

Optimální návrh zásobního objemu nádrže v podmínkách nejistot

Stanislav Paseka

*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, Žižkova 17,
602 00 Brno, paseka.s@fce.vutbr.cz*

Anotace:

Cílem příspěvku je nalézt optimální zásobní objem nádrže Vír pro předem stanovenou zabezpečenost podle trvání v podmínkách nejistot a také, jak zohlednit výsledné nejistoty při prezentaci výsledků. Nejistoty datových vstupů (přítoky vody do nádrže, batygrafie, výpar z vodní hladiny a průsak hrází) byly aplikovány metodou Monte Carlo. Dále byl vytvořen simulačně-optimalizační model nádrže a použita mřížková metoda. Výsledky jsou prezentovány na základě statistických charakteristik.

Annotation:

The aims of the paper are to find the optimal active storage capacity of reservoir Vír for the predetermined temporal reliability under condition of uncertainty of measurement and describe how the uncertainty took into account in the presentation of results. Uncertainties of data inputs (water inflow, morphological volume-area curves, water evaporation and seepage losses of the dam) were applied using the Monte Carlo method. The simulation-optimization reservoir model was developed, and the grid optimization method was used. Result was presented based on statistical characteristic.

Klíčová slova

Optimální zásobní objem nádrže, nejistoty, metoda Monte Carlo, simulačně-optimalizační model, mřížková optimalizační metoda, vodní nádrž Vír I

Keywords

Optimal active storage capacity of reservoir, uncertainty, Monte Carlo method, simulation-optimization reservoir model, grid optimization method, water reservoir Vír I

Abstrakt

Vzhledem k současným výkyvům počasí v podobě častějších výskytů hydrologických extrémů, které čím dál častěji pociťujeme i na území České republiky, se v posledních letech řeší především problémy se suchem. Problematické začínají být i zásobní prostory nádrží, které ovšem dokážou velmi dobře čelit zmíněnému problému. Je tedy vhodné zásobní prostory nádrží podrobněji prozkoumat a v případě potřeby vhodně navyšovat. Cílem příspěvku je nalézt optimální zásobní objem nádrže Vír I pro aktuální podmínky (aktualizované přítoky vody do nádrže) a pro předem stanovený zabezpečený odtok vody z nádrže za podmínek nejistoty měření.

Příspěvek se zabývá nejistotami měření na vstupních hydrologických, morfologických a provozních dat. Pro tento účel byl v programu Fortran 77 vyvinut simulačně-optimalizační model nádrže. Vytvořený software umožňuje zavádět vstupní nejistoty metodou Monte Carlo použitím generátoru pseudonáhodných čísel. Použitím vhodné metodiky a aktualizovaných vstupních dat tento přístup umožní navrhnout optimální zásobní objem nádrže za podmínek nejistoty vstupních dat včetně ztrát vody z nádrže.

V současnosti se při vodohospodářských řešení s nejistotami změn klimatu nebo s nejistotami měření příliš nesetkáváme. Přesto zohlednění nejistot může výsledky ovlivňovat. Proto výzkumy zabývající se zdokonalováním návrhů u plánovaných nebo přepočítávání zásobních prostorů u stávajících nádrží v podmínkách nejistot jsou žádané, důležité, ale především aktuální.

V článku je podrobně popsána metoda Monte Carlo a simulačně-optimalizační model nádrže jehož základ tvoří upravená rovnice nádrže v součtovém tvaru. Optimalizace je provedena mřížkovou metodou a kritérium vychází ze zabezpečení podle trvání P_T . Software rovněž zavádí ztráty vody z nádrže a to ztráty vody výparem z vodní hladiny a průsakem tělesa hráze. Tento přístup byl aplikován na vodní nádrži Vír I, která mimo jiné plní účely k akumulaci povrchové vody, k zajištění minimálních průtoků a má také vodárenské využití.

Nejprve bylo nutné deterministicky a bez vstupních nejistot spočítat zabezpečení podle trvání P_T včetně ztrát vody z nádrže pro uvedený požadovaný odtok O_P a stávající zásobní objem nádrže V_Z . Bylo zjištěno, že díky aktualizované řadě přítoků vody do nádrže je zabezpečení nádrže P_T výrazně pod deklarovanou hranicí 99,5 % pro významnost nádrže A. Z tohoto důvodu musel být požadovaný odtok O_P postupně snižován, aby byla zajištěna zabezpečení P_T 99,5 %. Dále byl bez nejistot spočítán zásobní objem nádrže V_Z včetně ztrát vody z nádrže pro vypočtený požadovaný odtok O_P a zabezpečení $P_T \geq 99,5$ %. Na základě optimalizovaného V_Z byl ještě měněn O_P , tak aby se optimalizovaný V_Z blížil skutečnému objemu nádrže, který je 44,056 mil. m³.

Poté byla provedena podrobná analýza plnění a prázdnění nádrže Vír I se vstupní konstantní nejistotou u_B na všech vstupech o velikostech $u_B = \text{od } \pm 1 \text{ do } \pm 7$ % a rozdílně dle očekávání. Počet opakování byl vždy nastaven na 300 opakování. Pro prezentaci stochastického řešení byly výsledky statisticky vyhodnoceny. Z analýzy byl prokázán zřetelný vliv vstupních nejistot na výsledné hodnoty zásobního prostoru nádrže. Proto je důležité uvažovat s možnými nejistotami při vodohospodářském řešení nádrže. Existuje zde prostor pro budoucí přezkoumání manipulačních řádů nádrží a také případná změna normy ČSN 75 2405 (ČSN 75 2405, 2017), která by měla brát v úvahu nejistoty vstupních dat.

Výsledky ukázaly, že se konkrétní testovaná vodní nádrž Vír I nedokáže dobře vypořádat s možnými aktualizovanými vstupními daty ani s možnými vstupními nejistotami. Na základě aktualizované řady přítoků vody do nádrže a zavedení vstupních nejistot včetně uvažování ztrát vody z nádrže bylo doporučeno navýšení stávajícího zásobního objemu nádrže Vír, které by se relativně bezpečně vypořádalo s aktuálními podmínkami a vstupními nejistotami.

Vyvinutý simulačně-optimalizační model nádrže a použité metody prokázaly svoji funkčnost při řešení optimálního zásobního objemu nádrže Vír v podmínkách vstupních nejistot. Zdrojový kód programu je napsán obecně a software se dá rychle využít k testování i jiných nádrží. Nakonec je třeba konstatovat, že předložená analýza byla provedena pouze pro jednu nádrž, a tudíž výsledky v současné době nelze zobecnit. Je zde ale předpoklad, že pro jiné nádrže s různými vstupními nejistotami budou získané výsledky V_Z taktéž zatíženy a ovlivněny vstupními nejistotami. Zároveň není úplně jednoduché navýšit zásobní objem nádrže, protože by to mohlo být na úkor retenčního objemu nádrže. Proto je velmi důležité řešit celý problém víceúčelových nádrží v podmínkách nejistot komplexněji. Tento software je vyvinut v návaznosti na software TRANSFORM_WEVE (Paseka, 2018), který právě slouží ke stanovení retenčního objemu nádrže v podmínkách nejistot. Otázkou pak zůstává, jak velké vstupní nejistoty aplikovat do vodohospodářských řešení a jak řešit jednotlivé objemy v závislosti a podle priorit mezi sebou, tak aby oba tyto prostory byly vyhovující na aktuální podmínky.

Optimální návrh zásobního objemu nádrže v podmínkách nejistot

Stanislav Paseka

1 Úvod

Změna klimatu a přerozdělení ročních srážek jsou příčinou častějšího výskytu hydrologických extrémů v podobě povodní a především sucha. Nejnáléhavějším problémem však je, že hodnoty dlouhodobých průměrných toků se v řekách snižují, stejně jako kapacita zdrojů podzemních vod. Suchá období se u nás ve větší míře začala objevovat přibližně od roku 2011 (Zahradníček a kol., 2014) a přetrvávají, ba dokonce prohlubují, dodnes. Necitlivé zásahy do krajiny v kombinaci s působením klimatické změny, která s sebou přináší zvýšené riziko výskytů dlouho trvajícího období sucha, mají negativní vliv na vodní režim v krajině. V budoucnu se předpokládá, že hodnota dlouhodobého průměrného průtoku může klesnout k hodnotě 0,8 až 0,6 Q_a (Kašpárek, 2005). Mimoto další vývoj do následujících let s ohledem na četnosti a délky suchých období není příliš optimistický, a to ani v případě, kdyby se odhady z klimatických modelů plně neprojevíly. Současná změna klimatu je vážným tématem a její dopad na hospodaření s vodou v Česku musí být podrobně řešen. Tato otázka je stále více diskutována ve veřejných sdělovacích prostředcích, mezi odborníky, ale i na politické úrovni.

Je známo, že úhrny srážek jsou jediným zdrojem vody pro naši krajinu, protože z pohledu odtokových poměrů jsme označovány za střechu Evropy. Do Česka tedy nepřitékají žádné významnější vodní toky, a proto Česko musí hospodařit s velmi omezenými vodními zdroji. V našich podmínkách se musíme zaměřit na zvyšování retenční schopnosti vody v krajině. Vláda České republiky vydala několik strategických dokumentů o adaptaci na změnu klimatu (Strategie MŽP, 2015), (Národní akční plán MŽP, 2015), (VODA-SUCHO, 2015). Tyto dokumenty vznikly spoluprací výzkumných ústavů s Ministerstvem životního prostředí ČR a ukazují na dosažení cílů ochrany před negativními dopady sucha. Jedním z nich je např. adaptační opatření vedoucí k optimalizaci objemů stávajících vodních nádrží. Jinými slovy je nezbytné navýšovat nebo přerozdělovat stávající prostory vody v nádržích, resp. provádět revize manipulačních řádů nádrží novelizací normy (ČSN 75 2405, 2017). Právě při probíhajících suchých obdobích byly vodní toky pod nádržemi s dostatečným zásobním prostorem výrazně dotovány a byl zajištěn alespoň minimální zůstatkový průtok.

V současné praxi se při vodohospodářských výpočtech ať už s nejistotami změn klimatu nebo s nejistotami měření příliš neseťkáváme. Zohlednění nejistot však může výsledky ovlivňovat, protože při řešení deterministickou metodou nastávají značné ztráty přesnosti na úkor jednoduchosti řešení. Výzkumy, které vedou ke zdokonalování návrhů u plánovaných nebo přerozdělení funkčních prostorů stávajících nádrží, v podmínkách nejistot jsou žádané, důležité, ale hlavně aktuální. Nejistoty z pohledu dnešního poznání byly nejprve popsány v práci Risk, uncertainty, and Profit (Knight, 1921). Koncept nejistoty je v současné době vnímán z více hledisek, a to jako nejistoty, rizika a nejistoty měření. Nejistotu také lze klasifikovat do dvou kategorií (Kiureghiana a Ditlevsen, 2009) z anglického aleatoric uncertainty, v ČR uvažovanou jako nejistota a epistemic uncertainty jako neurčitost.

Nejistoty měření se do běžné praxe kalibračních laboratoří dostaly až v roce 1990 vydáním dokumentu WECC 19/90 Západoevropským kalibračním sdružením (WECC, 1990), ve kterém jsou definovány předpisy pro nejistoty. Po něm následovaly další předpisy, jako Směrnice pro vyjadřování nejistoty při měření (Guide to the Expression of Uncertainty, 1993), kde je 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 do Evropské unie se ČR zavázala dodržet zmíněné dokumenty, které definovaly zcela nový pohled na chyby vzniklé měřením a také jejich nové pojetí. Základem bylo nahrazení názvosloví novým pojmem nejistoty měření. Z dokumentů byly sestaveny mezinárodní směrnice a normové předpisy, které jsou pro EU včetně ČR závazné. Český překlad má název Stanovení nejistot při měřeních (TPM 0051, 1993). Aplikace nejistot v hydrologii byly popsány

metodou GLUE (Beven and Binley, 1992). Teorii na aplikaci nejistot do obecných vodohospodářských výpočtů je mnoho a jsou zkoumány po celém světě. Zavedení nejistot vstupních hydrologických a technických parametrů do výpočtů lze provádět např. metodou Monte Carlo.

V nejnovějších publikacích zkoumajících rizika a vliv nejistoty na zásobní objem nádrže s využitím Monte Carlo simulace (Starý, 1984), (Marton a kol., 2011), (Campos a kol., 2014), (Kurina a Vogel, 2014), (Paseka a kol., 2016) a (Marton a Paseka, 2017) bylo potvrzeno, že vstupní nejistoty mají vliv na velikosti zásobního prostoru, ale i na výslednou zabezpečenost nalepšeného odtoku.

Cílem příspěvku je nalézt optimální zásobní objem nádrže Vír I pro předem stanovený zabezpečený odtok vody z nádrže za podmínek nejistoty měření. Příspěvek se zabývá nejistotami měření na vstupních hydrologických, morfologických a provozních dat. Pro tento účel byl vyvinut simulačně-optimalizační model nádrže a byla použita zabezpečenost podle trvání. V modelu byla použita optimalizační mřížková metoda. Použitím vhodné metodiky a aktualizovaných vstupních dat tato metoda umožní navrhnout optimální zásobní objem nádrže za podmínek nejistoty vstupních dat včetně ztrát vody z nádrže.

2 Metody

2.1 Metoda 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. Metoda Monte Carlo potřebuje pro generování dat generátor pseudonáhodných čísel, který je základem simulačních programů. Kvalitní generátory mají konstantní hustotu pravděpodobnosti generovaných pseudonáhodných čísel, tzv. bílý šum. Mezi vygenerovanými náhodnými čísly potom neexistuje žádná závislost, to znamená, že je nulová autokorelační funkce. Náhodná čísla jsou generována se stejnou pravděpodobností. Obecný postup pro generování nejistoty metodou Monte Carlo na přítoku vody do nádrže, batygrafických křivkách nádrže, výparu vody z vodní hladiny a na průsaku tělesem hráze je následující.

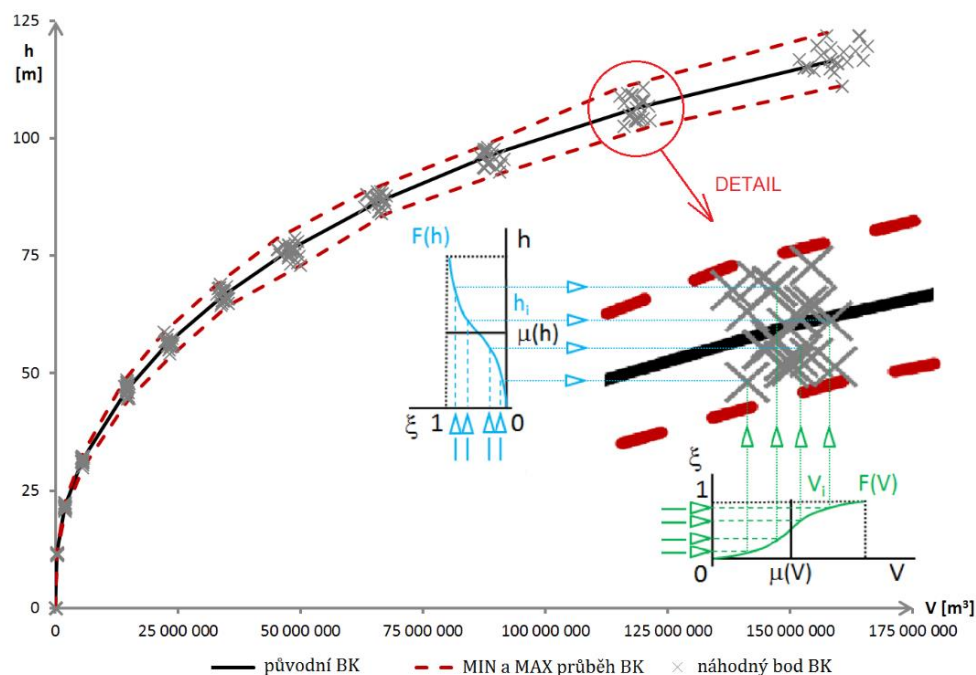
Pro vytvoření algoritmu, který generuje náhodné řady se zatížením nejistot jsou zavedeny následující předpoklady. Obecná vstupní hodnota X vzniklá z měření je považována za náhodnou (stochastickou) veličinu. Tento předpoklad umožňuje generovat nové hodnoty X_i okolo vstupní hodnoty X vzniklé z měření 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 s tzv. 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 tzv. koeficientu variace $C_v(X)$, viz rovnice (1)

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

kde x_i jsou prvky náhodného výběru a n je počet prvků náhodného výběru.

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 $N(\mu_t(X), \sigma_t(X))$ pro $t = 1, 2, \dots, PP$, kde PP je celkový počet prvků (např. celkový počet průměrných měsíčních přítoků nebo celkový počet bodů čar zatopených objemů $V(h)$). Použitím generátoru pseudonáhodných čísel, který generuje náhodná čísla z intervalu $\zeta \in (0,1)$, jsou opakovaně generovány náhodné průběhy řady prvků $X_{t,i}$, označovány jako náhodné polohy hodnot $NX_{t,i}$ v intervalu zadané nejistoty pro $i = 1, 2, \dots, PO$, kde PO je celkový počet opakování (generování).

Tento pospaný postup generování náhodných prvků lze uplatnit na všech veličinách vstupujících do vodohospodářského řešení zásobního prostoru nádrže s výjimkou batygrafických křivek nádrže. Pro tento případ, kdy se jedná o 2D souřadnicový systém, je přístup generování částečně odlišný. Základní princip generování náhodných poloh bodů $(NX_{b,i}, NY_{b,i})$ je shodný s teorií popsanou výše. Odlišnost je dána pouze sestavením bodu, který vyžaduje sestavení dvou na sobě nezávislých Monte Carlo generátorů. Každý generátor sestaví náhodnou polohu bodu $NX_{b,i}$ (např. výška vodní hladiny $Nh_{i,i}$) a k ní náhodnou hodnotu $NY_{b,i}$ (např. objem vody v nádrži $NV_{i,i}$). Společně náhodné polohy dvou bodů pak vytvoří náhodnou souřadnici bodu $(NX_{b,i}, NY_{b,i})$ (např. náhodná souřadnice bodu čáry zatopených objemů $(NV_{i,i}, Nh_{i,i})$). Série náhodných bodů $(NV_{i,i}, Nh_{i,i})$ pak tvoří náhodné čáry zatopených objemů zatížené nejistotami. Na Obr. 1 je znázorněn princip generovaných náhodných 2D poloh bodů aplikovaných právě na křivce zatopených objemů.



Obr. 1: Schéma principu generování náhodných poloh bodů (V, h) křivky zatopených objemů pro 2D souřadnicový systém

Tyto generované náhodné soubory slouží jako vstupní hodnoty pro simulačně-optimalizační model nádrže, který modeluje chování zásobníku v podmínkách nejistot. Výsledkem opakovaných výpočtů je soubor optimálních zásobních objemů nádrže pro předem stanovenou zabezpečení podle trvání P_T .

2.2 Simulačně-optimalizační model nádrže

Tento problém nelze řešit přímo v jedné variantě. Pro stanovení optimálního zásobního objemu nádrže, který je funkcí požadovaného odtoku O_P a předem známé zabezpečení menší než 100 %, lze formulovat jako $V_Z = f(O_P, P_T)$ pro $P_T < 100$ %, slouží opakované výpočty stanovení zabezpečení $P_T = f(O_P, V_Z)$ pro předem daný požadovaný odtok O_P a zásobní objem V_Z . Pro tuto úlohu byl naprogramován simulačně-optimalizační model nádrže. Software je napsán v programovacím jazyce FORTRAN (Open Watcom FORTRAN 77, Documentatiton) a k němu bylo vytvořeno uživatelské rozhraní v programu Delphi 7 (Borland Delphi Enterprise, Version 7.0, 2002), které uživateli umožní jednoduše nahrávat vstupy, zadávat vstupní nejistoty, nastavovat a provádět výpočty a také přehledně zobrazovat výstupy.

Hledaným parametrem je tedy zásobní objem V_Z a kritériem je zabezpečení nádrže, která je stanovena dle manipulačního řádu, ale nižší než 100 %. Pro každou volenou hodnotu parametru V_Z se řeší dílčí úloha $P_T = f(O_P, V_Z)$. Pro tento typ vodohospodářského řešení jsou povoleny poruchy vody z nádrže dle významnosti nádrže. Počáteční podmínkou je plná nádrž v začátku testovaného období a

okrajovou podmínkou je řada přítoků vody do nádrže v příslušném časovém kroku a v každém kroku je prováděna bilance mezi požadovaným odtokem O_p a přítokem vody do nádrže Q . Dále se testuje omezující podmínka $\Sigma(O_p - Q)$, neboli zda nedojde na konci každého měsíce k vyprázdnění nádrže, resp. voleného objemu nádrže. Pokud ano, tak nastane porucha odtoku vody z nádrže. To znamená, že ve všech měsících, kdy odtok vody O_i je menší než požadovaný odtok O_p , nastane porucha v dodávce vody z nádrže. Zaznamená se celkový součet všech poruchových měsíců, celkové množství nedodané vody oproti plánované hodnotě a poté je vypočtena příslušná zabezpečení. Jsou známy zabezpečení podle opakování, podle trvání a podle množství nedodané vody (Starý, 2006). Nejpoužívanější u nás je zabezpečení podle trvání P_T , která je udávána i v manipulačních řádech nádrží. Obecnou definici zabezpečení vodohospodářských systémů postupně popsali (Kritskiy a Menkel 1952), (Klemeš, 1967) a (Hashimoto a kol., 1982). Základem simulačního modelu dílčí úlohy $P = f(O_p, V_z)$ je upravená rovnice nádrže v součtovém tvaru převedená do nerovnosti (2) (Starý, 2006)

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

kde O_i je odtok vody z nádrže [$m^3 \cdot s^{-1}$] v daném měsíci pro $i = 1, \dots, k$; Q_i je přítok vody do nádrže [$m^3 \cdot s^{-1}$] v daném měsíci pro $i = 1, \dots, k$; Δt je časový krok výpočtu jeden měsíc a $V_{z,max}$ je zásobní objem nádrže [m^3]. V kroku $i+1$ hodnota O_{i+1} nejprve nahrazena hodnotou požadovaného nalepšeného odtoku O_p . Časový průběh vyčíslované sumy simuluje průběh prázdnění zásobního objemu nádrže po časových krocích $i = 1, \dots, k$. Pro $i = 0$ je třeba za hodnotu sumy zadat počáteční podmínku řešení.

Nerovnost (2) je zleva i zprava omezená. Z levé strany je omezena hodnotou 0, která značí plný zásobní objem a z pravé strany hodnotou $V_{z,max}$, která v tomto případě charakterizuje prázdný zásobní objem. Vypočtením hodnoty výrazu je získáno aktuální prázdnění zásobního objemu, které je následně testováno, zda leží v daném intervalu $(0, V_{z,max})$. Pokud ne, je třeba nalézt hodnotu O_{i+1} tak, že se buď položí výraz pod sumou rovný nule, a tím vznikne jalový odtok nebo výraz pod sumou se položí rovno $V_{z,max}$, kdy tudíž vznikne porucha (Starý, 2006). Klasifikace poruchy zásobního objemu nádrže pro výpočet zabezpečení podle trvání je následující (Hashimoto a kol., 1982)

$$Z_{t,i} = \begin{cases} Z_{t,i} = 1, & O_i > O_p \\ Z_{t,i} = 0, & O_i < O_p \end{cases} \quad (3)$$

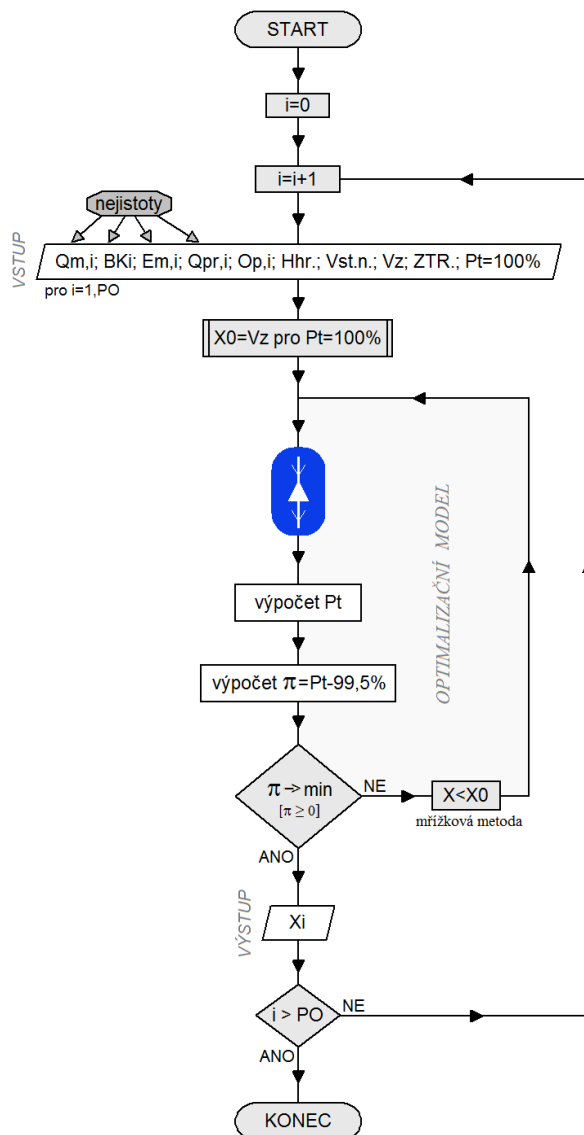
kde $Z_{t,i} = 1$ popisuje stav V_z nádrže v bezporuchovém (vyhovujícím) časovém kroku výpočtu a $Z_{t,i} = 0$ popisuje stav V_z nádrže v poruchovém (nevyhovujícím) časovém kroku výpočtu.

Míra zabezpečení nalepšeného odtoku O_p jako výsledek řízení odtoku je pravděpodobnost, že skutečný odtok z nádrže neklesne pod hodnotu nalepšeného odtoku O_p . Aplikována je zabezpečení dle trvání P_T odvozením z Čegodajeva, kterou lze dopočítat z hodnot $Z_{t,i}$ (Starý, 2005) (4)

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

kde $\sum_{i=1}^k Z_{t,i}$ je součet záznamů poruchových a bezporuchových měsíců, k je počet všech měsíců

Vstupní hodnotou pro řešení úlohy $V_z = f(O_p, P)$ pro $P < 100\%$ je nejprve výsledný zásobní objem z úlohy pro stanovení V_z pro zabezpečení 100%, tedy bez vzniku poruchy. Poté je volena hodnota parametru (zásobní objem) a opakovaně simulována nová varianta provozu nádrže dle nerovnice (2) a následně je vyhodnoceno sledované kritérium π (pokles zabezpečení) dle rovnic (3) a (4). Řešením je varianta, ve které se kritérium shoduje s požadovanou hodnotou. V této variantě se volený parametr stává výsledkem řešení. Úloha vede na optimalizaci, ve které je neznámou řešený parametr a kritériem je rozdíl mezi vypočtenou a požadovanou zabezpečení, který se minimalizuje (Starý, 2006). Princip výpočtu $V_z = f(O_p, P_T)$ pro $P_T < 100\%$ ($P_T = 99,5\%$ pro významnost nádrže A) je na Obr. 2.



Obr. 2: Vývojový diagram výpočtu optimalizovaného $V_Z = f(O_P, P_T)$ pro $P_T < 100\%$

Optimalizace je v optimalizačním modelu provedena mřížkovou metodou, viz kapitola 2.3. Vstupním parametrem X_0 je hodnota V_Z pro $P_T = 100\%$. Pro urychlení výpočtu byly při snižování parametru X voleny 4 kroky parametru (4 rozlišovací úrovně). Kritérium π , které je minimalizováno, se určí z aktuálně vypočtené zabezpečení podle trvání, od kterého se odečte příslušná zabezpečení, tedy 99,5%. Abychom zajistili alespoň právě zabezpečení 99,5%, tak kritérium π musí být ≥ 0 .

2.3 Optimalizace mřížkovou metodou

Pro hledání optimálního zásobního objemu nádrže 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. Kombinace hodnot parametrů tak vytváří pravidelnou mřížku v určeném prostoru. Každá kombinace možných parametrů určuje jednu variantu řešení. Výhodou mřížkové metody je to, že je systematicky prohledávaná celá oblast řešení, což umožňuje nalézt vždy globální extrém kritériální funkce. Na druhou stranu je nevýhodou velký počet řešených variant. Přesnost závisí na velikosti kroku změn parametrů. Za účelem snížení času výpočtu (počtu variant) se řešení může provádět nejprve s většími kroky parametrů (na hrubší rozlišovací úrovni), čímž se vymezení přibližně oblast hledaného řešení. Následně se na této vymezené oblasti provede řešení s menšími kroky parametrů (na jemnější rozlišovací úrovni).

2.4 Zavedení ztráty vody z nádrže do vodohospodářského řešení zásobního objemu

Simulační model vodohospodářského řešení zahrnuje ztráty vody výparem z vodní hladiny a průsakem tělesa hráze. K efektivnímu zavedení ztrát do řešení jsou ztrátové průtoky započítány pomocí opakované simulace, jinými slovy ve dvou krocích, při kterých je respektována počáteční podmínka řešení simulačního modelu v podobě plné nádrže. Nejprve je proveden výpočet zásobního objemu při požadovaném odtoku O_p bez uvažování ztrát vody z nádrže. Tím je nalezen maximální objem vody v nádrži vstupující do druhého kroku, který je tvořen z objemu stálého nadržení a zásobního.

Z maximálního objemu vody z prvního kroku se stává počáteční objem pro stanovení počáteční zatopené plochy a výšky vodní hladiny v nádrži. Tyto hodnoty jsou odečteny z batygrafických křivek. 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 hráze. Výsledná hodnota ztrátového odtoku vody 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.

2.5 Metody pro vyhodnocení

Vygenerované vstupní nejistoty na podkladech do vodohospodářského řešení nádrže poskytují spektra velikostí zásobních objemů, obdobně jako spektra odtoků vody z nádrže. Pro vhodnou prezentaci dosažených výsledků jsou výpočty statisticky vyhodnoceny. V této práci byly pro prezentaci výsledků použity střední hodnoty se směrodatnými odchylkami a kvantily na základě (Starý, 2005).

Střední hodnota je hodnota prvního obecného momentu značena jako $\mu(X)$ a patří k tzv. charakteristikám polohy. Metodou momentů je odhad střední hodnoty vyjádřen vztahem (5)

$$\mu(x) \approx \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

kde \bar{x} je střední hodnota, x_i jsou prvky náhodného výběru a n je počet prvků náhodného výběru.

Směrodatná odchylka vyjadřuje se jako odmocnina z disperze $D(X)$ neboli rozptylu. Směrodatná odchylka taktéž vychází z druhého centrálního momentu, značí se $\sigma(x)$ a je vyjádřena jako odmocnina z rozptylu. Metodou momentů je směrodatná odchylka vyjádřena vztahem (6)

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu(x))^2}{(n-1)}} \quad (6)$$

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 (7)

$$P(X < x_p) = F_x(x_p) = p \quad (7)$$

3 Praktická aplikace

Případová studie je aplikována na vodní nádrži Vír I, která leží v povodí řeky Svatky. Tato nádrž, jejímž správcem je Povodí Moravy, s. p., slouží převážně k akumulaci povrchové vody, k vodárenským a hydroenergetickým účelům, nalepšení průtoků pro závlahy pod Brnem, zajištění minimálních průtoků a k protipovodňové ochraně. Těleso hráze nádrže Vír I je betonové tížní složené z 26 bloků. Délka hráze v koruně hráze je 390 m. Ode dna výpustě po korunu hráze je celková výška 69 m. Šířka hráze v koruně je 9 m. Celkový objem nádrže V je 56,193 mil. m³. Z toho zásobní objem nádrže V_Z je 44,056 mil. m³. Uvedené parametry vychází z platného manipulačního řádu k vodnímu dílu (Manipulační řád VD Vír I, 2011). Jako podklad sloužila aktualizovaná historická časová řada průměrných měsíčních přítoků vody za posledních 66 let, průměrný roční výpar z vodní hladiny je 613 mm, aktuální údaje batygrafických křivek a hodnota průsaku betonové přehrady, která byla odvozena z empirického pozorování od podobných nádrží, konkrétně 0,15 l.s⁻¹ na 1 000 m².

Dle významnosti nádrže klasifikovaných v ČSN 75 2405 (ČSN 75 2405, 2017) nádrž spadá do kategorie A. Podle manipulačního řádu nádrže Vír (Manipulační řád VD Vír I, 2011) je pro tuto zabezpečení požadovaný odtok $O_P = 2,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nejprve bylo nutné pro danou zabezpečení najít vyhovující odběry (požadované odtoky) pro aktualizovanou řadu přítoků vody do nádrže.

4 Výsledky a diskuze

V Tab. 1 jsou nejprve deterministicky a bez vstupních nejistot spočítány zabezpečení podle trvání P_T včetně uvažování ztrát vody z nádrže pro uvedený požadovaný odtok O_P a stávající zásobní objem nádrže V_Z , tedy úloha typu $P_T = f(O_P, V_Z)$. Můžeme vidět, že díky aktualizované řadě přítoků vody do nádrže je zabezpečení nádrže P_T výrazně pod hranicí 99,5 %. Z tohoto důvodu byl O_P postupně snižován, abychom zabezpečili požadovanou zabezpečení P_T na zmiňovaných 99,5 %.

Tab. 1: Výsledky zabezpečení P_T pro měnící se vstupní O_P na aktualizovaných vstupních datech

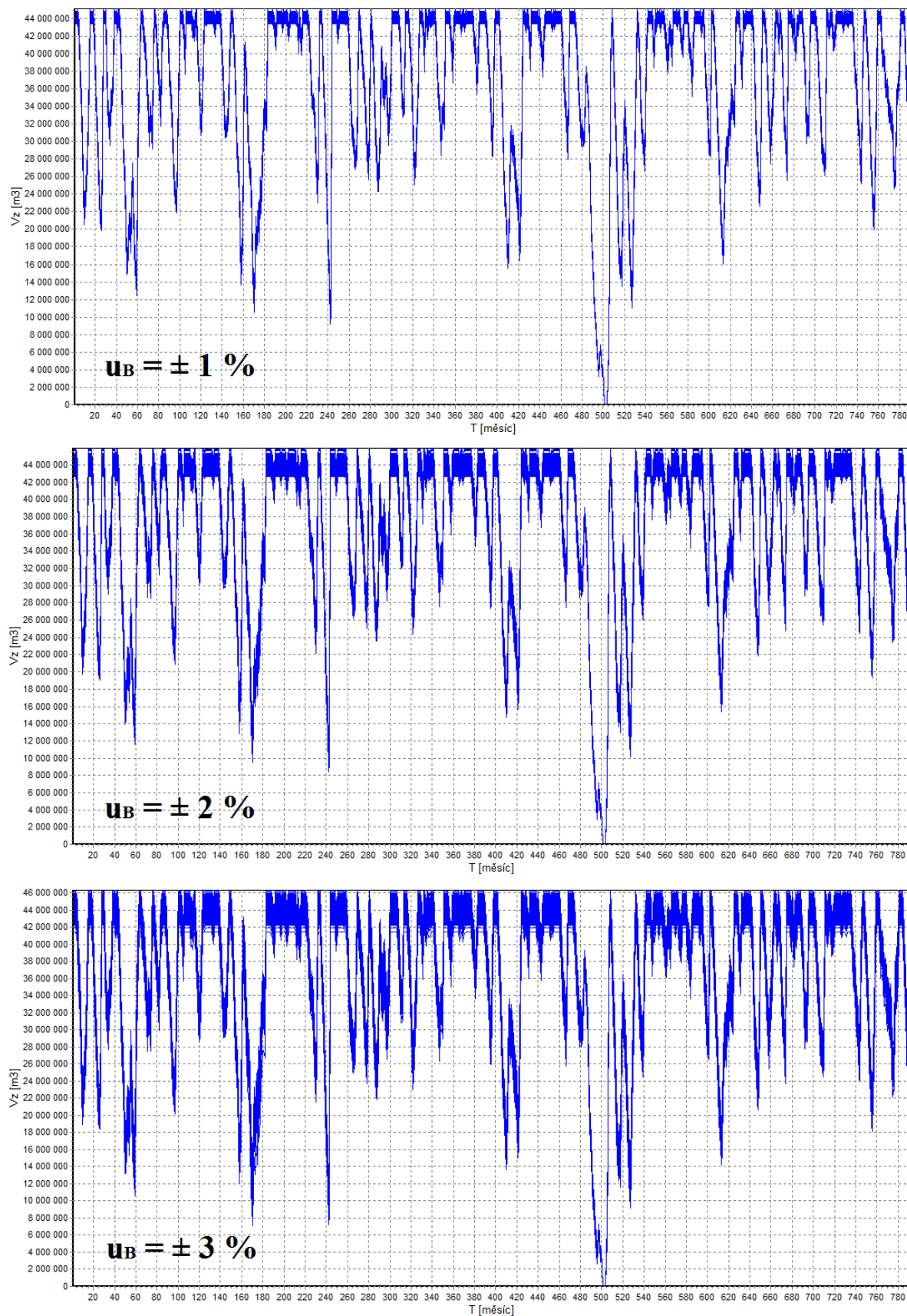
$P_T = f(O_P, V_Z)$		
O_P		P_T se ztrátami
2.5	>>>	98.7759
2.4		99.0283
2.3		99.5331
2.31		99.4036

V Tab. 2 je deterministicky a bez nejistot spočítán zásobní objem nádrže V_Z včetně ztrát vody z nádrže pro vypočtený požadovaný odtok O_P na základě aktualizovaných dat a pro zabezpečení $P_T \geq 99,5 \%$, tedy úloha typu $V_Z = f(O_P, P_T)$ pro $P_T = 99,5 \%$. Výsledný optimalizovaný zásobní objem nádrže V_Z by se měl blížit skutečnému objemu nádrže Vír. Na základě porovnání optimalizovaného V_Z se skutečným V_Z byl ještě měněn O_P . Z Tab.2 poté plyne hodnota O_P pro další výpočty.

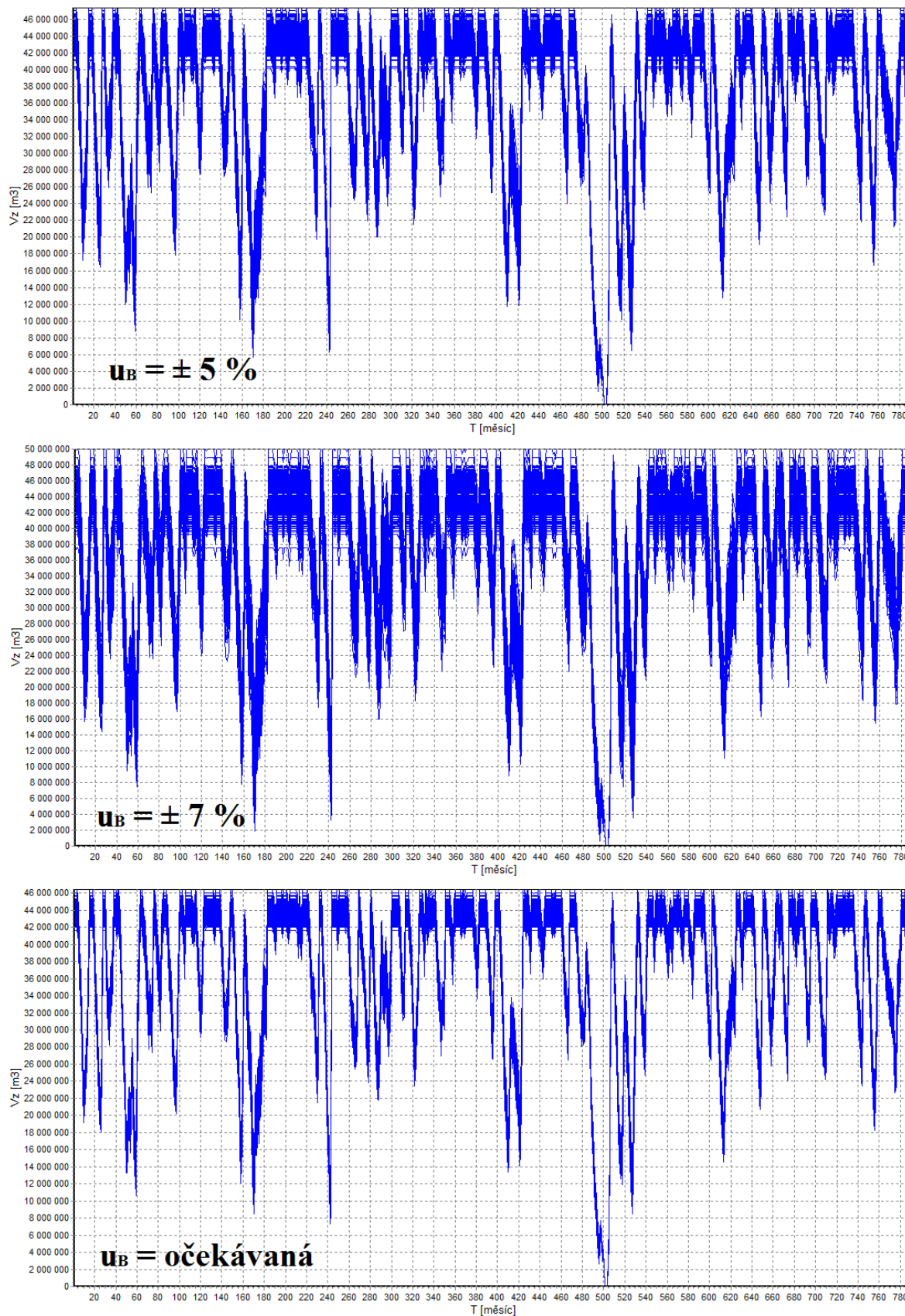
Tab. 2: Výsledky O_P pro měnící se vstupní O_P a $P_T \geq 99,5 \%$ na aktualizovaných vstupních datech

$V_Z = f(O_P, P_T)$ pro $P_T \geq 99,5\%$		
O_P		V_Z se ztrátami
2.3	>>>	43 657 000
2.31		44 371 700
2.305		44 069 000

Poté byly provedeny analýzy plnění a prázdnění nádrže Vír pro celou řadu přítoku vody do nádrže, jak je znázorněno na Obr. 3 a 4 pro vstupní konstantní nejistoty u_B na všech vstupech o velikostech $u_B = \text{od } \pm 1 \text{ do } \pm 7 \%$ a rozdílně dle očekávání. Konkrétně u_B na přítoku $\pm 3 \%$, batygrafických křivkách $\pm 5 \%$, na výparu $\pm 4 \%$ a průsaku hrází ± 3 pro 300 opakování.



Obr. 3: Průběhy plnění a prázdnění optimálního zásobního objemu V_Z nádrže Vír pro $u_B = \pm 1\%$, $\pm 2\%$ a $\pm 3\%$



Obr. 4: Průběhy plnění a prázdnění optimálního zásobního objemu V_Z nádrže Vír pro $u_B = \pm 5\%$, $\pm 7\%$ a očekávané

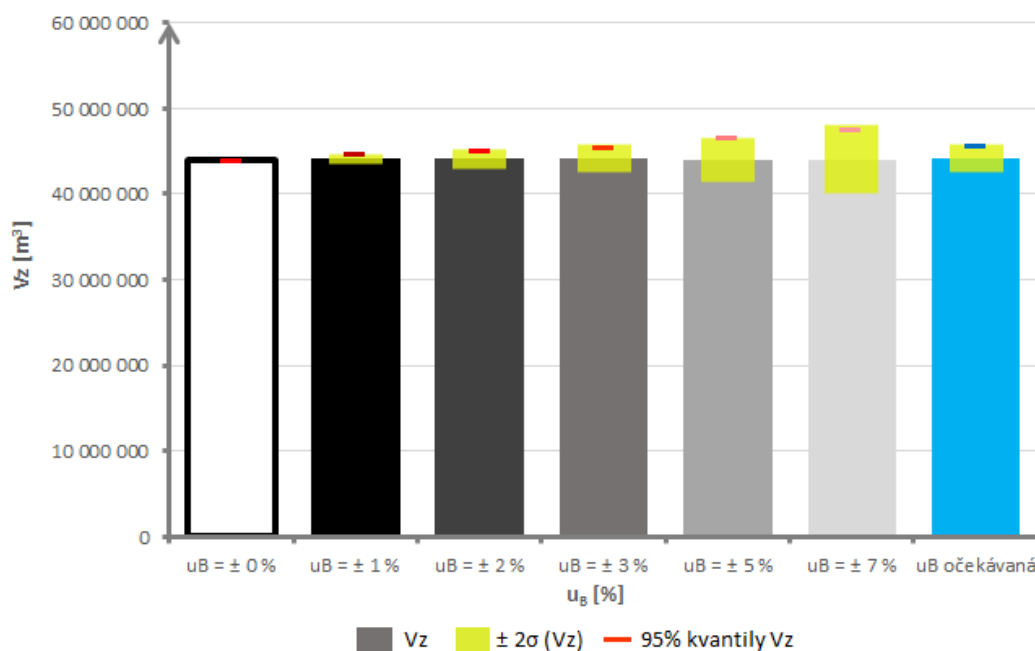
Na průběhách plnění a prázdnění nádrže vykreslených na Obr. 4 a 5 jde pěkně vidět nárůst rozptylu možných řešení s rostoucími vstupními nejistotami. Očekávané nastavení vstupních nejistot ovlivnilo průběhy plnění a prázdnění nádrže přibližně jako jednotné nastavení vstupních nejistot $u_B = \pm 3 \%$.

Pro lepší prezentaci byly výsledky statisticky vyhodnoceny. Střední hodnota μ pro každý náhodný soubor je považován za výsledek a směrodatná odchylka σ se považuje za standardní nejistotu týkající se konkrétního výsledku. Byla použita celková rozšířená nejistota typu U_a , která pokrývá 95 % výskytů a odpovídá $\mu \pm 2\sigma$. V Tab. 3 jsou vypočtené střední hodnoty optimalizovaných zásobních objemů včetně směrodatných odchylek. Dále jsou tyto výsledky vyhodnoceny formou přičtení horní a dolní meze koeficientem rozšíření $k = 2,0$. V posledním řádku je ještě uveden 95 % kvantil optimalizovaného zásobního objemu nádrže Vír.

Tab. 3: Výsledky analýzy optimálních zásobních objemů V_Z nádrže Vír

[m ³]	$u_B = \pm 0 \%$	$u_B = \pm 1 \%$	$u_B = \pm 2 \%$	$u_B = \pm 3 \%$	$u_B = \pm 5 \%$	$u_B = \pm 7 \%$	u_B očekávaná
$\mu (V_Z)$	44 069 000	44 098 652	44 121 960	44 154 544	44 010 168	44 078 572	44 148 504
$\pm 1\sigma (V_Z)$	0	272 673	568 784	813 790	1 287 298	1 979 462	810 862
$\pm 2\sigma (V_Z)$	0	545 346	1 137 567	1 627 581	2 574 596	3 958 923	1 621 724
V_Z dolní $2\sigma (V_Z)$	44 069 000	43 553 306	42 984 393	42 526 963	41 435 572	40 119 649	42 526 780
V_Z horní $2\sigma (V_Z)$	44 069 000	44 643 998	45 259 527	45 782 125	46 584 764	48 037 495	45 770 228
95% kvantil V_Z	44 069 000	44 673 900	45 114 800	45 496 700	46 569 400	47 560 700	45 628 200

Pro očekávané nejistoty vstupních dat je výsledný optimalizovaný zásobní objem nádrže 44,1485 mil. m³ \pm 1,6217 mil. m³ pro 95 % pravděpodobnostní pokrytí neboli výsledek leží v intervalu {42 526 780; 45 770 228}. Na stranu bezpečnou je žádoucí při stochastickém řešení v tomto případě uvažovat s výsledným horním intervalem, tedy s vyšším zásobním objemem. Vyjádření 95 % kvantilem je výsledný optimalizovaný objem 45,6282 mil. m³, v porovnání s horním kvantilem je tato hodnota V_Z o 0,31 % nižší. Relativně bezpečná, a tedy doporučená výsledná hodnota zásobního objemu Vír z této analýzy je 45,770 mil. m³. Aktualizovaná vstupní řada přítoků vody do nádrže způsobila snížení O_P a zavedení vstupních nejistot včetně uvažování ztrát vody z nádrže způsobilo navýšení stávajícího zásobního objemu nádrže Vír o téměř 3,9 %, přesně o 1,714 mil. m³.



Obr. 5: Sloupcový graf výsledných optimálních zásobních objemů $\mu(V_Z)$ nádrže Vír pro $\pm 2\sigma(V_Z)$ a 95 % kvantilů testovaných vstupních nejistot u_B

Na Obr. 5 jsou pro shrnutí provedených analýz vykresleny výsledné optimalizované V_Z formou sloupcového grafu pro všechny testované vstupní nejistoty. Žlutě jsou vyznačeny dolní a horní meze pro ± 2 směrodatné odchylky V_Z a červeně pak řešení 95 % kvantilů. V posledním modrém sloupci jsou výsledky V_Z s pravděpodobně očekávanými vstupními nejistotami. Dosažené výsledky v tomto sloupci byly použity pro bezpečný návrh zásobního objemu. Můžeme vidět, že střední hodnoty výsledných V_Z jsou těsně nad 44 mil. m³, což je obdobně jako u deterministického řešení. Získané výsledky potvrzují správnost generátoru náhodných čísel a vhodné použití metody Monte Carlo.

5 Závěr

Výsledky ukazují, že se testovaná vodní nádrž Vír nedokázala vypořádat s aktualizovanými přítoky vody do nádrže, protože aktualizovaná data způsobila vyšší poruchy v nedodávce vody. Jinými slovy, nádrž nemohla zaručit $P_T \geq 99,5$ %. Z tohoto důvodu musel být O_P nejprve snížen. Pak na tento O_P byl pro nádrž vypočítán optimální zásobní objem V_Z včetně vstupních nejistot a ztrát vody z nádrže, které způsobily potřebu navýšit stávající V_Z nádrže.

V kapitole 4. jsou doporučeny optimální hodnoty V_Z , které by se vyrovnaly s aktualizovanou řadou přítoku vody do nádrže a s uvažováním vstupních nejistot. Existuje zde prostor pro budoucí přezkoumání manipulačních řádů nádrží a také případná změna normy ČSN 75 2405 (ČSN 75 2405, 2017), která by měla brát v úvahu nejistoty vstupních dat. V takovém případě bude nutné vzít v úvahu výsledné hodnoty optimalizovaných zásobních hodnot V_Z pro horní mez výsledného intervalu nebo 95 % kvantil daných výsledků, a tím se přiklonit na bezpečnou stranu daného řešení.

Vyvinutý simulačně-optimalizační model nádrže a použité metody prokázaly svoji funkčnost při řešení optimálního zásobního objemu nádrže Vír I v podmínkách vstupních nejistot. Zdrojový kód programu je napsán obecně a software se dá rychle využít k testování i jiných nádrží. Nakonec je třeba konstatovat, že předložená analýza byla provedena pouze pro jednu nádrž, a tudíž výsledky v současné době nelze zobecnit. Je zde ale předpoklad, že pro jiné nádrže s různými vstupními nejistotami budou získané výsledky V_Z taktéž zatíženy a ovlivněny vstupními nejistotami. Je tedy jasné, že i další případové studie budou mít dopad na stávající V_Z se zavedením vstupních nejistot, což potvrzuje význam této problematiky. Navíc se tento software dá v návaznosti využít i s programem TRANSFORM_WEVE (Paseka, 2018) pro stanovení retenčního objemu nádrže v podmínkách nejistot. Potom by šel celý problém víceúčelových nádrží v podmínkách nejistot pojmout komplexněji. Otázkou spíše zůstává, jak velké vstupní nejistoty aplikovat do vodohospodářských řešení.

6 Reference

- [1] Beven, K.J. and Binley, A.M. 1992. *The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*, Hydrological Processes, 6, p.279–298.
- [2] Borland Delphi Enterprise, Version 7.0. [software] 2002. Borland Software Corporation. Dostupné z: <https://www.borland.com>
- [3] Campos, J.N.B., Souza Filho, F.A., and Lima, H.V.C., 2014. *Risks and uncertainties in reservoir yield in highly variable intermittent rivers: case of the Castanhão Reservoir in semi-arid Brazil*. Hydrological Sciences Journal, 59 (6), 1184–1195
- [4] Česká technická norma ČSN 75 2405 *Vodohospodářské řešení vodních nádrží*. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2017.
- [5] Dokument: *Expression of the Uncertainty in Measurement in Calibration* (Metodika vyjadřování nejistot při kalibracích) EA 4/02, 1997 (v ČR ALE-R2, 1997).
- [6] Dokument: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (Směrnice pro vyjadřování nejistoty při měření), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993.
- [7] Dokument: ISO GUM Suppl. 1 (DGUIDE 99998) *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) — Supplement 1: Numerical methods for the propagation of distributions*, ISO 2004.
- [8] Dokument: *Národní akční plán adaptace na změnu klimatu. Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2015 [cit. 2019-10-15]. Dostupné z:

- [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/\\$FILE/OEO-K-NAP_cely_20170127.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/$FILE/OEO-K-NAP_cely_20170127.pdf)
- [9] Dokument: *Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody*. Meziřesortní komise VODA-SUCHO [online]. 2015 [cit. 2019-10-15]. Dostupný z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/negativni_dopad_sucha_opatreni/\\$FILE/OOV-Sucho_20150806.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/negativni_dopad_sucha_opatreni/$FILE/OOV-Sucho_20150806.pdf)
- [10] Dokument: *Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR*. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2015 [cit. 2019-10-15]. Dostupný z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/\\$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf)
- [11] Dokument: TPM 0051–93 *Stanovení nejistot při měřeních, podnikové normy ÚNMZ – TPM*, Český metrologický institut, 1993.
- [12] Hashimoto, T., Stedinger, J. R., Loucks, D. P. *Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation*, Water Resources Research, Vol 18, NO 1, pages 14-20, February 1982.
- [13] Kašpárek, L. *Odhad objemu nádrží potřebného pro kompenzaci poklesu odtoku vlivem klimatické změny*. VÚV Praha, 2005, Praha.
- [14] Kiureghiana, A. D., Ditlevsen, O. *Aleatory or epistemic? Does it matter?* Structural Safety, Volume 31, Issue 2, 2009.
- [15] Klemeš, V. *Reliability estimates for a storage reservoir with seasonal input*. J. Hydrol. 7, 198-216, 1967.
- [16] Knight, F. H. *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston, Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, Boston 1921.
- [17] Kritskiy, S. N. & Menkel, M. F. *Water Management Computations* (in Russian). 1952, GIMIZ, Leningrad.
- [18] Kuria, F.W and Vogel, R.M. *A Global Reservoir Water Supply Yield Model With Uncertainty*, Environmental Research Letters, 9 095006 doi:10.1088/1748-9326/9/9/095006, 2014.
- [19] Manipulační řád pro vodní dílo Vír I na řece Svatce. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2011.
- [20] Marton, D.; Paseka, S. *Uncertainty Impact on Water Management Analysis of Open Water Reservoir*. Environments, 2017, roč. 4, č. 1.
- [21] 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.
- [22] Open Watcom FORTRAN 77. *Documentatiton: User's Guide*. [online]. Dostupné z: <http://www.openwatcom.org>
- [23] Paseka, S. *Stanovení retenčního prostoru nádrže v podmínkách nejistot*. In Zborník súťažných prác mladých odborníkov. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 2018. s. 1-12. ISBN: 978-80-88907-98-5.
- [24] Paseka, S.; Marton, D.; Menšík, P. *Uncertainties of reservoir storage capacity during low water period*. In SGEM Conference Proceedingsc. International multidisciplinary geoconference SGEM. Hydrology and Water Resources. 51 Alexander Malinov Blvd., 1712, Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2016. s. 789-796.
- [25] Starý, M. *Hydrologie (MODUL 03 Návodů do cvičení)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2005, 113 s.
- [26] Starý, M. *Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2006, 120 s.
- [27] Starý, M. *Zpráva o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu HDP VH 83/6 RÚ*, VUT FAST v Brně, Brno, 1984.
- [28] WECC doc. 19 – 1990: Western European Calibration Cooperation, 1990.
- [29] Zahradníček, P.; Trnka, M.; Brázdil, R. a kol. *The extreme drought episode of August 2011–May 2012 in the Czech Republic*. Int. J. Climatol, 2014.