

Stanovení retenčního prostoru 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 stanovení retenčního prostoru nádrže v podmínkách nejistot. Pro transformaci povodňových vln je vyvíjen software, který využívá modifikovanou grafickou Klemesovu metodu a rovněž umožňuje zavádět vstupní nejistoty metodou Monte Carlo na povodňových vlnách. Software opakovaně transformuje povodňové vlny a dopočítává kulminace výšek vody v nádrži, které slouží ke stanovení retenčního prostoru nádrže. Tento přístup je testován na stávající vodní nádrži Vír I.

Annotation:

The aim of the paper is to determine the flood storage capacity of the reservoir under conditions of uncertainty. The developed transformation software uses the modified Klemes graphical method as well as to introduce input uncertainties by the Monte Carlo method on flood waves. The software repeatedly transforms the flood waves and calculates the peak heights of the water in reservoir, which serves to determine the flood storage capacity. This approach is tested on the real water reservoir Vír I.

Klíčová slova

Retenční prostor nádrže, transformace povodňové vlny, nejistoty, metoda Monte Carlo, Klemesova metoda, vodní nádrž Vír I

Keywords

Flood storage capacity, flood wave transformation, uncertainty, Monte Carlo method, Klemes method, water reservoir Vír I

Abstrakt

Cílem příspěvku je stanovení retenčního prostoru nádrže v podmínkách nejistot. Tento prostor slouží k vypořádání se s povodněmi neboli k transformaci povodňové vlny. Vzhledem k současným výkyvům počasí v podobě častějších výskytů hydrologických extrémů se v posledních letech v České republice začínají řešit problémy se suchem. Nesmíme ale zapomínat ani na povodně. Vzpomeňme například na velkoplošné regionální povodně z let 1997, 2002, 2009, 2010 a 2013 nebo na stále častější výskyty přívalových povodní. Navíc, čím delší je období bez výskytu velkých regionálních povodní, tím se postupně zvyšuje pravděpodobnost, že tato událost nastane. Proto je žádoucí retenční prostory nádrží podrobněji prozkoumat a v případě potřeby navyšovat.

V tomto příspěvku je pro transformaci povodňových vln použit vyvíjený software, který využívá modifikovanou grafickou Klemesovu metodu a rovněž umožňuje zavádět vstupní nejistoty metodou Monte Carlo na povodňových vlnách použitím generátoru pseudonáhodných čísel. Tyto charakteristiky povodňových vln bývají většinou zatíženy výraznou chybou a 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 retenčních prostorů u stávajících nádrží za podmínek nejistot jsou žádané, důležité, ale i aktuální.

V článku jsou podrobně popsány principy obou zmíněných metod pro transformaci povodňových vln v podmínkách nejistot. Vyvíjený software psaný v jazyce Fortran 77 opakovaně transformuje povodňové vlny a dopočítává kulminační výšky vody v nádrži, které následně slouží ke stanovení retenčního prostoru zatíženým nejistotami povodňových situací. Tento přístup byl testován na vodní nádrži Vír I, která mimo jiné plní funkci protipovodňové ochrany. V praktické aplikaci byly testovány 2 varianty řízení nádrže při povodni. První z nich byla bez před vypouštění nádrže, kdy je hladina držena na úrovni plného zásobního objemu a druhá varianta uvažuje s před vypouštěním nádrže i pod úroveň maximálního zásobního objemu.

Výsledkem je, zda se vodní nádrž Vír I dokáže vypořádat s aktualizovanými povodněmi Q_{100} , Q_{1000} a $Q_{10.000}$ zatíženými různě velkými vstupními nejistotami. Vodní nádrž byla testována na neškodný odtok, na kapacitu retenčního prostoru nádrže a na kontrolní mezní hladinu. Byla provedena podrobná analýza a výsledky byly nejprve prezentovány pro deterministická řešení a následně pro stochastická řešení.

Z analýzy byl prokázán zřetelný vliv vstupních nejistot na výsledné hodnoty retenčního prostoru nádrže. Dále byly vidět rozdíly ve výsledcích podle rozdílné manipulaci se spodními výpustěmi. Proto je žádoucí nejistoty povodní do stanovení retenčního prostoru zavádět. Velmi důležité, ale zároveň obtížné je také vhodná manipulace se spodními výpustěmi na základě operativních předpovědí, protože před povodní jen těžko odhadnou a předpovědět, jaká povodeň samotnou nádrž nakonec zasáhne. A pokud bychom nádrž zbytečně výrazně před vypustili a poté by povodeň zásobní prostor ani nenaplnila, byla by především v době převládajících suchých období tato manipulace velmi nevhodná.

Výsledky ukázaly, že se konkrétní testovaná vodní nádrž Vír I dokáže relativně dobře vypořádat s možnými aktualizovanými povodňovými vlnami. Retenční prostor nádrže je pro deterministické řešení dobře navržen a při vhodných manipulaci se vodní nádrž dokáže vypořádat i s extrémními povodněmi včetně nižších vstupních nejistot na povodňových vlnách. Ale při opatrném před vypouštění a snaze držet nádrž co nejvíce naplněnou je i při nižších povodní zatížených vstupní nejistotou stávající retenční objem nevyhovující. Ve výsledcích je na závěr doporučeno konkrétní navýšení stávajícího retenčního prostoru, který by se vypořádal s tisíciletou povodní zatíženou vstupní nejistotou.

Vyvíjený program s použitými metodami prokázal svoji funkčnost pro danou problematiku. Navíc je zdrojový kód programu napsán obecně a software se dá rychle využít k testování retenčních prostorů v jiných nádržích nebo pro návrhy suchých nádrží v podmínkách nejistot. Psaní tohoto programu vzniká v návaznosti na budoucí propojení s programem UNCE RESERVOIR, který slouží ke stanovení zásobního objemu nádrže v podmínkách nejistot. Potom by se mohly víceúčelové nádrže v podmínkách nejistot pojmout komplexněji a řešit přímo konflikt mezi zásobním a retenčním prostorem nádrže. Oba tyto prostory v některých případech při provozování nádrží na území České republiky začínají být podhodnoceny. K tomu aktuální data v podmínkách nejistot nebo predikovaná data z modelů jen potvrzují vznikající problémy.

Stanovení retenčního prostoru nádrže v podmínkách nejistot

Stanislav Paseka

1 Úvod

Kombinace zásahu do vodního režimu naší krajiny, které bylo dominantní především v minulém století, s působením klimatické změny s sebou přináší negativní dopady v podobě extrémních povodní a výskytů dlouhotrvajícího období sucha. Následky těchto extrémů jsou pociťovány především v sektorech zemědělství nebo krajinného a vodního hospodářství v podobě poklesu vydatnosti vodních zdrojů a zanášením vodních toků a nádrží. V neposlední řadě mohou být způsobeny škody na majetku, ale i ohrožení životů obyvatel. V posledních letech se u nás začínají řešit problémy se suchem z důvodu dlouhotrvajících suchých období. Nesmíme ale zapomínat ani na povodně. Vzpomeňme například na velkoplošné regionální povodně z let 1997, 2002, 2009, 2010 a 2013 nebo na stále častější výskyty přívalových povodní. Navíc, čím delší je období bez výskytu velkých regionálních povodní, tím se postupně zvyšuje pravděpodobnost, že tato událost nastane.

Výše zmíněné jen potvrzuje, že Česká republika není připravena na změnu klimatického systému. K tomu vývoj 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 plně neprojevil odhad z klimatických modelů. Téma změny klimatu je v poslední době často zmiňovaná mezi odborníky, politiky a médii. Reakcí na toto téma začaly v ČR vznikat strategické dokumenty jako např. (Strategie MŽP, 2015), (Národní akční plán MŽP, 2015), (VODA-SUCHO, 2015). Ze zmíněných dokumentů a z aktuálních i predikovaných hrozeb v podobě povodní a sucha je nepochybně zřejmé, že se v brzké budoucnosti bez adaptačních opatření na našem území neobejdeme. Jedním z vhodných opatření je navyšovat nebo přerozdělovat stávající prostory vody v nádržích, resp. provádět revize manipulačních řádů nádrží novelizací normy (ČSN 75 2405, 2017). Jinými slovy se snažit navyšovat zásobní objemy nádrží za účelem eliminace dopadů sucha na toku pod nádrží a zkapacitnit technické objekty pro bezpečné převedení povodní, ale také navyšovat retenční objemy nádrží pro bezpečné převádění povodní a účinné transformace povodňových vln.

V současné praxi se při vodohospodářských výpočtech ať už s nejistotami změn klimatu nebo s nejistotami měření příliš neseškáváme. Samotné nejistoty jsou nanejvýš uvažovány velmi zjednodušeně například pomocí zavedení koeficientů. Zohlednění nejistot však může výsledky ovlivňovat, protože při řešení deterministickou metodou nastávají značné ztráty přesnosti na úkor jednoduchosti řešení. Proto výzkumy vedoucí ke zdokonalování návrhů u plánovaných nebo přerozdělení stávajících prostorů vody u nádrží v podmínkách nejistot jsou žádané, důležité, ale hlavně aktuální. Kromě toho charakteristiky povodňových režimů jsou zatíženy výraznou chybou. Podle třídy spolehlivosti hydrologických údajů se pohybují pravděpodobné chyby pro Q_1 až Q_{10} v rozmezí $\pm 15\%$ až $\pm 50\%$ a pro Q_{20} až Q_{100} dokonce $\pm 25\%$ až $\pm 60\%$ (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.

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 pak patří do skupiny nejistot tzv. aleatoric uncertainty. Do běžné praxe kalibračních laboratoří se nejistoty měření 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 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. Z výše zmíněných dokumentů byly sestaveny mezinárodní směrnice a normové předpisy, které jsou pro EU včetně ČR závazné. Český přepis má název Stanovení nejistot při měřeních (TPM 0051, 1993). Aplikace nejistot v hydrologii byly popsány metodou GLUE (Beven and Binley, 1992). Teorií 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), (Kuria 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. V pracích (Whitehead a kol., 2009), (Li a kol., 2016), (Chen a kol., 2018) byly naopak nejistoty s využitím metody Monte Carlo aplikovány na nejisté povodňové přítoky s vlivem na možná rizika nádrží.

Retenční prostor nádrže obecně vychází z velikosti a samotné transformace povodňové vlny. Pro transformaci povodňové vlny v nádrži lze využít několik metod, které většinou vychází ze simulace provozu nádrže. Známé jsou např. metody Runge – Kutta 2. řádu, metody Runge – Kutta 4. řádu, grafická metoda Klemešova a další numerické metody, ale lze využít i matematického modelování pomocí dostupných softwarů.

Cílem příspěvku je stanovit retenční prostor nádrže v podmínkách nejistot stanovení povodňových vln. K tomu poslouží vyvíjený software, který pro transformaci povodňových vln využívá modifikovanou grafickou Klemešovu metodu a zavádí vstupní nejistoty metodou Monte Carlo na povodňových vlnách. Z opakovaných transformací povodňových vln a kulminačních výšek vody v nádrži lze stanovit retenční prostor nádrže. Případová studie je provedena na vodní nádrži Vír I, jejíž funkcí je i protipovodňová ochrana.

2 Metody

2.1 Klemešova metoda

Pro výpočty byl použit vyvíjený program psaný v jazyce Fortran 77, ve kterém je pro transformaci povodňových vln zvolena modifikovaná grafická Klemešova metoda. Jinými slovy byla zaprogramována (zmatematizována) grafická Klemešova metoda (Klemeš, 1960). 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.

$$Q\Delta t - O\Delta t = \Delta V \quad (1)$$

Mimo jiné jsou zaváděny následující zjednodušení, přesto že se hodnoty přítoku a odtoku v průběhu děje za časový interval Δt spojitě mění, považujeme je za konstantní neboli rovné průměrným hodnotám přítoku a odtoku v daném intervalu Δt . Metoda realizuje zjednodušení tím, že plynulé křivky přítoku a odtoku nahrazuje stupňovitými čarami, jejichž jednotlivé stupně jsou průsečíky střednic časových intervalů. Přítok i odtok v každém intervalu je tedy reprezentován jedinou okamžitou hodnotou. Samotná Klemešova metoda vstupuje do výpočtu až tehdy, kdy je překročen bezpečnostní přeliv. Pokud je voda pod úroveň bezpečnostního přelivu, tak program pouze bilancuje objem přítoku a odtoku vody k předchozímu objemu nádrže.

Hlavními podklady pro grafickou Klemešovu metodu jsou hydrogram povodně, informace o spodních výpustích, bezpečnostním přelivu a křivek zatopených objemů pro zkonstruování tzv. transformační čáry, která vyjadřuje celkový odtok vody z nádrže v závislosti na jejím plnění. Transformační čára tedy charakterizuje potenciální odtok vody z nádrže a je funkcí objemu. Tato křivka je zároveň přizpůsobena stupňovitému průběhu čáry odtoků pomocí korespondujících bodů. Pro její určení je

kapacita spodních výpustí vypočtena podle rovnice (2) (Jandora a Šulc, 2006) a kapacita bezpečnostního přelivu podle rovnice (3) (Jandora a Šulc, 2006).

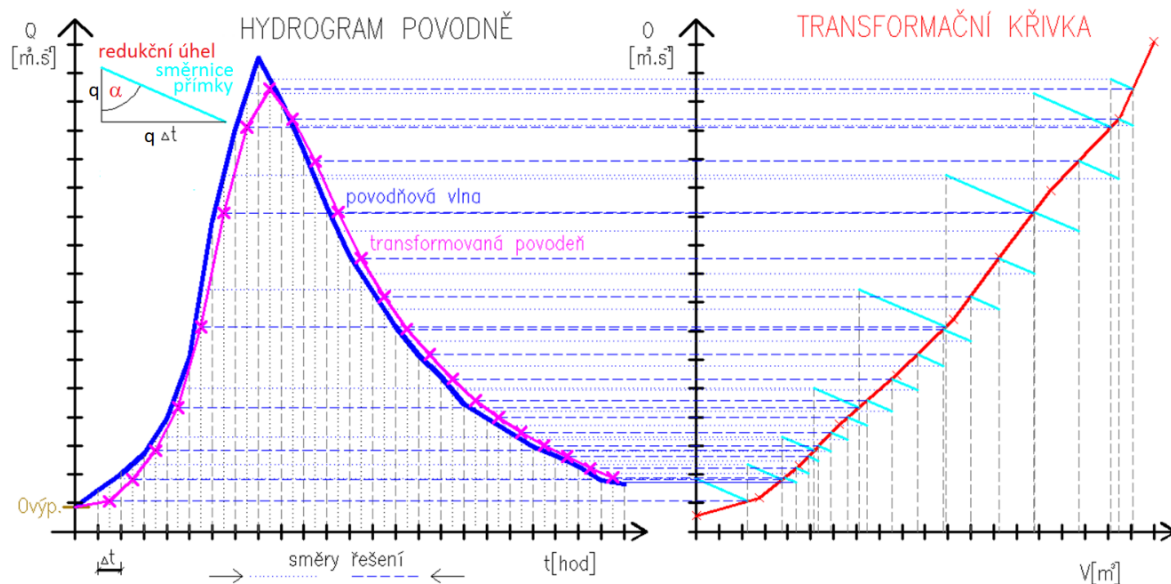
$$O_v = \mu S \sqrt{2 g h_i} \quad (2)$$

$$Q = m b \sqrt{2 g H_i}^{3/2} \quad (3)$$

kde μ je součinitel odtoku [-], S plocha výtokového otvoru (spodních výpustí) [m^2], g je tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$], h_i je výška vody v nádrži [m], H_i je výška vody nad bezpečnostním přelivem [m], m je součinitel přepadu [-] a b je šířka bezpečnostního přelivu [m].

Dále je nutné pro transformaci zkonstruovat tzv. redukční úhel, který vychází z velikosti průtoku a časového intervalu a charakterizuje úměrnost (ekvivalenci mezi vytvořenou plochou obklopenou přítokem a odtokem v daném časovém intervalu a délkou vodorovné úsečky transformační křivky daného časového intervalu). Tento úhel se zkonstruuje tak, že k libovolnému průtoku q vneseným na svislici je přiřazena vodorovná osa o velikosti průtoku q vynásobeným časovým intervalem Δt . Spojením těchto koncových bodů je získána směrnice přímky svírající redukční úhel.

Grafická konstrukce Klemešovou metodou probíhá postupně po jednotlivých časových intervalech nejprve na vzestupné a poté na sestupné větvi povodňové vlny přes zmíněnou transformační křivku a redukční úhel. Konkrétně při překročení bezpečnostního přelivu je vedena pro daný přítok vody do nádrže z nulové svislice transformační křivky směrnice přímky svírající redukční úhel 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 a hledáním průsečíku opět s transformační křivkou. Tento průsečík pak charakterizuje transformovaný odtok vody z nádrže v daném časovém kroku. Popsaný postup Klemešovy metody je charakterizován na Obr. 1.

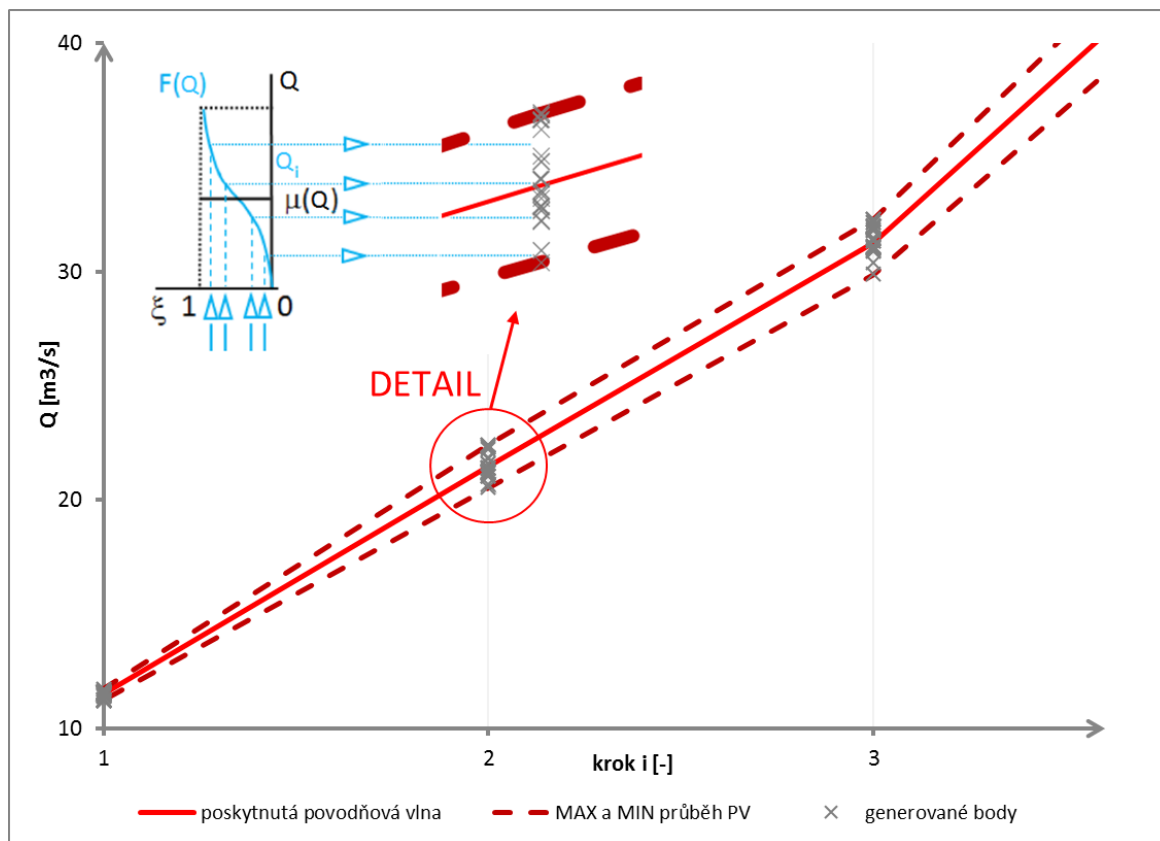


Obr. 1: Princip konstrukce transformace povodňové vlny Klemešovou metodou

2.2 Metoda Monte Carlo

Vyvíjený program zatím umožňuje aplikovat vstupní nejistotu na přítoku vody do nádrže neboli na hydrogramech povodně. Obecný postup generování nejistotou pomocí metody Monte Carlo je následovný. V práci je metoda Monte Carlo definována použitím generátoru pseudonáhodných čísel a příslušných distribučních křivek $F(Q)$, pomocí nichž jsou ke vstupní hodnotě Q_i generovány náhodné polohy hodnot NQ_i v intervalu zadané nejistoty. Veličina Q_i je považována za náhodnou a nezávislou

na hodnotě Q_{i-1} a Q_{i+1} . Uvedené předpoklady umožní zavedení normálního rozdělení pravděpodobnosti $N(\mu(Q), \sigma(Q))$. Potom obecná vstupní veličina Q_i je považována za střední hodnotu $\mu(Q)$ a velikost nejistoty je definována jako směrodatná odchylka $\sigma(Q)$. Následně je ke každé střední hodnotě $\mu(Q_i)$ vytvořena distribuční funkce $F_i(Q)$ normálního normovaného rozdělení pravděpodobnosti. Za použití generátoru pseudonáhodných čísel, který generuje náhodná čísla z intervalu $\zeta \in \langle 0,1 \rangle$, je dopočítána hodnota náhodné veličiny NQ_i . Obecný princip generování náhodných poloh vstupních parametrů je zobrazen na Obr. 2. Zavedením nejistot do vstupní povodňové vlny bude následně i transformovaná povodeň zatížena nejistotami. Stejně tak bude zatížen nejistotami i výsledný retenční prostor nádrže.



Obr. 2: Schéma obecného principu generování nejistot vstupních prvků metodou Monte Carlo

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 protipovodňové ochraně, k akumulaci povrchové vody, k vodárenským a hydroenergetickým účelům, nalepšení průtoků pro závlahy pod Brnem a zajištění minimálních průtoků. 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. Nádrž disponuje dvěma spodními výpustěmi o DN 1800 mm a jednou asanační výpustí DN 200 mm. Při maximální hladině je průtok spodními výpustěmi maximálně $2 \times 40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Bezpečnostní přeliv na kótě 467.05 je konstrukce korunové nehrazené o celkové délce 60,5 m s kapacitou $180,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na úrovni retenčního prostoru neovladatelného, tedy hladině ve výšce 468,45 m n. m. Neškodný průtok Q_{NE} je $55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Celkový objem nádrže V je 56,193 mil. m^3 . Z toho ochranný objem nádrže V_R je 8.337 mil. m^3 . Uvedené parametry vychází z platného manipulačního řádu k vodnímu dílu (Manipulační řád VD Vír I, 2011).

Pro výpočet byly použity aktualizované povodňové vlny podnikem ČHMÚ z roku 2008. Pro testování byly použity konkrétně Q_{100} , Q_{1000} a Q_{10000} dle klasické regrese bez rozlišení sezonality. Dále byla

určena tzv. kontrolní maximální hladina KMH v nádrži dle (ČSN 75 2935, 2014) a (Manipulační řád VD Vír I, 2011). Tato hladina je na úrovni koruny hráze, tedy 470,45 m n.m. Startovací hladina byla na úrovni maximálního zásobního objemu, tedy 464.45 m n.m.

Byly provedeny 2 varianty řízení nádrže při povodni. Varianta (A) bez před vypouštění nádrže a varianta (B) s před vypouštěním nádrže. Ve variantě (A) je držena hladina na úrovni plného zásobního objemu, jakmile je tato úroveň hladiny překročena, spodní výpusti jsou otevřeny na neškodný odtok. Po poklesu hladiny pod úroveň plného zásobního objemu jsou výpusti opět zavřeny v jednom časovém kroku, který má délku Δt 6 hod. Při překročení bezpečnostního přelivu jsou spodní výpusti zavírány a po opadnutí povodně je hladina opět držena na úrovni plného zásobního objemu. Naopak při variantě (B) je povoleno před vypouštěním i pod úroveň maximálního zásobního objemu. Spodní výpusti jsou zavírány až při překročení bezpečnostního přelivu a po opadnutí povodně jsou opět spodní výpustě otevřeny. Aby nebyla překročena hodnota neškodného odtoku při otevření spodních výpustí, jsou otevírány konkrétně obě přibližně z 65 % nebo jedna plně otevřena a druhá otevřena přibližně z 30 %.

Tyto dvě varianty řízení nádrže byly aplikovány na Q_{100} , Q_{1000} a $Q_{10.000}$ nejprve deterministicky a poté stochasticky s tzv. vstupní standardní nejistotou typu B $u_B = 5\%$ a 10% na povodni. Počet opakování generace náhodných vstupních parametrů byl vždy volen 300 opakování. Pro vhodnou prezentaci výsledků byly vypočtené hodnoty transformací a dosažených výšek vody statisticky vyhodnoceny pomocí středních hodnot a směrodatných odchylek. Výsledky jsou prezentovány jako rozšířená standardní nejistota U přenásobena koeficientem 2, tedy s pravděpodobností pokrytí cca 95 %. Tento koeficient je pro praxi nevhodnější. Možný výsledek tedy leží v rozpětí střední hodnoty ± 2 krát směrodatná odchylka (Starý, 2005).

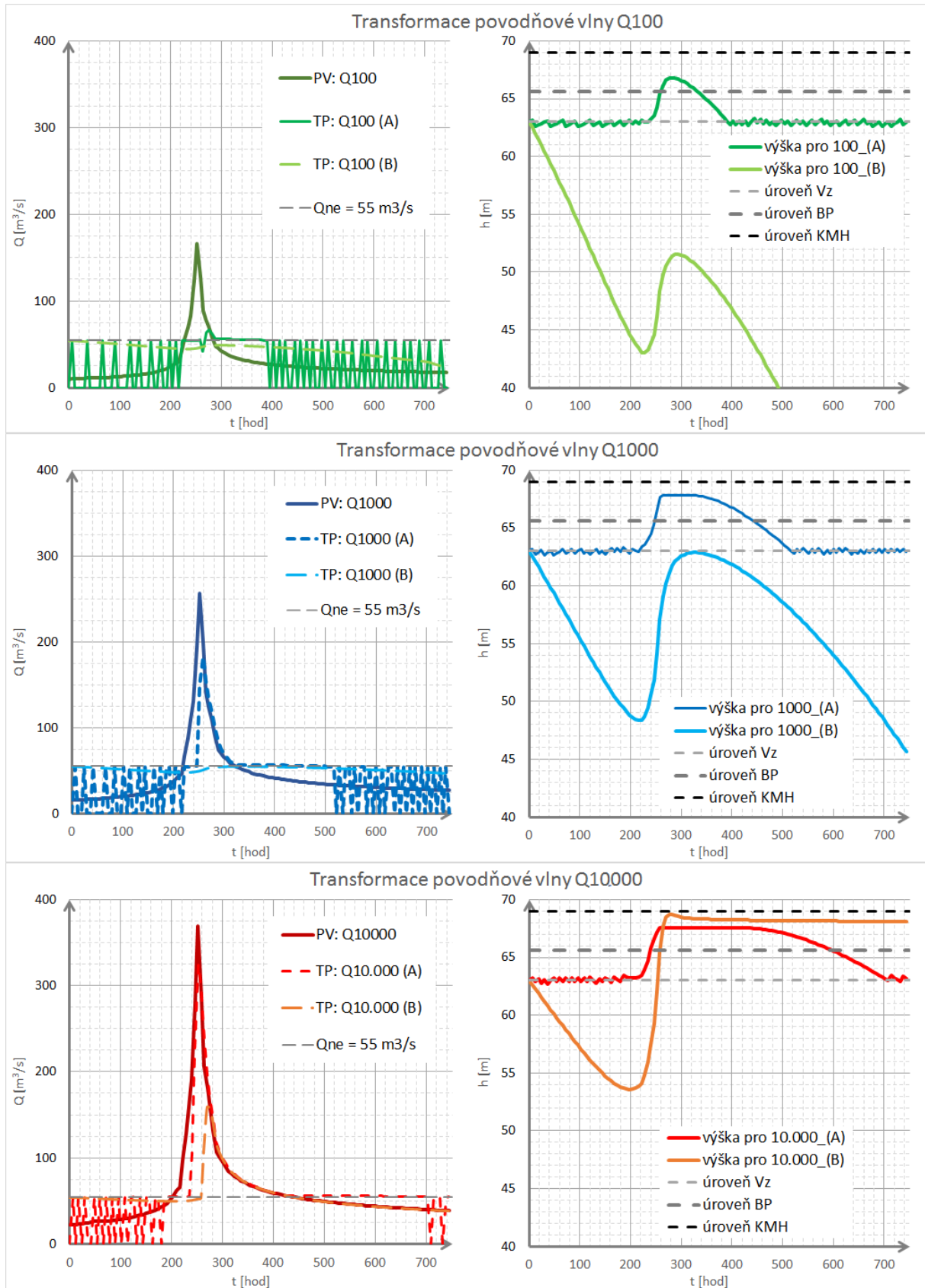
4 Výsledky a diskuze

Nejprve jsou na Obr. 3 vykresleny jednotlivé transformace Q_{100} , Q_{1000} a $Q_{10.000}$ z výpočtu deterministického řešení. V levé části vidíme průtoky povodni a jejich transformace a v pravé části jsou dosažené výšky vody v nádrži při daných transformacích.

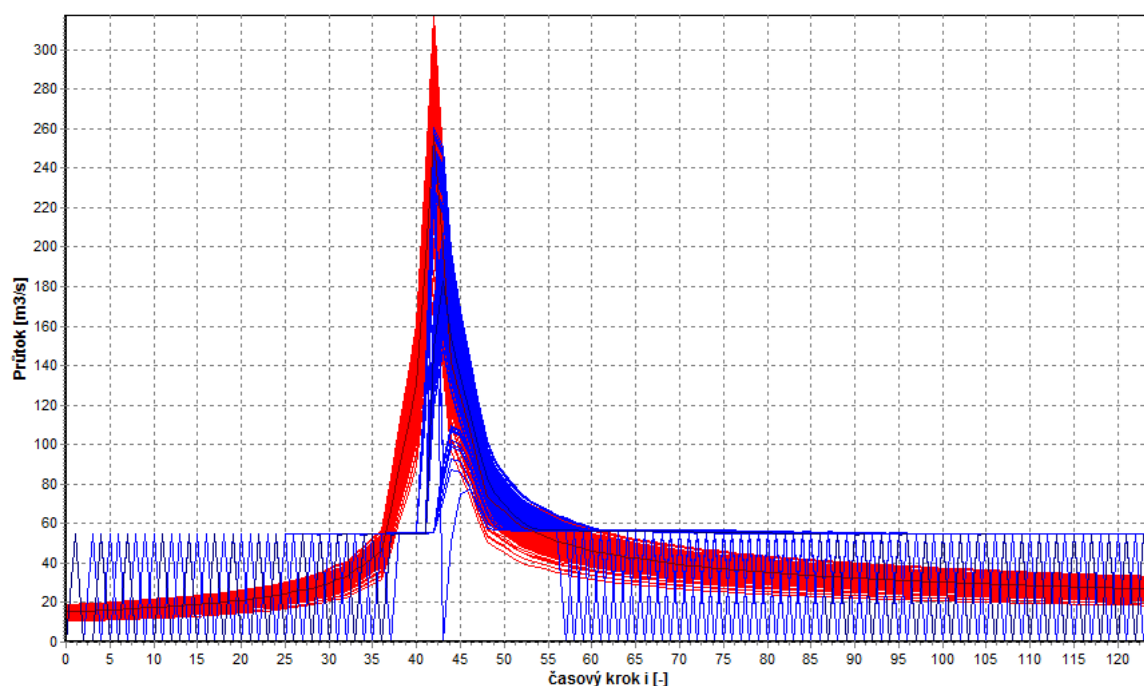
Na následujících obrázcích je vykreslen stochastický průběh transformací z vyvíjeného softwaru. Můžeme vidět 300 průběhů transformací povodňových vln a následně 300 průběhů výšek vody v nádrži. Jsou zobrazeny průběhy pro řízení nádrže varianty (A) pro povodňovou vlnu Q_{1000} se vstupní standardní nejistotou povodně 10 % a poté varianta (B) pro povodňovou vlnu $Q_{10.000}$ se vstupní standardní nejistotou povodně 5 %. V těchto obrázcích jsou červeně zobrazeny opakované průběhy přítoků (povodňových vln) do nádrže, modře průběhy odtoků (transformovaných vln) z nádrže a zeleně průběhy plnění a prázdnění (dosažené výšky vody) nádrže.

Na Obr. 3 při deterministickém řešení můžeme pozorovat, jak rozdílnou manipulací se spodními výpustěmi můžeme dosáhnout výrazných rozdílů ve výsledcích. Varianty (A) a (B) jsou spíše na teoretické úrovni, protože např. při stoleté povodni před samotným nástupem kulminace povodně je přibližně už 25 % zásobního objemu nádrže před vypuštěno a po opadnutí povodně je nádrž téměř prázdná, což je z vodohospodářského hlediska v praxi nepřijatelné. Proto je velmi důležitá, ale zároveň obtížná vhodná manipulace se spodními výpustěmi na základě operativních předpovědí. Pokud bychom nádrž takto výrazně před vypustili (např. na zmíněných 75 % zásobního objemu) a povodeň by nám pak samotný zásobní prostor ani nenaplnila, byla by především v době převládajících suchých období tato manipulace velmi nevhodná.

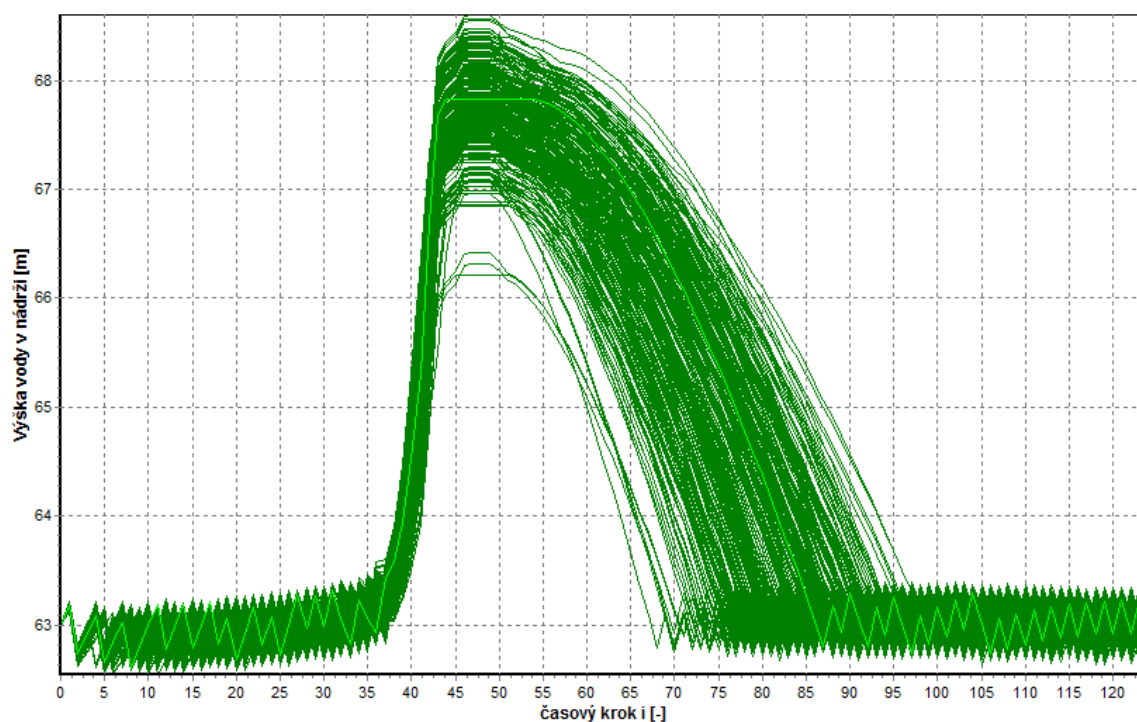
Na Obr. 3 pro transformaci povodňové vlny $Q_{10.000}$ je hezky vidět, kdy při variantě (A) dochází k výrazně horší transformaci, ale zároveň voda v nádrži nevystoupá tak vysoko, jako ve variantě (B). Ve variantě (B) naopak voda téměř atakuje KMH, ale zároveň je využit větší objem v zátopě a logicky dochází k lepší transformaci povodňové vlny.



Obr. 3: Výsledky deterministického řešení průběhu transformací a průběhu výšek vody v nádrži pro velikosti povodňových vln Q_{100} , Q_{1000} a $Q_{10.000}$ a pro 2 varianty řízení nádrže



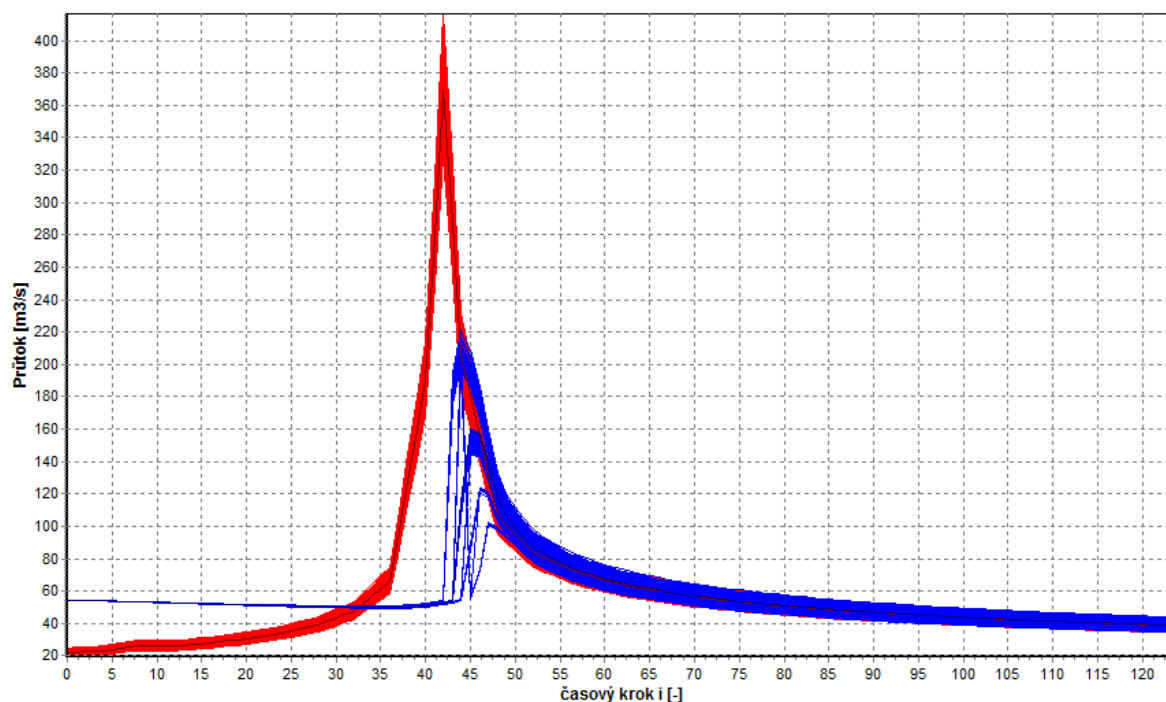
Obr. 4: Výsledky stochastického řešení průběhu transformací pro 300 generovaných povodňových vln Q_{1000} se vstupní nejistotou 10 % pro řízení nádrže varianty (A)



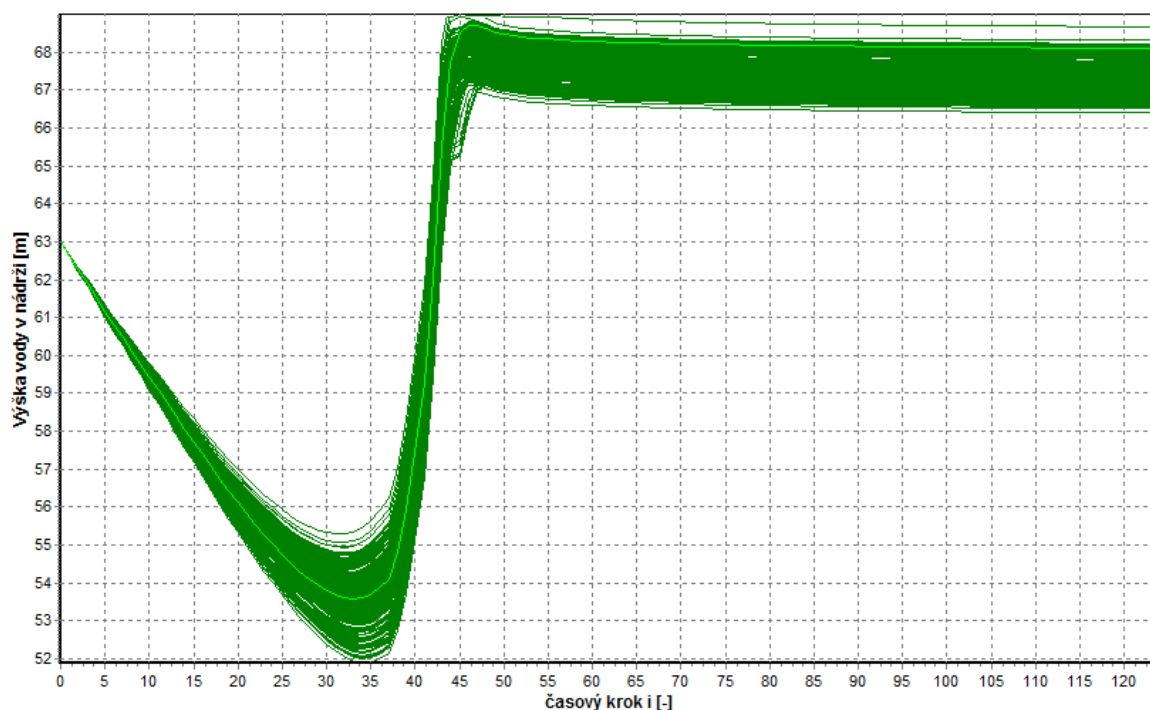
Obr. 5: Výsledky stochastického řešení průběhu výšek vody v nádrži pro 300 generovaných povodňových vln Q_{1000} se vstupní nejistotou 10 % pro řízení nádrže varianty (A)

Červeně jsou na Obr. 4 a 6 vykresleny generované povodňové vlny a modře pak transformované povodně. Tmavšími odstíny je pak znázorněn deterministický průběh. Obdobně na Obr. 5 a 6 jsou

zeleně vykresleny dosažené průběhu výšek vody v nádrži pro 300 opakování a světle zeleně je znázorněn deterministický průběh.



Obr. 6: Výsledky stochastického řešení průběhu transformací pro 300 generovaných povodňových vln $Q_{10.000}$ se vstupní nejistotou 5 % pro řízení nádrže varianty (B)



Obr. 7: Výsledky stochastického řešení průběhu výšek vody v nádrži pro 300 generovaných povodňových vln $Q_{10.000}$ se vstupní nejistotou 5 % pro řízení nádrže varianty (B)

Z obrázku výše je vidět zřetelný vliv vstupních nejistot na konečné výsledky. Dále je pozorovatelný větší rozptyl výsledků na Obr. 4 a 5, kde byla aplikována vyšší vstupní nejistota. Kompletní výsledky provedené analýzy jsou vyhodnoceny v Tab. 1 a 2.

Na Obr. 4 se mohou zdát výrazné skoky způsobeny manipulacemi spodními výpustěmi před a po povodni jako nesmyslné, ale jak bylo řečeno, varianty řízení nádrže jsou spíše teoretické. Navíc by tato manipulace mohla být z technického a provozního hlediska dle typu spodních výpustí možná, protože je časový krok 6 hodin. Pokud by ale provozovatel nádrže např. podle manipulačního řádu držel hladinu na úrovni plného zásobního objemu, tak by pravděpodobně manipuloval plynuleji dle přítoku a zkušeností. Na výslednou transformaci tyto manipulace před a po povodni vliv nemají, protože při přítoku větším, než neškodném bude hladina vody stále přibližně na hladině plného zásobního objemu.

Tab. 1: Výsledky kulminací průtoků [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] testovaných transformovaných povodní

$Q_{\text{kulm.}} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$	Varianta (A)			Varianta (B)		
	bez nejistoty	s $u_B = 5 \%$	s $u_B = 10 \%$	bez nejistoty	s $u_B = 5 \%$	s $u_B = 10 \%$
Q_N						
Q_{100}	66.72	78.3 ± 16.7	79.1 ± 26.6	54.50	54.5 ± 0.0	54.5 ± 0.0
$Q_{1.000}$	182.97	207.4 ± 39.5	188.1 ± 63.8	54.50	54.8 ± 1.5	58.0 ± 15.9
$Q_{10.000}$	324.67	327.1 ± 36.6	-	158.98	177.5 ± 53.1	-

V Tab. 1 můžeme vidět výsledky kulminací testovaných povodní s různými vstupními nejistotami a dvěma variantami řízení. Z výsledků je patrné, že pro variantu (A) je vždy překročen neškodný odtok a ve variantě (B) s před vypouštěním není překročen neškodný odtok pro stoletou povodeň, ale pro tisíciletou povodeň pouze bez vstupních nejistot. Červeně jsou zobrazeny výsledky, kde je překročen neškodný odtok a červená proškrtnutá buňka symbolizuje, že výpočty transformací nebyly spočteny z důvodu překročení KMH.

Pro Q_{100} ve variantě (B) můžeme vidět, že rozšířená směrodatná odchylka dosahuje nulových hodnot. To je způsobeno tím, že transformace povodňové vlny pro všechna opakování byla provedena pouze spodními výpustěmi. Obdobně jako stejné dosažené hodnoty $54.50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ve variantě (B) jsou způsobeny, že startovací hladina byla ve výšce 63 m a pro tuto úroveň je kapacita spodních výpustí zmiňovaných $54.50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a v dalších krocích díky před vypouštěním nebyla tato výška překročena.

Poněkud zarážející se můžou zdát výsledné hodnoty středních nejistot dané povodně, jako např. pro Q_{1000} a variantu (A), kdy deterministické řešení má maximální kulminaci necelých $183 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, tak se vstupní nejistotou 5 % je pak střední hodnota kulminací přes $207 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Tento rozdíl je pravděpodobně důsledkem velikosti zvoleného časového kroku, který v tomto případě byl 6 hodin. Poté, kdy jednotlivé průběhy překročily bezpečnostní přeliv v jiném časovém kroku, byl hned rozdíl 6 hodin, což je značný rozdíl v objemu povodně a tudíž jednotlivé průběhy „přeskakovaly“ v časových krocích a způsobily skoky v kulminacích. Tento jev je patrný na Obr. 4 a 6, kde jsou krásně vidět na sestupných větvích povodní vytvořené „svazky“ transformací. Kdyby byl časový krok menší, tak by průběhy transformací byly plynulejší, a tudíž by byla i výsledná střední hodnota blíže deterministickému řešení.

Časový krok vycházel jednak z poskytnutých dat (délka kroku 1 den) a z celkové délky povodně (1 měsíc). Teoretické vlny tedy byly zjemněny z délky kroku 24 hodin na 6 hodin z důvodu přesnosti a také kvůli problému v odstavci výše. Na druhou stranu se tím prodloužila doba výpočtu. Navíc, při řízení vodní nádrže je uvažováno s manipulací spodními výpustěmi pouze v jednom časovém kroku, a proto tento časový interval musí být vhodně nastaven.

Tab. 2: Výsledky kulminací výšek vody v nádrži [m] testovaných transformovaných povodní

$H_{\text{kulm. [m]}}$	Varianta (A)			Varianta (B)		
	bez nejistoty	$s u_B = 5 \%$	$s u_B = 10 \%$	bez nejistoty	$s u_B = 5 \%$	$s u_B = 10 \%$
Q_N						
Q_{100}	66.76	66.83 ± 0.53	66.95 ± 0.82	63.00	63.0 ± 0.00	63.0 ± 0.00
$Q_{1.000}$	67.82	67.50 ± 0.53	67.72 ± 0.80	63.00	63.5 ± 1.37	63.92 ± 2.63
$Q_{10.000}$	67.54	67.90 ± 0.55	X	68.71	68.02 ± 0.91	X

V Tab. 2 můžeme vidět výsledky kulminací výšek vody v nádrži s různými vstupními nejistotami a dvěma variantami řízení. Červeně jsou zobrazeny výsledky, kde byl překročen retenční prostor nádrže a červeným křížkem jsou označeny buňky, kde byla překročena KMH.

Podle Tab. 2 aktuální retenční objem vyhoví pouze na Q_{100} ve variantě (A) bez vstupních nejistot a ve variantě (B) pro Q_{100} a Q_{1000} včetně nejistot. Naopak nádrž ve většině případů vyhoví na KMH, pouze při vstupní nejistotě 10 % teoretické povodňové vlny $Q_{10.000}$ nádrž nevyhoví na KMH, v tomto případě by nastalo přelití samotné hráze.

Jak bylo řečeno, ochranný objem nádrže V_R je 8.337 mil. m³ na úrovni 468.45 m n.m. Pokud bychom chtěli navrhnout retenční prostor nádrže např. na Q_{1000} se vstupní nejistotou povodňové vlny 5 %, bez před vypouštění nádrže jako ve variantě (A) a zároveň nezasahovali do velikosti zásobního prostoru, pak by podle Tab. 2 byl retenční prostor na úrovni 67.50 ± 0.53, tedy v rozmezí hodnot 66.97 m až 68.03 m. Na stranu bezpečnou je žádoucí přiklonit se na horní mez 68.03 m. Tato hodnota by odpovídala 10.775 mil. m³, tedy navýšení retenčního prostoru o 2.438 mil. m³.

Na této nádrži by hladina ochranného prostoru reálně navýšit šla aktualizací manipulačního řádu nádrže, ale na jiných typech hrází, jako jsou třeba sypané, by mohl vznikat problém s navyšování hladiny ke koruně hráze. V těchto případech by tento problém mohl být vyřešen zásahem do zásobního objemu nádrže, což je hlavně v dnešní době, kdy zaznamenáváme poklesy hladin v nádržích, méně vhodné. Proto v budoucnu nastane ještě větší problém, jak se vypořádat z hydrologickými extrémů u víceúčelových nádrží. Jinými slovy, jak zabezpečit odtok vody z nádrže dostatečně kapacitním zásobním objemem v podmínkách nejistot a zároveň jak zvládat a eliminovat extrémní povodně. V současné době ale většina nádrží v České republice spíše na vyšší průtoky čeká, aby se vyřešil problém s nízkými stavy vody v nádrži. V tomto přetrvávajícím suchém období, kdy je nádrž pod normálem, by se s větší povodní bez problému vypořádala i testovaná nádrž.

5 Závěr

Výsledky ukazují, že se testovaná vodní nádrž Vír I dokáže relativně dobře vypořádat s možnými aktualizovanými povodňovými vlnami. Retenční prostor nádrže je pro deterministické řešení dobře navržen a při vhodných manipulacích se vodní nádrž vypořádá i s extrémními povodněmi včetně nižších vstupních nejistot na povodňových vlnách. Při snaze držet nádrž co nejvíce naplněnou bez před vypouštění je i při nižších povodních se zavedením vstupních nejistot stávající retenční objem nevyhovující a bylo by vhodné tento retenční prostor navýšit.

Vyvíjený program prokázal, že použité metody se dají bez problému aplikovat na transformaci povodňových vln neboli na stanovení retenčního prostoru nádrže v podmínkách vstupních nejistot. Zdrojový kód programu je napsán obecně a software se dá rychle využít k testování i jiných nádrží nebo na návrhy suchých nádrží. Navíc se tento vznikající program dá v návaznosti využít i s programem UNCE RESERVOIR (Marton a kol., 2015) na stanovení zásobního 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] Dokument: *Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR. Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2015 [cit. 2018-09-21]. 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/$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf)
- [2] Dokument: *Národní akční plán adaptace na změnu klimatu. Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2015 [cit. 2018-09-21]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/\\$FILE/OEO-K-NAP_cely_20170127.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/$FILE/OEO-K-NAP_cely_20170127.pdf)
- [3] Dokument: *Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody. Meziresortní komise VODA-SUCHO* [online]. 2015 [cit. 2018-09-21]. Dostupný z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/negativni_dopad_sucha_opatreni/\\$FILE/OOV-Sucho_20150806.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/negativni_dopad_sucha_opatreni/$FILE/OOV-Sucho_20150806.pdf)
- [4] Česká technická norma ČSN 75 2405 *Vodohospodářské řešení vodních nádrží*. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2017.
- [5] Česká technická norma ČSN 75 1400 *Hydrologické údaje povrchových vod*. Český normalizační institut, Hradec Králové, 2014.
- [6] Knight, F. H. *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston, Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, Boston 1921.
- [7] Kiureghiana, A. D., Ditlevsen, O. *Aleatory or epistemic? Does it matter?* Structural Safety, Volume 31, Issue 2, 2009.
- [8] WECC doc. 19 – 1990: Western European Calibration Cooperation, 1990.
- [9] Dokument: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (Směrnice pro vyjadřování nejistoty při měření), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993.
- [10] Dokument: *Expression of the Uncertainty in Measurement in Calibration* (Metodika vyjadřování nejistot při kalibracích) EA 4/02, 1997 (v ČR ALE-R2, 1997).
- [11] 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.
- [12] Dokument: TPM 0051–93 *Stanovení nejistot při měřeních, podnikové normy ÚNMZ – TPM*, Český metrologický institut, 1993.
- [13] Beven, K.J. and Binley, A.M. 1992. *The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*, Hydrological Processes, 6, p.279–298.
- [14] Starý, M. *Zpráva o výsledcích řešení při spolupráci na normalizačním rozborovém úkolu HDP VH 83/6 RÚ*, VUT FAST v Brně, Brno, 1984.
- [15] 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.

- [16] 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
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Marton, D.; Paseka, S. *Uncertainty Impact on Water Management Analysis of Open Water Reservoir*. Environments, 2017, roč. 4, č. 1.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Klemeš, V. *A simlified solution of the flood-routing problem*. Vodohospod. Čas. 8(4), 1960. 317-326.
- [24] Jandora, J.; Šulc, J. *Hydraulika (MODUL 01)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2006. 178 s.
- [25] Manipulační řád pro vodní dílo Vír I na řece Svratce. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2011.
- [26] Česká technická norma ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních, Český normalizační institut, Praha, 2014.
- [27] Starý, M. *Hydrologie (MODUL 01)*. Brno: VUT v Brně – Fakulta stavební, 2005, 213 s.
- [28] Marton, D., Starý, M. a Menšík, P. *UNCERESERVOIR – Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže*. 2015. Dostupné z: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>