



# OPTIMALIZACE PŘÍMÉHO PLNĚNÍ PLAVEBNÍ KOMORY DĚČÍN

## OPTIMIZATION OF DIRECT FILLING OF A NAVIGATION LOCK DĚČÍN

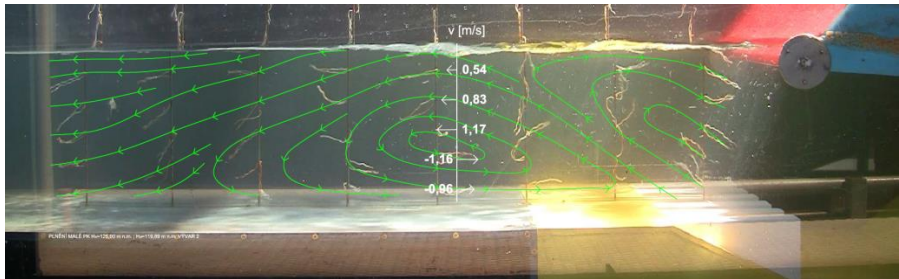
*Ing. Tomáš Kašpar, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra  
hydrotechniky*

### ABSTRAKT

Tato práce se zabývá výzkumem optimalizace přímého plnění připravované plavební komory Děčín. Ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební, ČVUT byl vybudován členy Katedry hydrotechniky pod vedením doc. Dr. Ing. Pavla Fošumpaura výsekový model v rámci výzkumného úkolu „Fyzikální hydraulický modelový výzkum plavební komory Děčín“, jehož objednatel je Ředitelství vodních cest ČR. Jedná se o výsek poloviny šířky horní části plavební komory v měřítku 1:20. V rámci tohoto výzkumu jsem se podílel na měření rychlostí a proudových polí při plnění plavební komory. Výsledky získané experimentálním výzkumem v laboratoři byly následně využity pro sestavení a verifikaci 3D matematického modelu přímého plnění plavební komory, který je zpracován v rámci projektu studentské grantové soutěže ČVUT v Praze.

Cílem výzkumu bylo porovnat naměřené veličiny jednotlivých variant, vybrat optimální variantu a porovnat výsledky měření fyzikálního modelu s výsledky matematického modelu.

Na vybudovaném modelu proběhlo měření rychlostí a proudových polí. Měření probíhala pomocí tří hydrometrických vrtulek a sítí s bavlňkami. Měření probíhala v ustáleném režimu, kdy byla horní okrajová podmínka nastavena průtokem, který odpovídá okamžiku maximálního plnicího průtoku. Ten byl odvozen hydraulickým výpočtem plnění plavební komory v neustáleném režimu. Dolní okrajová podmínka byla nastavována pomocí hladin. Rychlosti během přímého plnění plavební komory byly měřeny v několika úrovních na začátku užité délky pro 5 variant řešení. Porovnáním výsledků byly vybrány jako optimální dvě varianty. Naměřené rychlosti u těchto variant dosahovaly maximální rychlosti 0,97 m/s, což umožňuje bezproblémové proplouvání plavební komorou.



*Proudnice za vývarem -  $H_h=125,00$  m n. m. ;  $H_d= 119,89$  m n. m.*

Dále byl v rámci projektu studentské grantové soutěže sestaven 3D matematický model pro vybranou variantu. Hustota sítě modelu byla v počtu 700 000 elementů o max. velikosti 1 m. Při porovnání výtokového součinitele bylo dosaženo vysoké přesnosti (0,85 na fyz. modelu, 0,86 na mat. modelu). Při porovnání rychlostí na začátku užité délky se jednotlivé rychlosti lišily, ale průměrná odchylka dosahovala 6 %. Pro detailní porovnání proudnic je třeba zpřesnit výpočetní síť, ale charakter proudu jednotlivých modelů byl stejný.

Výsledky výzkumu ukázaly optimální konstrukční řešení ukončení vývaru pod horními vraty plavební komory na tlumení kinetické energie. Srovnáním měřených veličin na fyzikálním a matematickém modelu byla prokázána dobrá korespondence těchto modelů.

Příspěvek vznikl za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT při řešení projektu č.: SGS14/129/OHK1/2T/11 s názvem „Vliv řízení objektů na vodních cestách na průtokový režim a plavbu“.

## **Anotace**

Článek se zabývá hydraulickým výzkumem optimalizace přímého plnění připravované plavební komory Děčín. Měření probíhala na výsekovém modelu plavební komory v měřítku 1:20, který byl postaven ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Na modelu bylo vyhodnoceno 5 typů úprav vývaru pod horními vraty pro optimalizaci tlumení kinetické energie. Výsledky výzkumu přinášejí vyhodnocení rychlostí na začátku užité délky plavební komory, proudová pole a porovnání s 3D matematickým modelem.



**Klíčová slova:** *fyzikální modelování, matematické modelování, modelová podobnost, plavební komora, vývar, proudová pole*

## Annotation

The article deals with a hydraulic research optimization of direct filling of upcoming navigation lock Děčín. The measurements were conducted on a die-cut model of a navigation lock in the scale of 1:20, which was constructed in a water management laboratory at faculty of civil engineering, ČVUT in Prague. On the model, there were evaluated 5 types of stilling basin alterations for optimization of the damping of the kinetic energy. The results of the research are: comparison of the speed on the beginning of the chamber, flow field and collision with a 3D mathematical model.

**Key words:** *physical modeling, mathematical modeling, model similarity, navigation lock, stilling basin, flow field*

## 1 ÚVOD

Tato práce se zabývá výzkumem optimalizace přímého plnění připravované plavební komory Děčín. Pro horní ohlavi plavební komory jsou navržena spustná segmentová vrata. V rámci předprojektové přípravy vyhovují nejlépe zadaným požadavkům, což je bezpečné plnění, resp. doplňování plavební komory, zajištění možnosti převádění nezamrzného průtoku, převádění ledů, části povodňových průtoků v kritických situacích a bezpečné tlumení kinetické energie vody a ledů při dopadu do plavební komory. Ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební, ČVUT byl vybudován členy Katedry hydrotechniky pod vedením doc. Dr. Ing. Pavla Fošumpaura výsekový model v rámci výzkumného úkolu „*Fyzikální hydraulický modelový výzkum plavební komory Děčín*“, jehož objednatelem je Ředitelství vodních cest ČR. Jedná se o výsek poloviny šířky horní části plavební komory v měřítku 1:20. V rámci tohoto výzkumu jsem se podílel na měření rychlostí a proudových polí při plnění plavební komory. Výsledky získané experimentálním výzkumem v laboratoři byly následně využity pro sestavení a verifikaci 3D matematického modelu přímého plnění plavební komory, který je zpracován v rámci projektu SGS14/129/OHK1/2T/11 studentské grantové soutěže ČVUT v Praze.



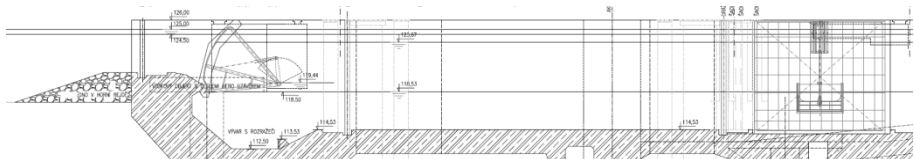
Cílem výzkumu je porovnat naměřené veličiny jednotlivých variant, vybrat optimální variantu a porovnat výsledky měření fyzikálního modelu s výsledky matematického modelu.

## 2 PLAVEBNÍ KOMORA DĚČÍN

Plavební komora je součástí plánovaného plavebního stupně Děčín, který bude umístěn v říčním kilometru 737,12 pod přístavem Děčín – Loubí.

Současná předprojektová příprava vychází z následujících předpokladů:

- Šířka PK		24,00 m
- Užitná délka PK	celková	200,00 m
	malá část	41,50 m
	velká část	140,00 m
- Horní hladina	nominální vzduť	124,50 m n. m.
	maximální plavební	125,00 m n. m.
- Dolní hladina	při max. plavebním Q	123,67 m n. m.
	při $Q_{345d}$	118,53 m n. m.
- Dno PK		114,53 m n. m.
- Dno vývaru PK		112,50 m n. m.
- Typ vrat	horní ohlavi	segmentová vrata
	střední ohlavi	vzpěrná vrata
	dolní ohlavi	vzpěrná vrata





### 3 MODELOVÉ PODMÍNKY

Model byl navržen a sestaven v měřítku 1:20. Toto měřítko bylo v minulosti ověřeno jako nejvhodnější pro modelování plnění plavebních komor. Dále byl vzat v úvahu rozbor geometrických a průtokových podmínek tak, aby bylo možné model umístit do laboratorního žlabu.

U Froudova typu modelové podobnosti jsou vyjádřeny podmínky dynamické podobnosti hydrodynamických jevů za výhradního působení gravitačních sil. Kromě gravitačních sil však mohou zkoumané proudění ovlivňovat i další síly – odpor třením vazké kapaliny, síly kapilární, síly objemové apod. Podle Froudova zákona podobnosti můžeme určitý hydrodynamický jev zkoumat tehdy, jestliže účinky těchto sil jsou zanedbatelné v porovnání s gravitačními silami. Mezní podmínky vymezují oblasti a měřítka, v nichž lze hydrodynamický jev modelovat. Kinematicky podobné jevy, které ovlivňuje výhradně gravitační síla, jsou dynamicky podobné, jestliže ve vzájemně příslušných průřezech budou stejná Froudova čísla. Fyzikální model v měřítku 1:20 odpovídá všem podmínkám.

Na základě modelových podobností vyplývají pro použité geometrické měřítko 1:20 následující podmínky:

- Geometrické měřítko:

$$M_h = M_l = M_b = 20$$

- Měřítko rychlostí:

$$M_v = M_l^{1/2} = 4,47$$

- Měřítko průtoků:

$$M_Q = M_l^{3/2} = 1788,85$$

- Měřítko časů:

$$M_t = M_l^{1/2} = 4,47$$

Celý model má délku  $L = 4,5$  m, výšku  $H = 0,8$  m a šířku  $B = 0,6$  m. Voda byla k modelu přiváděna rozváděcím potrubím v laboratoři, průtok byl měřen pomocí magneticko-indukčního průtokoměru, voda byla uklidněna v uklidňovací nádrži. Voda z modelu byla odvedena sběrnou nádrží do podzemních prostor vodohospodářské laboratoře, kde je umístěna centrální akumulace vody.

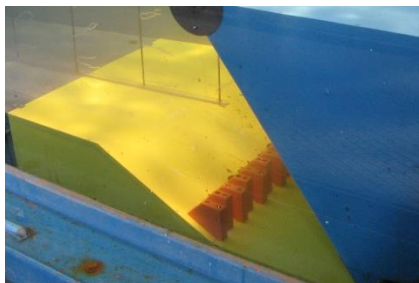


## 4 VARIANTY ŘEŠENÍ

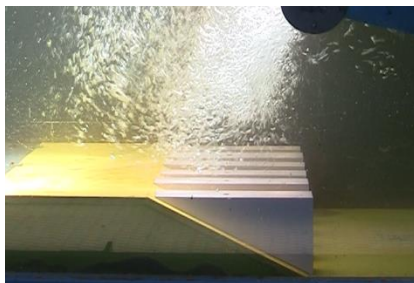
Modelový výzkum byl rozdělen na 5 variant podle technické úpravy vývaru:

**Varianta 1** – podle předprojektové přípravy vytvořené firmou Pöyry Enviroment. Vývar je ukončen řadou 30 ti rozražečů o rozměrech 0,4x1x1m a sklonem ukončovacího prahu vývaru 1:2.

**Varianta 2** – větší rozražeče, šířka rozražečů je 0,96 m, mezera mezi rozražeči je také 0,96 m, výška rozražečů je na úroveň dna plavební komory. Vývar je ukončen ukončovacím prahem ve sklonu 1:2.



Obr. 4-1 Varianta 1



Obr. 4-2 Varianta 2

**Varianta 3** – ukončení vývaru v místě původních rozražečů schodem do výšky dna plavební komory.

**Varianta 4** – vychází z varianty vývaru 2, ale upravuje rozmístění rozražečů podle slupic provizorního hrazení, které se nachází bezprostředně za vývarem. Šířka jednoho rozražeče je 1,5 m, mezera mezi rozražeči je 1,22 m. Vývar je ukončen sklonem dna 1:2.



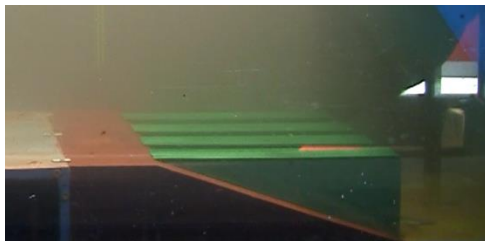
Obr. 4-3 Varianta 3



Obr. 4-4 Varianta 4



**Varianta 5** – upravuje sklon dna ukončení vývaru na 1:3, rozměry rozražečů jsou stejné jako ve variantě 4.



*Obr. 4-4 Varianta 5*

## 5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

### 5.1 Fyzikální modelování

Měření probíhala v ustáleném režimu, kdy byla horní okrajová podmínka nastavena průtokem, který odpovídá okamžiku maximálního plnicího průtoku. Ten byl odvozen hydraulickým výpočtem plnění plavební komory v neustáleném režimu. Dolní okrajová podmínka byla nastavena v rozmezí hladin 119,75-122,89 m n. m. Hladina 119,75 m n. m. odpovídá okamžiku maximálního plnicího průtoku pro přímé plnění celé plavební komory. Hladina 119,89 m n. m. odpovídá maximálnímu plnicímu průtoku pro plnění malé části komory. Pro přímé plnění malé PK byly dále měřeny rychlosti pro hladiny 120,89 m n. m., 121,89 m n. m. a 122,89 m n. m. V případě pomalého plnění malé části plavební komory (uzávěr otevřen na 69 %) dosahuje maximální plnicí průtok hladiny 122,54 m n. m.

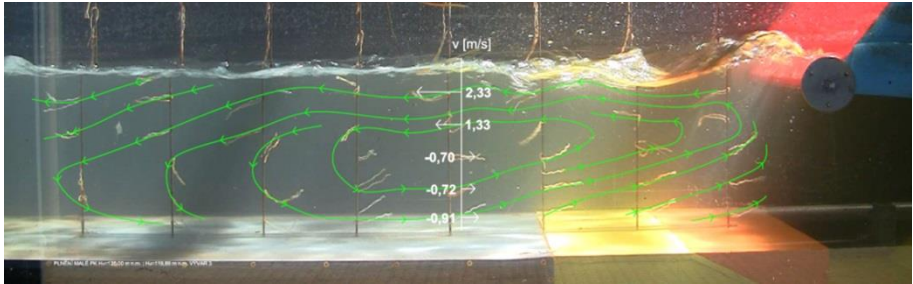
#### 5.1.1 Proudová pole

Proudová pole byla měřena pomocí sítě bavlnek, které byly přichyceny na ocelové tyčky. Vzdálenosti bavlnek byly 1 m po výšce a 2 m v podélném směru (ve skutečnosti). Pomocí videokamery byl pořízen záznam v délce 1 minuty, který zachytává polohu jednotlivých bavlnek v proudu a tím určuje směr proudění. Po vyhodnocení záznamu bylo možné zakreslit vyhlazený tvar proudových polí a tím popsat celkový charakter proudu bezprostředně za vývarem.

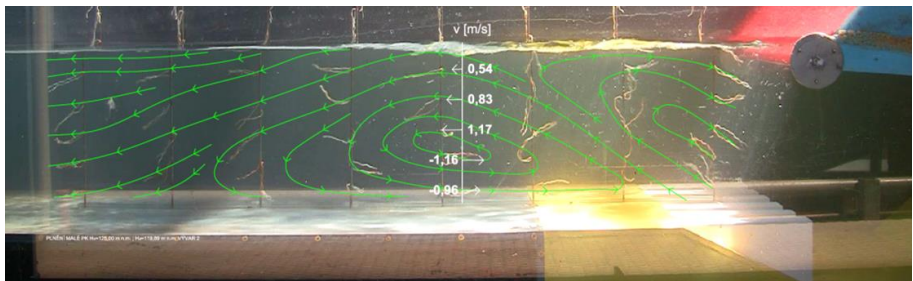
Na obr. 5 - 1. je kromě proudnic vidět zcela nevhodný tvar hladiny při plnění pro variantu vývaru 3. Obr. 5 - 2. ukazuje proudnice pro variantu 2. Hladina je zde



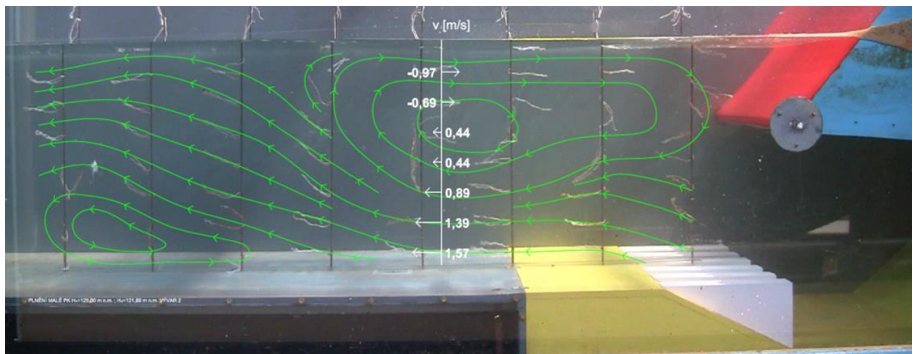
klidnější, pro proplavení lodí je tato varianta vhodnější. Na obr. 5 - 3 je vidět zpětný proud zasahující do užité délky PK.



Obr. 5 - 1 Proudnice Var. 3 -  $H_h=125,00$  m n. m. ;  $H_d= 119,89$  m n. m.



Obr. 5 - 2 Proudnice Var. 2 -  $H_h=125,00$  m n. m. ;  $H_d= 119,89$  m n. m.



Obr. 5 - 3 Proudnice Var. 2 -  $H_h=125,00$  m n. m. ;  $H_d= 122,89$  m n. m.





### 5.1.2 Rychlostní poměry

Jedním z úkolů laboratorního modelového výzkumu bylo změření a porovnání rychlostí na začátku užité délky. Měření probíhalo pomocí tří hydrometrických vrtulek typu STS 005 firmy Erfisinger electronic GmbH. Hydrometrické vrtulky umožňují měřit rychlost pouze v jednom směru, proto byly umístěny 4 m za počátek užité délky PK, kde byla pomocí bavlnek prokázána převažující podélná složka vektorů rychlostí. Měření rychlosti probíhalo po dobu 30 s. Datalogger zaznamenal průměrnou rychlost proudění. Měření probíhalo na každé úrovni současně pomocí 3 symetricky umístěných vrtulek. První měření probíhalo 0,5 m nade dnem PK a dále po metru, až k dosažení hladiny.

Hodnoty měřených rychlostí byly v absolutních hodnotách, proto se musel směr proudění určit pomocí proudnic.

V tabulce jsou zobrazeny rychlosti proudění při plnění PK 1m pod hladinou pro každou variantu. Rychlost proudění v této hloubce nejvíce ovlivňuje silové namáhání plavidel. Na základě měření in-situ, která probíhala na horní Vltavě, se prokázala maximální bezpečná rychlost proudění do 1,2 m/s (max. 1,5 m/s). Rychlost 1,5 m/s považujeme za limitní, pro bezpečné proplavení.

Z měření vyplývá (Tab. 1), že varianta 3 je zcela nevhodná při všech hladinách v komoře a to jak pro pomalé, tak pro rychlé plnění. Rychlosti naměřené pro variantu 1 jsou sice nižší, ale stále přesahují hodnotu 1,5 m/s. U varianty 5 dochází k velkému zpětnému proudění při hladinách 120,89 m n. m. a 121,89 m n. m. Varianty 2 a 4 vykazují vhodné hodnoty rychlosti. Ale při postupném plnění dochází ke zpětnému proudu (obr. 5 - 3). Pro tyto varianty byly použity modely lodí, které se umístily do komory, a zjišťoval se vliv zpětného proudění na plavidla. Pokusy ukázaly, že při správném proplavení lodí nemá zpětné proudění tendenci strhávat plavidla na uzávěr.

pokus č.	H <sub>h</sub>	H <sub>d</sub>	Q	rychlost na počátku PK, 1m pod hladinou				
				Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	Varianta 5
	[m n. m.]	[m n. m.]	[m <sup>3</sup> /s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
1) malá PK - rychle	125,00	119,89	61,28	1,73	0,54	2,33	0,58	0,75
	125,00	120,89	54,95	1,69	-0,78	2,12	0,36	-1,28
	125,00	121,89	47,76	1,13	-0,97	1,60	-0,63	-1,17
	125,00	122,89	39,31	0,55	-0,81	1,51	-0,56	-0,85
2) malá PK - pomalu	125,00	122,54	29,19	0,56	-0,70	1,34	-0,32	-0,78
3) celá PK	125,00	119,75	62,10	2,11	0,54	2,40	0,48	-0,79

Tab. 1 Rychlosti 1m pod hladinou, 4m od počátku UD



## 5.2 Matematické modelování

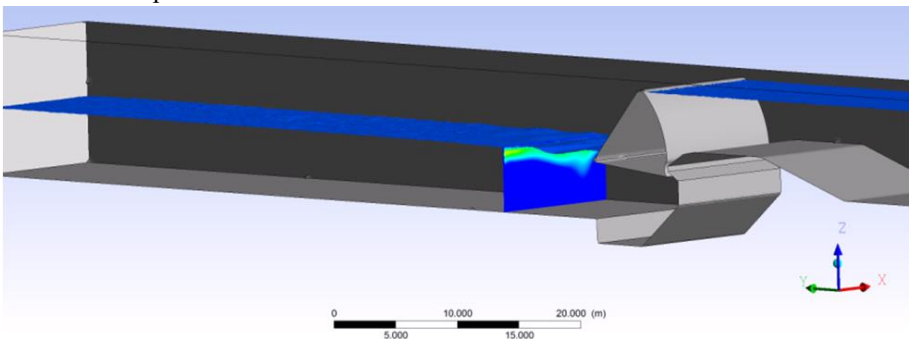
V rámci výzkumu studentské grantové soutěže byl sestaven matematický model pro variantu 3. Tato varianta byla vybrána, protože nedisponuje rozražeči. Celý model není tak náročný na kvalitu sítě v místě ukončení vývaru.

Vstupní podklady byly stejně jako na fyzikálním modelu a to výkresy předprojektové přípravy. Z těchto podkladů byl sestaven 3D výkres na půlku šířky komory (12m), který tvořil geometrii modelu.

Výpočetní síť byla vytvořena v programu *ICEM CFD*, který je součástí platformy *ANSYS Workbench*. Byla vytvořena strukturovaná síť (mesh) o maximální velikosti elementu 1 m. V místě výtoku pod segmentem byla síť zahuštěna na velikost 5 cm, aby nedocházelo ke zkreslení proudění v tomto detailu. Celkový počet elementů tak dosáhl 700 000.

Pro samotný výpočet byl použit program *CFX*, který je také součástí platformy *ANSYS Workbench*. Horní okrajová podmínka byla nastavena pomocí hladiny  $H_h=125,00$  m n. m. Dolní okrajová podmínka byla také nastavena pomocí hladiny na úroveň  $H_d=119,89$  m n. m. Výpočet byl stejně jako u fyzikálního modelu nastaven pro ustálené proudění pro nejnepříznivější případ maximálního plnění průtoku.

V modelu byly sledovány tři veličiny – výtokový součinitel, rychlosti na začátku užité délky (respektive o 4 m dále) a tvar proudového pole. Tyto veličiny se dají jednoduše porovnat s fyzikálním modelem a v dalším výzkumu budou sloužit pro kalibraci modelů.



Obr. 5-4 Pohled na model

Výtokový součinitel byl odvozen vyjádřením rovnice výtoku otvorem, ze známého průtoku v modelu, který je roven  $31,1$  m<sup>3</sup>/s. Tomuto průtoku odpovídá

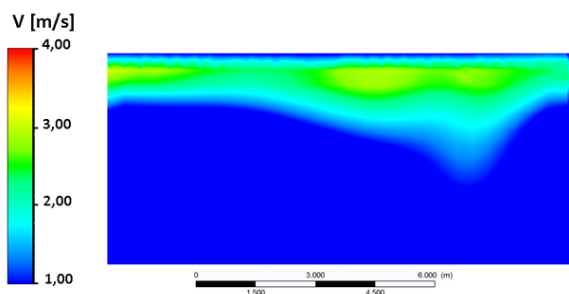


výtokový součinitel  $\mu_s = 0,86$ . Fyzikálním model byl verifikován na výtokový součinitel  $\mu_s = 0,85$ . Tato hodnota byla ověřena na hydraulickém modelu v měřítku 1:8, který prováděl Ing. Tomáš Pícek Ph.D., z Katedry hydrauliky a hydrologie Fakulty stavební ČVUT.

Obr. 5 - 5 zobrazuje rychlosti z matematického modelu v profilu 4 m za začátkem užité délky. Porovnání rychlostí je v tabulce Tab. 2. Je zřejmé, že naměřené rychlosti ve fyzikálním modelu se liší od rychlostí v matematickém modelu, ale jejich průměry v dané úrovni vykazují odchylku max. 14 %, celková odchylka v měřené síti je 6 %. Tyto výsledky jsou uspokojivé, chyba může být v nedostatečné síti matematického modelu, nebo i nepřesnostmi při měření pomocí vrtulek. Dále je vidět, že směry rychlostí jsou v obou modelech stejné.

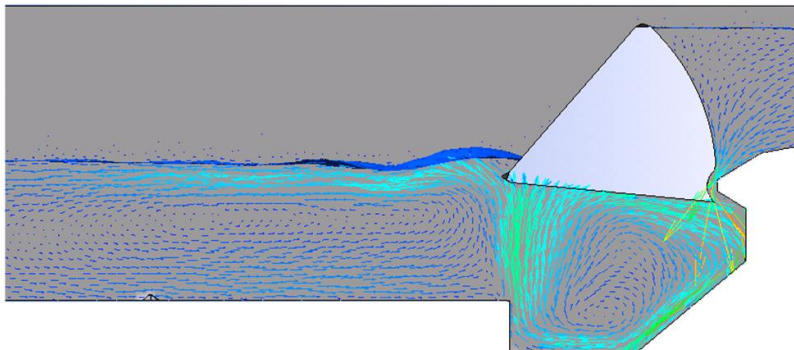
průměrné rychlosti fyz. model [m/s]					průměrné rychlosti mat. model [m/s]					odchylka v [%]
úroveň	levý		pravý	průměr	úroveň	levý		pravý	průměr	
5	2,24	2,17	2,57	2,33	5	2,16	2,68	2,59	2,48	6,5
4	1,23	1,19	1,59	1,33	4	0,34	1,39	1,73	1,15	13,6
3	-0,69	-0,60	-0,80	-0,70	3	-0,56	-0,25	-1,28	-0,70	0,6
2	-0,87	-0,72	-0,58	-0,72	2	-0,95	-0,42	-0,81	-0,73	0,5
1	-1,16	-0,87	-0,69	-0,91	1	-1,22	-0,90	-0,37	-0,83	8,7

Tab. 2 Porovnání rychlostí z fyzikálního a matematického modelu, 4m od začátku UD



Obr. 5-5 Rychlosti 4m za začátkem UD

Na obr 5 - 6 jsou vidět proudnice z matematického modelu. Při porovnání s obr. 5 - 1 je zřejmý stejný charakter proudu. Jednotlivé proudnice vykazují rozdílný tvar. Pro detailnější popis proudnic je potřeba zahustit síť v oblasti vývaru a za vývarem. Tvar hladiny odpovídá fyzikálnímu modelu, pro přesnější popis hladiny je třeba opět zahustit síť.



Obr. 5-6 Proudnice z mat. modelu

## 6 ZÁVĚR

Na vybudovaném modelu ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební, ČVUT v Praze proběhlo měření rychlostí a proudových polí v rámci výzkumu optimalizace horního ohlaví plavební komory Děčín. Měření probíhala pomocí tří hydrometrických vrtulek a sítě s bavlnkami.

Rychlosti během přímého plnění plavební komory byly měřeny v několika úrovních na začátku užité délky pro 5 variant řešení. Porovnáním výsledků byly vybrány jako optimální dvě varianty a to varianta 2 (velké rozražeče šířky 1m) a varianta 4 (velké rozražeče šířky 1,5m). Naměřené rychlosti u těchto variant dosahovaly maximální rychlosti 0,97 m/s, což umožňuje bezproblémové proplouvání plavební komorou. V rámci dalšího výzkumu byla vybrána jako optimální varianta 2 (nejlépe splňuje všechny požadavky).

Vzhledem k tomu, že výsledky měření rychlostí jsou v absolutních hodnotách, bylo třeba určit směr proudění. Toto byl možné určit pomocí proudnic. Výsledky ukázaly při určitých hladinách zpětný proud směrem k vratům. Zpětný proud zasahoval do užité délky PK. Pokusy bylo zjištěno, že tento proud nemá negativní vliv na bezpečné proplavení.

V rámci projektu studentské grantové soutěže byl sestaven 3D matematický model pro variantu 3. Tato varianta byla vybrána pro jednoduchou geometrii vývaru. Hustota sítě byla v počtu 700 000 elementů o max. velikosti 1 m. Při porovnání výtokového součinitele bylo dosaženo vysoké přesnosti (0,85 na fyz. modelu, 0,86 na mat. modelu). Při porovnání rychlostí na začátku užité délky se jednotlivé



rychlosti lišily, ale průměrná odchylka dosahovala 6 %. Pro detailní porovnání proudnic je třeba zpřesnit výpočetní síť, ale charakter proudu jednotlivých modelů je stejný.

Výsledky matematického modelu budou sloužit pro další kalibraci matematických modelů a sestavení modelu neustáleného proudění při plnění PK a další potřeby disertační práce.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT při řešení projektu č.: SGS14/129/OHK1/2T/11 s názvem „Vliv řízení objektů na vodních cestách na průtokový režim a plavbu“.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ANSYS, Inc. *ANSYS CFX Tutorials*. Release 13.0. U.S.A., 2010.
- [2] ANSYS, Inc. *ANSYS CFX - Solver Modeling Guide*. Release 13.0. U.S.A., 2010.
- [3] ČÁBELKA, J., GABRIEL, P.: *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice (1) Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti*, Academia Praha 1987.
- [4] FOŠUMPAUR, P., KRÁLÍK, M., ZUKAL, M., PICEK, T., KUČEROVÁ, J.: *Fyzikální hydraulický modelový výzkum plavební komory Děčín. Metodika výzkumu. Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2014*
- [5] KAŠPAR, T., *Matematický model horního ohlavi plavební komory Děčín*. Praha, 2014. Diplomová práce. ČVUT.
- [6] ŠKAŘUPOVÁ, E. *Modelování plnění plavební komory České Vrbné*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT.
- [7] PÖYRY ENVIRONMENT, a.s.: *Optimalizace plavební komory Děčín. Předprojektová příprava*. 2012.

