

HYBRIDNÍ MODEL ROZDĚLOVACÍHO OBJEKTU SYSTÉMU PLNĚNÍ A PRÁZDNĚNÍ PLAVEBNÍ KOMORY

HYBRID MODEL OF THE WATER DIVIDER OF THE FILLING/EMPTYING SYSTEM OF NAVIGATION LOCK

Ing. Tomáš Kašpar, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky

Anotace

Článek se zabývá popisem hybridního modelování, který kombinuje metodu fyzikálního a numerického modelování proudění. Metoda hybridního modelování byla použita k optimalizaci rozdělovacího objektu v systému dlouhých obtoků plavební komory Děčín. Měření na fyzikálním modelu poskytovala okrajové podmínky a také hodnoty pro kalibraci 3D numerického modelu. Následnou optimalizací pomocí numerického modelu bylo možné snížení místních ztrát v rozdělovacím objektu. Tím se zefektivnilo proplavování plavební komorou, aniž by vznikalo větší hydrodynamické namáhání proplavovaných plavidel.

Klíčová slova: *Hybridní modelování, fyzikální model, 3D numerický model, rozdělovací objekt, plnění a prázdňení plavební komory.*

Annotation

The article describes the hybrid modelling. It is a method of hybrid modelling, which combines physical and numerical methods modelling of flow. The hybrid modelling method was used to optimize the distribution object of F/E system of navigation lock Děčín. Physical model measurements provided boundary conditions for calibration of the 3D numerical model. The use of a 3D numerical model has reduced hydraulic losses in the water divider. Locking will be more effective with same hawser forces.

Key words: *Hybrid Modelling, physical model, 3D numerical model, water divider, filling/emptying of navigation lock*

ABSTRACT

The article describes the hybrid modelling. It is a method of hybrid modelling, which combines physical and numerical modelling methods of flow. Hybrid modelling is mainly used for solving the hydraulic flow of water complex in hydraulic structures. Optimizing and rebuilding the physical model is laborious and does not show all the results. The use of a numerical model allows to optimize only a part of the structure with using measurements on a physical model. Main advantages of hybrid modelling are the high reliability of results and the possibility of interpreting results that are not visible on the physical model.

Within the project preparation of the Decin lock, in the hydraulic laboratory of the Faculty of Civil Engineering CTU in Prague was conducted an extensive research on the object model of the lock chamber including a weir adjacent section. The measure of model is 1:20. The purpose of the research an optimization of the lock filling and emptying system of long culverts. The partition of the system of long culverts is the water divider. The first measurements on the physical model showed a need to optimize the water divider.

The conception of filling/emptying (F/E) system on the Decin lock is based on long culverts. The filling flow is supplied by intake structure to culvert and is guided through the culvert (3x4m) to a water divider. From the water divider the water flows through two long (2x3 m) culverts into a chamber. Upon emptying the chamber, the water flows through two long culverts into the water divider. From water divider water flows through the culvert (3x4m) into the flow bed.

The water divider was first constructed on the physical model according to the design from the project preparation. Subsequently, the object was optimized to reduce hydraulic losses. A pressure probe system has been designed for a comprehensive assessment of the measurement on the physical model. This design allows to detect pressure losses in the F/E system. It also allows to detect losses in individual parts of the F/E system or a determination of boundary conditions for a numerical model.

The 3D numerical model (ANSYS CFX) was used for simulation of stream lines in the water divider. The setup of the calculation has been steady state. The inlet boundary condition has been set for the flow rate. The outlet boundary condition has been set for the pressure from pressure probes. Calibration of the numerical model was based on the water surface in the water divider. The deviations between the simulated water surface positions in the distribution object and those measured on the physical model were up to 2 cm on the physical model, that is, up to 40 cm in reality.

Based on calculations on the numerical model, the water divider had to be modified to a hydraulic shape by rounding edges. Editing of the water divider reduced hydraulic losses. Hydraulic losses were reduced during filling and emptying the chamber. Hydraulic loss values dropped to 1/3 compared to the project. The optimization of the object has increased the discharge efficient (μ_v) from 0,41 to 0,46 for filling and from 0,35 to 0,38 for emptying. Optimized system of F/E is up to 12% more efficient than the project preparation design. Locking will be more effective with same hawser forces.

1 ÚVOD

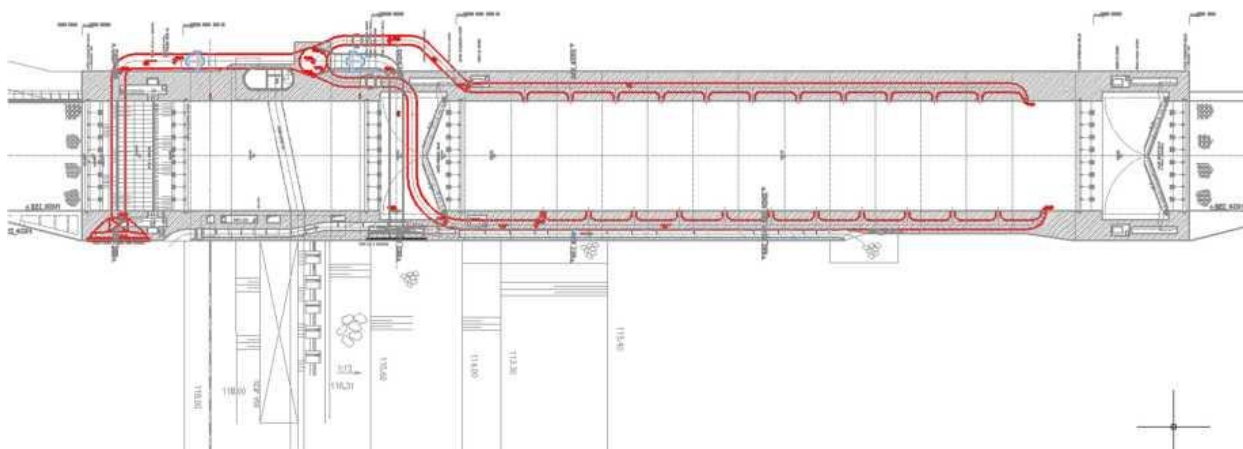
Spojení různých modelových přístupů, jakou jsou numerické 1D a 3D modely navzájem, nebo fyzikální a numerické modely se nazývá hybridní modelování. Cílem spojování těchto různých modelovacích metod je zpravidla určení parametrů, nebo vytvoření okrajových podmínek.

Hybridní modelování se nejčastěji používá k optimalizaci částí hydrotechnických staveb, které jsou zkoumány na fyzikálním modelu a vyžadují úpravu. Optimalizace a přestavba fyzikálního modelu je pracná a může být nevypovídající. Sestavením numerického modelu je možné provést optimalizaci pouze určité části konstrukce s využitím měření na fyzikálním modelu. Hlavní výhody hybridního modelování spočívají ve velké spolehlivosti výsledků a možnost interpretace výsledků, které na pouze na fyzikálním modelu nejsou patrné.

V rámci výzkumného úkolu „Fyzikální hydraulický modelový výzkum plavební komory Děčín“, jehož objednatelem bylo Ředitelství vodních cest ČR, byl vybudován ve vodo hospodářské laboratoři Fakulty stavební, ČVUT v Praze, objektový model plavební komory, včetně všech přilehlých částí v měřítku 1:20. Na tomto modelu probíhala zejména optimalizace systému dlouhých obtoků, jehož součástí je také rozdělovací objekt. První měření na fyzikálním modelu ukázaly potřebu tento objekt optimalizovat. Toho bylo docíleno kombinací fyzikálního a numerického 3D modelování. Optimalizací bylo možné snížit místní ztráty v systému dlouhých obtoků a tím zkrátit čas proplavování, aniž by vznikalo větší hydrodynamické namáhání plavidel.

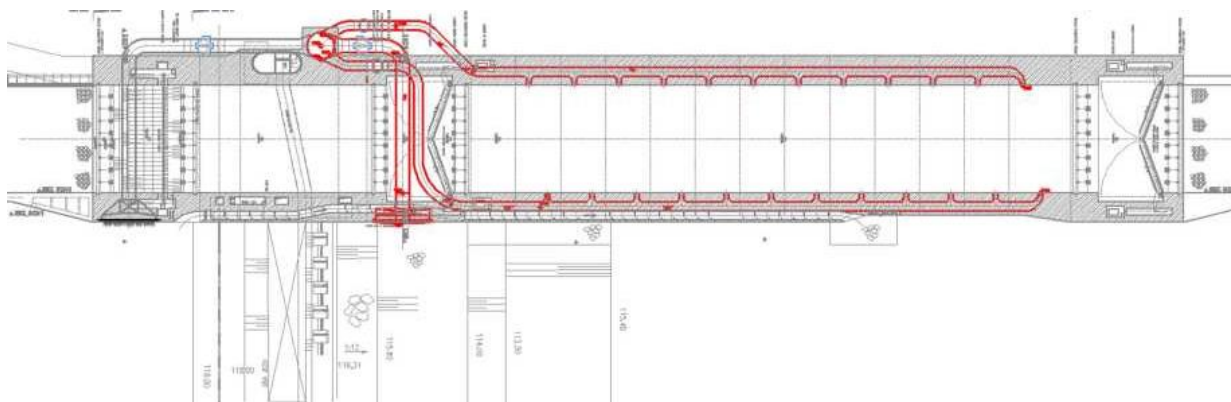
2 ROZDĚLOVACÍ OBJEKT SYSTÉMU PLNĚNÍ A PRÁZDNĚNÍ PK

Koncepce plnění a prázdnění plavební komory Děčín je založena na systému dlouhých obtoků, které jsou vyvedeny do dlouhé části plavební komory o užitné délce 140,0 m (užitná délka celé plavební komory je 200,0 m). Plnicí průtok je odebírán z nadjezí vtokovým objektem ve zdi horního ohlaví a je následně veden kanálem profilu 3x4 m do rozdělovacího objektu, ze kterého vychází dvěma obtoky profilu 2x3 m do spodní části obou zdí plavební komory. Schéma plnicího systému je znázorněno na obr. 1.



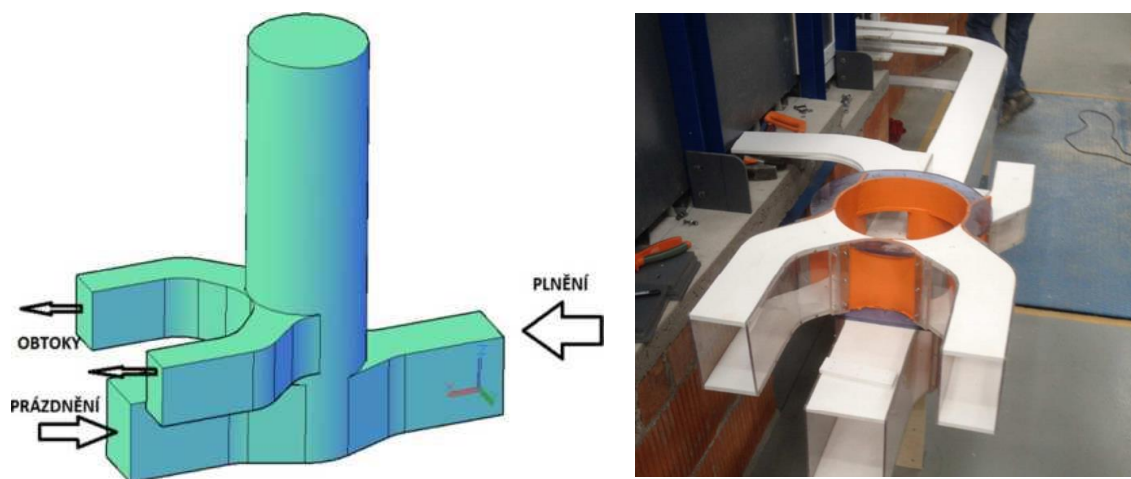
Obr. 1 Schéma plnění plavební komory

Při prázdnění plavební komory odtéká voda ze systému dlouhých obtoků zpět do rozdělovacího objektu, odkud je vedena odpadním kanálem (3x4 m) do výtokového objektu s vyústěním do podjezí. Schéma prázdnění plavební komory je znázorněno na obr. 2.



Obr. 2 Schéma prázdnění plavební komory

Samotný rozdělovací objekt (obr. 3) v systému plnění a prázdnění plavební komory slouží pro rozdělování průtoků v závislosti na poloze plnicího a prázdnícího uzavěru. Rozdělovací objekt je tvořen svislou šachtou kruhového tvaru o průměru 6 m. Do šachty ústí přívodní kanál, odpadní kanál a dva kanály, které jednotlivě propojují systém dlouhých obtoků v levé a v pravé zdi plavební komory. Z hlediska proudění se jedná o velmi složitý prvek plnicího/prázdnícího systému, ve kterém velikost hydraulických ztrát má vliv na efektivnost celého systému.

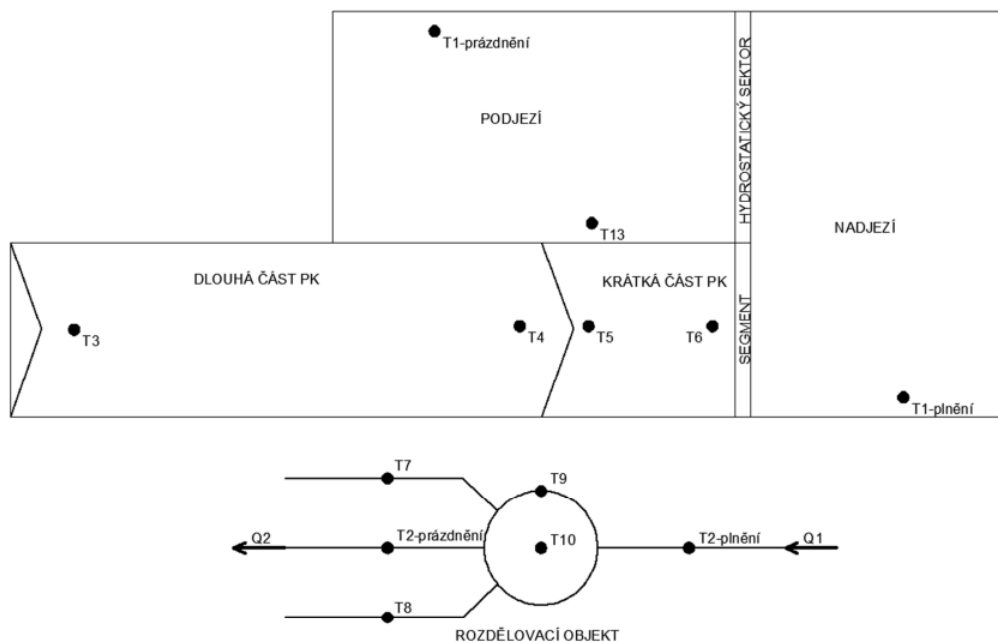


Obr. 3 Rozdělovací objekt

3 OPTIMALIZACE ROZDĚLOVACÍHO OBJEKTU NA FYZIKÁLNÍM MODELU

Rozdělovací objekt byl v první fázi sestaven na fyzikálním modelu podle návrhu z předprojektové přípravy a následně byl postupně optimalizován s ohledem na snížení hydraulických ztrát pomocí fyzikálního a numerického modelu.

Pro potřeby komplexního hodnocení jednotlivých variant úprav na fyzikálním modelu byl navržen systém tlakových sond rozmístěných podle schématu na obr. 4.



Obr. 4 Schéma rozmístění sond na fyzikálním modelu plavební komory

Kde:

- Sonda T1 snímá polohu hladiny při prázdnění, resp. při plnění.
- Sonda T2 snímá tlak v přívodním kanálu z nadjezí do rozdělovacího objektu. Při prázdnění sonda snímá tlak v odpadním kanálu z rozdělovacího objektu do podjezí.
- Sondy T3 – T6 snímají polohu hladiny v jednotlivých částech plavební komory.
- Sondy T7, T8 - sondy snímají tlak na začátku obtoků do dlouhé části plavební komory.
- Sonda T9 snímá polohu hladiny v rozdělovacím objektu.
- Sonda T10 snímá tlakové pulzace na dně rozdělovacího objektu.

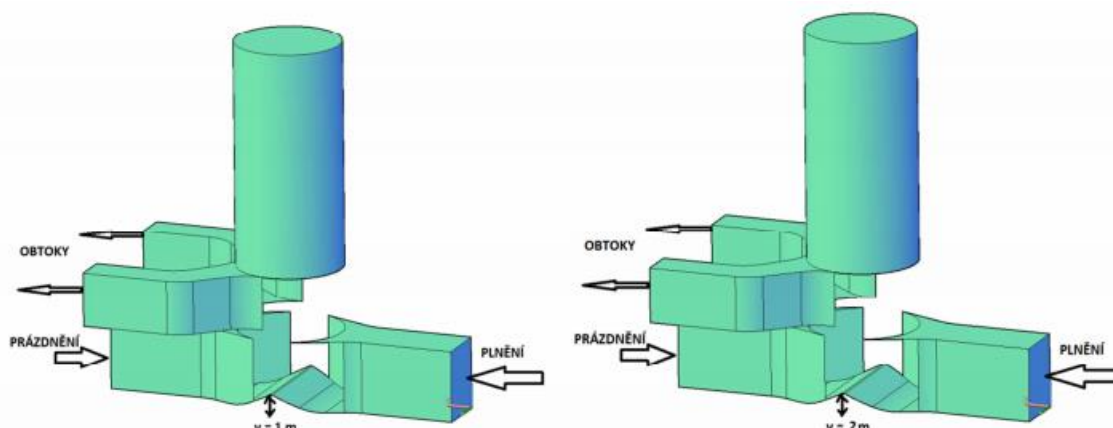
Toto schéma rozmístění tlakových sond umožňuje vyhodnocovat tlakové ztráty v systému dlouhých obtoků jako celku, popř. jeho jednotlivých částí. Také je možné hodnotit tlakové pulzace v rozdělovacím objektu, které mohou mít nepříznivý vliv na funkci a životnost celého systému. Pomocí sond je dále možné určit okrajové, nebo kalibrační podmínky pro numerický model.

3.1 Varianty rozdělovacího objektu

Varianta 1: Původní varianta navržená v rámci předprojektové přípravy (obr. 3).

Varianta 2: Vychází z původní varianty. Ve dně rozdělovacího objektu je navržen hydrodynamicky tvarovaný práh výšky 1,0 m. Tento práh si klade za cíl usměrnění proudu z přívodního kanálu do kanálů obtoků, které jsou v jiné výškové úrovni, obr. 5 vlevo.

Varianta 3: Také vychází z varianty 2, ale předpokládá navýšení prahu na 2,0 m, obr. 5 vpravo.



Obr. 5 Varianta 2 (vlevo), varianta 3 (vpravo)

3.2 Vyhodnocení variant

Jednotlivé varianty byly na fyzikálním modelu hodnoceny s ohledem na rychlosti plnění, resp. prázdňení. Srovnání bylo provedeno pomocí vyhodnocení ztrátového součinitele μ a celkové doby plnění a prázdňení T . viz tab. 1

Tab. 1 Porovnání ztrátového součinitele jednotlivých variant pro plnění a prázdňení.

Plnění		
Varianta	μ [-]	T [min]
1	0,41	20,8
2	0,44	19,8
3	0,44	19,8

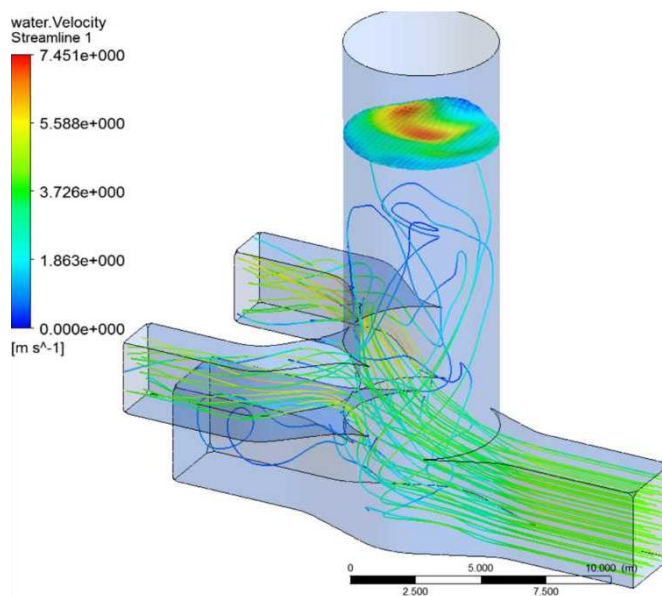
Prázdňení		
Varianta	μ [-]	T [min]
1	0,35	24,2
2	0,36	23,5
3	0,36	23,5

Z tab. 1 vyplývá, že varianty s prahem na dně rozdělovacího objektu pomohly zefektivnit plnění a prázdňení plavební komory přibližně o 5%. Na základě velikosti tlakových pulzací na dně rozdělovacího objektu byla varianta 2 vybrána jako nejoptimálnější z testovaných variant.

4 OPTIMALIZACE ROZDĚLOVACÍHO OBJEKTU NA NUMERICKÉM MODELU

Pro simulaci proudových poměrů v rozdělovacím objektu byl využit 3D numerický model ANSYS CFX. Jedná se o komerční software, který se v současnosti řadí mezi nejpoužívanější programové nástroje v oblasti CFD (Computational Fluid Dynamics), a to zejména díky své spolehlivosti a možnostem efektivního nasazení pro úlohy ustálených a neustálených 3D simulací turbulentního proudění.

Model funguje na principu aproximace řídicích pohybových rovnic v oblasti proudění metodou konečných prvků a umožňuje simulaci dvoufázového prostředí s výpočtem volné hladiny. Následující obr. 6 znázorňuje základní simulaci proudění v rozdělovacím objektu v prostředí ANSYS CFX pro variantu rozdělovacího objektu 1.



Obr. 6 Simulace proudění pro Variantu 1

4.1 Sestavení a kalibrace numerického modelu

Sestavení numerického modelu bylo umožněno na základě vyhodnocení daného plnicího, popř. prázdnícího cyklu plavební komory. Na všech důležitých bodech fyzikálního modelu jsou umístěny tlakové sondy dle obr. 4 a zpětně jsou vyhodnoceny průtokové poměry v jednotlivých přívodních a odpadních kanálech, zejména průběh plnicího a prázdnícího průtoku v čase. Z této neustálené simulace byl vybrán okamžik maximálního plnicího průtoku, který spolu s tlakovými poměry tvořily okrajové podmínky modelu.

Numerický model rozdělovacího objektu byl verifikován pro první a druhou variantu rozdělovacího objektu na fyzikálním modelu. Pro verifikační simulaci na 3D numerickém modelu byly nastaveny okrajové podmínky:

- Horní okrajová podmínka je nastavena v průřezu přívodního kanálu (3x4 m), který odpovídá umístění tlakoměrné sondy na fyzikálním modelu. Horní

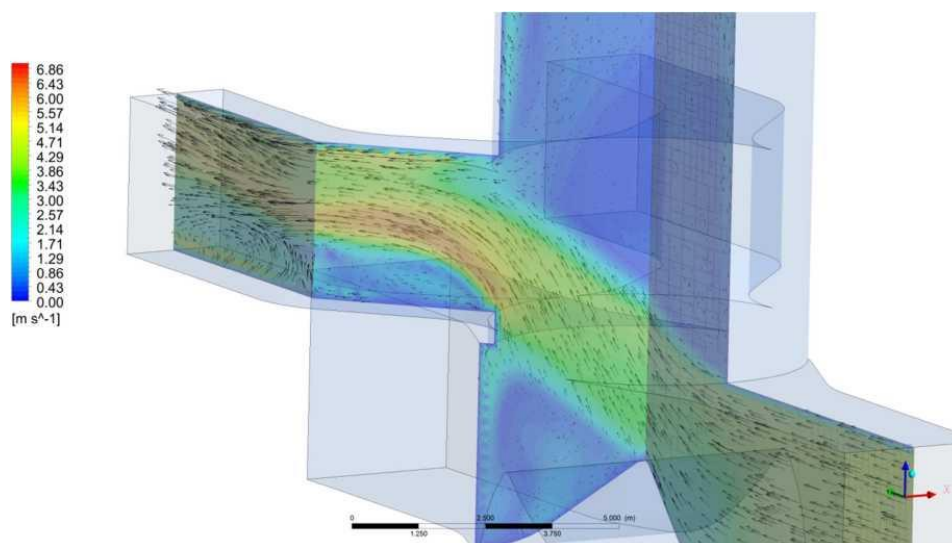
okrajová podmínka byla nastavena na dopočítaný průtok přivodního kanálu v okamžik kulminace.

- Dolní okrajová podmínka je nastavena na obou výstupních obtocích (každý průřezu 2x3 m), kde jsou nastaveny hodnoty tlaků změřených na fyzikálním modelu, které odpovídají časovému okamžiku s maximálním plnicím průtokem.
- Na stěnách rozdělovacího objektu a obtoků jsou nastaveny stěnové okrajové podmínky s drsností odpovídající betonovému povrchu.

Základní kalibrační veličinou modelu je poloha volné hladiny v rozdělovacím objektu, na které je atmosférický tlak. Při správné funkci 3D numerického modelu se hladina v rozdělovacím objektu ustálí ve stejné výšce, jako při odpovídajícím experimentu na fyzikálním modelu.

Na základě realizovaných verifikačních výpočtů lze konstatovat, že odchylky mezi simulovanými polohami hladiny v rozdělovacím objektu a těmi měřenými na fyzikálním modelu byly do 2 cm na fyzikálním modelu, tedy do 40 cm ve skutečnosti. Tyto odchylky lze považovat za nevýznamné s ohledem na řadu nejistot vstupujících do analýzy a využitelnost 3D matematického modelu pro optimalizaci konstrukce rozdělovacího objektu byla plně potvrzena.

Sestrojený 3D numerický model následně sloužil zejména pro vizualizaci proudových poměrů v rozdělovacím objektu, kde umožnil kvantifikovat problematické proudové oblasti a dále pro odhad tlakových ztrát.



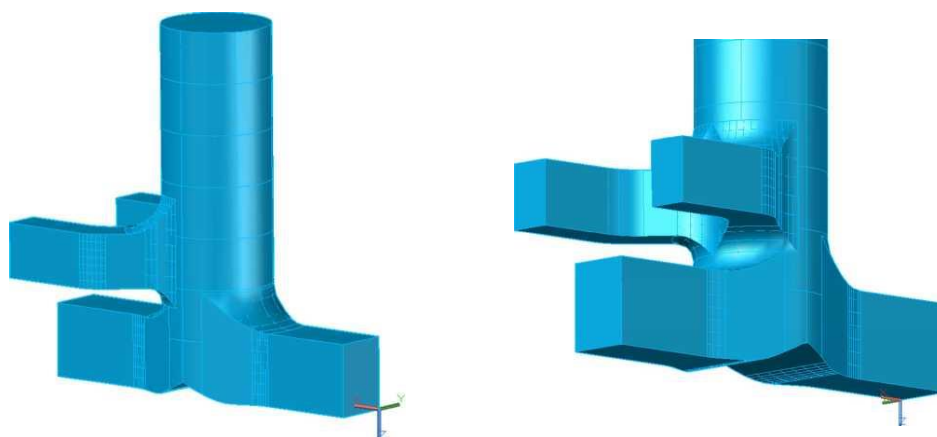
Obr. 7 Vizualizace proudových poměrů v rozdělovacím objektu při plnění plavební komory (varianta 2)

Z obr. 7 vyplývá potřeba upravit vyústění všech kanálů napojených na rozdělovací objekt. Na obrázku je patrná tvorba vírových oblastí v oblasti kanálů vedoucích do systémů dlouhých obtoků. Tvorba těchto vírů má negativní vliv na hydraulické ztráty rozdělovacího objektu, zvyšuje rychlosti a tím se snižuje životnost obtékaných konstrukcí.

Z vizualizace proudových poměrů vyplývá nutná úprava zaústění všech kanálů, které ústí do rozdělovacího objektu.

4.2 Optimalizace rozdělovacího objektu

Na základě výsledků modelu sestrojeného pro verifikaci byla nutná úprava rozdělovacího objektu ve vertikálním směru do hydrodynamicky vhodnějšího tvaru pomocí zaoblení obtékaných hran. Z důvodů obousměrného proudění v rozdělovacím objektu je nejvhodnější zaoblení obtékaných hran podle kruhové plochy. Na základě návrhu projektanta (Aquatis, a.s.) byl sestrojen 3D model geometrie (obr. 8), který byl následně podstoupen ověření na 3D numerickém modelu.



Obr. 8 Prostorový model geometrie optimalizované varianty 4

Optimalizovaný rozdělovací objekt (varianta 4) byl zatížen stejnými okrajovými podmínkami, jako předchozí verze rozdělovacích objektů. Model byl testován pro průtokové situace, které odpovídají kulminačnímu průtoku při plnění, resp. prázdňení plavební komory.

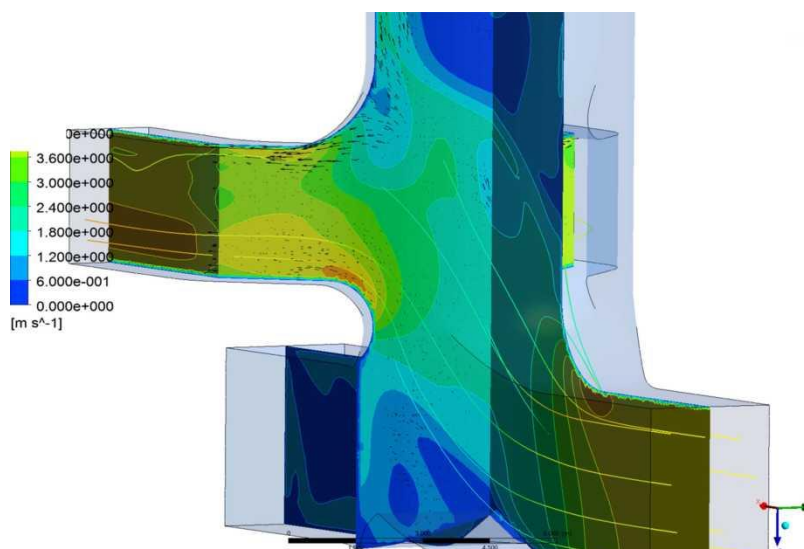
Hodnocení poklesu ztrát bylo možné na základě porovnání změny polohy volné hladiny v optimalizovaném a původním rozdělovacím objektu. Volná hladina se v optimalizovaném objektu ustálila v níže, než u původního rozdělovacího objektu. To svědčí o poklesu hydraulických ztrát v rozdělovacím objektu. Na podkladě poklesu ztrát v objektu a známého průtoku bylo možné vyčíslit součinitel místních ztrát ζ_{RO} . Při známé hodnotě poklesu ζ_{RO} bylo možné dopočítat celkový součinitel ztrát jak plnění, tak i pro prázdňení plavební komory μ_v . Výsledné hodnoty místních ztrát ζ_{RO} a dopočteného ztrátového součinitele μ_v jsou zobrazeny v tab. 2.

Plnění				Prázdňení			
Varianta	$\zeta_{RO}[-]$	$\mu [-]$	T [min]	Varianta	$\zeta_{RO}[-]$	$\mu [-]$	T [min]
1	1,7	0,41	20,8	1	1,8	0,35	24,2
2	1	0,44	19,8	2	1,5	0,36	23,5
4	0,5	0,46	18,75	4	0,8	0,38	22

Navržená úprava zaoblení obtékaných konstrukcí v rozdělovacím objektu vede ke snížení hydraulických ztrát, kde ztráty samotného rozdělovacího objektu klesly během plnění i prázdňení přibližně o polovinu. Vliv této úpravy na efektivnost celého systému by měl být na úrovni 5-6 % oproti variantě 2. Efektivnost varianty 4 by měla být o 12% vyšší, než základní varianta 1.

Z vizualizací proudového pole (obr. 9) v optimalizovaném rozdělovacím objektu během plnění a prázdňení vyplývá, že nedochází k odtrhávání proudu od stěn a tvoření

vírových struktur v těchto oblastech. To má vliv na snížení ztrát celého systému a lze očekávat pozitivní vliv na životnost konstrukce.



Obr. 9 Proudové poměry při plnění plavební komory (varianta 4)

4.3 Výsledná varianta rozdělovacího objektu na fyzikálním modelu

Na fyzikálním modelu následně proběhla přestavba rozdělovacího objektu do podoby výsledné varianty. Z důvodu přípravy geometricky poměrně komplikovaného tvaru rozdělovacího objektu byl jeho model řešen za využití 1 cm silných desek z měkkčeného PVC, jejichž 2D geometrie byla předem připravena realizací řady vodorovných řezů počítačového modelu. Jednotlivé desky byly řezány pomocí počítačem řízeného řezu vodním paprskem, který umožnil vysokou přesnost jednotlivých desek. Model rozdělovacího objektu byl tedy řešen sendvičovým způsobem, kdy jednotlivé vodorovné části byly postupně sesazeny pomocí svislých vodících tyčí a odskoky na vnitřní straně objektu byly vytmeleny klempířským tmelem a vybroušeny do hydraulicky hladkého povrchu. Na obr. 10 je možné vidět optimalizovaný rozdělovací objekt na fyzikálním modelu.

Následné měření časů plnění a prázdnění a tlaků v jednotlivých částech systému na fyzikálního modelu umožnilo potvrzení hodnot, které byly dopočítány na základě numerického modelu a jsou zobrazeny v tab. 2.



Obr. 10 Finální varianta rozdělovacího objektu na fyzikálním modelu

5 ZÁVĚR

Numerický model byl sestaven v rámci tzv. hybridního modelování, pro potřeby optimalizace rozdělovacího objektu v systému dlouhých obtoků z důvodů identifikace vysokých ztrát. Nejprve se na fyzikálním modelu změřily pomocí tlakových sond, které sloužily ke stanovení okrajových, nebo kalibračních podmínek.

Numerický model obsahoval horní okrajovou podmínku v podobě maximálního plnicího, popř. prázdnicího průtoku (odvozeného z průběhu plnění a prázdnění) a jemu přiřazenou dolní okrajovou podmínku v podobě tlaků naměřených na fyzikálním modelu. Výpočet byl spuštěn v ustáleném módu, kdy probíhala verifikace modelu. Jako kalibrační hodnota sloužila poloha volné hladiny v rozdělovacím objektu, která na fyzikálním modelu odpovídala tlaku sondy v čase kulminačního průtoku.

Postup skládající se z kombinace fyzikálního a numerického modelu umožnil snížit součinitel místních ztrát rozdělovacího objektu (ζ_{RO}) až na polovinu oproti variantě 2, respektive až na třetinu oproti původnímu návrhu. Optimalizace rozdělovacího objektu vedla se zvýšením celkového ztrátového součinitele při plnění $\mu_v = 0,41$ na hodnotu $\mu_v = 0,46$ a u prázdnění z $\mu_v = 0,35$ na hodnotu $\mu_v = 0,38$, čímž je systém obtoků až o 12 % efektivnější.

V poslední řadě byla geometrie rozdělovacího objektu, která byla optimalizována pomocí numerického modelu, realizována na fyzikálním modelu. To umožnilo zpětnou kontrolu správnosti výsledku získaných z numerického modelu.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT při řešení projektu č.: SGS16/141/OHK1/2T/11 s názvem „Hydrodynamické namáhání plavidel na vodních cestách“.

REFERENCE

- Belzner F, Thorenz C (2014) Hybrid Modelling of a Filling and Emptying System of a Navigation Lock. ICHE 2014, Hamburg - Lehfeldt & Kopmann (eds), s 967-974.
- Čábelka J, Novák P (1987) Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice (1) - Výzkum na hydraulických dílech a ve skutečnosti. Academia Praha, 303 s.
- De Mulder T (2011) Computational Fluid Dynamics (CFD) in lock design: Progress and challenges. International Workshop, PIANC – New-Orleans, Sept. 2011
- Fošumpaur P, Zukal M, Králík M (2008) Hydraulický výzkum plnění a prázdnění plavební komory České Vrbné. Závěrečná zpráva. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- Fošumpaur P, Zukal M, Králík M, Pícek T (2012) Verifikace a optimalizace provozních parametrů zdymadla Hluboká nad Vltavou ve vazbě na navazující vodní cestu - 2. etapa. Dokončení vltavské vodní cesty v úseku Hluboká nad Vltavou – VD Hněvkovice. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- Fošumpaur P, Kašpar T, Králík M, Kučerová J, Zukal M (2016) Fyzikální hydraulický modelový výzkum plavební komory Děčín. Závěrečná zpráva. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- Fošumpaur P, Kašpar T, Králík M, Kučerová J, Zukal M (2017) Plavební komora Děčín - výzkum na fyzikálním modelu. XXIX. Plavebné dni. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2017. pp. 35-44. ISBN 978-80-227-4729-5
- Novák P, and others (2010) Hydraulic Modelling – an Introduction. Spon Press, 614 s.
- Roumieu P and others (2008) Physical Model for the Filling and Emptying System of the Third Set of Panama locks.
- Součková N, Kolář P, Tuček A (2013) Simulace proudění tekutin pomocí CFD. IT CAD 2013