

Modelování dělení průtoků v nátokových galeriích

JIŘÍ PROCHÁZKA

Klíčová slova: dělení průtoků – CFD – Flow 3D – nátokové galerie

ABSTRAKT

Hlavním cílem práce byla optimalizace objektů sloužící k rozdělení průtoků v nátokových galeriích, které se využívají nejen v úpravnách vod, ale i v čistírnách odpadních vod (ČOV). Působením v oblasti problematiky ČOV se zjistilo, že se v České republice a ani ve světě nevyskytují optimalizované objekty pro rovnoměrné rozdělení průtoků na libovolné množství nátokových větví do nádrží o stejném průtoku. V současné době jsou ve většině neregulovaných objektů mezi jednotlivými nátokovými větvemi k nádržím značné rozdíly. U regulovaných objektů je nutné výtokové otvory regulovat při každé změně průtoku a u změn množství nátoků do nádrží (např. z důvodu odstavení nádrže) manuálně dopravit každý výtokový otvor (např. pomocí stavítka) tak, aby všechny nátoky do nádrží měly stejný průtok. V modernějších případech je stavítka osazeno elektromotorkem pro změnu polohy a sondou snímající výšku hladiny. Centrální jednotka následně dopočítává průtok v jednotlivých nátokách do nádrží a upravuje polohu stavítek tak, aby bylo všude dosaženo stejných průtoků. Cílem výzkumu bylo optimalizovat rozdělovací objekt tak, aby nátoky do nádrží dosahovaly u průtoku podobných hodnot jak při změně přítoku na rozdělovací objekt, tak i při změně množství nátokových větví do nádrží, a to bez významné regulace na rozdělovacím objektu. Aby byl výzkum snadno aplikovatelný na co největší množství rozdělovacích objektů, byly k řešení problematiky vybrány nejčastěji používané objekty pro dělení průtoků (kašnový přeliv, žlab s výtokovými otvory osazenými stavítkem a sondou pro monitoring výšky hladiny a další). Na vybraných objektech různých variant a tvarů byly simulovány různé průtokové stavy, po jejichž analýze byly objekty optimalizovány tak, aby bylo dosaženo co nejpodobnějších průtoků na nátokách do jednotlivých nádrží.

ÚVOD

Tento článek představuje CFD (Computational Fluid Dynamics) model vybraného objektu rozdělovací průtoky na ČOV. Tento objekt byl vybrán, protože patří k nejpoužívanějším na ČOV. Objekt rozděluje průtok z provzdušňovací nádrže do čtyř nádrží. Pozorování během provozu ukázala, že průtok není rozdělen rovnoměrně – mezi nátoky do jednotlivých nádrží jsou značné rozdíly.

Na modelu bylo simulováno jednofázové proudění s čistou vodou. Vzduchové bubliny ani vločky kalu nebyly zahrnuty. Analýza citlivosti ukázala určitý vliv charakteristik turbulence na přítoku na konečné výsledky. Vzhledem k tomu, že přítok pochází přímo z provzdušňovací nádrže s jemnobublinnou aerací, je určení turbulence velmi obtížné. Všechny výsledky pocházejí z nekvalitního modelu.

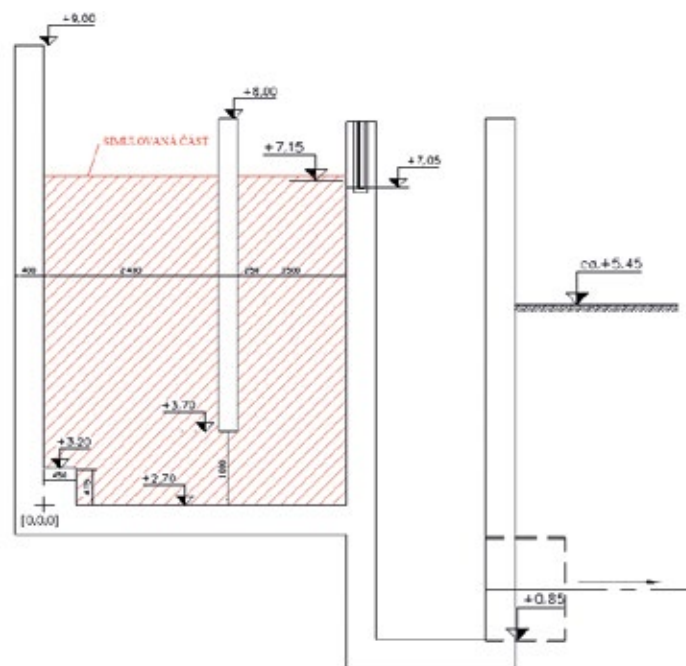
Jelikož průtoky, které se mají simulovat, nebyly výslovně specifikovány, byly zvoleny tyto průtoky:

Tab. 1. Simulované průtoky

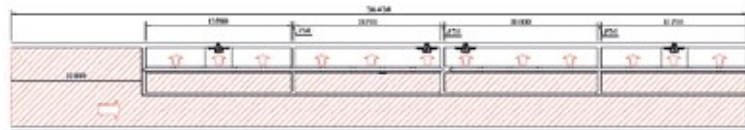
Tab. 1. Simulated flows

Popis	$0,75 \cdot Q_{24}$	Q_{24}	$0,5 \cdot Q_{\max}$	Q_{\max}
Průtok [l/s]	377,2	565,8	3 000	6 000

Geometrie modelu byla nastavena podle dostupných výkresů nejvyužívanějších objektů na ČOV. Byla simulována 10 m dlouhá část provzdušňovací nádrže spolu s konstrukcí rozdělovací proudění. To proto, aby bylo dosaženo plně rozvínutého proudového pole na začátku struktury rozdělovací proudění [1].



Obr. 1. CFD model – příčný řez – simulovaná část vyznačena červeně
Fig. 1. CFD model – cross section – simulated part marked in red



Obr. 2. CFD model – půdorys – simulovaná část vyznačena červeně
Fig. 2. CFD model – floor plan – simulated part marked in red

METODIKA

Před každou simulací je důležité obecně pochopit, jak konstrukce funguje, a stanovit zde probíhající nejdůležitější jevy. Objekty rozdělující proudění jsou obvykle založeny na výtokových otvorech. Přepadová rychlost výtokového otvoru je dána hydraulickým převýšením před ním. Mají-li tedy otvory stejné délky stejnou přelivnou výšku, musí být průtok stejný. I malá změna výšky hladiny však způsobuje velké rozdíly mezi průtoky.

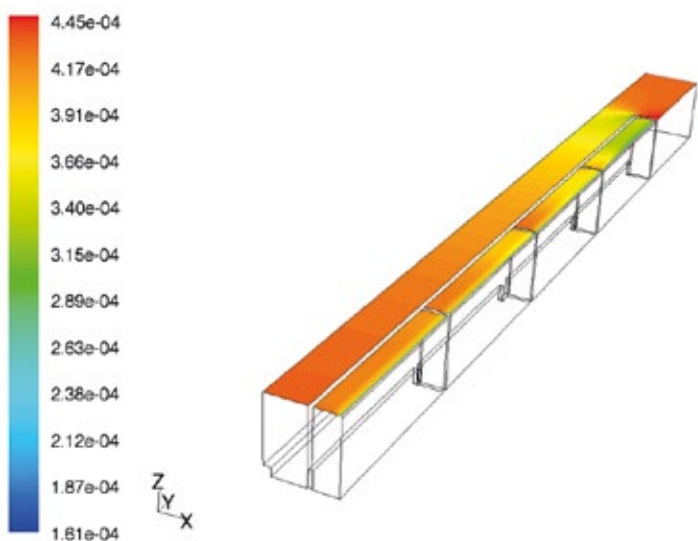
To je problém tohoto objektu. Koryto, které rozvádí průtok do čtyř výtokových otvorů, je poměrně dlouhé a vytvoří se podél něj linie zpětného vzdutí. Hladina vody v objektu tedy nebude konstantní. Otvory na dně, jež odvádějí vodu do zdrží, jsou poměrně velké, a proto nepřispívají k rovnoměrnému rozdělení průtoku.

Průběh hladiny v objektu

Byly provedeny čtyři různé simulace rozdělovacího objektu s různými průtoky. Výsledky ukazují, že výše uvedené úvahy jsou správné. Na začátku koryta dochází k poklesu hladiny vody. Jak voda proudí z provzdušňovací nádrže do úzkého koryta rozdělovacího objektu, zvyšuje se rychlostní převýšení, a proto musí hladina vody klesat. Dále podél koryta část vody protéká bočními otvory do nádrží, rychlost proudění se snižuje a hladina vody se zvyšuje [2].

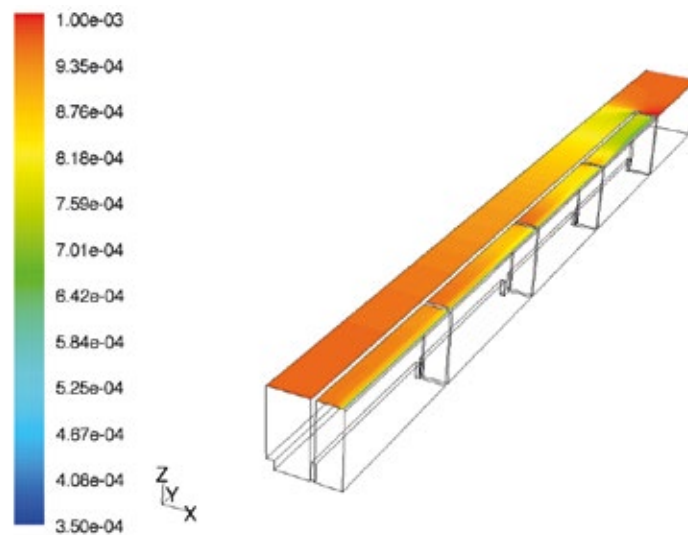
Model to ukazuje při všech průtocích. Při nízkých průtocích (377 a 566 l/s) je rozdíl tak malý, že tento efekt je pouze teoretický a ve skutečnosti je významnější rozdíl v hladině vody způsobený jinými faktory (vlny, vítr). Při vysokých průtocích (3 000 a 6 000 l/s) je však tento efekt poměrně významný. To ilustrují následující obrázky (obr. 3–7). Barevná škála ukazuje rozdíl mezi aproximací konstantní hladiny a simulovanou hladinou vody v metrech.

Všechny popsané efekty jsou ještě lépe vidět na obr. 7. Výška hladiny vody je zde vyjádřena v metrech.



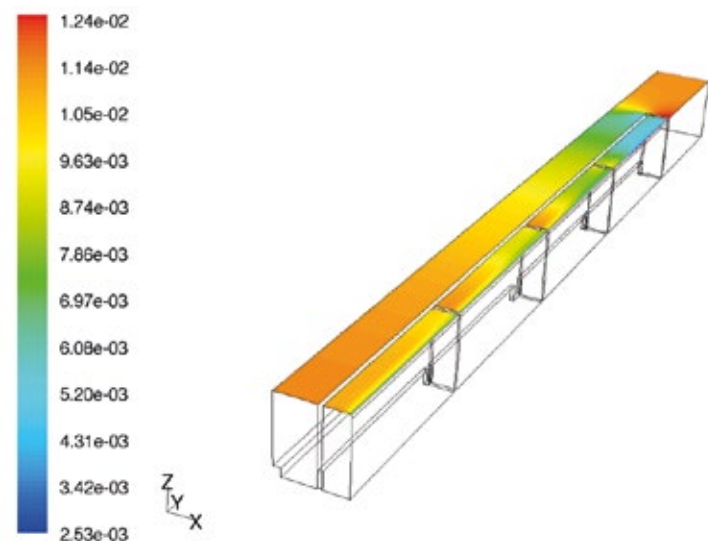
Obr. 3. Simulovaný rozdíl hladin $Q = 377$ l/s

Fig. 3. Simulated water level difference $Q = 377$ l/s



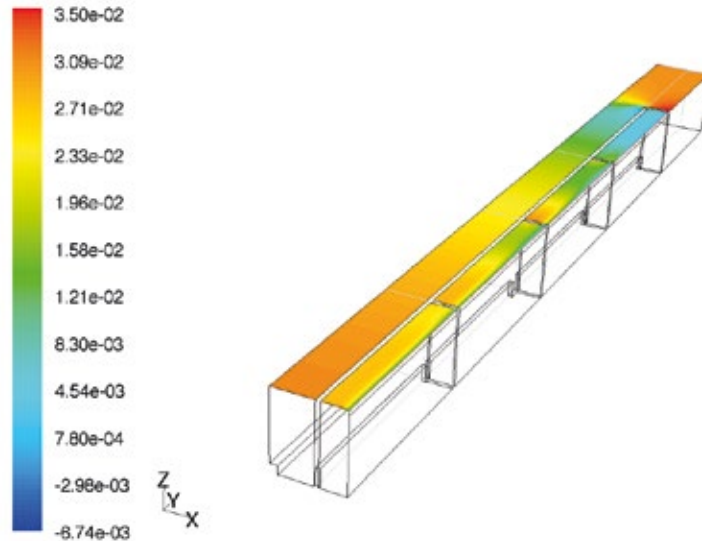
Obr. 4. Simulovaný rozdíl hladin $Q = 566$ l/s

Fig. 4. Simulated water level difference $Q = 566$ l/s



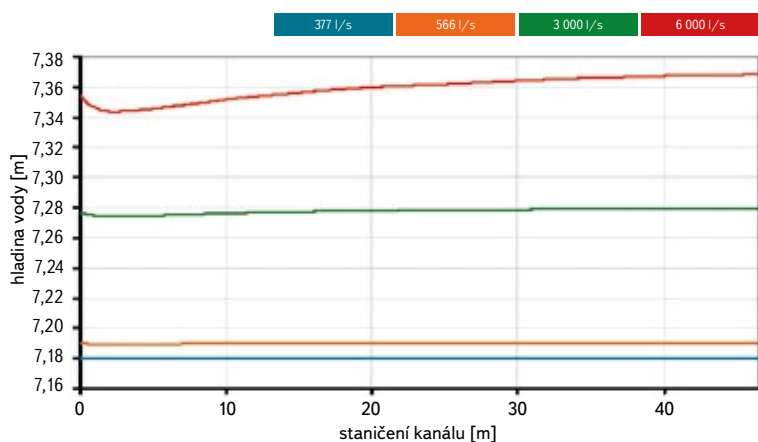
Obr. 5. Simulovaný rozdíl hladin $Q = 3\,000$ l/s

Fig. 5. Simulated water level difference $Q = 3\,000$ l/s



Obr. 6. Simulovaný rozdíl hladin $Q = 6\,000$ l/s

Fig. 6. Simulated water level difference $Q = 6\,000$ l/s



Obr. 7. Simulovaná hladina vody v průtočném rozdělovacím objektu

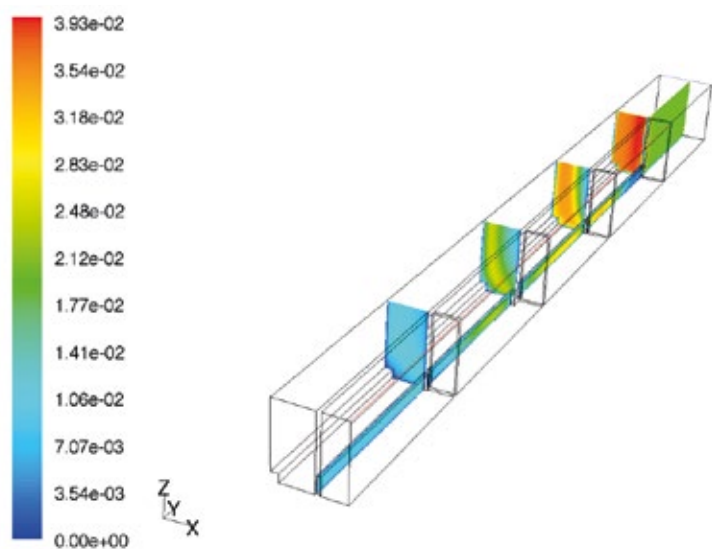
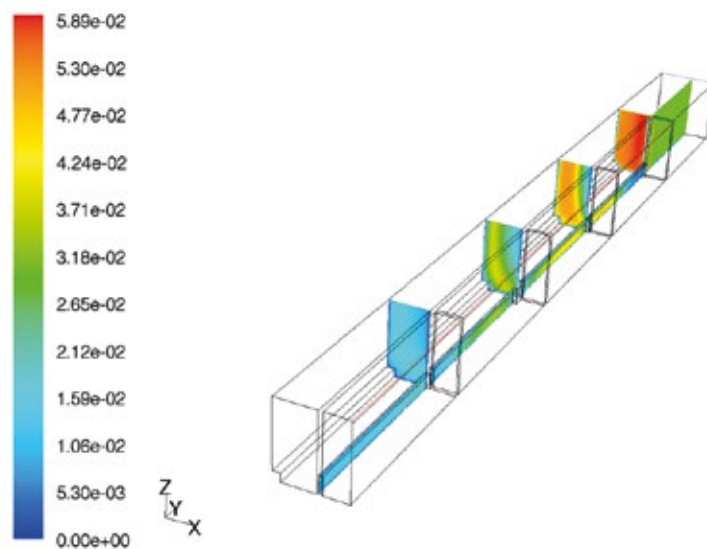
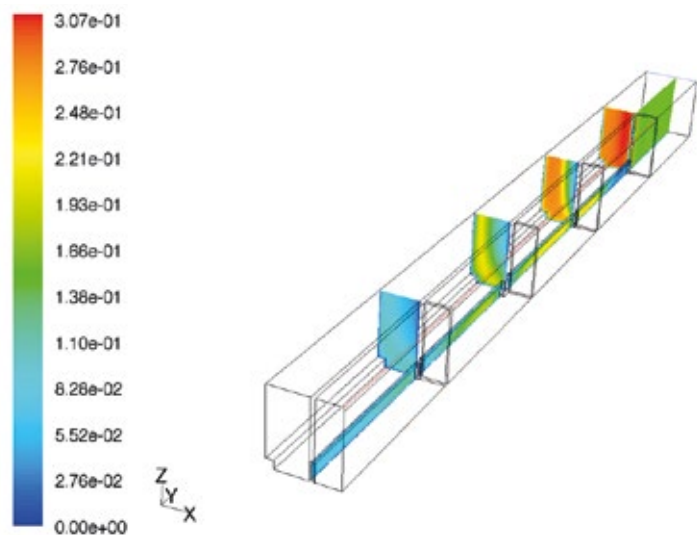
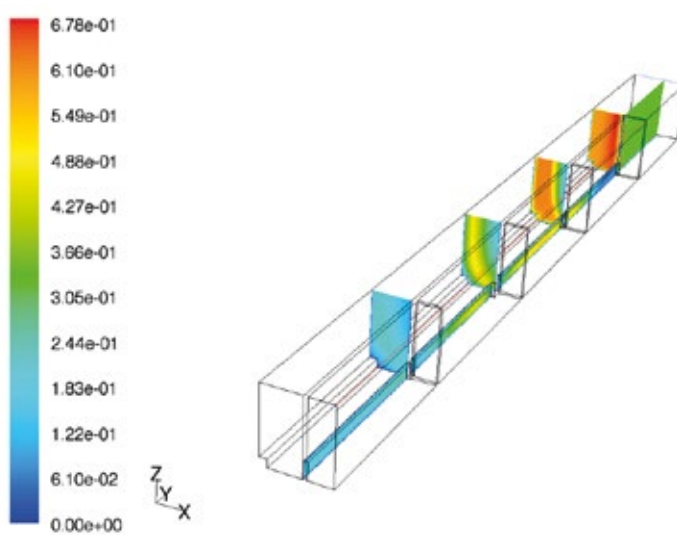
Fig. 7. Simulated water level in the flow distribution object

VÝSLEDKY

Následující obrázky ukazují obrysy simulovaných rychlostí proudění v příčných řezech koryta a v otvorech, což může poskytnout určitou představu o obecném průběhu proudění.

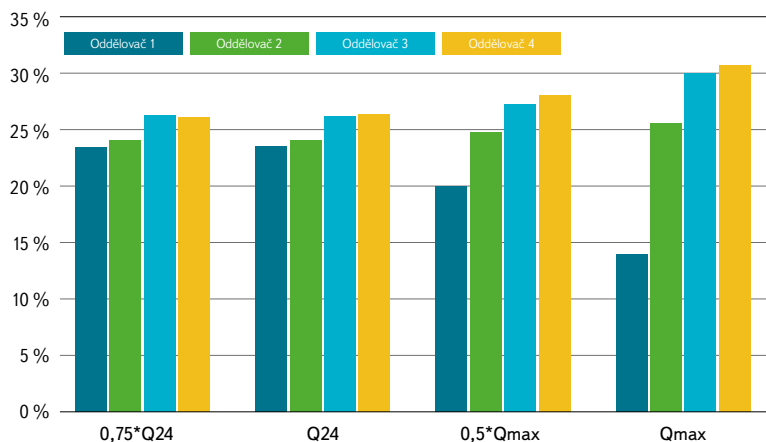
Na začátku koryta dochází k poměrně výraznému zúžení proudění. Znamená to, že první polovina prvního otvoru není hydraulicky plně využita. To je opět důležitější za podmínek vysokého průtoku. Tento efekt by mohl být ve skutečnosti méně významný než v modelu, protože v provzdušňovací nádrži je vysoká turbulence, již je v modelu obtížné posoudit.

Barvy znázorňují celkovou velikost rychlosti. Proto je rychlost v posledním otvoru nejnižší. Složka „y“ rychlosti je v prvních třech otvorech poměrně významná [3].

Obr. 8. Obrysy velikosti rychlosti proudění $Q = 377$ l/sFig. 8. Flow velocity contours $Q = 377$ l/sObr. 9. Obrysy velikosti rychlosti proudění $Q = 566$ l/sFig. 9. Flow velocity contours $Q = 566$ l/sObr. 10. Obrysy velikosti rychlosti proudění $Q = 3000$ l/sFig. 10. Flow velocity contours $Q = 3000$ l/sObr. 11. Obrysy velikosti rychlosti proudění $Q = 6000$ l/sFig. 11. Flow velocity contours $Q = 6000$ l/s

Rozdělení průtoků

Následující tabulka a diagram ukazují rozložení průtoku při různých podmínkách proudění. Protože nebyly k dispozici žádné naměřené údaje, nešlo model kalibrovat. Citlivost průtoků na výšku přepadu byla upravena pouze podle teoretické křivky průtoku. Předběžné výsledky ukázaly podobné rozložení průtoku za všech průtokových podmínek, ale vyšlo najevo, že za nízkých průtoků jsou přepady příliš citlivé na výšku přepadu. Konečné výsledky po odpovídající úpravě této citlivosti jsou uvedeny v tab. 2.



Obr. 12. Rozdělení průtoků
Fig. 12. Flow distribution

Výsledky ukazují, že rozdělení průtoků je při nízkých hodnotách rozloženo poměrně rovnoměrně, avšak se zvyšujícím se průtokem nerovnoměrnost rozložení vzrůstá, což je způsobeno výše popsanými rozdíly v hladině vody [4].

DISKUZE

Jelikož výsledky ukázaly, že rozložení průtoku není závislé na samotném průtoku, bylo navrženo vyřešit problém úpravou délek přepadů.

Zavedení přepážek napříč korytem se také nejeví jako dobrý nápad. Koryto je samo o sobě poměrně úzké a zavedení jakýchkoli větších překážek v něm by snížilo jeho hydraulickou kapacitu a problém spíše zhoršilo.

Nejlepším řešením je zřejmě úprava velikosti otvorů na dně koryta pro rozdělení průtoku. Menší otvory na konci koryta způsobí hydraulickou ztrátu, která bude kompenzovat vyšší hladinu vody při vysokých průtocích. Za nízkých průtoků bude hydraulická ztráta malá a rozdělení průtoku nebude ovlivněno.

Tab. 2. Rozdělení průtoků
Tab. 2. Flow distribution

	0,75*Q ₂₄	Q ₂₄	0,5*Q _{max}	Q _{max}
Nátok [l/s]	377,2	565,8	3 000	6 000
Oddělovač 1	88,2 23,40 %	133,2 23,50 %	601,5 20,00 %	845,3 14,10 %
Oddělovač 2	90,6 24,00 %	136 24,00 %	742,1 24,70 %	1 530,5 25,50 %
Oddělovač 3	99,4 26,40 %	148,3 26,20 %	816,8 27,20 %	1 789,7 19,80 %
Oddělovač 4	98,9 26,20 %	148,8 26,30 %	839,9 28,00 %	1 835,4 30,60 %

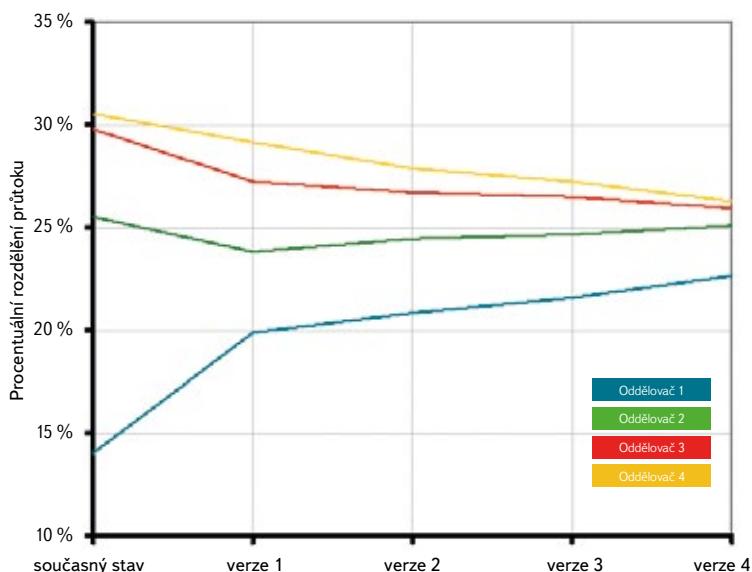
Nastavení velikosti spodních otvorů

Bylo provedeno několik simulací s cílem najít nejlepší možnou kombinaci velikostí otvorů. Optimalizace vycházela z maximálního průtoku (6 000 l/s) a po potvrzení dobré funkce konstrukce při nízkém průtoku byl použit průtok 566 l/s.

Simulace byly prováděny iteračně. Nejprve byla velikost otvorů zmenšena na polovinu původní velikosti. Původní otvory byly velmi velké (rychlost 0,136 m/s při maximálním průtoku), a i když se jejich velikost zmenšila na polovinu, nezpůsobovaly velké energetické ztráty. Bylo simulováno proudění takto upravenou konstrukcí a získány průtoky do jednotlivých nádrží.

Proces optimalizace

Následující tabulky a grafy ukazují výsledky simulací výše uvedených verzí a ilustrují iterační proces.



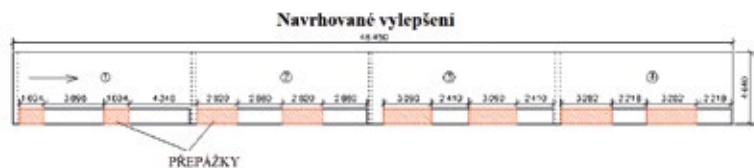
Obr. 13. Ukázka iteračního procesu
Fig. 13. Example of iterative process

Navrhované zlepšení

Navrhované zlepšení je znázorněno na následujícím nákresu (obr. 14). Červeně šrafované oblasti znázorňují umístění plechů, které uzavírají části otvorů. Při simulacích byly tyto přepážky umístěny na straně kanálu a byly zarovnané se stěnou kanálu.

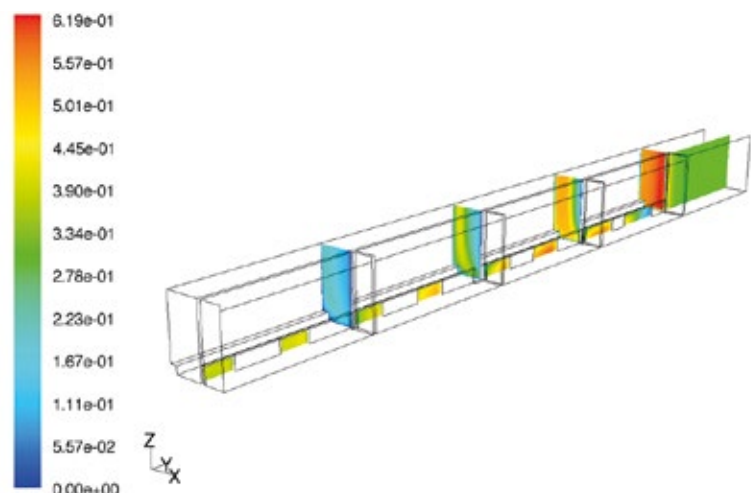
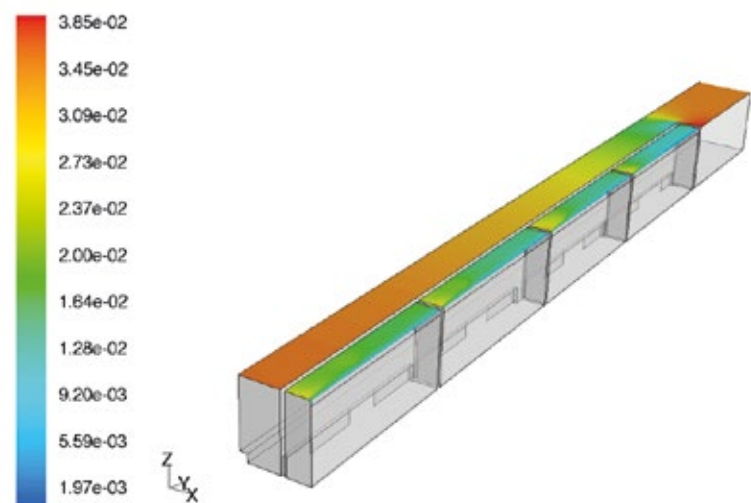
Tab. 3. Porovnání různých fází iteračního procesu (Q_{max})Tab. 3. Comparison of the different phases of the iterative process (Q_{max})

	Nátok [l/s]	Současný stav	Verze				
			1	2	3	4	
Q_{max}	6 000	Oddělovač 1	14,10 %	19,90 %	20,90 %	21,60 %	22,60 %
		Oddělovač 2	25,50 %	23,80 %	24,50 %	24,70 %	25,10 %
		Oddělovač 3	29,80 %	27,20 %	26,70 %	26,40 %	26,00 %
		Oddělovač 4	30,60 %	29,10 %	27,90 %	27,20 %	26,30 %



Obr. 14. Konečné rozměry navrhovaných otvorů

Fig. 14. Final dimensions of the proposed openings

Obr. 15. Obrisy rychlostí průběhu proudění $Q = 6\,000$ l/sFig. 15. Velocity contours of the flow pattern $Q = 6\,000$ l/s

Obr. 16. Hladina vody v rozdělovacím objektu

Fig. 16. The water level in the distribution object

Princip funkce

Obr. 16 znázorňuje funkci přepážek ve spodních otvorech. Přestože hladina vody podél koryta stoupá, hladiny vody v klidových komorách jsou téměř vyrovnané. Rozdíl mezi hladinami vody v korytě a v klidové komoře je způsoben hydraulickými ztrátami způsobenými přepážkami. Barvy na obrázku znázorňují rozdíl mezi aproximovanou konstantní hladinou vody a vypočtenou hladinou.

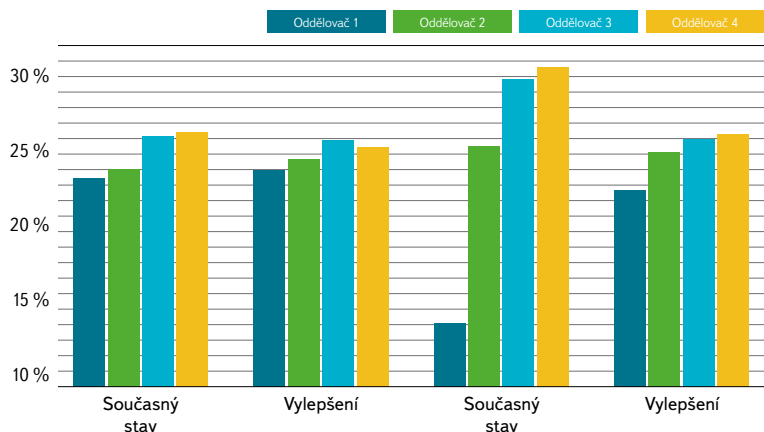
ZÁVĚR

Následující tabulka a diagram ukazují srovnání výsledků simulace pro současný stav a konečné navrhované zlepšení. Pro zlepšení byl zatím simulován pouze maximální průtok (Q_{max}) a průměrný denní průtok (Q_{24}). Z výsledkové tabulky je patrné, že navrhovaný stav rozdělovacího objektu splňuje podmínky pro rovnoměrné rozdělení průtoků, a cíle výzkumu tak byly naplněny. Vzhledem k tomu, že vybraný rozdělovací objekt je běžně používán v terénu, je možné výsledky výzkumu snadno aplikovat v praxi, a to na větším množství ČOV.

Tab. 4. Srovnání současného stavu a navrhovaného zlepšení

Tab. 4. Comparison of the current situation and proposed improvements

		Oddělovač 1	Oddělovač 2	Oddělovač 3	Oddělovač 4
Q₂₄	566 l/s				
	Současný stav	133,0	135,8	148,3	148,9
		23,50 %	24,00 %	26,20 %	26,30 %
	Navrhovaný stav	135,5	139,9	146,5	144,0
		23,90 %	24,70 %	25,90 %	25,40 %
Q_{max}	6 000 l/s				
	Současný stav	845,3	1 530,5	1 789,7	1 834,4
		14,10 %	25,50 %	29,80 %	30,60 %
	Navrhovaný stav	1 358,7	1 507,1	1 558,1	1 576,1
		22,60 %	25,10 %	26,00 %	26,30 %

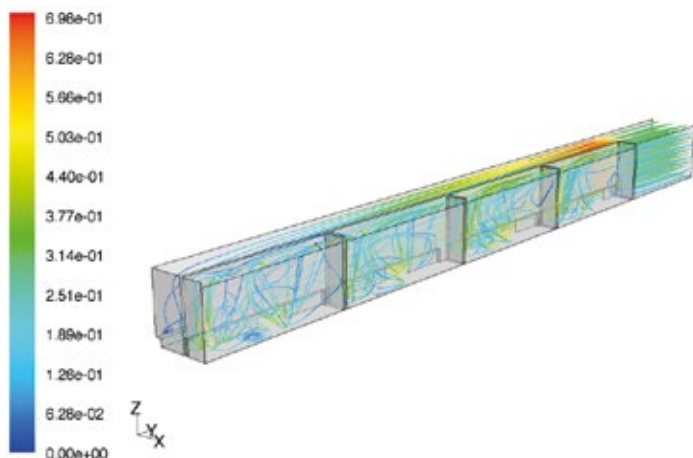


Obr. 17. Srovnání současného stavu a navrhovaného zlepšení

Fig. 17. Comparison of the current situation and proposed improvements

Další možná zlepšení

Toto vylepšení ukazuje, že je možné problém nerovnoměrného rozdělení průtoků omezit zavedením přepážek do otvorů, jejichž montáž je rychlá, jednoduchá a bez nutnosti stavebních úprav objektů. Další pozornost v případném navazujícím výzkumu by měla být věnována tvaru přepážek. Nelze totiž vyloučit, že některé sedimenty by se mohly hromadit v klidových zónách za těmito přepážkami a zejména v rozích (obr. 18), což by do budoucna mohlo způsobit problém se zanášením nátokových větví do nádrží sedimentem. Zanesením sedimentem pak bude s velkou pravděpodobností ovlivněna hydraulika rozdělovacího objektu tak, že dojde k opětovnému nerovnoměrnému rozdělení průtoků.



Obr. 18. Sediment se bude pravděpodobně hromadit v mrtvých zónách v rozích

Fig. 18. Sediment is likely to accumulate in dead zones in the corners

Poděkování

Tento článek byl podpořen grantem 3600.54.10/2021 „3D modelování vybraných variant dělení průtoků v nátokových galeriích“.

Literatura

[1] HAVLÍK, V. a kol. *Matematické modelování neustálého proudění*. Ediční středisko ČVUT. Praha: ČVUT, 1992. 223 s. ISBN 80-01-00764-2.

[2] ČÁBELKA, J., GABRIEL, P. *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice*. Praha: Academia, 1987.

[3] KOLÁŘ, V. a kol. *Hydraulika*. Praha: STNL, 1983.

[4] MATTAS, D. *Výpočet průtoku v otevřených korytech*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2014. ISBN 978-80-87402-27-6.

[5] ČSN EN 16323 (750162). *Slovník technických termínů v oblasti odpadních vod*.

Autor

Ing. Jiří Procházka, Ph.D.

✉ jiri.prochazka@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-3444-2347

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2022.11.002

MODELLING FLOW SEPARATION IN INFLOW GALLERIES

PROCHÁZKA, J.

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

Keywords: flow separation – CFD – Flow 3D – flow galleries

The main objective of the work was to optimize the objects used to distribute the flows in the inflow galleries, which are used not only in water treatment plants, but also in wastewater treatment plants. By working in the field of WWTP problems, it was found that there are no optimized objects in the Czech Republic or in the world for uniform distribution of flows to any number of inflow branches into tanks of the same flow rate. Currently, in most unregulated facilities, there are significant differences between the various inflow branches to the reservoirs. In regulated facilities, the outlets must be regulated at each change in flow rate and, for changes in the number of inflows to the tanks (e.g., due to tank shut-down), each outlet must be manually adjusted (e.g., using a sluice gate) so that all inflows to the tanks have the same flow rate. In more modern cases, the sluice is equipped with an electric motor for changing the position and a probe sensing the level. The central unit then calculates the flow rate in the individual tank inflows and adjusts the position of the sluice gates so that the same flow rate is achieved everywhere. The objective of the research was to optimize the distributing object so that the inflows to the reservoirs reach similar values for the flow rate when both the inflow to the distributing object and the number of inflow branches to the reservoirs are changed, without significant regulation at the distributing object. In order to make the research easily applicable to as many distribution objects as possible, the most commonly used flow splitting objects (fountain spillway, flume with outlets fitted with a sluice gate and probe for level monitoring, etc.) were selected to address the issue. Different flow conditions were simulated on the selected objects (in different variants and shapes), after the analysis of which the objects were optimized in order to achieve the most similar flows at the inflows to the individual reservoirs.