

Strategické řízení zásobní funkce fiktivní vodní nádrže

Abstrakt

Práce je zaměřena na ověření funkčnosti adaptivního řízení odtoku vody z fiktivní nádrže. K vytvoření předpovědi průměrných měsíčních průtoků je použit zonální pravděpodobnostní předpovědní model (ZPPM). Fiktivní nádrže se nachází na stejném toku v jiných profilech. Funkčnost je ověřena na řízení v letech 2000 – 2006.

Klíčová slova

nádrž, optimalizační model, strategické řízení, zásobní funkce, předpovědní model

Abstract

The thesis is focused at verifying the functionality of adaptive control of fictive water reservoir. Flow rates are predicted using zonal prediction model. Fictive reservoirs located on the same flow in the other profiles. Functionality is verified by the control in 2000 – 2006.

Keywords

Reservoir, Optimization Model, Strategic Control, Storage Capacity, Prediction Model

1. Úvod

Při pohledu na současné výsledky z oblasti klimatologie a meteorologie se dá říci, že dochází ke změně klimatických podmínek po celém světě. Změny klimatických podmínek přispívají k častějším výskytům extrémů, jak povodní, tak období sucha. Zmínit by se dali roky 2011 a 2012, které byly hodnoceny jako extrémně suché [3]. I letošní rok 2015 je považován za extrémně suchý. Údajně se jedná o nejsušší rok za posledních dvanáct let. Při výskytu sucha dochází k ohrožení zásobní funkce nádrží, kdy nejsou schopny překrýt celé období sucha. Vzniklý problém se dá řešit více způsoby. Jedním z nich je výstavba nových vodních nádrží nebo zvětšení zásobních objemů u stávajících nádrží. Další možností je změna způsobu manipulace s řízeným odtokem vody z nádrží.

V současné době je většina nádrží v České republice řízena pomocí dispečerských grafů. Dispečerské grafy jsou odvozeny z historických průtokových řad. Díky klimatickým změnám se ovšem průtokové řady začínají měnit, na což je nutné reagovat. Jednou z možností, jak reagovat na změny klimatu, je například inteligentní strategické řízení. Tohoto řízení je možno dosáhnout pomocí adaptivního přístupu. Adaptivita je jednou z metod umělé inteligence. K adaptivnímu řízení je potřeba znát předpovědi přítoků do nádrže. V praxi lze právě díky adaptivnímu řízení částečně eliminovat nepřesnosti předpovědí.

2. Cíl práce

Cílem práce je ověřit funkčnost adaptivního řízení odtoku vody z nádrže. Ve své bakalářské práci jsem již ověřil funkčnost adaptivního řízení při provozu zásobní funkce během málovodného období. V diplomové práci byly výpočty rozšířeny. Byly provedeny pro dva různé profily, které leží na stejném toku. Výběr dvou profilů je z důvodu porovnání vlivu adaptivního řízení v horní a dolní části toku. Výpočty se dále liší délkou předpovědi a hodnotou nalepšeného odtoku (řídícího odtoku).

3. Metody

3.1. Předpovědní model

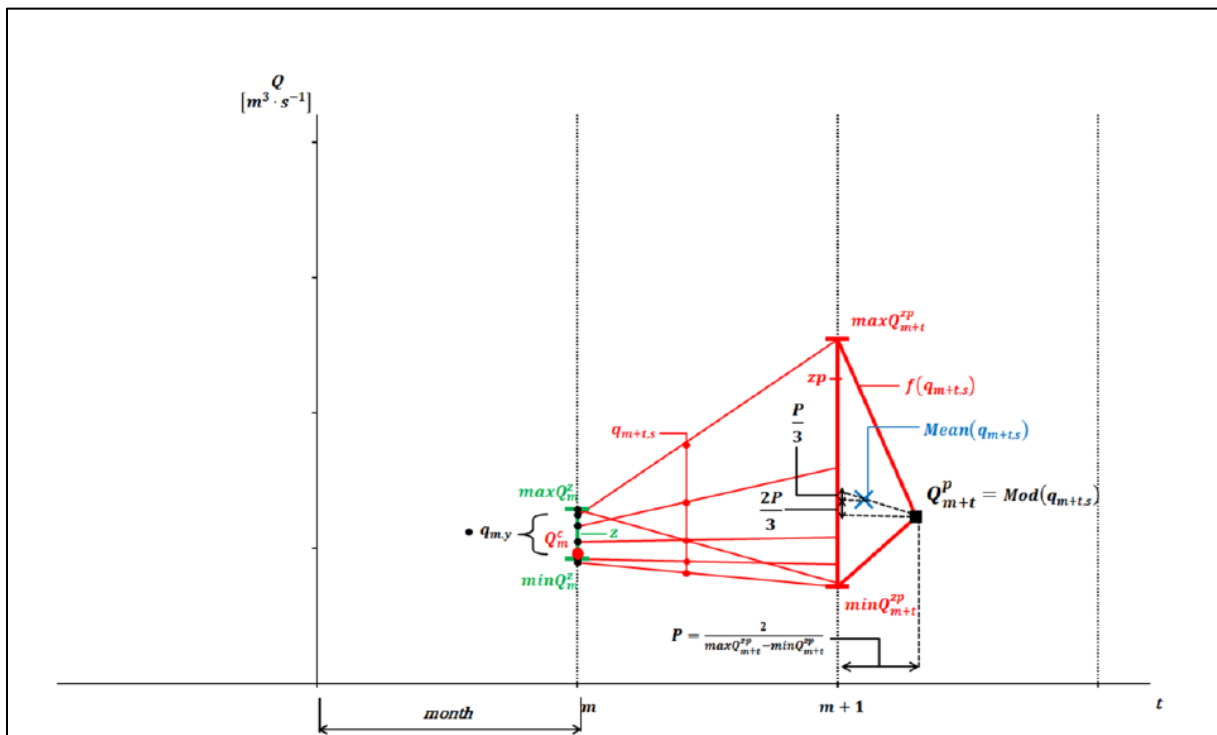
Na předpovědi měsíčních průtoků byl použit zonální pravděpodobnostní model (ZPPM). Model pracuje na následujícím principu. Z několikaleté průtokové řady jsou vyčleněny jednotlivé roky $y = 1, 2, \dots, Y$, kde Y značí celkový počet let. Ze všech roků jsou posléze vyčleněny i jednotlivé měsíce $m = 1, 2, \dots, 12$ s průměrnými měsíčními průtoky Q_m pro každý rok množiny Y . Množina Q_m je tvořena průměrnými měsíčními přítoky vody do nádrže z celého sledovaného období Y odpovídajících přítoků v měsíci m . Množina průměrných měsíčních průtoků je vyčleněna pro každý měsíc. V každém měsíci je potom nalezena minimální hodnota $\min Q_m$ a maximální hodnota $\max Q_m$ historického přítoku vody. Interval mezi hodnotami $\langle \min Q_m, \max Q_m \rangle$ je rozdělen na předem zvolený počet zón. Počet zón Z je v každém měsíci stejný, velikost intervalu $\langle \min Q_m^z, \max Q_m^z \rangle$ se však může lišit. Velikost jednotlivé zóny je stanovena tak, aby splňovala požadavek, že každá zóna musí obsahovat přibližně stejný počet prvků $q_{m,y}$. Jednotlivé prvky $q_{m,y}$ každé množiny tvoří v příslušné zóně podmnožinu Q_m^z .

Podle počáteční průměrné hodnoty přítoku vody Q_m^c v měsíci m , ve kterém je rozhodováno o řízení, je vybrána zóna z , pro kterou platí $Q_m^c \in \langle \min Q_m^z, \max Q_m^z \rangle$. Zónou z prochází vybraný soubor historických řad $s = 1, 2, \dots, S$, kde S je celkový počet řad procházející zónou. Pro každou řadu v souboru S platí, že $q_{m,s} \in Q_m^z$. Další členy historických řad s souboru S , které jsou reprezentovány průměrnými měsíčními přítoky $q_{m+t,s}$ v měsících $m + t$, kde t je pořadí měsíce předpovědi, jsou pak použity pro určení intervalu zóny předpovědi z^p . Pro t platí $t = 1, 2, \dots, TP$, kde TP je počet předpovídaných kroků (měsíců) a $q_{m+t,s} \in Q_{m+t}^{zp}$. Pro pořadí měsíců $m + t > 12$ platí $m + t - 12$. Pro každý měsíc předpovědi $m + t$ je stanovena pouze jedna zóna předpovědi z^p [1].

Hodnota průměrného měsíčního přítoku vody do nádrže Q_{m+t}^p v měsíci $m + t$ je rovna hodnotě vyskytující se v intervalu zóny předpovědi z^p s největší pravděpodobností. Průměrné měsíční průtoky jsou potom předpovězeny podle následujícího principu. Pro všechny prvky $q_{m+t,s}$ z množiny Q_{m+t}^{zp} je vytvořena hustota rozdělení pravděpodobnosti. Tvar spojitě funkce je pro zjednodušení trojúhelníkový. Spodní hrana je tvořena intervalem $\langle \min Q_{m+t}^{zp}, \max Q_{m+t}^{zp} \rangle$ a vrchol trojúhelníku leží na předpokládané poloze modu Mod veličiny $q_{m+t,s}$. K určení polohy modu je použit předpoklad, že platí:

$$\int_{\min Q_{m+t}^{zp}}^{\max Q_{m+t}^{zp}} p(q_{m+t,s}) dq_{m+t,s} = 1, \quad (1)$$

Postup nalezení polohy modu na intervalu $\langle \min Q_{m+t}^{zp}, \max Q_{m+t}^{zp} \rangle$ je vyobrazen graficky na Obr. 1.

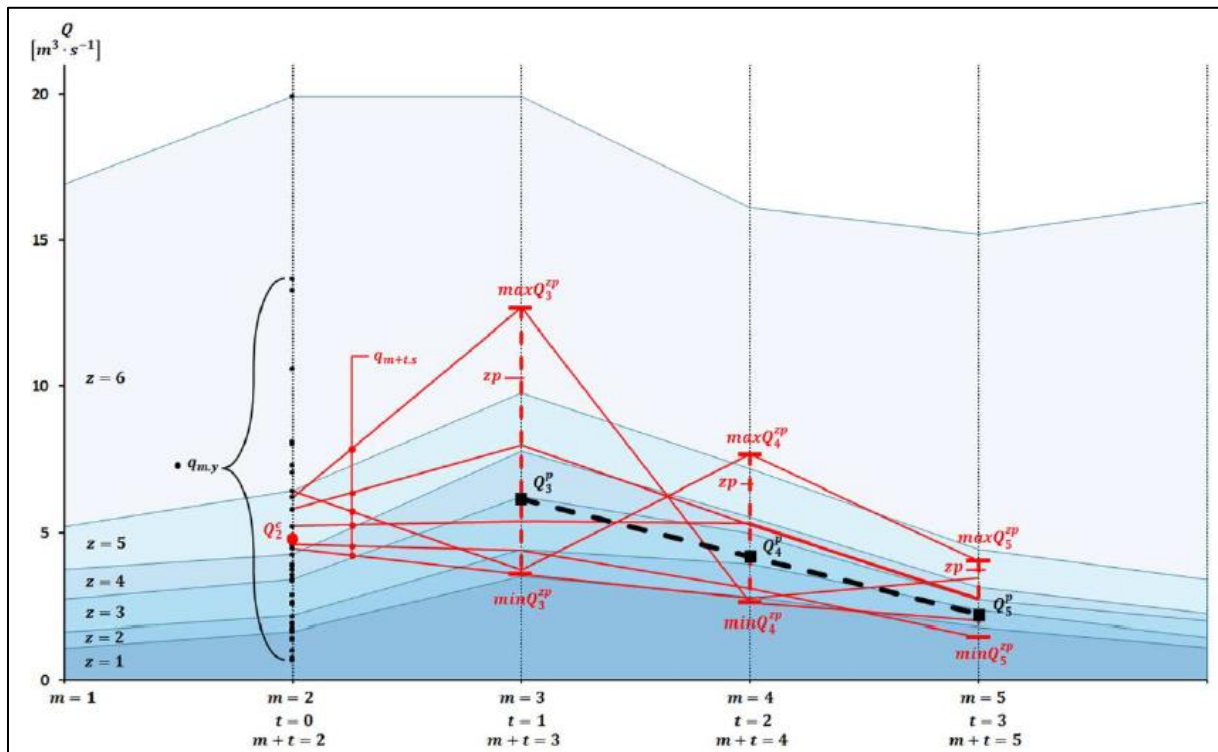


Obr. 1 - Postup nalezení modu

Potom pro předpovězenou hodnotu přítoku vody do nádrže v měsíci $m + t$ platí:

$$Q_{m+t}^p = \text{Mod}(q_{m+t,s}). \quad (2)$$

Algoritmus vytváření předpovědi Q_{m+t}^p pro více kroků (měsíců) je zobrazen na Obr. 2.



Obr. 2 - Algoritmus vytváření předpovědi

3.2. Algoritmus adaptivního řízení

Vhodnost předpovědního modelu by se prakticky nedala ověřit na skutečné nádrži, proto je k jeho otestování použit simulační model (globální model). Simulační model je klasický a pravidla řízení jsou nahrazeny opakovanou optimalizací. Krok simulačního modelu je $T = 1, 2, \dots, M$, kde M je celkový počet kroků (měsíců). Algoritmus řízení se dá popsat celkem ve třech krocích, které se postupně opakují:

V prvním kroku je vytvořena předpověď průměrných měsíčních přítoků vody do nádrže. Předpověď je vytvořena na základě předpovědního modelu a délka odpovídá zvolenému počtu předpovídaných měsíců.

Ve druhém kroku je sestaven optimalizační model nádrže. Průměrné měsíční odtoky z nádrže O_τ na řízeném období jsou hledány optimalizací v každém časovém kroku lokálního modelu $\tau = 1, 2, \dots, N$, kde N je celkový počet kroků. K nalezení O_τ je použita metoda diferenciální evoluce. Počet předpovídaných měsíců TP je roven počtu časových kroků N . Jako okrajové podmínky slouží předpovězené přítoky do nádrže. Počáteční podmínka řešení je potom objem vody v nádrži na konci časového kroku $\tau = 0$. V realitě se jedná o naměřenou hodnotu objemu vody v nádrži. Jako kritérium optimalizace byl zvolen součet čtverců odchylek mezi řídicím odtokem W_τ a skutečným řízeným odtokem O_τ vody z nádrže, který je snaha

minimalizovat. Účelová funkce (3) má takový tvar a její snahou je rozložit nedodávku vody pokud možno rovnoměrně mezi jednotlivé měsíce.

$$\left[\pi = \sum_{\tau=1}^{N=TP} (W_{\tau} - O_{\tau})^2 \right] \rightarrow MIN. \quad (3)$$

Ve třetím kroku se na základě skutečného přítoku a nalezeného řízeného odtoku, který odpovídá prvnímu kroku lokálního modelu $\tau = 1$, provede v časovém kroku $T = 1$ simulace chování nádrže pomocí simulačního modelu. Počáteční podmínkou pro řešení další optimalizace je výsledná velikost objemu vody v nádrži na konci časového kroku. Následně je optimalizace posunuta o jeden časový krok.

Kroky 1 až 3 se následně opakují pro každá krok globálního modelu T . Opakováním jednotlivých kroků se zároveň model adaptuje na nové podmínky. Celý proces adaptace je ukončen při dosažení časového kroku $T = M$.

K výpočtům byl použit program SOMVS, což je zkratka pro Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy. Program byl vyvinut na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební, Ústavu vodního hospodářství krajiny. Byl vyvinut v rámci disertační práce Ing. Pavla Menšíka Ph.D. Matematický model je napsán v jazyce FORTRAN a grafické uživatelské rozhraní v jazyce C# [2].

4. Aplikace

Pro aplikaci a následné ověření byly vybrány dva profily. Profil Vlaské a profil v Kroměříži, oba leží na řece Moravě. Profil Vlaské se nachází v horním toku řeky Moravy a má sběrnou plochu 96,55 km². Zatímco profil v Kroměříži se nachází na dolním toku a má sběrnou plochu 7030,31 km². Profily byly vybrány, protože u nich máme k dispozici průtokové řady a také protože se na nich nenachází nádrže. Cílem je srovnat výsledky řízení v obou profilech. Dlouhodobý průměrný průtok pro profil Vlaské je 1,88 m³.s⁻¹ a pro profil Kroměříž 51,2 m³.s⁻¹.

Na začátku bylo provedeno vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže. Byly vytvořeny dvě fiktivní nádrže, jedna v profilu Vlaské a druhá v profilu Kroměříž. Nádrže byly vytvořeny pomocí úlohy tzv. prvního typu, kdy je známa hodnota nalepšeného odtoku a je dána stoprocentní zabezpečení. Hodnota nalepšeného odtoku byla zvolena jako 0,3 násobek dlouhodobého průměrného průtoku. Výsledné hodnoty zásobních prostorů fiktivních nádrží jsou spolu s ostatními hodnotami uvedeny níže v přehledné tabulce.

Tabulka 1 - Hodnoty zásobních prostorů jednotlivých nádrží

Profil	Q _a [m ³ .s ⁻¹]	Plocha [km ²]	Plocha* [%]	Alfa [-]	O _p [m ³ .s ⁻¹]	V _z [m ³]
Vlaské	1,88	96,55	0,4	0,3	0,564	2 180 270
Kroměříž	51,2	7030,31	65	0,3	15,360	119 269 800

*Procento řídicí plochy nádrže k celkové ploše povodí.

Po navržení zásobního objemu jednotlivých nádrží bylo provedeno řízení na období 2000 - 2006. Období 1950 – 2000 bylo použito pro kalibraci, tzn. pro vytvoření ZPPM. Výpočty se lišily hodnotou nalepšeného odtoku. Řízení proběhlo pro 7 různých hodnot nalepšeného odtoku – konkrétně se jednalo o násobky součinitele alfa 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,75, 0,8 a 0,9. Pro každou hodnotu nalepšeného odtoku proběhlo celkem 24 výpočtů, dvanáct pro řízení s předpovězenými průtoky (adaptivní řízení s předpovězenými průtoky – AŘ – P) a dvanáct pro řízení s reálnými průtoky (adaptivní řízení s reálnými průtoky – AŘ – R). Jednotlivé výpočty se od sebe lišily počtem časových kroků lokálního modelu. Výpočty s reálnými průtoky sloužily pro porovnání úspěšnosti řízení, jelikož je považujeme za ideální stav – v praxi nedosažitelný. Dále bylo provedeno pro každou hodnotu nalepšeného odtoku i řízení simulačním modelem (SM). U simulačního modelu probíhá řešení odlišným způsobem než u optimalizačních metod. Omezující podmínky jsou řešeny postupně v časových krocích. Přitom se v každém kroku snažíme přiblížit hodnotě nalepšeného odtoku z nádrže. Simulační model považujeme za nejjednodušší způsob řízení a byl použit pro srovnání výsledků řízení.

Jednotlivé způsoby řízení byly vyhodnocovány a porovnávány podle určeného kritéria (K). Pokud byl řízený odtok větší než řídicí, kritérium bylo vyhodnoceno jako nulové. Pokud byl řízený odtok menší než řídicí, kritérium bylo vyhodnoceno jako rozdíl těchto dvou hodnot povýšen na druhou. Výpočet kritéria byl proveden pro každý měsíc zvlášť a suma těchto hodnot potom určovala úspěšnost řízení. Vzorec pro výpočet kritéria je uveden v rovnicích (4) a (5):

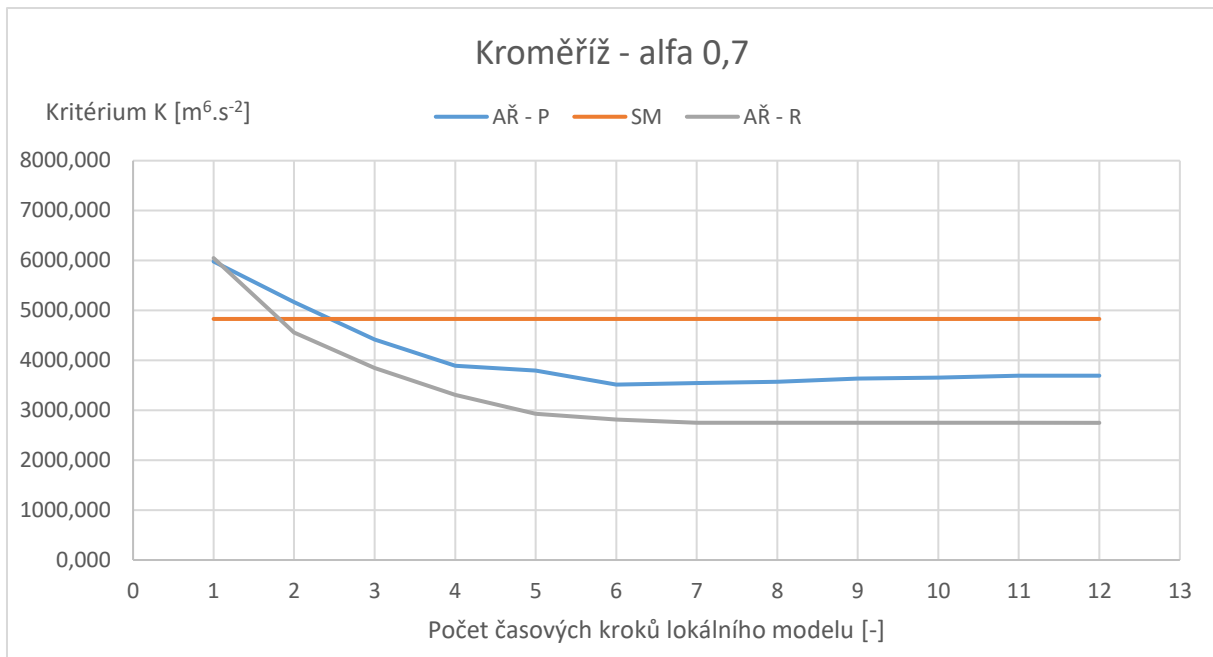
$$KDYŽ: O_t \geq W_t \rightarrow K = 0 \quad (4)$$

$$KDYŽ: O_t < W_t \rightarrow K = (O_t - W_t)^2 \quad (5)$$

5. Shrnutí výsledků

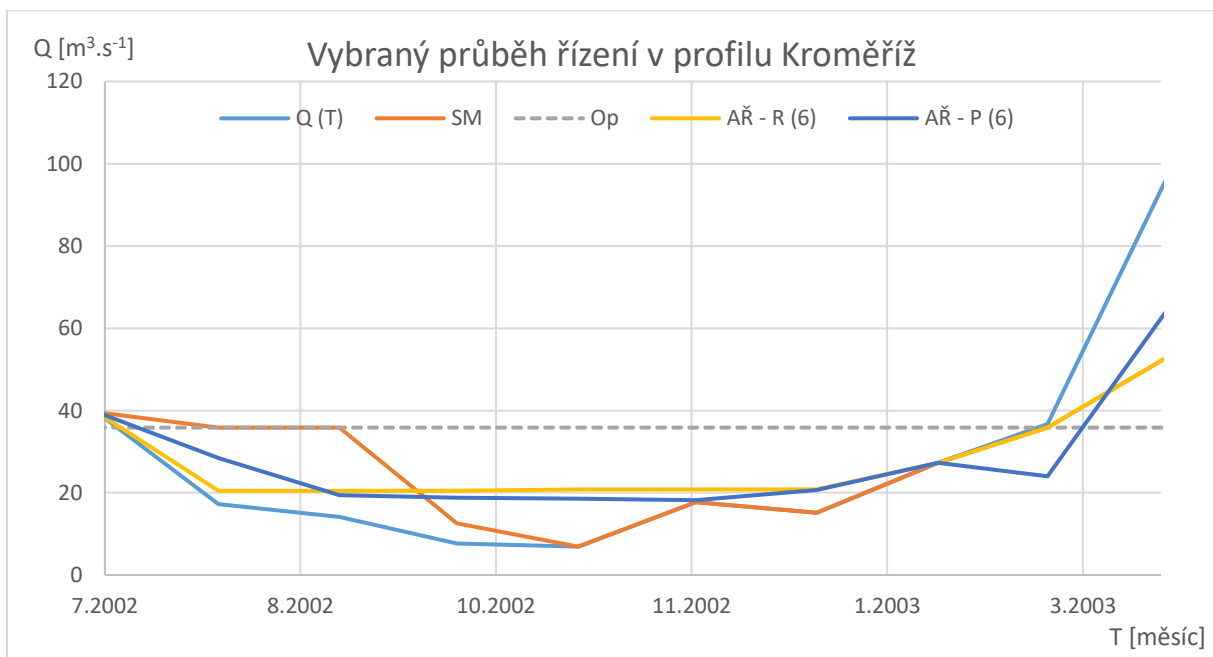
U celého sledovaného období v dolním profilu Kroměříž vystihuje průběh nejlépe řízení na nalepšený odtok se součinitelem alfa 0,7. Při řízení s 1 nebo 2 časovými kroky lokálního modelu dosahuje simulační model lepších hodnot kritéria než řízení s předpovězenými nebo reálnými průtoky. Při více časových krocích globálního modelu již dosahují řízení s předpovězenými a reálnými průtoky lepších výsledků než řízení simulačním modelem. Dále můžeme říci, že čím více kroků lokálního modelu, tím menší hodnota kritéria a tím přesnější máme výsledky. Průběh je vykreslen v níže uvedeném grafu (Obr. 3).

Výše uvedené závěry platí skoro pro všechny hodnoty nalepšeného odtoku. Výjimku tvoří pouze řízení na hodnotu součinitele alfa 0,75, kde již u prvních dvou kroků lokálního modelu dojde při řízení s předpovězenými a reálnými průtoky k lepším výsledkům než u simulačního modelu.



Obr. 3 - Dolní profil Kroměříž- řízení na součinitel alfa 0,7

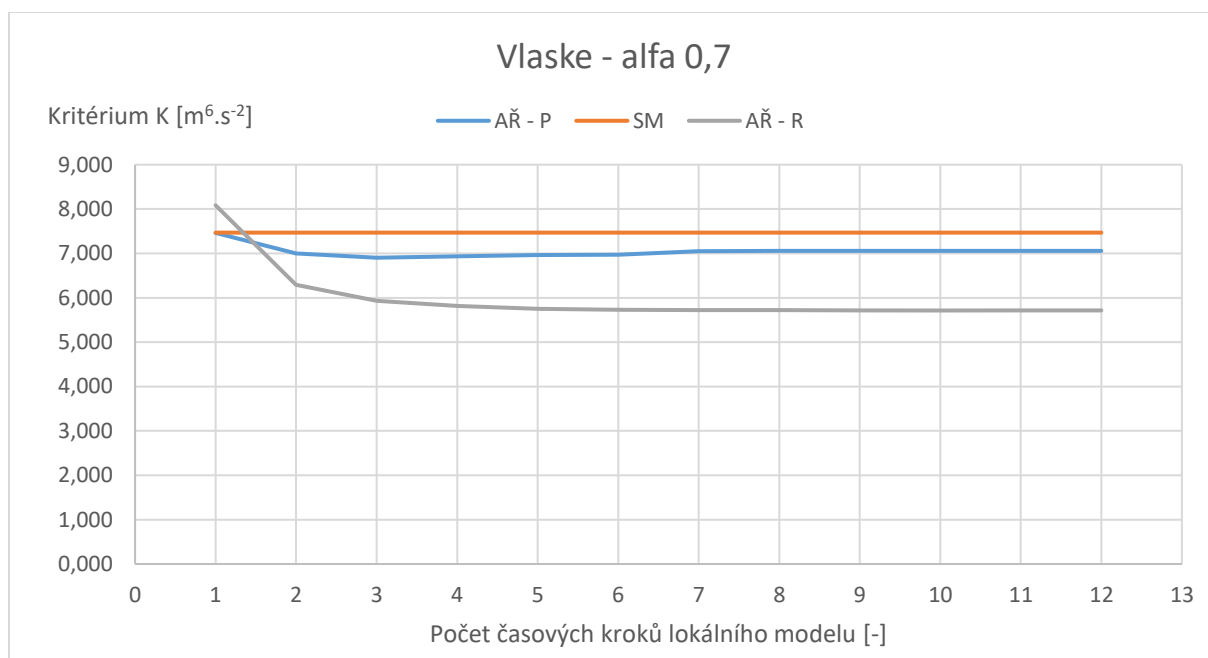
Na Obr. 4 je znázorněn průběh řízení na nalepšený odtok odpovídající součiniteli alfa rovno 0,7 v profilu Kroměříž. Kvůli přehlednosti a lehké orientaci v grafu je vybrána pouze dílčí část řízení, ve které vznikla porucha. Pokud se podíváme na řízení na nalepšený odtok (SM), vidíme, že má nejhlubší poruchu. Pro ukázkou adaptivního řízení jsem vybral pro oba případy řízení s počtem kroků lokálního modelu 6. Vybral jsem je, protože od této hodnoty dojde k ustálení kritéria a již se s rostoucím počtem kroků lokálního modelu nemění. Tato skutečnost je zřejmá z výše uvedeného grafu (Obr. 3). V obou případech adaptivního řízení můžeme vidět, že dosahují lepších výsledků řízení, protože hloubka poruchy není tak velká jako u simulačního modelu. Adaptivní řízení s reálnými průtoky zde dosahuje mírně lepších výsledků než adaptivní řízení s předpovězenými průtoky.



Obr. 4 - Vybraný průběh řízení v profilu Kroměříž

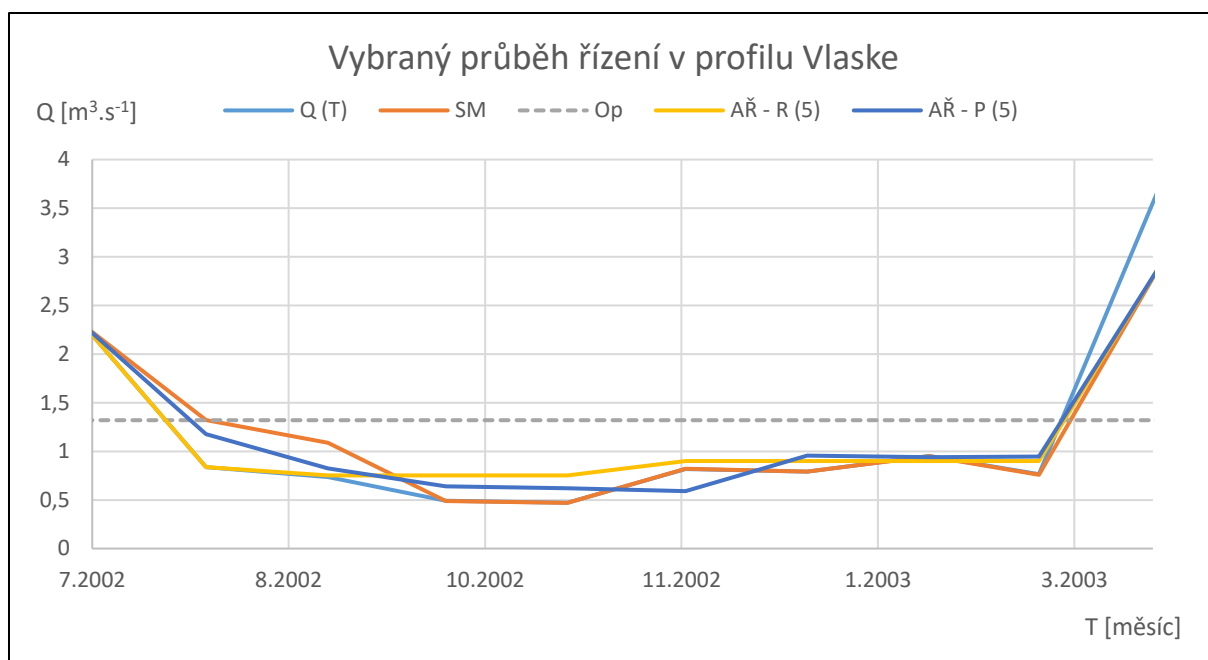
U celého sledovaného období v horním profilu Vlaske můžeme sledovat podobný průběh jako v dolním profilu Kroměříž. Jako ukázkový případ jsem opět vybral řízení na nalepšený odtok se součinitelem alfa 0,7. Při řízení s jedním časovým krokem lokálního modelu dosahuje opět simulační model lepších výsledků než řízení s předpovězenými nebo reálnými průtoky. Při dvou a více krocích již dosahuje simulační model horších výsledků než řízení s předpovězenými nebo reálnými průtoky. Dále také platí, že řízení s reálnými a předpovězenými průtoky má klesající tendenci, to znamená, že řízení s více časovými kroky lokálního modelu dosahuje lepších výsledků. Průběh je opět vykreslen v níže uvedeném grafu (Obr. 5).

Výjimku tvoří pouze řízení na hodnotu součinitele alfa 0,4 a 0,5. Rozdíl oproti výše zmíněnému standardu je v tom, že řízení s předpovězenými průtoky zde nedosahuje nikdy lepších výsledků než řízení simulačním modelem. Důvod je především v minimálním výskytu poruchových měsíců, kdy není dostatek vody a v nepřesnosti předpovědního modelu.



Obr. 5 - Horní profil Vlaske - řízení na součinitel alfa 0,7

Na Obr. 6 je znázorněn vybraný průběh řízení na nalepšený odtok odpovídající součiniteli alfa rovno 0,7 v profilu Vlaske. Kvůli přehlednosti a lepší orientaci v grafu jsem opět vybral jen dílčí část z celého řízeného období. Závěry jsou stejné jako ty, které jsem uvedl u profilu Kroměříž. Rozdíl je jen v tom, že jsem zde uvedl adaptivní řízení s počtem kroků lokálního modelu 5. Můžete si zde také všimnout, že rozdíly mezi jednotlivými řízeními jsou zde menší. To je způsobeno tím, že jsou v tomto profilu průtoky asi 10x menší než u profilu v Kroměříži.



Obr. 6 - Vybraný průběh řízení v profilu Vlaske

6. Závěr

Závěrem můžeme říci, že z pohledu počtu časových kroků lokálního modelu jsme došli v obou profilech ke shodným výsledkům. U prvních dvou kroků lokálního modelu jsou výsledky ve většině případů horší než řízení simulačním modelem. Následně dojde k postupnému klesání kritéria (zlepšování výsledků). K ustálení dojde při řízení s výhledem na 5 nebo 6 časových kroků lokálního modelu a následně se hodnota kritéria již nemění nebo mění jen velmi málo. U horního profilu jsou rozdíly kritéria u jednotlivých řízení větší, což je logické, jelikož jsou v tomto profilu průtoky až 10 x větší a proto je větší i hodnota kritéria.

Dále můžeme konstatovat, že s řízením na větší nalepšený odtok jsme dosahovali lepších výsledků. Samozřejmě se nepředpokládá, že budeme chtít nádrž, která je navržena na 0,3 násobek dlouhodobého průměrného průtoku, řídit na nalepšený odtok roven 0,7 násobku dlouhodobého průměrného průtoku. Ovšem podle dosavadních odhadů lze v průběhu hydrologického roku očekávat výskyt suchých období střídající se s obdobími příválových dešťů. Důsledkem těchto klimatických změn můžeme očekávat výrazný pokles dlouhodobých průměrných průtoků v říční síti. Hodnota dlouhodobého průměrného průtoku v našich tocích může klesnout o 20 – 40 % [4].

Pokud budeme uvažovat s poklesem dlouhodobého průměrného průtoku o 40 % a přepočítáme si hodnotu součinitele alfa tak, aby se hodnota nalepšeného odtoku nezměnila, podle vzorce:

$$O_p = \alpha * Q_a \quad (6)$$

$$O_p = 0,3 * 1,88 = 0,5 * 1,128 \quad (7)$$

zjistíme, že hodnota součinitele alfa se nám zvedla na 0,5. Pokud k tomu připočteme i zvýšené požadavky na odběr vody, tak se dostáváme na hodnoty, které v současné době odpovídají řízení na nalepšený odtok roven 0,6 násobku dlouhodobého průměrného průtoku. A při těchto řízeních již bylo dosaženo dobrých výsledků na obou dvou řešených profilech.

Poděkování

Článek je výsledkem specifického výzkumu FAST-S-14-2454 “Řízení provozu zásobní funkce soustavy nádrží s použitím optimalizačního modelu”.

7. Použitá literatura

- [1] Menšík P., Starý M a Marton D., *Using Predictive Models of Mean Monthly Flows for Operative Outflows Control from Large Open Reservoirs*. In Proceedings ITISE 2014, International work- conference on Time Series. Spain, Granada: Copicentro Granada S. L, 2014. p. 382-395. ISBN: 978-84-15814-97- 9.
- [2] Menšík P. a Starý M., *SOMVS – Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy*, dostupné z: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/somvs.php>
- [3] Zahradnicek P., Trnka M., Brazdil R., Mozny M., Stepanek P., Hlavinka P., Zalud Z., Maly A., Semeradova D., Dobrovolny P., Dubrovsky M. a Reznickova L., The extreme drought episode of August 2011–May 2012 in the Czech Republic, *International Journal of Climatology*, 2014, pp 1-18.
- [4] Kašpárek L., *Odhad objemu nádrží potřebného pro kompenzaci poklesu odtoku vlivem klimatické změny*, VÚV Praha, 2005

Martin Sobek: **Strategic Control of Fictive Water Reservoir Storage Capacity**

The thesis is focused at verifying the functionality of adaptive control of fictive water reservoir. Discharge series are predicted using zonal prediction model. Fictive reservoirs located on the same watercourse in the other profiles. One profile is in Kromeriz. The average water flow in profile Kromeriz is $51,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Second profile is in Vlaske. The average water flow in this profile is $1,88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The period 1950 – 2000 was used to the creation of zonal predictive model. Functionality of model is verified by the control in 2000 – 2006. The calculations differed by value of required water outflows from the reservoir. The control was applied on seven different values of required water outflows. Specifically, it was multiples of coefficient alpha – 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,75, 0,8 and 0,9. It was applied total twenty-four calculations for every required water outflows, twelve for control of predictive water inflows into reservoir (adaptive control of predictive water flows), and twelve for control of real water inflows into reservoir (adaptive control of real water flows). Individual calculations were different by number of steps of local model. Adaptive control of real water flows was used to the comparison, because we consider it for the ideal control – in practice unattainable.

Bc. Martin Sobek

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav vodního hospodářství krajiny
Veveří 95, 602 00 Brno
martinsobek3@gmail.com

Ing. Pavel Menšík, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav vodního hospodářství krajiny
Veveří 95, 602 00 Brno
mensik.p@fce.vutbr.cz