

Odolnost návrhu nádrže na změny klimatického systému

Stanislav Paseka

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

Abstrakt

Cílem příspěvku je ukázat nový přístup návrhu vodní nádrže v možné změně klimatického systému. Hlavními kritérii návrhu různých variant výšek vodní nádrže jsou odolnost nádrže a odběry vody z nádrže. S ohledem na omezování dostupnosti vodních zdrojů a požadavků na odběry vody je žádoucí obě tato kritéria maximalizovat. Výsledky jsou vypočteny pomocí evoluční multikritériální optimalizace a změnu klimatu charakterizují scénáře z regionálních klimatických modelů. Nový přístup výpočtu je aplikován na variantě B plánovaného vodního díla Hanušovice ve vymezeném chráněném území pro akumulaci povrchových vod.

Klíčová slova

Simulační model nádrže, klimatická změna, odolnost nádrže, odběry vody, vícekritériální optimalizace

Abstract

The aim of this paper is to introduce novel approach to the design of water reservoir in possible climate change. The main criteria of design of the variants of dam height are reservoir resilience and water outflow from the reservoir. With respect to the limited availability of water resources and requirements of water is desirable to maximize these both criteria. The results are calculated with using evolutionary multi-criteria optimization and climate change is characterized by scenarios from regional climatic models. A new calculation approach is applied to variant B of intended profile of Hanusovice dam in the defined protected location for the accumulation of surface water.

Keywords

Reservoir Simulation Model, Climate Change, Reservoir Resilience, Water Outflow, Multi-Objective Optimization

ÚVOD

V posledních letech, kdy se začínají naplňovat předpoklady klimatických změn, vnímáme globálně vážnost této záležitosti. Českou republiku zasáhlo období sucha a jeho následky zřetelně pociťujeme. Stává se pravidlem, že ke konci kalendářního roku meteorologové označují daný rok za nejteplejší rok v historii měření a výjimkou nebyl ani rok 2016. Další vývoj do následujících let s ohledem na četnost a délky suchých období není příliš optimistický a to ani v případě, kdyby se odhady z klimatických modelů neprojeví v plné míře. Je nepochybně zřejmé, že na našem území musíme změnit hospodaření s vodou.

V našem pásmu nezaznamenáváme snížení průměrného množství srážek, ale objevují se změny v rozložení. Jinými slovy zaznamenáváme pokles v počtu srážkových dnů a to znamená, že se prodlužují období výskytů sucha, které se střídají s kratšími, ale intenzivnějšími úhrny srážek. Tyto úhrny, především v období výskytu sucha, mají jen velmi nízký efekt na retenci vody v krajině. Naopak častěji způsobují lokální povodně, voda rychle odtéká pryč a po několika dnech je situace obdobná, jako před srážkami. Je rovněž pozorován nepříznivý vývoj stavu podzemních vod, který se dlouhodobě zhoršuje. Kromě toho stále dochází i k poklesu stavu vodních toků. Zde je ale důležité zmínit, že právě vodní toky pod přehradami, které mimochodem zachytí zmiňovanou rychle odtékající vodu, jsou díky zásobní funkci přehrady nalepšovány a tím částečně eliminují dopady hydrologického sucha.

V našich podmínkách se musíme zaměřit na zvyšování retenční schopnosti vody v krajině, ať už lepším hospodařením ze strany zemědělců, navýšením podílu organické hmoty v půdě například vhodnými dotačními tituly ze strany vlády, ale také především technickými kroky. Mezi tyto kroky řadíme například výstavbu nebo obnovu tůní, mokřadů nebo rybníků, kterých v naší krajině bylo před staletími mnohonásobně více. V neposlední řadě bude zapotřebí postavit nové víceúčelové přehrady.

Reakcí na problematiku sucha a na danou změnu klimatu v České republice začaly vznikat strategické dokumenty řešící sucho. V roce 2015 byl připraven meziresortní komisí VODA-SUCHO materiál s názvem Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody [4], který byl daný rok i schválen vládou. V tomto materiálu je uvedeno mnoho opatření k naplnění cílů ochrany před negativními dopady sucha vždy s uvedenými gestory daného opatření a termínem plnění. Ve stejném roce vláda schválila i dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR [5]. Tato strategie byla připravena Ministerstvem životního prostředí a představuje národní adaptační strategii ČR a také zhodnocuje pravděpodobné dopady změny klimatu včetně návrhů konkrétních adaptačních opatření. Strategie mimo jiné počítá s opatřeními, která povedou k šetření pitné vody, zadržování vody v krajině, k zajištění stability vodního režimu v krajině, ale také například počítá s obnovou malých vodních nádrží a zvyšování jejich spolehlivosti nebo s vytýpováním dalších ploch vhodných pro vybudování vodních nádrží. V roce 2017 byl vládou schválen Národní akční plán adaptace na změnu klimatu [2], který je implementačním dokumentem Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR. Výše zmíněné dokumenty mají za cíl se vypořádat a čelit problémům se suchem, povodněmi, ale například i chránit vodní zdroje a další.

Vodohospodářské výpočty a tím i přesnost provozu samotných nádrží dříve vycházely převážně z deterministického řešení. V dnešní době je trend zavádět stochastické řešení, resp. pravděpodobnostní řešení, kdy jsou do výpočtů zavedeny nejistoty, které mohou výsledky ovlivnit. Nejistoty jsou v tomto případě chápány a zavedeny do následujících výpočtů jako neurčitost, která může vzniknout změnou klimatu.

Cílem článku je návrh nové nádrže ve vybrané lokalitě pro varianty výšek tělesa hráze s kladeným důrazem na co největší odolnost (resilienci) nádrže. Respektive udržet v mezích vzniklé poruchy v důsledku poklesu hladiny vody v zásobním prostoru nádrže a zároveň dosáhnout co největších odběrů. Součástí výpočtu je pro každou výšku hráze proveden

výpočet ceny hráze podle oceňovací vyhlášky. Cílem je tedy najít nejlepší variantu výšky (ceny) hráze při maximalizování odolnosti nádrže a maximalizování odběrů vody z nádrže pro modelované podmínky z klimatických scénářů.

METODIKA

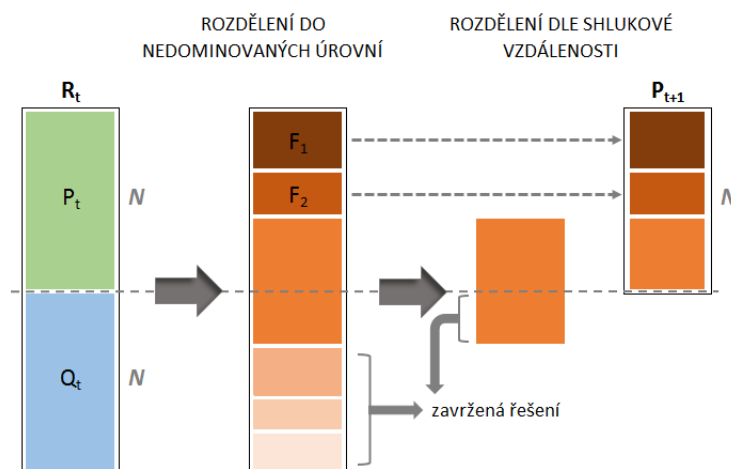
Algoritmus NSGA II

Pro tento typ multikriteriální optimalizace je použit moderní genetický algoritmus NSGA II [1]. Tento algoritmus rozvíjí svého předchůdce NSGA Nondominated Sorting Genetic Algorithm z roku 1994 [14], který byl výpočetně náročný a byl též kritizován z absence elitismu a potřeby vstupního parametru σ -share. NSGA vychází z jednoduchého genetického algoritmu podle Goldberga [7].

Princip použitého algoritmu NSGA II je následující. Prvotně je vygenerována tzv. mateřská populace P_t pro $t = 0$, která se podrobuje známým operacím genetických algoritmů, jako je selekce, křížení a mutace. Tyto operace vytvářejí populaci potomků označovány jako Q_t o velikosti N . Z prvotní mateřské a nově vytvořené populace se vytvoří kombinovaná populace $R_t = P_t \cup Q_t$, dolní index t charakterizuje t -tou generaci a vytvořená populace R_t je o velikosti $2N$.

Následuje seřazení členů R_t do tzv. nedominovaných úrovní. Základní myšlenka je taková, že populace se rozděluje do nedominovaných úrovní tak, že v první nedominované úrovni jsou jedinci, kteří nejsou dominováni žádným jiným jedincem v populaci. Tato úroveň nejlepších jedinců se nazývá nedominovaná řešení první úrovně F_1 . K nalezení nedominovaných řešení druhé úrovně F_2 jsou obvykle nedominovaná řešení první úrovně dočasně zanedbána. Takto se pokračuje, dokud všem řešením není přiřazena nedominovaná úroveň.

Přirozeně nastane okamžik, kdy se nedominovaná úroveň F_x nevejde beze zbytku do nové populace P_{t+1} . Vždy je ale nutné, aby byl vybrán takový počet členů z úrovně F_x , aby populace P_{t+1} měla přesně N členů. V tento okamžik přichází na řadu druhotné třídící kritérium, které vybere vhodné jedince z této vzniklé úrovně.



Obr. 1 Schéma výběru N řešení z populace R_t pro populaci P_{t+1}

V NSGA II se jako druhotné kritérium může aplikovat tzv. crowding distance (shluková vzdálenost) nebo možnost ϵ -dominance. Metoda crowding distance používá k zajištění diverzity shlukové vzdálenosti, které jsou získány kombinací vzdáleností od dvou nebo více sousedních (nejbližších) řešení v prostoru kritériálních funkcí. Nejméně vhodné řešení je to, které má kolem sebe mnoho sousedních řešení, respektive to, které má nejnížší hodnotu shlukové vzdálenosti.

Elitismus nám zajišťuje fakt, že všichni jedinci z předchozí generace jsou v populaci R_t s jedinci z aktuální generace. Díky tomu, že členové v první úrovni F_1 jsou nejlepšími jedinci z populace R_t , měli by být vybráni všichni, pokud není počet členů první nedominované úrovně větší než N . Potom tato nedominovaná úroveň bude součástí populace P_{t+1} . Takto je vybráno N členů pro populaci P_{t+1} z několika nedominovaných úrovní. Jelikož z populace R_t o velikost $2N$ členů se vybírá pouze N členů, ve skutečnosti není nutné provádět třídění do nedominovaných úrovní pro všech $2N$ členů. Rozdělení populace do úrovní nedominovaných množin řešení může být ukončeno tehdy, když v nedominovaných úrovních je dosaženo více jak N členů.

Vzniklá populace P_{t+1} je znova podrobena operacím křížení a mutace a tím se vytvoří populace dalších potomků Q_{t+1} . Tyto dvě populace nám tvoří opět kombinovanou populaci R_{t+1} pro další generaci a celý postup se opakuje podle celkového počtu generací.

Simulační model nádrže

Simulační model nádrže vychází z předpokladu rovnice nádrže v součtovém tvaru, která je upravena do následující nerovnosti (1) [15].

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

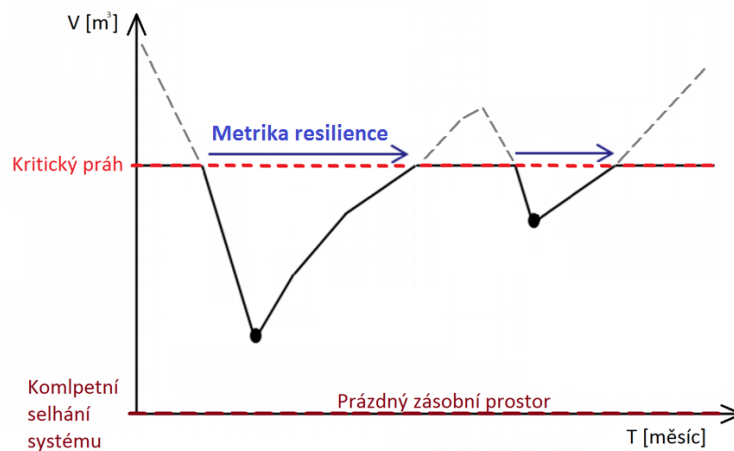
kde O_i značí odtok vody z nádrže, Q_i přítok vody do nádrže pro $i = 1, \dots, n$, Δt je časový krok výpočtu, v tomto případě 1 měsíc. O_{i+1} je odtok vody z nádrže v následujícím časovém kroku, kdy v kroku $i+1$ je hodnota O_{i+1} nejdříve nahrazena hodnotou požadovaného nalepšeného odtoku O_p . Vyčíslovaná suma nám simuluje průběh prázdnění a plnění zásobního objemu nádrže po časových krocích $i = 1, \dots, k$. Pro $i = 0$ je třeba za hodnotu sumy zadat počáteční podmínku řešení. Nerovnost (1) je z levé strany omezena hodnotou 0, což charakterizuje plný zásobní objem a z pravé strany hodnotou $V_{z,max}$ charakterizující prázdný zásobní objem nádrže, který je k dispozici. Vypočtením hodnoty výrazu je získáno aktuální prázdnění a plnění zásobního objemu nádrže, které je dále podrobně testováno. V tomto případě je důležité, jestli nastane stav, kdy se nachází průběh prázdnění a plnění pod předem stanovenou kritickou hladinou. Jestliže dojde k poklesu pod tento tzv. kritický práh, pak nastane porucha v nádrži. Tato porucha může být jako kritérium pro metriky odolnosti (resilience) nádrže.

Odolnost (resilience) nádrže

Definice odolnosti zůstává v současné praxi ve značné míře špatně definována. Odolnost vůči vodním zdrojům byla obecně kvantifikována jako doba trvání (maximální nebo průměrná)

dočasného omezení dodávek vody z pohledu dostupnosti vodních zdrojů [8]. Samotný výpočet se v literatuře liší. Resilience byla například použita jako výkonnostní kritérium chování systému [9], jinde byla resilience stanovena jako průměrná doba trvání systému pod dočasným omezením [10] nebo vypočtena jako podíl času v neuspokojivém stavu k celkovému budoucímu času [6]. Roach v [11] a [12] charakterizoval a testoval několik potenciálních metrik resiliencí.

Pro tuto úlohu byla zvolena metrika resilience v podobě nejdelší vyskytnuté poruchy. Tato metrika resilience je znázorněna na následujícím obrázku, který zobrazuje detail procesu prázdnění a plnění nádrže. Vodní deficit neboli porucha se v problematice resilience rozumí tehdy, když hladina vody klesne pod předem určený kritický práh. Pokud dojde k vyprázdnění celého zásobního objemu nádrže, potom mluvíme o tzv. kompletním selhání systému.



Obr. 2 Znázorněná metrika resilience (doba trvání nejdelšího vodního deficitu v měsících)

Cena hráze podle oceňovací vyhlášky

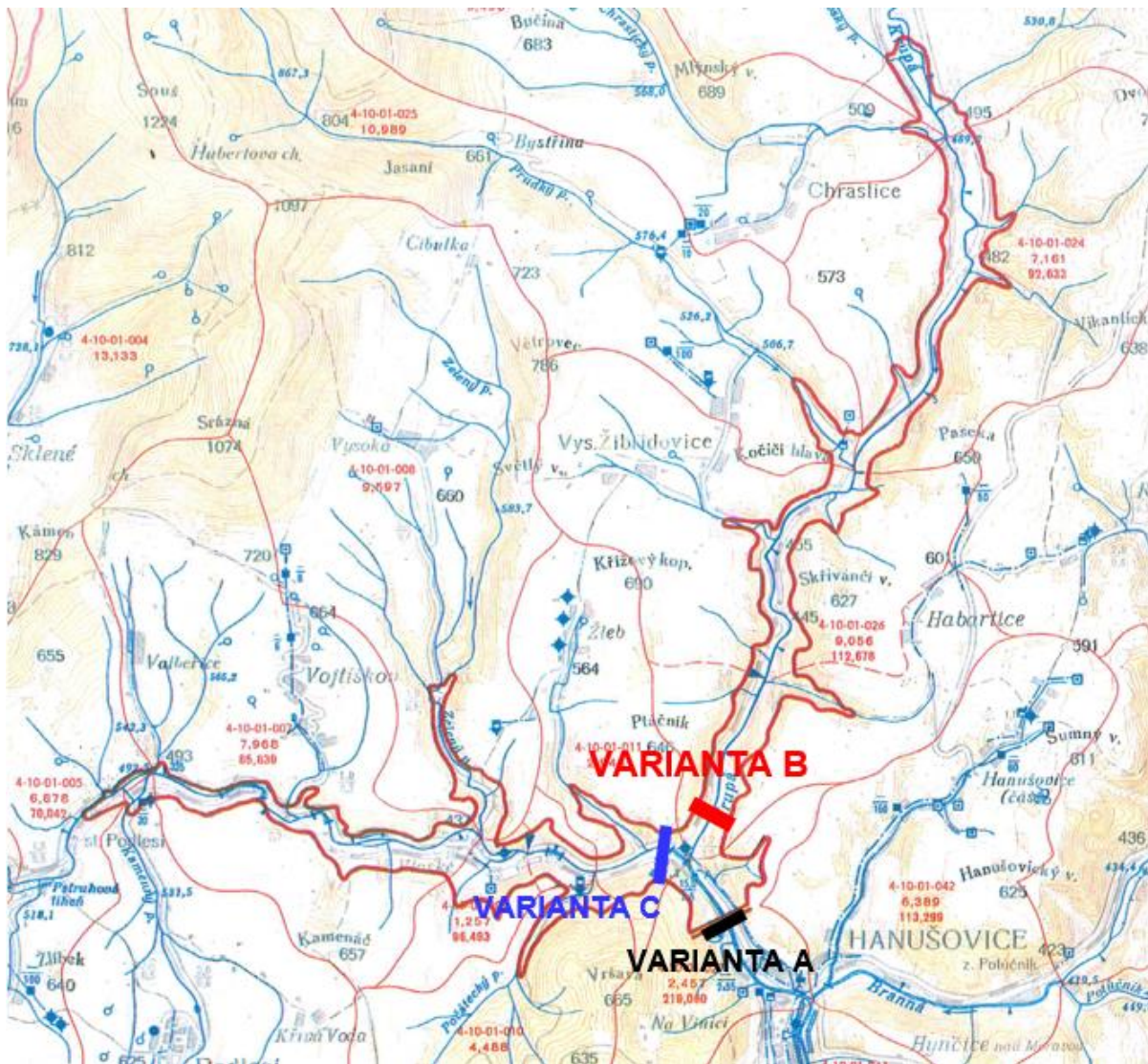
Cena hráze vychází z Vyhlášky č. 441/2013 Sb., tzv. oceňovací vyhlášky [16]. Vodní díla jsou oceňována podle § 17, kde ZCU (základní cena upravená za měrnou jednotku) je rovna ZC (základní cena za měrnou jednotku) upravená koeficientem polohy K_5 a koeficientem změny cen staveb K_i podle rovnice (2).

$$ZCU = ZC \cdot K_5 \cdot K_i \quad (2)$$

Pro přehradní hráz zemního typu je $ZC = 333 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$, pro město Hanušovice je $K_5 = 1.0$ a pro přehrady a nádrže na tocích je $K_i = 2.084$. ZCU se potom rovná hodnotě $694 \text{ Kč} \cdot \text{m}^{-3}$.

Praktická aplikace

Výše zmíněná metodika je použita na připravovaném vodním díle Hanušovice, konkrétně na profilu varianty B na řece Krupá. Vodní dílo Hanušovice se objevuje v různých strategických dokumentech již mnoho let. V blízkosti vybraného profilu B je umístěn vodoměrný profil Habartice, který spravuje podnik ČHMÚ. Údaje z tohoto profilu jsou následující, dlouhodobý průtok Q_a je $2.15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ekologický průtok je dán hodnotou Q_{355} odpovídající průtoku $0.41 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Batygrafie pro tuto polohu připravovaného vodního díla byly stanoveny z digitálního modelu terénu.



Obr. 3 Varianty možných profilů plánovaného vodního díla Hanušovice [17]

Objem stálého nadržení byl stanoven jako u stávajících vodárenských nádrží, kde se pohybuje v rozmezí od 12 do 18 m. Zde byla uvažována výška 15 m, která odpovídá objemu 0.35 mil. m³. Retenční prostor nádrže byl zjednodušeně určen pro střední výšku hráze nádrže s návrhem parametrů výpočtu tak, aby byl schopen převést povodňovou vlnu o velikosti Q_{10000} . K transformaci povodňové vlny byla použita Klemešova metoda, pomocí ní byl získán celkový retenční objem nádrže 7.72 mil. m³. Tento objem nám určuje dosažení maximální mezní hladiny. Dále byla zavedena bezpečnostní rezerva výšky hráze proti přelítí tělesa hráze v důsledku možného zvednutí výšky hladiny vlnobitím při kritických rychlostech větru. Výška hráze byla navýšena nad stanovenou maximální mezní hladinu o 2 m.

Pro výpočet objemu tělesa hráze je uvažováno se zemním typem hráze o šířce koruny hráze 5 m, délky dna hráze 100 m, sklonem návodního svahu 1:3, sklonem vzdušného svahu 1:2 a sklony údolí (boků hráze) 1:1 levého a 1:1.8 pravého. Výška hráze byla počítána pro 80 až 100 m s krokem 2.5 m.

Přítoky vody do nádrže jsou stanoveny odvozením z průtokových řad získaných z 15 regionálních klimatických modelů. Výsledky modelů vychází ze čtvrté zprávy

IPCC AR4 (Mezivládní panel pro změnu klimatu), přesněji pro konzervativní emisní scénář A1B. Vyhodnocované období z projektu „Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu“ od RSCN VUV [3] je pro roky 2015 až 2100. Minimální velikost nalepšeného odtoku vody z nádrže *Op* byla uvažována konstantní pro všechny měsíce v roce a pro celé období. Tato hodnota byla stanovena jako suma požadovaného minimálního zůstatkového průtoku v toku, která je $0.54 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, požadavků na odběry vody pro zásobování obyvatelstva ($1/4$ z celkového potenciálního odběru obyvatelstva pro zásobování lokality středního Pomoraví), tedy $0.56 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a odběrů pro průmysl a zemědělství o požadovaném odběru $0.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Výsledná hodnota požadovaného odtoku je tedy $1.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Pokud ovšem nastane porucha, stav kdy voda v nádrži klesne pod stanovenou kritickou úroveň, bude požadovaný odtok snížen o odběry vody pro průmysl a zemědělství na hodnotu $1.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Výpočty byly spočteny optimalizační metodou NSGA II v softwaru SolveXL [13]. Nastavení výchozích parametrů a kritérií pro jednotlivé scénáře bylo dáno velikostí populace 100 jedinců, selekcí dle turnajového výběru, jednobodovým křížením o velikosti 0.90, náhodnou mutací o velikosti 0.05 a celkovým počtem generací 200. Vždy se jednalo o vícekritériální optimalizaci s cílem maximalizovat odolnost nádrže a maximalizovat odběry vody z nádrže pro různé varianty výšek hráze a scénářů z klimatických modelů.

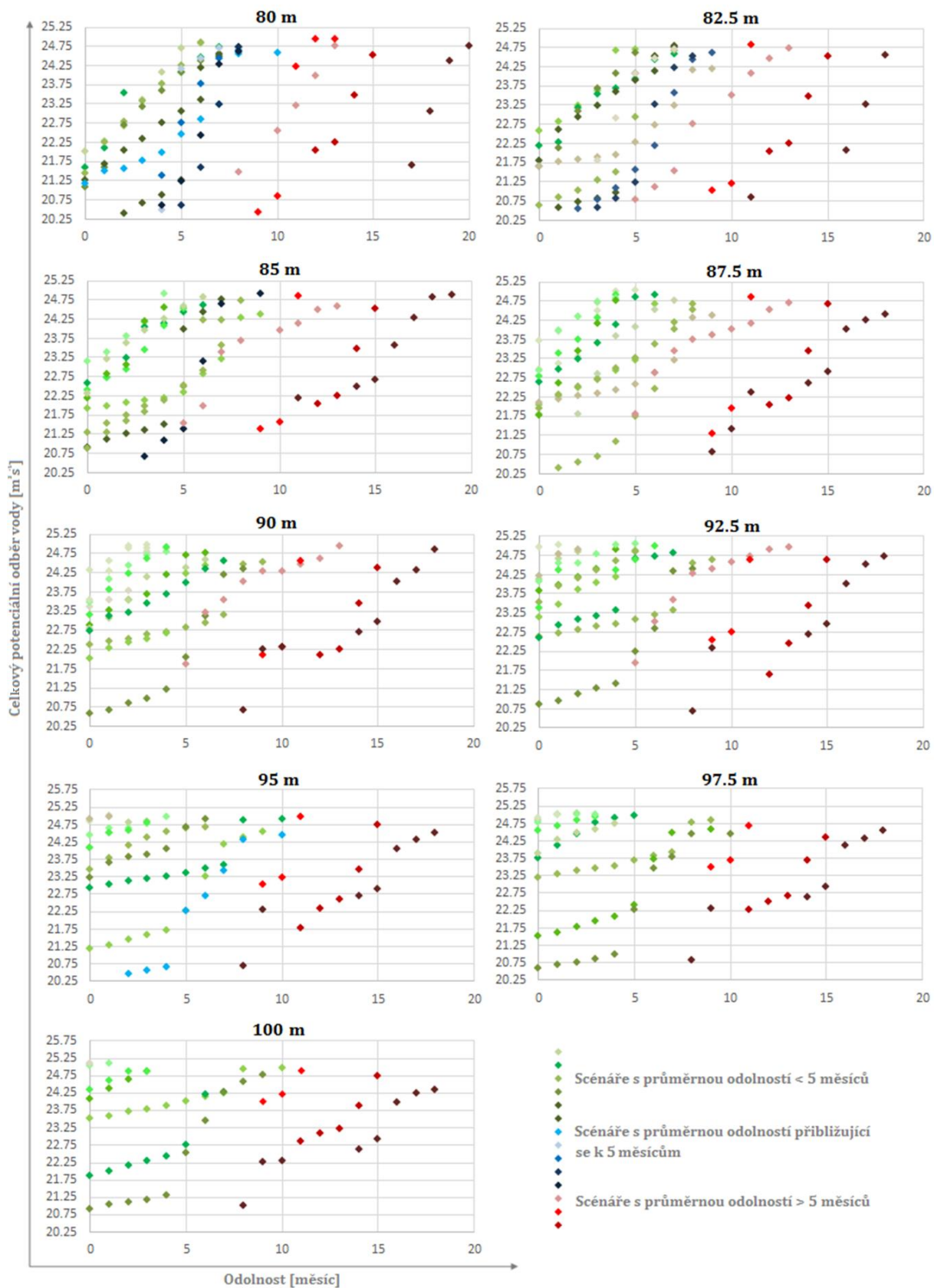
Vyhodnocení a závěr

Ve vyhodnocených grafech v Obr. 4 jsou zobrazeny výsledky pro všechny počítané varianty výšek tělesa hráze od 80 do 100 m s krokem 2.5 m v podobě tzv. Pareto optimálních řešení pro dostupné regionální klimatické scénáře.

Všechny získané Pareto body jsou svým způsobem optimálním řešením daných závislostí. Na svislé ose je zobrazena suma odběrů vody v m^3s^{-1} za 12 měsíců a na vodorovné ose odpovídající odolnost (délka největší poruchy) v měsících pro budoucí období od roku 2015 do roku 2100. Každý bod Pareto křivky pak reprezentuje jedno konkrétní řešení vzešlé z optimalizace.

Pro stanovení nejlepšího řešení musíme ještě určit přípustnou délku poruchy. Jinými slovy takovou délku poruchy, se kterou jsme schopni se vypořádat pro období od roku 2015 do 2100. Pokud výsledek bude nižší nebo roven přípustné délce poruchy, tak můžeme říci, že takový návrh je odolný.

Nastavení této hodnoty záleží především na určení kritického prahu a na omezeních při vzniklé poruše. Například ve Velké Británii při použití tohoto typu resilience zavádějí pro řízení vodních systémů limitní hodnotu okolo 5 měsíců. Pro náš případ, kdy při poklesu pod kritickou hladinu bude požadovaný odtok snížen o odběry vody pro průmysl a zemědělství, bude akceptovatelná délka poruchy taktéž 5 měsíců.

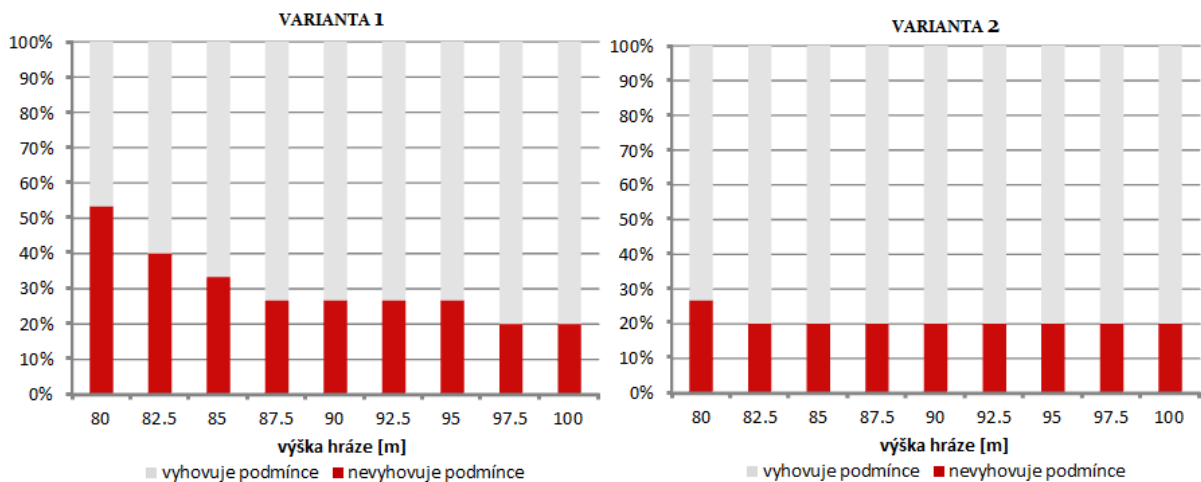


Obr. 4 Pareto optimální body jednotlivých variant výšek hráze a scénářů z klimatických modelů

Na Obr. 4 jsou vykresleny Pareto optimální body a můžeme pozorovat, kolik scénářů lze uřídit na hranici resilience 5 měsíců pro jednotlivé výšky hráze a také, jak tento počet z narůstající výškou hráze klesá. Dále vidíme závislost, že s klesající sumou odběrů klesá resilience (nádrž je odolnější vůči poruše).

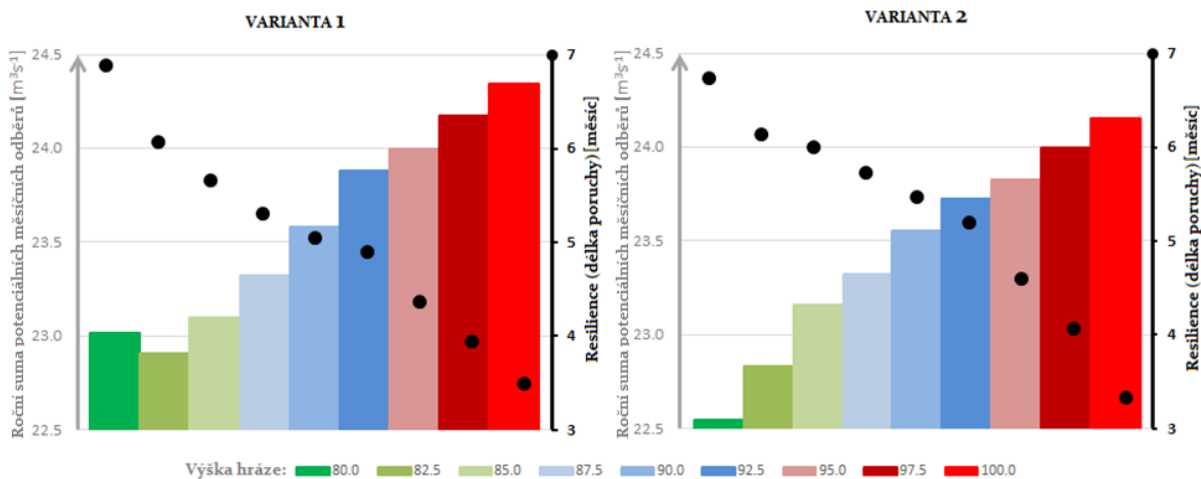
Následující prezentace výsledků je ve dvou variantách. 1. varianta je úvaha, že z každé křivky Pareto bodů vezmeme průměrnou hodnotu a 2. varianta vybírá konkrétní Pareto bod vyhovující podmínce 5 měsíců nebo nejbližší možnou délku.

Na Obr. 5 je procentuální vyjádření vyhovujících a nevyhovujících podmínce 5 měsíců všech scénářů pro testované výšky hráze a obě varianty vyhodnocení.



Obr. 5 Procentuální vyjádření vyhovujících a nevyhovujících scénářů pro jednotlivé výšky hráze

Na Obr. 6 je vykreslen průměrný možný odběr vody a průměrná odolnost (max. délka poruchy) nádrže všech scénářů pro testované výšky hráze a obě varianty vyhodnocení.

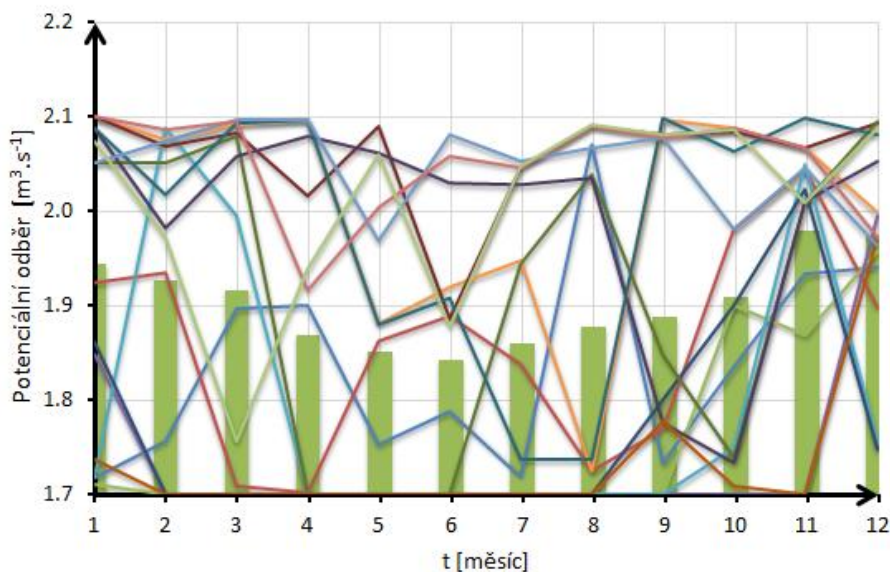


Obr. 6 Závislost možného odběru a odolnosti nádrže pro jednotlivé výšky hráze

Z Obr. 5 a varianty 1 je patrné, že do výšky hráze 87.5 m dochází ke zlepšení v poměru vyhovujících a nevyhovujících scénářů, potom je další skok až při výšce 97.5 m. Pro variantu 2 dochází ke zlepšení pouze u výšky hráze 82.5 m.

Na obrázku 6, kde jsou vykresleny celkové průměrné možné odběry a průměrné odolnosti nádrže vidíme, že největší pokles v délce max. poruchy je právě při výšce 82.5 m jak u varianty 1 tak u varianty 2. K dalším výrazným snížením délky poruchy dochází u výšek hráze nad 95 m. U těchto výšek je už z ekonomického hlediska výrazně vyšší cena, než u výšky hráze 82.5 m. Konkrétně cena hráze podle oceňovací vyhlášky pro výšku 82.5 m je asi 100 mil. € a pro výšku 95 m pak přibližně 140 mil. €.

Jako nejlepší varianta je tedy zvolena výška hráze 82.5 m za cenu hráze 100 mil. €. Při tomto návrhu je suma potenciálních měsíčních odběrů $22.84 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pro každý rok. Pro tuto variantu u 12 scénářů z 15 lze nádrž uřídit s maximální poruchou 5 měsíců. Konkrétní průběhy potenciálních odběrů pro každý rok jsou na následujícím obrázku.



Obr. 7 Potenciální měsíční odběry vody při výšce hráze 82.5 m

Pro variantu B plánovaného vodního díla Hanušovice ve vymezeném chráněném území pro akumulaci povrchových vod se nejlépe jeví návrh přehradní hráze o výšce 82.5 m. Pro tento návrh je zásobní objem nádrže přibližně 39.4 mil. m^3 a celkový objem nádrže 47.6 mil. m^3 . Nakonec na Obr. 7 byly pro zvolený návrh výšky prezentovány průběhy potenciálních možných odběrů všech modelovaných scénářů z klimatických regionálních modelů.

V budoucnu by bylo vhodné otestovat výpočty se záměnou vstupních parametrů optimalizace. Pokusit se získat ještě lepší výsledky jinou velikostí populace, počtem generací nebo počtem jedinců vstupujících do křížení a mutace. Pro tento přístup by mohla být použita i jiná vícekritériální optimalizace, která by mohla posloužit k porovnání výsledků.

V dalším poznání by bylo přínosné rozdělit a vyčíslit potenciální měsíční odběry vody podle potřeb a stanovit například návratnost samotné přehrady. Další možností je zavést scénáře na potřebu vody např. podle vývoje obyvatel v dané lokalitě, potřeb vody pro podniky, pro výrobu elektřiny malou vodní elektrárnou, zajištění minimálního průtoku v toku, napojení dosud nenapojených obyvatel v systému apod. V dalším výzkumu by bylo žádoucí zapojit nebo vygenerovat další scénáře z klimatických modelů.

Poděkování

Tento příspěvek je výsledkem specifického výzkumu FAST-J-17-4214 „Nové pojetí ekonomického návrhu nádrže v podmínkách hlubokých nejistot s použitím multikriteriální optimalizace“.

Reference

- [1] DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL S. a MEYARIVAN, T. *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002, 6(2), 182-197.
- [2] Dokument: *Národní akční plán adaptace na změnu klimatu*. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2015 [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/\\$FILE/OEOK-NAP_cely_20170127.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/$FILE/OEOK-NAP_cely_20170127.pdf)
- [3] Dokument: *Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu* [online]. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.: Praha, 2014. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://rscn.vuv.cz/>
- [4] Dokument: *Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody*. Meziresortní komise VODA-SUCHO [online]. 2015 [cit. 2017-10-05]. Dostupný z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/negativni_dopad_sucha_opatreni/\\$FILE/OOV-Sucho_20150806.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/negativni_dopad_sucha_opatreni/$FILE/OOV-Sucho_20150806.pdf)
- [5] Dokument: *Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR*. Ministerstvo životního prostředí [online]. 2015 [cit. 2017-10-05]. Dostupný z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/\\$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf)
- [6] FOWLER, H. J., KILSBY, C. G., O'CONNELL, P. E. Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resources Manage*, 2003. 39(8), 1222.
- [7] GOLDBERG, David E. *Genetic alghorithms in search, optimization, and machine learning*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Publishing Company, 1989. ISBN 0-201-15767-5.
- [8] HASHIMOTO, T., J. R. STEDINGER and D. P. LOUCKS. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation, *Water Resources Research*, 1982. 18(1), 14–20.
- [9] MATROSOV, E. S., PADULA, S., HAROU, J. J. Selecting portfolios of water supply and demand management strategies under uncertainty-contrasting economic optimisation and „Robust decision making“ approaches. *Water Resources Manage*, 2012. 27(4), 1123–1148.

- [10] PATON, F. L., DANDY, G. C., MAIER, H. R. Integrated framework for assessing urban water supply security of systems with non-traditional sources under climate change. *Environ. Modelling Software*, 2014. 60, 302–319.
- [11] ROACH, T., KAPELAN Z., LEDBETTER, R. Comparison of Info-gap and Robust Optimisation Methods for Integrated Water Resource Management under Severe Uncertainty, *Procedia Engineering*, Volume 119, 2015. Pages 874-883, ISSN 1877-7058
- [12] ROACH, T. *Decision Making Methods for Water Resources Management Under Deep Uncertainty*. Exeter, 2016. Doctoral Theses. University of Exeter. Advisor Prof. KAPELAN, Z.
- [13] SolveXL: *Genetic Algorithm Optimization*, software [online]. Exeter, 2013. [cit. 2017-09-15]. Dostupny z: <http://www.solvexl.com/>
- [14] SRINIVAS, N. a DEB, K. *Muiltiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms*. *Evolutionary Computation*. 1994, 2(3), 221-248
- [15] STARÝ M. *Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 02)*. Brno: VUT v Brně - Fakulta stavební, 2006, 117 s.
- [16] Vyhláška č. 441/2013 Sb., Vyhláška k provedení zákona o oceňování majetku (oceňovací vyhláška)
- [17] Zadání Technicko-ekonomické studie variant Morava, Krupa – VD Hanušovice. Povodí Moravy, s.p. Smlouva o dílo [online]. 2015 [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: https://zakazky.eagri.cz/document_31234/586757eff8fed432f-smlouva-o-dilo-pdf