

# OPERATIVNÍ ŘÍZENÍ ODTOKU VODY SOUSTAVOU NÁDRŽÍ ZA PRŮCHODU POVODNĚ DOLNÍ ČÁSTÍ POVODÍ

Starý, M. – Doležal, P. - Králová, H.  
VUT FAST ÚVHK, Žižkova 17, 66237 Brno

## Anotace

V příspěvku jsou uvedeny výsledky aplikace dvou řídicích algoritmů založených na adaptivním principu řízení odtoku vody z povodí za průchodu povodní. První je založen na kombinaci nelineární optimalizace (určení řídicího průtoku) a fuzzy-regulace (určení dílčích řízených odtoků vody z nádrže). Minimalizovaným kritériem optimalizace je součet čtverců odchylek kulminačních průtoků ve vybraných profilech říční sítě od zadaných hodnot. Princip konstrukce druhého algoritmu je obdobný. Nevyužívá však fuzzy-regulátory. Nelineární optimalizací jsou v něm postupně upřesňovány nikoliv řídicí odtoky, ale přímo polohy regulačních uzávěrů. Úlohy jsou zprogramovány v prostředí MATLAB [1]. Na spolupráci dvou hypotetických nádrží je provedeno srovnání obou přístupů. V obou případech je prokázána vysoká účinnost řízení.

## Úvod

Při použití metod umělé inteligence (UI), které se v teorii řízení dynamických systémů dostávají do popředí pozornosti (např. fuzzy-regulátory, neuro-regulátory, nebo různé učící se hybridní regulační systémy), je zásadní otázkou stanovení průběhu řídicích veličin v návaznosti na měnícím se stavu řízeného systému a případných dalších vstupních veličinách. To platí zejména u dynamických systémů, které pracují s výrazným zpožděním. Řídicí průtoky (resp. polohy regulačních uzávěrů) u jednotlivých nádrží je třeba podle toho stanovit v závislosti na časově a prostorově měnících se srážkách nad povodím, průtocích vody v říční síti a plnění jednotlivých nádrží.

*První* srovnávací algoritmus využívá kombinaci jednoduché optimalizační metody s fuzzy regulátorem pro operativní řízení odtoku ze soustavy nádrží s nehrazeným přelivem za průchodu povodně [4]. Přitom průběh řídicí veličiny je v každém rozhodovacím časovém bodě přesně vyčíslen simulačním modelem (s optimalizovanou volbou parametrů - parametry jsou přímo řídicí veličiny), na základě aktuální upřesněné předpovědi přítoku do nádrže. Použití fuzzy-regulátoru umožňuje při daném řídicím odtoku vody z nádrže nastavit spojitý průběh veličiny řízené a následně všech dílčích odtoků vody z nádrže [4]. Zjednodušeně je rovněž posouzen vliv délky předpovědi přítoku vody do nádrže a trvání vzájemného posunu rozhodovacích časových bodů na dosažené efekty řízení. *Druhý* srovnávací řídicí algoritmus vychází ze stejného principu. Optimalizací určuje nikoliv veličinu řídicí, ale přímo veličiny akční - nastavení poloh regulačních uzávěrů [2].

## Metoda

Uvažujme, že budeme řídit tok vody říční sítí v dolní části rozsáhlého povodí s nádržemi. Necht' srážky spadlé na mezipovodí a vliv změny podzemního odtoku jsou zanedbány. Řízený systém se pak skládá pouze z úseků toků a nádrží. Předpokládejme dále, že budoucí průběh přítoků do systému (okrajová podmínka řešení) v časovém úseku  $\Delta\tau$ , lze předpovědět libovolným srážkoodtokovým modelem, implementovaným na horní části povodí.

Z důvodu nezbytné rychlosti výpočtu je zavedeno zjednodušení - úloha proudění vody úseky toků a celou říční sítí je řešena jako jednorozměrná, na soutocích koryt toků je zachována pouze spojitost průtoků. Pro popis přenosových vlastností koryt toků je použita kinematická vlnová aproximace [5]. Proudění vody korytem toku je pak popsáno rovnicemi kontinuity a např. podle Manninga:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$Q = \frac{1.49 \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \cdot A}{n}, \quad (2)$$

kde značí:  $Q$  – průtok,  $A$  – průtočná plocha,  $x$  – směr proudění vody,  $t$  – čas,  $R$  – hydraulický poloměr,  $S$  – sklon dna koryta,  $n$  – drsnost podle Manninga.

Nádrže jsou v takto zjednodušeném systému jedinými nástroji, kterými je možno měnit průběh toku vody systémem. Jejich přenosové vlastnosti, které při daném plnění nádrže  $V(t)$  v čase  $t$  a přítoku vody do nádrže  $Q(t)$ , jednoznačně určují okamžitou hodnotu odtoku vody z nádrže  $O(t)$ . Vztah těchto veličin lze vyjádřit známou diferenciální rovnicí 1. řádu:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q(t) - O(V(t)), \quad (3)$$

kde  $V(t)$  je stavová veličina,  $Q(t)$  je veličina vstupní a  $O(V(t))$  je veličina řízená. Předpokládejme, že počáteční hodnoty přítoku do nádrže v čase  $t=0$ , tj.  $Q(0)$  a plnění nádrže  $V(0)$ , tj. počáteční podmínky řešení, jsou určeny měřením.

Je zřejmé, že odtok z nádrže v budoucím období  $\tau$  závisí při daném časovém průběhu přítoku  $Q(t)$  na počátečním naplnění nádrže, na hydraulických vlastnostech přelivu, na hydraulických vlastnostech spodních výpustí a na jejich otevření. Při uvedených počátečních podmínkách a při známé předpovědi přítoku vody do nádrže pak řízený odtok závisí pouze na poloze regulačních uzávěrů. Jejich polohy mohou být v budoucím období buď konstantní nebo se mohou v čase měnit. Příslušným nastavením uvedených poloh regulačních uzávěrů je tak možno nádrži přiřadit požadované dynamické (přenosové) vlastnosti.

Nádrž považujeme podle klasické teorie regulace za řízený objekt regulačního obvodu se systémem řízení on-line. Přítok do nádrže považujeme za poruchovou veličinu  $z(t)=Q(t)$ , požadovaný odtok z nádrže za veličinou řídicí  $w(t)$ , skutečný řízený odtok za řízenou veličinu  $y(t)=O(V(t))$ . Funkční objekty považujeme za akční prvky a polohy uzávěrů (přelivů, spodních výpustí apod.) pak za veličiny akční,  $u(t)$  je akčním zásahem. Cílem manipulací je co největší snížení kulminačních odtoků z nádrže, resp. snížení kulminačních odtoků v oddáleném profilu v toku pod nádrží. To vede k maximálnímu zploštění povodňové vlny.

Vlastní konstrukci řídicího algoritmu systému lze rozdělit na dvě dílčí úlohy. První úlohou je volba takového typu regulátoru, který bude schopen při zadaném požadovaném průběhu řídicí veličiny a spojitě se měnícím stavu nádrží v diskrétních časových krocích postupně určovat hodnoty změny veličiny akční (změna nastavení uzávěrů) při dostatečné stabilitě regulačního pochodu. Pro tento účel byla ověřena možnost užití fuzzy-regulace. Navržený fuzzy regulátor je typu PI (proporcionálně integrální). Popisující rovnice tohoto regulátoru je nahrazena pravidly obsaženými v bázi pravidel ve tvaru:

$$\text{if } e = \langle \text{hodnota} \rangle \text{ and } \Delta e = \langle \text{hodnota} \rangle \text{ then } \Delta u = \langle \text{hodnota} \rangle, \quad (4)$$

kde značí:  $e$  - regulační odchylku mezi řídicím a řízeným odtokem,  $\Delta e$  - změnu regulační odchylky,  $\Delta u$  - změnu akčního zásahu (např. změna otevření spodních výpustí). Nově určené změny akčního zásahu jsou tedy dány součtem akčního zásahu v předchozím časovém kroku a změny  $\Delta u$ . V regulátoru je použit fuzzy inferenční systém Mamdani. Defuzzifikace je prováděna metodou středu plochy.

Druhou úlohou je nutnost určení požadované hodnoty řídicí veličiny  $w(t)$  u každé nádrže. Tento problém se pro budoucí (předpovídané) období  $\tau$  řeší pomocí simulačního modelu s optimalizovanou volbou parametru. Počáteční podmínkou řešení je vždy aktuální naplnění nádrží a okrajovou podmínkou je časový průběh předpovídaného přítoku vody do vstupních profilů systému. Parametrem je hledaná hodnota řídicího odtoku, která je pro jednoduchost považována v řešeném období  $\tau$  za konstantní. Pro nalezení optimální hodnoty parametrů byla

zvolena jednoduchá mřížková (grid) metoda z oblasti nelineárního programování. Jako kritérium optimalizace byla použita hodnota kulminačního odtoku z nádrže, resp. ve vybraném profilu na toku pod nádrží, která byla minimalizována. Simulace chování nádrží podle rovnice (3) je řešena metodou Runge-Kutta 4. řádu [3]. V říční síti se při spuštění operativního řízení (počáteční podmínka řešení) předpokládá ustálené proudění.

Vlastní řešení problému je tedy diskrétní (bodovou) simulací spojitého procesu. Procento otevření výpustí nádrže je v každém časovém kroku výpočtu  $\Delta t$  stanoveno pomocí fuzzy-regulátoru a časový průběh celkového a dílčích odtoků vody se tak mění podle aktuální hodnoty parametru - požadovaného řídicího odtoku.

Proces operativního řízení provozu systému za průchodu povodně je možno chápat jako sekvenci rozhodovacích časových bodů, vzájemně posunutých o časový krok  $\Delta \tau$ , v nichž se opakovaně upřesňuje předpověď budoucího přítoku do nádrže na období  $\tau$  (délka předpovědi limituje časový krok  $\Delta \tau$ ), měřením (výpočtem) se stanoví okamžité naplnění nádrže, z předchozího výpočtu se převezme příslušný průběh průtoků v říční síti a následně se simulačním modelem určí hodnota řídicí veličiny. Výstupní varianta ze simulačního modelu určuje i časový průběh změn otevření uzávěrů a tím i celkového řízeného odtoku.

Popsané řídicí algoritmy byly zprogramovány v prostředí MATLAB s využitím Fuzzy Logic Toolboxu - pod názvem RIZS1 a RIZS2, Program umožňuje buď operativně řídit provoz jedné a více nádrží při zadání předpovězených budoucích přítoků vody do systému, nebo simulovat operativní řízení odtoku v historickém období (předpovězené přítoky jsou nahrazeny skutečně naměřenými průběhy přítoků vody do systému). Tato verze umožňuje analyzovat vliv délky předpovědi přítoku vody do nádrže na dosažené efekty řízení apod. Vzhledem k tomu, že předpovědi přítoku vody do nádrže v reálném provozu nejsou přesné, je zřejmé určité nadhodnocení dosažených efektů.

## Aplikace

Oba programy byly ve verzi určené pro simulaci operativního řízení použity pro řízení odtoku vody ze soustavy dvou hypotetických nádrží shodných s nádrží Brno – viz. obr.1. Obě však mají zjednodušené funkční objekty, každá obsahuje pouze dvě spodní výpustí a pevný přeliv. Délky úseků toků jsou uvedeny na obrázku. Do dvou vstupních profilů systému přitéká přítok převzatý z povodňové situace z 12.7. až 16.7. 1974 (Svratka/Veverská Bítýška). Oba přítoky však nejsou synchronní, ale jsou vzájemně posunuty o 16 hodin. Smyslem aplikace je prokázat funkčnost obou algoritmů a provést jednoduché srovnání dosažených výsledků.

V průběhu řešení byl testován vliv různých délek předpovědi přítoku vody do nádrží (24h, 48h a 72h). Pro testování byl zvolen časový interval mezi rozhodovacími časovými body 6h (opakovaný výpočet řídicích veličin - adaptace)

V tab.1 jsou uvedeny pro srovnání hodnoty kulminačních průtoků vody v oddáleném profilu (závěrový profil, který byl vybrán pro minimalizaci průtoků) a jsou z ní zřejmé dosažené efekty. Ukázky výsledků řešení jsou znázorněny na obr.2 až obr.5. Obr.2 a obr.3 znázorňují výsledky simulace operativního řízení programy RIZS1 a RIZS2 pro délku předpovědi přítoku 48 h, obr.4 a obr.5 znázorňují obdobné výsledky pro délku předpovědi přítoku 72 h. V dílčích obrázcích značí tlustá čára vždy příslušnost zobrazované veličiny k jedné nádrži a tenká čára ke druhé nádrži. V dílčím obrázku "Dílčí a celkové odtoky" je odtok přes přeliv vykreslen pouze u programu RIZS1. Čerchovaná čára označuje odtok z první nádrže, tečkovaná čára označuje odtok z druhé nádrže.

**Tab.1.** Srovnání kulminačních průtoků v závěrovém profilu

Délka předpovědi přítoku [h]	Kulminační odtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	
	Řídicí alg.1 - fuz.	Řídicí alg.2
24	35,55	48,01
48	35,17	37,48
72	27,08	35,51

## Shrnutí výsledků a závěr

Nesynchronizovaný průchod složitých tvarů povodňových vln (opakované povodně) ukázal na možnosti použitých řídicích algoritmů, které oba poskytují velmi dobré výsledky. Algoritmus využívající fuzzy-regulaci je za takto složitých podmínek výrazně účinnější a lépe vyhlazuje řízený odtok. Cenou za dosažení lepších výsledků je prodloužení doby výpočtu na dvoj až trojnásobek času, který potřebuje druhý algoritmus. V praxi je však využitelný pouze na nádržích, které umožňují spojitě dálkové ovládání uzávěrů. Algoritmus, který nevyužívá fuzzy regulaci, je rychlejší. V praxi je využitelný na všech nádržích s obsluhou.

Vliv délky předpovědi na snížení kulminačních odtoků vody z nádrže je značný. Výrazně projevilo prodloužení předpovědi ze 48h na 72h u prvního algoritmu a z 24h na 48h u druhého algoritmu. Pak již byl vliv délky předpovědi poměrně malý a není uveden v prezentovaných výsledcích.

Zvolený časový interval mezi rozhodovacími časovými body 6h (opakovaný výpočet řídicích veličin) považujeme za dlouhý. Závisí na možnostech vydávání opakovaných upřesněných hodnot předpovězených přítoků do nádrže. Zkrácení intervalu vede na lepší vyhlazení řízeného odtoku vody z nádrže. Při použití reálných předpovědí přítoku vody do nádrže považujeme zkrácení tohoto intervalu za nezbytné.

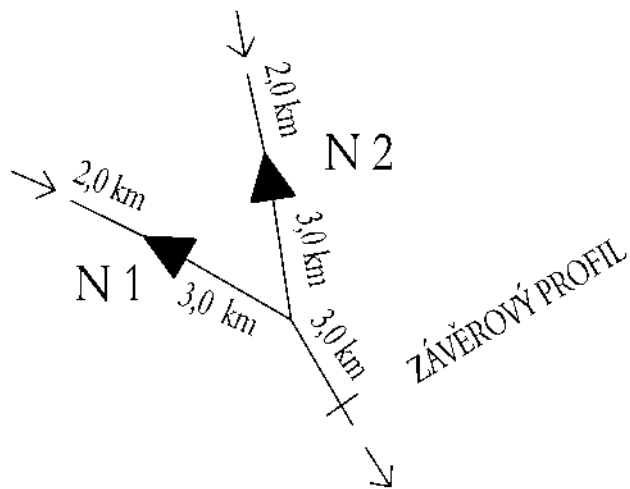
Algoritmy předpokládají, že se vypočtený průběh řídicí veličiny, resp. nastavení poloh uzávěrů v předpovídaném období nemění. Numerické experimenty ukázaly, že rozdělení těchto veličin na dvě a více (úměrně narůstá počet neznámých a prodlužuje se doba řešení) vede k vyhlazení řízených odtoků a k dalšímu snížení kulminačních průtoků. Pokud se však zkrátí časový interval mezi rozhodovacími časovými body  $\Delta t$ , limitovaný možností vydávání operativních předpovědí přítoků vody do nádrže, je dosaženo obdobného efektu.

Použité algoritmy jsou v současnosti aplikovány na kaskádu nádrží Vranov - Znojmo a probíhá implementace na dolní části Dyjsko-svratecké soustavy.

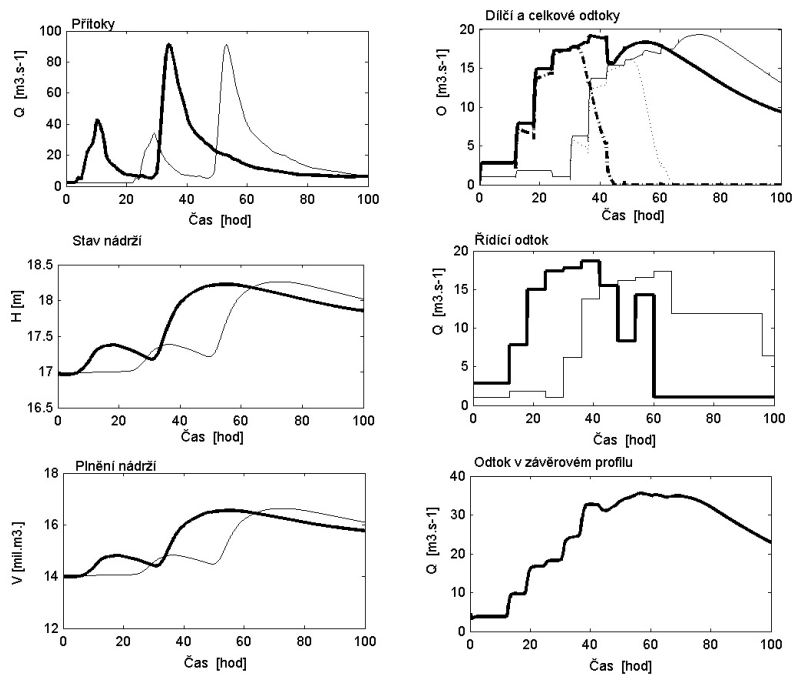
*Příspěvek byl zpracován v rámci řešení projektu GAČR: 103/01/0201.*

## Literatura

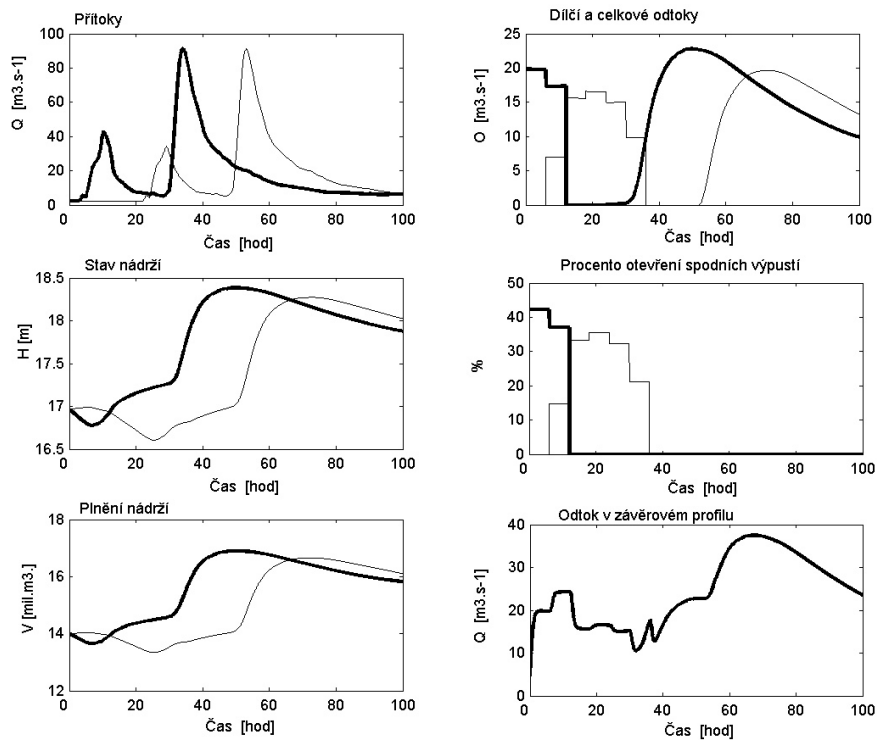
- [1] MATLAB, The Language of Technical Computing, The MathWorks, 1984-2001.
- [2] Starý, M.: HYDROG. Software pro simulaci a operativní řízení odtoku vody z povodí. Brno, 1991-2001.
- [3] Starý, M.: Nádrže a vodohospodářské soustavy, VUT FAST, Brno, 1990.
- [4] Starý, M.: Operativní řízení odtoku vody z nádrže za průchodu povodně, MATLAB 2001, Praha, 2001, 6s.
- [5] STEPHENSON, D.- MEADOWS, M.E., 1986, Kinematic Hydrology and Modeling. Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, 287 p.



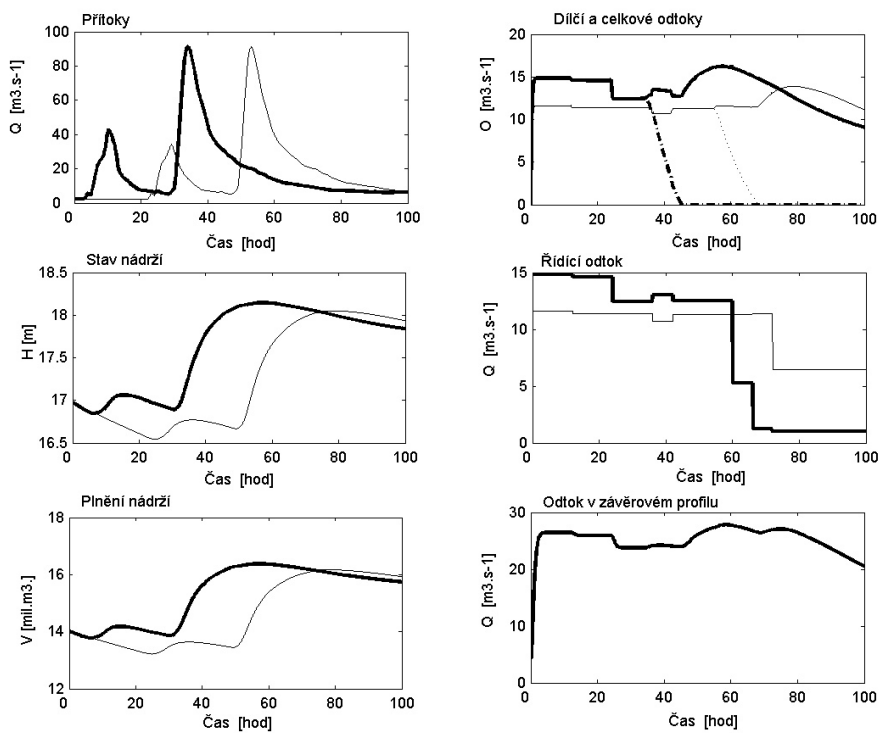
**Obr.1.** Schema systému.



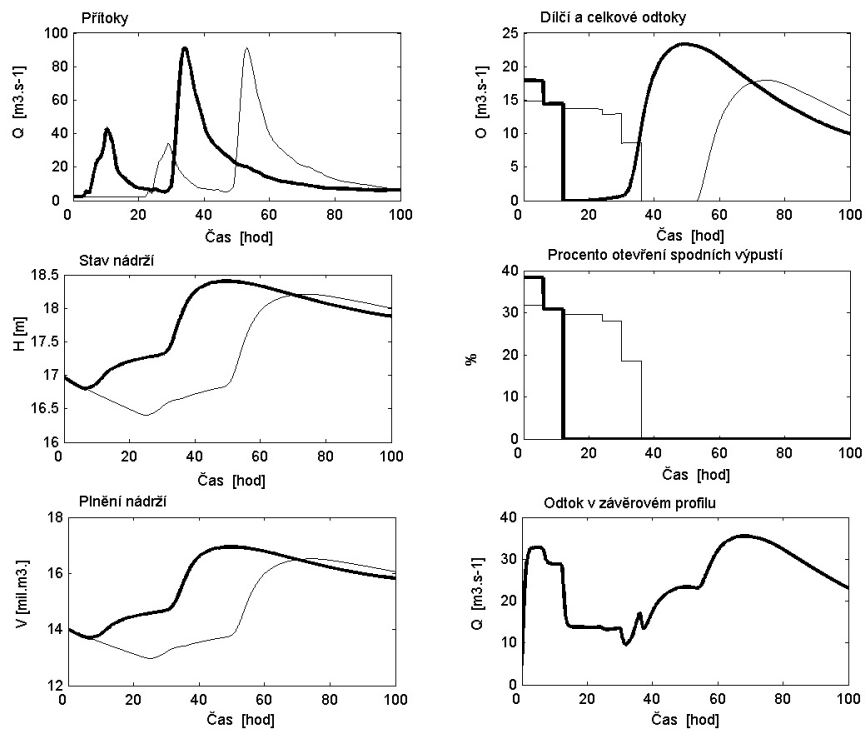
**Obr.2.** Program RIZS1 (fuzzy) - délka předpovědi průtoku 48 h.



**Obr.3.** Program RIZS2 - délka předpovědi průtoku 48 h.



**Obr.4.** Program RIZS1 (fuzzy) - délka předpovědi průtoku 72 h.



*Obr.5. Program RIZS2 - délka předpovědi průtoku 72 h.*