[m³]	[m]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³s⁻¹]	[m]
souč. stav	63.00	44 056 000	65.60	5 286 000	67.00	3 051 000	8 337 000	56 193 000	-	2.00
pro souč. stav	63.00	44 056 000	65.60	5 286 000	67.80 ± 0.64	5 002 000 + 1 554 000	10 288 000 **11 842 000**	58 144 000 **59 698 000**	172.11 ± 62.54	1.20 **0.56**
75% kvantil *Vz*	63.32	44 682 300	65.60	4 659 700	67.80 ± 0.61	4 999 000 + 1 499 000	9 658 700 **11 157 700**	58 141 000 **59 640 000**	177.91 ± 61.36	1.20 **0.58**
85% kvantil *Vz*	63.47	44 984 800	65.60	4 357 200	67.78 ± 0.60	4 950 000 + 1 458 000	9 307 200 **10 765 200**	58 092 000 **59 550 000**	181.12 ± 61.54	1.22 **0.62**
95% kvantil *Vz*	63.79	45 628 200	65.60	3 713 800	67.70 ± 0.51	4 755 000 + 1 239 000	8 468 800 **9 707 800**	57 897 000 **59 136 000**	188.41 ± 60.41	1.30 **0.79**
horní mez *Vz*(+2σ)	63.90	45 770 228	65.60	3 571 772	67.67 ± 0.49	4 676 000 + 1 181 000	8 247 772 **9 428 772**	57 818 000 **58 999 000**	190.87 ± 59.59	1.33 **0.85**

V Tab. 5 vidíme výšku hladiny h_{Vz} a optimální zásobní objem V_{Zoptim}. Dále výšku h_{RO} a objem V_{RO} retenčního prostoru ovladatelného, výšku h_{RN} včetně rozšířené nejistoty ± 2σ a objem V_{RN} včetně horní meze rozšířené nejistoty + 2σ retenčního prostoru neovladatelného. Dále celkový objem retenčního prostoru $V_{R.}$ včetně horní meze rozšířené nejistoty + 2σ (tučně) a stejně tak celkový objem nádrže $V_{celk.}$ Nakonec jsou zobrazeny hodnoty kulminací povodní $Q_{1.000}$ včetně rozšířené nejistoty ± 2σ (tučně) a výška mezi retenčním prostorem neovladatelným (maximální výška vody v nádrži) a KMH (výška hráze) včetně horní meze rozšířené nejistoty + 2σ (tučně).

Výsledky ukazují, že s vyšším V_{Zoptim} při neměnící se výšce bezpečnostního přelivu (hladina h_{RO}) klesá retenční prostor ovladatelný V_{RO} a zároveň klesá i výška retenčního prostoru neovladatelného h_{RN} včetně rozšířené nejistoty spolu s V_{RN} včetně horní meze rozšířené nejistoty. S tím roste i velikost mezi h_{RN} a KMH, což je žádanější. Na druhou stranu i přes to, že hodnoty objemů a výšek klesají, tak jsou výrazněji vyšší (u rozdílu mezi h_{RN} a KMH menší), než jsou skutečné hodnoty stávající nádrže Vír I.

Výše popsané je způsobeno tím, že pro danou vyšší hodnotu V_Z (startovací hladinu) odpovídá větší objem z čáry zatopených objemů, a tudíž je v počátečním kroku povodně a následujících krocích zachyceno více vody, než při startovací výšce 63 m. V důsledku toho je tedy výsledný $V_{R.}$pro transformaci povodně a výsledný $V_{celk.}$funkčních prostorů nádrže Vír I menší, než při transformaci uvažované povodňové vlny včetně nejistot ze skutečného V_Z. Tím se nabízí návrh pro nejbezpečnější řešení, co se týče optimálního V_Z, tedy buď 95 % kvantil V_Z nebo horní mez V_Z(+2σ). Nesmíme ale zapomenout, že při této volbě roste kulminační průtok Q_{kulm} transformované povodňové vlny. Např. pro transformaci ze současného stavu je Q_{kulm} horní meze rozš. nejistoty (+2σ) 234,65 m³ s⁻¹ a pro transformaci z 95 % kvantilu V_Z je Q_{kulm} = 248,82 m³ s⁻¹, což může být při budoucím návrhu funkčních prostorů nádrže jeden z klíčových parametrů. Dalším klíčovým parametrem při změně funkčních objemů nádrže může být velikost mezi h_{RN} a KMH.

7 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

7.1 ZÁSOBNÍ PROSTOR NÁDRŽE PRO ZABEZPEČENOST 100 %

V Tab. 6 je vyjádřena pomocí násobku standardní vstupní nejistoty u_B k výsledným rozšířeným nejistotám zásobních objemů U_{Vz} všech profilů

Tab. 6 *Výsledný násobek u_B k výsledným rozšířeným nejistotám zás. objemů U_{Vz} všech profilů*

α [-]	u_B = ±1 %	u_B = ±2 %	u_B = ±3 %	u_B = ±5 %	u_B = ±7 %	u_B = ±10 %
0.3	**0.89**	0.86	0.88	0.84	0.82	0.82
0.4	**0.74**	0.74	0.71	0.72	0.72	0.70
0.5	**1.09**	0.99	1.01	1.03	1.07	0.99
0.6	**1.50**	1.45	1.42	1.35	1.38	1.30

V Tab. 6 můžeme vidět, že s rostoucí u_B má tendenci výsledný násobek klesat, jinými slovy poměr mezi u_B a U_{Vz} je menší. Dále je zřejmý nárůst násobku s rostoucím koeficientem α. Při návrhu V_Z je žádoucí uvažovat se vstupními nejistotami. Výsledek V_Z pak o tyto nejistoty navýšit. Na základě popsané analýzy je doporučeno uvažovat alespoň s výslednou průměrnou hodnotou rozšířené nejistoty U_{Vz}, v lepším případě s maximální hodnotou této nejistoty. Návrh by ale mohl být v některých případech zbytečně předimenzovaný. Z Tab. 6 plynou doporučené hodnoty všech průměrných výsledných rozšířených nejistot U. Konkrétně hodnoty, které byly dosaženy při u_B = ± 1 %. (tučně). Je ale na místě u konkrétního nového návrhu V_Z uvažovat s co nejpravděpodobnějšími velikostmi u_B jednotlivých vstupů a pomocí softwaru provézt konkrétní výpočty a analýzy.

7.2 ZÁSOBNÍ PROSTOR NÁDRŽE PRO ZABEZPEČENOST MENŠÍ NEŽ 100 %

Z provedené analýzy pro nádrž Vír I dosahují výsledné střední hodnoty V_Z pro testované nejistoty velmi blízkých výsledků stávajícího V_Z. Naopak pro nádrž Vranov jsou v tomto případě výsledné V_Z relativně rozkolísané a odlišné od stávajícího V_Z. Z výsledků je zřejmé, že každá nádrž reaguje jinak na u_B. Mezi jednotlivými nádržemi je patrný rozdíl ve velikostech výsledných hodnot. Dále pak u nádrže Vír I mají výsledky v podobě $\pm 2\sigma(V_Z)$ plynulý nárůst v závislosti na u_B. Naopak u nádrže Vranov při nižších u_B je výsledná směrodatná odchylka velmi podobná a plynulý nárůst je zaznamenán až od vstupní nejistoty u_B = ± 3 %. Tyto závěry opět potvrzují, že se každá nádrž v podmínkách nejistot chová odlišně, a tudíž konkrétní dosažené výsledky nelze zobecňovat.

7.3 RETENČNÍ PROSTOR NÁDRŽE

Pro testovanou nádrž Vír I bylo doporučeno konkrétní navýšení stávajícího V_R, který by se vypořádal s aktualizovanou povodňovou vlnou $Q_{1.000}$ bez předpouštění včetně vstupní nejistoty vznikající při odvození povodňové vlny. Na této nádrži by hladina ochranného prostoru teoreticky šla navýšit aktualizací manipulačního řádu nádrže, ale na úkor nedodržení doporučené hodnoty mezi hladinou retenčního prostoru neovladatelného a KMH, která je u takovýchto typů nádrží většinou doporučena 2 m. Při navrhovaném navýšení V_R směrem k hrázi by poté byla tato hodnota pouze 0,56 m. Ovšem na jiných typech hrází, jako jsou třeba sypané, by mohl vznikat ještě větší problém s navyšováním hladiny ke koruně hráze. Proto by měl tento problém být zároveň řešen i variantou zkapacitnění spodních výpustí a bezpečnostního přelivu, případně zásahem do V_Z, což je hlavně v dnešní době, kdy zaznamenáváme poklesy hladin v nádržích, nejméně vhodné.

Dále byl vyhodnocen transformační efekt nádrže včetně u_B. Při vyhodnocení byla brána horší varianta max. transformovaného odtoku, tedy přičtení rozšířené nejistoty k výsledné kulminaci. Celkově bylo dosaženo lepších transformací ve variantě B, ale jak bylo již řečeno, tak pro $Q_{10.000}$ a variantu B vzniká větší riziko přelití nádrže. Z toho plyne, že v tomto případě nelze obecně doporučit předpouštění nádrže pro lepší transformační účinek. Jednak může při nízké povodňové vlně dojít ke zbytečnému upuštění nádrže, ale naopak při extrémní povodňové vlně může být riziko přelití nádrže vyšší než bez předpouštění. Předpouštění nádrže ale lze doporučit v případech spolehlivých operativních předpovědí povodňových situací.

7.4 KOMPLEXNÍ ŘEŠENÍ FUNKČNÍCH PROSTORŮ NÁDRŽE

Část kompletních výsledků kulminací výšek vody v nádrži s možnými funkčními prostory jsou shrnuty v Tab. 7, ve které jsou škálou barev zvýrazněny dosažené výsledky. Červená barva odpovídá nejméně vhodnému výsledku. Z Tab. 7 tedy plyne, že nejvhodnější volba řešení je ve spodní části tabulky. Tedy výrazné navýšení V_Z na úkor velikosti kulminace povodně, protože je větší výška mezi h_{RN} a KMH. U velkých povodní, což $Q_{1.000}$ bezpochyby je, se musí brát především ohled na bezpečnost samotné hráze.

Tab. 7 *Ukázka výsledných objemů vody v nádrži a jejich odpovídající výška vody v nádrži pro vybrané optimální hodnoty V_Z [m^3] včetně velikostí kulminací transformovaných povodňových vln*

	h. mez Q_{kulm} (+2σ) ($Q_{1.000}$)	výška h_{Vz}	V_{Zoptim}	výška h_{RO}	V_{RO}		výška h_{RN}	V_{RN}	V_R	V_{celk}	výška po KMH
	[m^{3}s^{-1}]	[m]	[m^3]	[m]	[m^3]		[m]	[m^3]	[m^3]	[m^3]	[m]
pro souč. stav	234.65	63.00	44 056 000	65.60	5 286 000	75% kv.	68.02	5 533 000	10 819 000	58 675 000	0.98
						85% kv.	68.15	5 857 000	11 143 000	58 999 000	0.85
						95% kv.	68.43	6 532 000	11 818 000	59 674 000	0.57
						mez(+2σ)	68.44	6 556 000	11 842 000	59 698 000	0.56
75% kvan. Vz	239.27	63.32	44 682 300	65.60	4 659 700	75% kv.	68.04	5 582 000	4 659 768	58 724 000	0.96
						85% kv.	68.17	5 898 000	4 659 768	59 040 000	0.83
						95% kv.	68.36	6 362 000	4 659 768	59 504 000	0.64
						mez(+2σ)	68.42	6 498 000	11 157 700	59 640 000	0.58
85% kvan. Vz	242.66	63.47	44 984 800	65.60	4 357 200	75% kv.	68.02	5 533 000	9 890 200	58 675 000	0.98
						85% kv.	68.16	5 874 000	10 231 200	59 016 000	0.84
						95% kv.	68.30	6 215 000	10 572 200	59 357 000	0.70
						mez(+2σ)	68.38	6 408 000	10 765 200	59 550 000	0.62
95% kvan. Vz	248.82	63.79	45 628 200	65.60	3 713 800	75% kv.	67.90	5 241 000	8 954 800	58 383 000	1.10
						85% kv.	67.99	5 460 000	9 173 800	58 602 000	1.01
						95% kv.	68.12	5 777 000	9 490 800	58 919 000	0.88
						mez(+2σ)	68.21	5 994 000	9 707 800	59 136 000	0.79
h. mez Vz(+σ)	250.46	63.90	45 770 228	65.60	3 571 772	75% kv.	67.85	5 118 000	8 689 772	58 260 000	1.15
						85% kv.	67.93	5 313 000	8 884 772	58 455 000	1.07
						95% kv.	68.07	5 655 000	9 226 772	58 797 000	0.93
						mez(+2σ)	68.15	5 857 000	9 428 772	58 999 000	0.85

8 ZÁVĚR

V disertační práci byly popsány možné vstupující nejistoty plynoucí z měření, které vstupují do vodohospodářského řešení nádrže. Ve výpočtech pak tyto nejistoty byly uplatněny a byla vždy provedena detailnější analýza těchto nejistot včetně očekávané varianty neboli pravděpodobné velikosti nejistoty jednotlivých vstupů. Obdržené výsledky při řešení v podmínkách nejistot byly výrazně ovlivněny. Na stranu bezpečnou je vhodné výsledek ať už zásobního nebo retenčního objemu o výsledné nejistoty navýšit.

Nejprve byla provedena podrobná analýza u_B pro vodohospodářské řešení V_Z na 6 různých vodních nádrží pomocí softwaru UNCE_RESERVOIR. Procentuálním analyzováním rozšířených nejistot U zásobních objemů nebyla zjištěna závislost mezi jednotlivými profily (např. že by menší nebo méně vodné profily dosahovaly menších rozšířených nejistot). Tento fakt nám umožnil výsledky z jednotlivých profilů zprůměrovat a pro zprůměrované průběhy rozšířených nejistot U pozorujeme ve všech případech téměř lineární závislosti mezi nárůstem U a u_B. Na základě podrobné analýzy a vyhodnocení bylo doporučeno uvažovat alespoň s výslednou průměrnou hodnotou rozšířené nejistoty U.

Poté byla vytvořena nová knihovna k softwaru UNCE_RESERVOIR. Tato knihovna počítá optimální V_Z nádrže pro P_T menší než 100 % v podmínkách nejistot. Byla provedena analýza u_B na nádržích Vír I a Vranov. Aktualizované vstupní přítoky vody do testovaných nádrží v obou případech způsobily vyšší poruchu v nedodávce vody. Jinými slovy nemohly nádrže zaručit $P_T \geq 99{,}5$ %. Z tohoto důvodu musely být nejprve stávající O_P sníženy. Poté byly pro nádrže vypočítány optimální V_Z včetně u_B, které způsobily potřebu navýšit stávající V_Z. Byly doporučeny optimální hodnoty V_Z, které by se vyrovnaly s aktualizovanou řadou přítoku vody do nádrže a s u_B. Vyvinutý simulačně-optimalizační model nádrže a použité metody prokázaly svoji funkčnost při řešení optimálního zásobního objemu nádrží v podmínkách vstupních nejistot.

Ke splnění dalšího cíle byl vyvinut nový software TRANSFORM_WAVE pro transformaci povodňových vln modifikováním grafické Klemešovy metody. Software opět zavádí vstupní nejistoty metodou Monte Carlo a umožňuje stanovit V_R v podmínkách nejistot vstupních dat. Vyvinutý software prokázal, že použité metody se dají bez problému aplikovat na transformaci povodňových vln. Testování a analýza softwaru byla provedena na vodní nádrži Vír I. Na základě dosažených výsledků a vyhodnocení bylo pro tuto nádrž taktéž doporučeno konkrétní navýšení stávajícího V_R, který by se vypořádal s aktualizovanou povodňovou vlnou $Q_{1.000}$ zatíženou u_B bez předpouštění.

Zdrojový kód obou softwarů je napsán obecně a softwary se dají rychle využít k testování i jiných nádrží nebo nádrží plánovaných. Navíc se oba softwary dají využít v návaznosti na sobě. Potom jde celý problém víceúčelových nádrží v podmínkách nejistot pojmout komplexněji, což vede k naplnění posledního cíle, kdy bylo záměrem stanovit funkční objemy nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat. Pro tuto problematiku byla opět zvolena vodní nádrž Vír I. Analýza byla provedena tak, že se zvolilo několik vypočtených optimálních V_Z, pro které byly spočteny transformace. Výsledkem je zjištění, jak navýšení V_Z ovlivňuje transformaci aktualizované povodňové vlny v podmínkách nejistot.

Nakonec je třeba konstatovat, že předložené analýzy byly provedeny pouze pro 2, resp. 1 nádrž, a tudíž výsledky v současné době nelze zobecnit. Je zde ale předpoklad, že pro jiné nádrže s odlišnými vstupními nejistotami budou výsledky V_Z a V_R taktéž

ovlivněny. Je tedy jasné, že i další případové studie budou mít dopad na stávající funkční objemy se zavedením vstupních nejistot, což potvrzuje význam této problematiky. Existuje zde prostor pro budoucí přezkoumání manipulačních řádů nádrží a byla by vhodná také případná změna normy ČSN 75 2405, která by měla brát v úvahu nejistoty vstupních dat.

Finální rozhodnutí konkrétního nastavení funkčních objemů vody v nádrži bude ale vždy na vlastníkovi, uživateli nebo investorovi, což vede k detailním analýzám vodních děl. Dále je možné vylepšit řešení např. zkapacitněním bezpečnostního přelivu a spodních výpustí, zároveň přesně modelovat rozliv kulminačního průtoku pod nádrží, podrobněji ověřit bezpečnostní výšku mezi maximální dosaženou hladinou a KMH. Do softwarů se dají velmi rychle a snadno zapracovat doporučené změny bezpečnostního přelivu nebo spodních výpustí. Byl tedy vytvořen nástroj pro komplexní stanovení funkčních objemů nádrže s uvažováním nejistot vstupních dat.

V budoucnu pravděpodobně nastane ještě větší problém, jak se vypořádat s hydrologickými extrémy u víceúčelových nádrží. Jinými slovy, jak zabezpečit odtok vody z nádrže dostatečně kapacitním V_Z v podmínkách nejistot a zároveň jak zvládat a eliminovat extrémní povodně. Celá práce uvažovala s nejistotami vznikajícími pouze z měření. Přítoky i povodně lze určitě řešit i pomocí klimatických modelů a emisních scénářů. V této práci ale bylo záměrem podchytit konkrétně nejistoty měření, a to především neznalost velikosti nejistoty přítoků vody do nádrže (stanovení měsíčních průtoků nebo povodňových vln), dále neznalost batygrafických křivek nádrže, ale i výparu a průsaku. Proto nakonec i přítoky vody do nádrže jsou v této práci generovány metodou Monte Carlo, aby byly všechny vstupy ucelené a jednotné. Na druhou stranu i do těchto softwarů se při nahrávání vstupních dat mohou opakovaně načíst různé scénáře přítoků vody do nádrže z klimatických modelů a pracovat tak s klimatickou změnou.

Během zpracování disertační práce se vyskytly další možnosti na budoucí rozšíření zkoumání této problematiky. Například pro nalezení vhodného poměru mezi prostory vody v nádrži by mohlo být využito multikriteriální optimalizace, která namísto jediného optimálního bodu dostává řadu řešení. Jelikož žádné z nedominovaných řešení v sadě není lepší než jakékoli jiné, jedno z nich je přijatelné. Volba jednoho řešení na úkor druhého ovšem vyžaduje znalosti konkrétních problémů a řadu faktorů souvisejících problémů. To by mohlo vést třeba k přiřazování jednotlivých důležitostí neboli navolit prioritu V_Z a V_R dané nádrže nebo například ekonomicky vyčíslit dopady sucha a povodně pro danou nádrž. Dále by bylo vhodné rozšířit software UNCE_RESERVOIR o zbývající typ úlohy. Konkrétně o stanovení nalepšeného odtoku O_P, který bude funkcí zásobního objemu V_z a zabezpečenosti P, tedy $O_P = f(V_Z, P)$. Obdobně by šel rozšířit i software TRANSFORM_WAVE o další typy přelivů. Nakonec by bylo přínosné problematiku nejistot vodohospodářského řešení nádrže aplikovat i do soustavy nádrží.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] Baldassarre, G. D., Montanari, A. *Uncertainty in river discharge observations: A quantitative analysis*. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(6), 913.

[2] Beven, K.J. and Binley, A.M. 1992. *The future of distributed models*: model calibration and uncertainty prediction, Hydrological Processes, 6, p.279–298.

[3] Beven, K. *Towards integrated environmental models of everywhere*: uncertainty, data and modelling as a learning process, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 460-467, doi:10.5194/hess-11-460-2007, 2007.

[4] 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

[5] Česká technická norma ČSN 75 2405 Vodohospodářské řešení vodních nádrží. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2017.

[6] Česká technická norma ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2014.

[7] Česká technická norma ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2014.

[8] 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

[9] Dokument: *Expression of the Uncertainty in Measurement in Calibration* (Metodika vyjadřování nejistot při kalibracích) EA 4/02, 1997 (v ČR ALE-R2, 1997).

[10] Dokument: *Guide to the Expressionof Uncertainty in Measurement* (Směrnice pro vyjadřování nejistoty při měření), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993.

[11] Dokument: ISO GUM Suppl. 1 (DGUIDE 99998) *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM) — Supplement 1: Numerical methods for the prop. of distrib., ISO 2004.

[12] Dokument: *Národní akční plán adaptace na změnu klimatu.* Ministerstvo životního prostředí [online]. 2015 [cit. 2019-09-11].

[13] Dokument: *Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody*. Mezirezortní komise VODA-SUCHO [online]. 2015 [cit. 2019-09-11].

[14] Dokument*: Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR.* Ministerstvo životního prostředí [online]. 2015 [cit. 2019-09-11].

[15] Dokument: *Koncepce na ochranu před následky sucha pro území České republiky* Ministerstvo zemědělství, Ministerstvo životního prostředí, Mezirezortní komise VODA-SUCHO a VÚV TGM v. v. i. [online]. 2017 [cit. 2019-09-11].

[16] Dokument: *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)* [online], Zeměměřický úřad ČÚZK, 2016. [cit. 2019-04-12].

[17] Dokument: TPM 0051–93 *Stanovení nejistot při měřeních, podnikové normy ÚNMZ – TPM*, Český metrologický institut, 1993.

[18] Dokument: WECC doc. 19–1990: Western European Calibration Cooperation, 1990.

[19] Hanel, m.; Kašpárek, L.; Mrkvičková, M. a kol.: *Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. Praha, 2011. ISBN 978-80-87402-22-1

[20] Chen, J.; Zhong, P.-A.; Wang, M.-L.; Zhu, F.-L.; Wan, X.-Y.; Zhang, Y. *A risk-based model for real-time flood control operation of a cascade reservoir system under emergency conditions*. Water, 10, 167, 2018.

[21] Jandora, J.; Šulc, J. Hydraulika (MODUL 01). Brno: VUT v Brně – FAST, 2006. 178 s.

[22] Kapelan Z., Savić D., Mahmoud H. *A Response Methodology for Reducing Impacts of Failure Events in Water Distribution Networks*, Procedia Engineering, volume 186, 2017.

[23] Kašpárek, L. *Odhad objemu nádrží potřebného pro kompenzaci poklesu odtoku vlivem klimatické změny*. VÚV Praha, 2005, Praha.

[24] Kiureghian A., Ditlevsen O. *Aleatory or epistemic? Does it matter?,* Structural Safety, Volume 31, Issue 2, 2009.

[25] Klemeš, V. *A simplified solution of the flood-routing problem*. Vod. Čas. 8(4), 1960.317-326.

[26] Knight, F. H. *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston, Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, Boston 1921.

[27] Kuria, F. W. and Vogel, R. M. *A Global Reservoir Water Supply Yield Model With Uncertainty*, Environ. Research Letters, 9 095006 doi:10.1088/1748-9326/9/9/095006, 2014.

[28] 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.

[29] Li B, Liang Z, Zhang J, Chen X, Jiang X, Wang J, Hu Y, *Risk analysis of reservoir flood routing calculation based on inflow forecast uncertainty*. Water 2016, 8:486.

[30] Maiolo, M., Mendicino, G., Senatore, A., Pantusa, D. *Optimization of drinking water distribution systems in relation to the effects of climate change*. Water, 9, 2017, 803

[31] MŘ pro vodní dílo Vír na řece Svratce v km 114,900. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2011.

[32] MŘ pro vodní dílo Vranov na řece Dyje v km 175,405. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2011.

[23] Marton, D. *Vliv nejistot průtokových řad průměrných měsíčních průtoků na vypočtené hodnoty zásobního objemu nádrže*. Disertační práce, Brno: VUT v Brně – FAST, 2012, 104 s.

[34] Marton, D. *Nejistoty zatěžující vodohospodářské řešení zásobního objemu údolní nádrže (Uncertainty impact on water management analysis of open water reservoir storage capacity).* Zkrácená verze habilitační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2018. 34 stran. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně.

[35] Marton, D.; Starý, M.; Menšík, P. *The Influence of Uncertainties in the Calculation of Mean Monthly Discharges On Reservoir Storage*, Journal of Hydrology and Hydromechanics. November 2011, Volume 59, Issue 4, Pages 228–237, ISSN (Print) 0042-790X, DOI: 10.2478/v10098-011-0019-3.

[36] 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, 2015a, roč. 63, č. 4, s. 287-294. ISSN: 0042- 790X

[37] Marton, D.; Starý, M.; Menšík, P.; Paseka, S. *Hydrological Reliability Assessment of Water Management Solution of Reservoir Storage Capacity in Conditions of Uncertainty*, příspěvek na konferenci Drought: Research and Science-Policy Interfacing, ISBN 978-1-138-02779-4, CRC Press Taylor & Francis Group, Leiden, Netherlands, 2015b.

[38] Marton, D., Starý, M. a Menšík, P. UNCERESERVOIR – Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže, 2015d. Dostupné z: http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php

[39] Marton, D.; Paseka, S. *Uncertainty Impact on Water Management Analysis of Open Water Reservoir*. Environments, 2017, roč. 4, č. 1.

[40] Měřící loď Povodí Moravy, s.p. *Povodí Moravy* [online]. Dřevařská 11, BRNO: Povodí Moravy, s.p., 2012 [cit. 2019-06-12].

[41] Morris, G. L., Fan, J., 1998. Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use, New York, USA: McGraw-Hill.

[42] Ngo, L. L., Madsen, H., Rosbjerg, D. *Simulation and optimisation modelling approach for operation of the Hoa Binh reservoir*, *Vietnam*. Journal of Hydrology, vol. 336, no. 3-4, 2007.

[43] Palenčár, R.; Vdoleček, F.; Halaj, M. *Nejistoty měření I: vyjadřování nejistot*. Automa, 7, 2001a, č. 7-8, s.50-54.

[44] PALSTAT s.r.o. *Vyjadřování nejistot měření při kalibracích*. PALSTAT CAQ systémy řízení jakosti. Vrchlabí, 2002.

[45] Paseka, S. *Stanovení nejistoty měření průměrného měsíčního průtoku na vybraném vodoměrném profilu v povodí řeky Svitavy*. Brno, 2014. 70 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

[46] Paseka, S. *Analýza nejistot hydrologických a provozních parametrů na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže*. Brno, 2016. 85 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Daniel Marton, Ph.D.

[47] Paseka, S.; Kapelan, Z.; Marton, D. *Multi-Objective Optimization of Resilient Design of the Multipurpose Reservoir in Conditions of Uncertain Climate Change*. Water 2018, 10, 1110.

[48] Paseka, S.; Marton, D.; Menšík, P. *Uncertainties of reservoir storage capacity during low water period*. In SGEM Conference Proceedings. International multidisciplinary geoconference SGEM. Hydrology and Water Resources. 51 Alexander Malinov Blvd., 1712, Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2016. s. 789-796.

[49] Roach T, Kapelan Z, Ledbetter R. *Comparison of robust optimization and info-gap methods for water resource management under deep uncertainty*. Journal of Water Resources Planning and Management, volume 143, 2017, no. 9,

[50] Sadílek, V.; Doležal, J.; Vořechovský, M. Řešené úlohy z oblasti spolehlivosti stavebních konstrukcí. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2010. 79 s.

[51] Shrestha, R. R, Simonovic, S. P. Fuzzy set theory based methodology for the analysis of measurement uncertainty in river discharge and stage. Can. J. of Civ. Eng. 37(3), 2010, 429–439.

[52] Starý, M. *Hydrologie* (MODUL 01). Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2005a, 213 s.

[53] Starý, M. *Hydrologie* (MODUL 03 Návody do cvičení). Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2005b, 113 s.

[54] Starý, M. *Nádrže a vodohospodářské soustavy* (MODUL 01). Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2006a, 120 s.

[55] Starý, M. Zpráva o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu HDP VH 83/6 RÚ, VUT FAST v Brně, Brno, 1984.

[56] Systém měření hloubek a sedimentů ve vodních tocích a nádržích, firma Vars, Caperea

[57] Tomkins, K. M. *Uncertainty in streamflow rating curves: Methods, controls and consequences. Hydrological Processes*, 28(3), 2014, 464-481.

[58] Trnka, M.; Vizina, A; Hanel, M.; Balek, J.; Hlavinka, P. a kol. *Pozorované změny a výhled pro vodní bilanci a potřebu vody v zemědělské krajině České republiky*. Vodohospodářská konference Vodní nádrže 2017. Brno: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno, 2017. ISBN 978-80-905368-5-2

[59] Tůma, A.; Fína, D. *Příprava vodních nádrží Vlachovice a Skalička*. Vodohospodářská konference Vodní nádrže 2017. Brno: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno, 2017. ISBN 978-80-905368-5-2

[60] Viskot, M. *Úloha vodních nádrží v suchých letech*. Vodohosp. konference Vodní nádrže 2019. Brno: Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno, 2019. ISBN 978-80-907141-3-7

[61] Westerberg, I. K., McMillan, H. K. Uncertainty in hydrological signatures for gauged and ungauged catchments. Water Resources Research, 52,(3), 2016.

[62] Whitehead, P. Hornberger, G. a Black, R. *Effects of parameter uncertainty in a flow routing model / Les effets de l'incertitude des paramètres dans un modèle du calcul du cheminement*, Hydrological Sciences Bulletin, 24:4, 445-464, 2009.

[63] Winter, T. C. *UNCERTAINTIES IN ESTIMATING THE WATER BALANCE OF LAKES*. JAWRA Journal of the American Water Res. Association, 17: 82–115, 1981.

[64] WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. *World Meteorological Organization*, 2020 [online]. Geneva 2, Switzerland: Chair, Publications Board, [cit. 2020-06-05]. ISBN 978-92-62-11248-5.

[65] Zadání Technicko-ekonomické studie variant Morava, Krupa – VD Hanušovice. Povodí Moravy, s.p. Smlouva o dílo [online]. 2015 [cit. 2020-02-17].

[66] Zahradníček, P., Trnka, M., Brázdil, R., Možný a kol. The extreme drought episode of August 2011–May 2012 in the Czech Republic. International Journal of Climat. 35(11), 2014.

Další zdroje jsou uvedeny v disertační práci.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Ing. Stanislav Paseka
paseka.s@fce.vutbr.cz

Vzdělání:

2016 – současnost	Doktorské studium, Vysoké učení technické (VUT) Fakulta stavební (FAST) v Brně. Ústav vodního hospodářství krajiny (ÚVHK), obor Vodní hospodářství a vodní stavby.
2014 – 2016	Magisterské studium (Ing.), VUT FAST v Brně ÚVHK, obor Vodní hospodářství a vodní stavby. Prospěl s vyznamenáním.
2010 – 2014	Bakalářské studium (Bc.). VUT FAST v Brně. ÚVHK, obor Vodní hospodářství a vodní stavby. Prospěl s vyznamenáním.
2006 – 2010	Student VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou, obor Technické lyceum.

Zaměstnání:

2019 – současnost	Asistent na VUT FAST v Brně, ÚVHK.
2017 – současnost	Technik pro výzkum a vývoj na VUT FAST v Brně, ÚVHK – projekt SEDECO: Interreg (ATCZ28).
2017 – 2018	Projektant v oblasti vodního hospodářství, Geocart CZ a.s.
2014 – 2015	Projektový manažer povodňových plánů, ENVIPARTNER, s.r.o.
2013 – 2015	Pomvěd (pedagog.–vědecké síla) na VUT FAST v Brně, ÚVHK.

Zahraniční stáž:

06/2017 – 09/2017	3 měsíční stáž na University of Exeter ve Velké Británii v Centre for Water Systems pod prof. Zoranem Kapelanem.

Vnitřní projekty VUT:

hlavní řešitel: FAST-J-17-4214, FAST-J-18-5044 a FAST-J-19-5798.
spoluřešitel: FAST-S-15-2694, FAST-S-16-3444, FAST-S-18-5341 a FAST-S-20-6346.

Ocenění a uznání:

Ocenění:	na 18. Konferencii mladých odborníkov za vynikající příspěvek, SHMÚ 2019.
Ocenění:	na 17. Konferencii mladých odborníkov za vynikající příspěvek, SHMÚ 2018.
Ocenění:	na 16. Konferencii mladých odborníkov za vynikající příspěvek, SHMÚ 2017.
3. místo	v soutěži ČKAIT diplomových prací v oboru Vodní hospodářství a vodní stavby. ČKAIT a FAST VUT v Brně 2016.
1. místo	ve Studentské vědecké a odborné činnosti v mezinárodním kole za Vodné stavby, vodné hospodárstvo a environmentálne inžinierstvo, Bratislava 2015.
1. místo	ve Studentské vědecké a odborné činnosti ve fakultním kole za sekci Vodní stavby, vodní hospodářství a ekologické inženýrství, Brno 2015.
1. místo	v odborné studentské soutěži oboru V pořádané oborovou radou Vodního hospodářství a vodních staveb FAST VUT v Brně, 2013.
Uznání	děkanem FAST VUT v Brně za vzorně vypracovanou diplomovou práci a její obhajobu při státní závěrečné zkoušce v roce 2016.
Uznání	děkanem FAST VUT v Brně za vzorně vypracovanou bakalářskou práci a její obhajobu při státní závěrečné zkoušce v roce 2014.
Uznání	děkanem FAST VUT v Brně za vynikající studijní výsledky během magisterského studia v roce 2016 a během bakalářského studia v roce 2014.

ABSTRACT

Damaging changes and interventions in the water cycle in our landscape caused mainly in the last century together with uncertainties from climate change are the cause of more frequent occurrences of hydrological extremes. In Hydrology, the most urgent problem is that the values of the long-term mean flows are decreasing in rivers as well as the yield of groundwater sources, but on the other hand, we cannot forget to the problem of extreme floods. In these consequences developing methods and tools to uncertainty analysis of the reservoir yield and of the reservoir flood protection is very important, useful and desired.

The main aim was to determine the functional volumes of the reservoir considering input data measurement uncertainties and to quantify them and was explained how uncertainty took into account in results.

The active storage capacity was determined from the historical series of monthly flows that were affected by uncertainties, next were applied on water evaporation, seepage losses of the dam and morphological volume-area curves. The simulation-optimization reservoir model was developed and temporal reliability as reservoir yield performance measures was applied. This model will extend the existing UNCE_RESERVOIR software. The flood capacity was determined from random flood wave variations were obtained by repeatedly generating uncertainty on the flood hydrograph. Software was developed based on the modified Klemes method, which was able to transform flood waves. The measurement uncertainties of data inputs were created using Monte Carlo method in both softwares. By connecting two softwares, the functional volumes of the reservoir under conditions of measurement uncertainties were complexly determined.

The case study was applied to the real water reservoir, in the Morava River Basin. The result will be whether the dam is resistant to the current conditions, or the optimal design of the functional volumes of reservoir under conditions uncertainties.