

**České vysoké učení technické v Praze**

Fakulta stavební  
Katedra hydrotechniky



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Metody PIV a PTV pro měření hladinových rychlostí  
PIV and PTV methods for water surface velocimetry

Autor:

Bc. Vít Petržílek

Vedoucí práce:

Dr. Ing. Petr Nowak

Praha 2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Petržilek</u>	Jméno: <u>Vít</u>	Osobní číslo: <u>468562</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra hydrotechniky</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Vodní hospodářství a vodní stavby</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Metody PIV a PTV pro měření hladinových rychlostí</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>PIV and PTV methods for water surface velocimetry</u>	
Pokyny pro vypracování: návrh a vytvoření tvarových překážek do měrného žlabu, zaměření průběhu hladiny a hladinových rychlostí metodou PIV a PTV, výpočet CFD modelu, použití SW Matlab pro zpracování hladinových rychlostí, porovnání výsledných naměřených i vypočtených dat	
Seznam doporučené literatury: Particle Image Velocimetry for MATLAB, MathWorks manual, User's manual CFX, Hydraulika	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Dr. Petr Nowak</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>24.09.2021</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>02.01.2022</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<u>23/9/2021</u> Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
---	---------------------

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“

V Praze dne 2.1.2022

.....

Podpis studenta

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu Dr. Ing. Petru Nowakovi za jeho odborné vedení diplomové práce a předání znalostí během studia. Následně bych rád poděkoval paní Ing. Evě Bílkové za odborný dohled při psaní diplomové práce a pomoci při tvorbě matematických modelů. Dále bych rád poděkoval Bc. Davidu Karbulkovi a Ing. Ondřeji Vránkovi za předání znalostí v prostředí Matlab a technickou pomoc. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, která mi umožnila studium na vysoké škole.

## **Abstrakt:**

Cílem autora diplomové práce bylo ověření nestandardních metod měření, respektive metody particle image velocimetry a particle tracking velocimetry. Metody lze použít například pro měření hladinových rychlostí a vykreslení trajektorie proudění částic na hladině.

Část diplomové práce se autor věnoval také tvorbě skriptu v rozhraní MATLAB, který umožnil měření trajektorie a rychlosti částic. Pro vytvoření skriptu byla použita metoda počítačového vidění a zpracování obrazu, která autorovi umožnila detekci pohybujících se částic na hladině.

Ve vodohospodářském experimentální centru Fakulty stavební autor diplomové práce vytvořil fyzikální model simulující obtékání pilíře ve vodním toku. Pro fyzikální model byl použit laboratorní žlab, do kterého byl upevněn pilíř vytvořený pomocí 3D tisku. Nad pilířem byla umístěna kamera snímající průběh proudění pohybujících se papírových částic, které sloužily k vyhodnocení jednotlivých metod. Pro ověření hladinových rychlostí a trajektorie byl vytvořen matematický model, který byl zkalibrován pomocí modelu fyzikálního. Následně byly tyto metody vzájemně porovnány.

## **Klíčová slova:**

particle image velocimetry, PIV, particle tracking velocimetry, PTV, MATLAB, Ansys CFX, matematický model

## **Abstract:**

The aim of the author's master thesis was to verify non-standard measurement methods, respectively particle image velocimetry and particle tracking velocimetry. The methods can be used, for example, to measure surface velocities and to plot the trajectory of particle flow on the surface.

Part of the thesis was also devoted to the author's development of a MATLAB script that enabled the measurement of particle trajectory and velocity. A computer vision and image processing method was used to create the script, which allowed the author to detect moving particles on the surface.

In the Water Experimental Centre of the Faculty of Civil Engineering, the author of the thesis created a physical model simulating the encircling of a pillar in a watercourse. For the physical model, a laboratory flume was used into which a pillar created by 3D printing was fixed. A camera was placed above the pillar to capture the flow of moving paper particles, which were used to evaluate each method. To verify the surface velocities and trajectories, a mathematical model was created and calibrated using the physical model. Subsequently, these methods were compared with each other.

## **Key words:**

Particle Image Velocimetry, PIV, Particle Tracking Velocimetry, PTV, MATLAB, Ansys CFX, mathematical modelling

## Obsah

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>3</b>
1.1. SPECIFIKACE CÍLŮ PRÁCE.....	4
<b>2. METODY PRO VYKRESLENÍ HLADINOVÝCH RYCHLOSTÍ .....</b>	<b>5</b>
2.1. PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY.....	5
2.2. PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY.....	8
<b>3. TVORBA MODELU.....</b>	<b>9</b>
3.1. VÝBĚR VHODNÉHO TVARU MODELU .....	9
3.2. HISTORIE 3D TISKÁREN POUŽÍVAJÍCÍ METODU FDM .....	11
3.3. ROZHRANÍ PRO UŽIVATELE 3D TISKÁREN.....	11
3.4. TVORBA TĚLESA MODELU .....	12
3.5. PŘÍPRAVA TISKÁRNY .....	14
<b>4. POSTUP MĚŘENÍ.....</b>	<b>16</b>
<b>5. STANDARDNÍ POSTUP MĚŘENÍ .....</b>	<b>17</b>
5.1. FYZIKÁLNÍ MODEL .....	17
5.2. ANALYTICKÝ VÝPOČET.....	18
5.3. MATEMATICKÝ MODEL .....	19
5.3.1. <i>Model</i> .....	19
5.3.2. <i>Výpočetní síť</i> .....	19
5.3.3. <i>Nastavení vlastností modelu</i> .....	20
5.3.4. <i>Počáteční podmínky</i> .....	20
5.3.5. <i>Okrajové podmínky</i> .....	21
5.3.6. <i>Výsledná data</i> .....	22
<b>6. NESTANDARDNÍ POSTUP MĚŘENÍ .....</b>	<b>23</b>
6.1. REKTIFIKACE SNÍMKU .....	23
6.2. METODA PTV.....	25
6.2.1. <i>Metoda PTV – tvorba skriptu v prostředí MATLAB</i> .....	25
6.3. METODA PIV .....	35
<b>7. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ Č. 1 .....</b>	<b>38</b>
<b>8. MĚŘENÍ Č. 2.....</b>	<b>40</b>
<b>9. MĚŘENÍ Č. 3.....</b>	<b>42</b>
<b>10. ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
<b>11. REFERENCE .....</b>	<b>45</b>

<b>12. PŘÍLOHY .....</b>	<b>49</b>
12.1. MĚŘENÍ Č. 1 - PRŮBĚH HLADINY PODÉL PILÍŘE .....	49
12.2. MĚŘENÍ Č. 3 – SNÍMEK PRŮBĚHU PROUDĚNÍ.....	50
12.3. MĚŘENÍ Č. 3 – PRŮBĚH PROUDĚNÍ PROTI VODĚ .....	51
12.4. MĚŘENÍ Č. 3 – PRŮBĚH PROUDĚNÍ PROTI VODĚ .....	52
12.5. MĚŘENÍ Č. 3 – PRŮBĚH PROUDĚNÍ PO VODĚ.....	53



# 1. ÚVOD

Pro základní seznámení s kapalinou, která proudí v obecném profilu, je zjištění jejích základních parametrů. Jedním z nich je průtočný profil, dalším důležitým aspektem je rychlostní součinitel a dále sklon čáry energie. Odvození zmíněných veličin popsal známý francouzský inženýr Antoine de Chézy.

Ke zjištění těchto důležitých parametrů se využívá obor zvaný hydrometrování, který se z části zabývá i monitoringem průtoku a rychlosti kapaliny. Po celé České republice jsou vybudované vodoměrné a limnigrafické stanice, které měří výšku hladiny na měrném přepadu, většinou používající Thompsonův přepad, a se změřenou výškou hladiny je tak snadno vypočítán i průtok. Díky elektronického záznamu jsou výsledná data k dispozici do několika sekund na cloudu.

Tam, kde výše uvedené stanice nejsou k dispozici, se využívají metody méně přesné a jsou prováděné in situ. Pro výpočet průtoku je možné využít směšovací metodu, kde za použití barvicí látky (stopovače) měříme koncentraci barvicí látky v níže položeném profilu. Pro měření rychlosti lze využít hydrometrickou vrtuli, plovák, ultrazvuk, popřípadě metodu ADCP. Zmíněné metody mají jedno společné – jedná se o metody invazivní, kde je potřeba s přístrojem vstoupit do místa vodního toku. [1]

V podobě kladení důrazu na digitalizaci a zjednodušení postupů práce je možné v případě hydrometrování využít metody PIV (Particle Image Velocimetry) a PTV (Particle Tracking Velocimetry), respektive pro velké toky LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) a LSPTV (Large Scale Particle Tracking Velocimetry).

V diplomové práci bylo provedeno ověření použití metod PIV a PTV pro zjištění hladinových rychlostí a trajektorii částic. Autor diplomové práce využil možnosti použití vodohospodářského experimentálního centra na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Měření probíhalo v hydraulickém žlabu a výsledky byly ověřeny za pomoci fyzikálního a matematického modelování.

## 1.1. Specifikace cílů práce

- Vytvoření 3D modelu pilíře za pomoci 3D tisku
- Vhodné implementování 3D výtisku do žlabu v hydraulické laboratoři
- Zaznamenání obtékání tělesa kapalinou
- Použití prostředí MATLAB pro vytvoření PTV skriptu
- Vytvoření matematického modelu laboratorního žlabu s 3D modelem pilíře
- Importování dat do softwarů PIV a PTV
- Porovnání výsledných dat

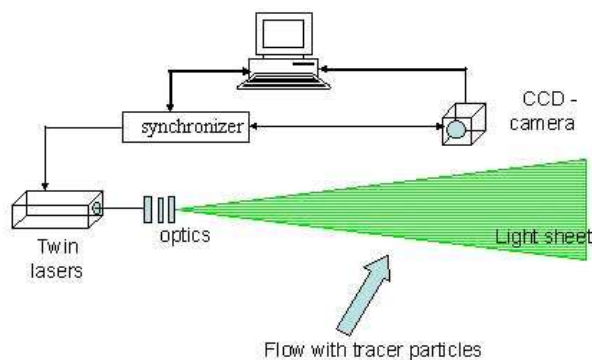
## 2. METODY PRO VYKRESLENÍ HLADINOVÝCH RYCHLOSTÍ

S použitím kvalitního osvětlení, videozáznamu a analýzy obrazu je možné dostat se k velké škále zobrazovacích rychloměrů, mezi nimi vyniká například PIV (Particle Image Velocimetry) a PTV (Particle Tracking Velocimetry). PIV je založen na základě Eulerovy soustavy, která poskytuje vektory rychlosti na pravidelné mřížce. Oproti tomu metoda PTV určuje náhodně umístěné Lagrangeovy vektory rychlosti. Důležitými parametry pro obě zmíněné metody je např. charakteristika proudění a intenzita osvětlení. [2]

V případě použití metod na vodním toku je důležitým faktorem minimalizování šikmého úhlu pohledu kamery na hladinu toku, jelikož úhel snímání zkresluje výpočet a vnáší do výpočtu geometrické deformace, které značně ovlivňují výsledné hodnoty. V terénu nelze zaručit kolmý pohled na hladinu, a proto probíhá u snímku následná rektifikace obrazu, která dokáže pohled do jisté míry napravit.

### 2.1. Particle Image Velocimetry

Jedná se o metodu zabývající se měřením rychlosti částic za pomoci jednotlivých snímků. Udává se jako neinvazivní technika, která dokáže měřit rychlost v kapalině. Metoda využívá laserový paprsek k osvětlení reflexních částic obsazených v kapalině, kdy synchronizovaná kamera s laserem zaznamenává pohyb částic. Doporučená vlnová délka se udává v rozsahu 400-500 nm. Kamera musí být dostatečně rychlá v uložení prvního snímku, aby byla připravena na druhou expozici. Výsledkem je posun malých skupin částic z jednoho snímku na druhý. Pomocí křížové korelace snímků se získá posun za čas, respektive rychlost. [3]

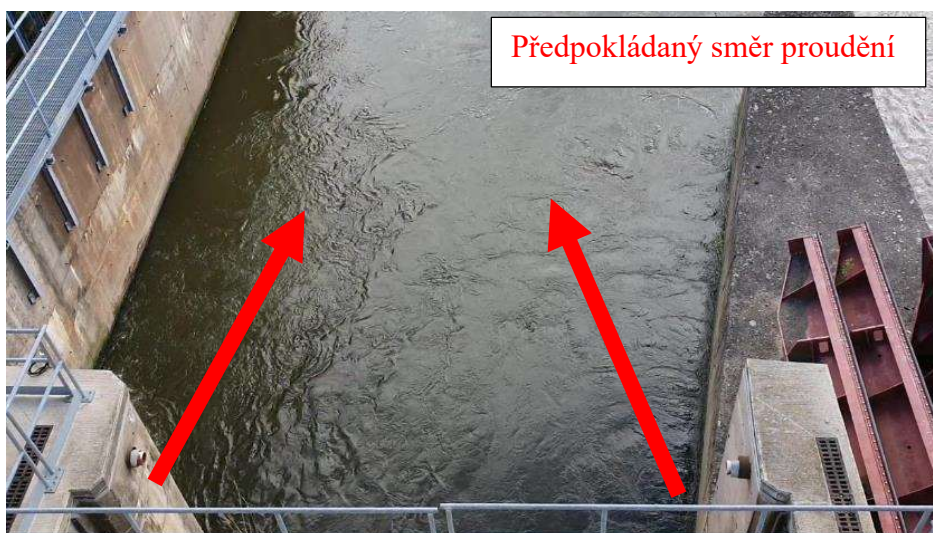


Obrázek 1 Princip PIV – laserový paprsek osvětluje částice a snímání vysokorychlostní kamerou. [4]

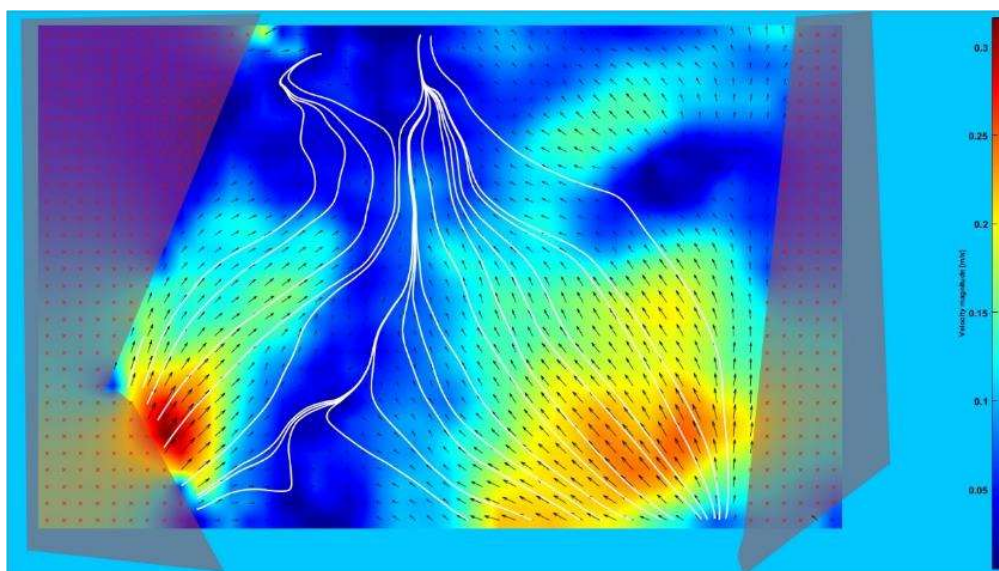
V posledních letech četnost použití metody PIV stoupá a lze tuto metodu nalézt i v jiných výzkumných oborech než pouze v dynamice tekutin. Příkladem může být pohyb buněk, ultrazvukové snímky a další, kde je potřeba kvantifikovat rychlosti nebo posuny částic. [3]

PIV, který je aplikován v Eulerově soustavě, určuje rychlost skupin stopových částic s pevně stanoveným prostorem. Postupným zdokonalováním výpočetních metod a techniky je možné metodu PIV použít pro analýzu hladinových rychlostí a odhadu ve větším měřítku, respektive LSPIV. Hlavním rozdílem mezi PIV (malé měřítko) a LSPIV (velké měřítko) jsou měřítka průtoku. S nově vytvořenými softwary lze získat vektory hladinových rychlostí pomocí kamery bez nutnosti použití laserového paprsku. Značným omezením je proměnlivé osvětlení a omezení dostupnosti ortogonálních kamerových snímků, které vyžadují přesnou geometrickou rektifikaci obrazu, aby bylo zamezeno velké odchylce způsobené úhlem pohledu kamery. [5]

Jedním z prvotních úkonů autora diplomové práce bylo ověření vykreslení vektorového pole na hladině. Prvotním záznamem byl snímek výtoku ze savky od Dr. Ing. Petra Nowaka, kde na Obrázek 2 je zobrazen předpokládaný směr proudění a na Obrázek 3 výsledné vektorové pole za pomoci metody PIV. Výsledná data byla klíčová pro pokračování v problematice PIV a PTV.



Obrázek 2 Snímek výtoku ze savky, autor Dr. Ing. Petr Nowak.



Obrázek 3 Výsledné vektorové pole vytvořené pomocí metody PIV.

## 2.2. Particle Tracking Velocimetry

Další neinvazivní metodou, založenou na měření rychlosti částic na hladině pomocí jednotlivých snímků, je Particle Tracking Velocimetry, která ke stanovení rychlosti jednotlivých stopovacích částic využívá techniku určující náhodně umístěné Lagrangeovy vektory rychlosti. Aplikace je vhodná pro nízkou hustotu částic a touto metodou můžeme vykreslit nestacionární proudění. PTV obvykle probíhá ve dvou fázích, a sice:

- Identifikace částic
- Sledování částic

K lepší identifikaci částic je možné použít filtr, který dokáže částice více zvýraznit od proudící kapaliny. V druhé fázi dochází ke sledování centroidu detekovaných částic pro rekonstrukci trajektorie. [6]

Pro získání výstupních rychlostí částic v metrech za sekundu je potřeba nezávisle odhadnout metrický rozměr pixelů na snímků. Většinou k tomu slouží kalibrační body, které mají pevně danou délku. Sekvenci snímku lze v dnešní době získat z videozáznamu pořízeného buď stacionárními kamerami, nebo mobilním zařízením. Důležitá je také fotometrická kalibrace určením vnitřních parametrů kamery a geometrickou kalibrací kamery v laboratorních podmínkách.

Metoda se hojně využívá i v přírodním prostředí, přestože je obtížné detekovat stopovací částice, především kvůli značným odleskům slunce na hladině. Existuje však alternativa založená na křížové korelaci, která zmírňuje odrazy od slunce a rekonstruuje trajektorii měřících prvků, které projdou zorným polem kamery. [7]

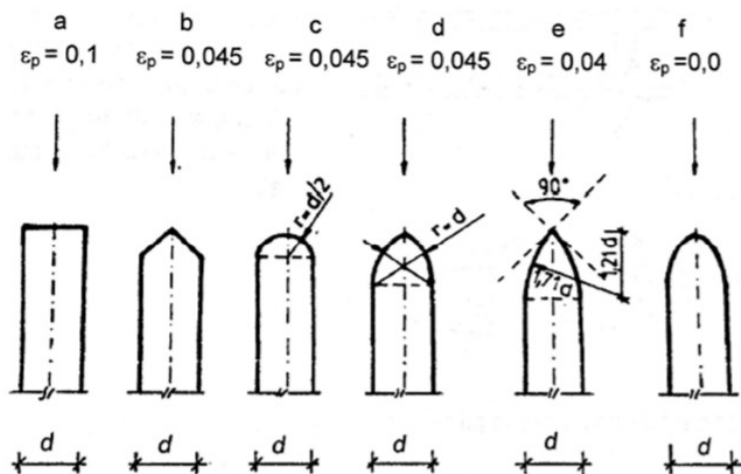
### 3. TVORBA MODELU

#### 3.1. Výběr vhodného tvaru modelu

Dalším krokem bylo vytvoření vhodné překážky, která by ovlivnila trajektorii proudění částic a značně by nezměnila výškový rozdíl hladiny v místě překážky (například vzdutím). Jelikož snímáním hladiny pomocí jedné kamery nejsme schopni zachytit proudění ve třech směrech, je potřeba s tímto faktem pracovat. Autor převzal tvar modelu z mostních pilířů, který je hydraulicky přívětivý a nemá značný vliv na vzdutí hladiny. Lze říct, že posun ve směru Z byl v případě tohoto výpočtu zanedbatelný.

Je několik půdorysných tvarů pilířů, které se v praxi objevují, jak u mostních, tak jezových konstrukcí. Z hydraulického hlediska tvar zhlaví značně ovlivňuje nepříznivé účinky v místě jednotlivých polí. Hlavními nepříznivými účinky je vzdutí hladiny vody v délce pilíře, kontrakce proudu (a tím zmenšení průtokové kapacity) a namáhání pilíře silami, jejichž součet dává proudový odpor pilíře.

Pro snížení nepříznivých účinků jsou použity hydraulicky přívětivé tvary zhlaví. Na Obrázek 4 je vidět pestrá škála půdorysných tvarů zhlaví pilíře. Od nejnepříznivějšího tvarového součinitele zleva, až po proudnicový tvar vpravo s nulovým tvarovým součinitelem  $\varepsilon_p$ . [8]



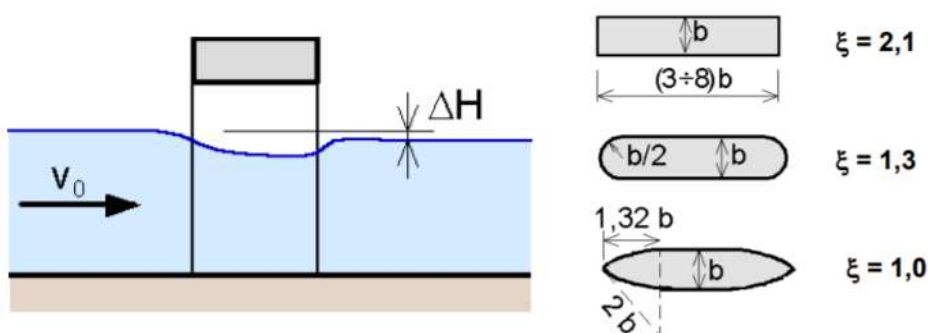
Obrázek 4 Tvary předního zhlaví návodních pilířů a jejich tvarové součinitele  $\varepsilon_p$ .

Pro výpočet vzduť mostovým pilířem je možné použít Rehbockovu rovnici, která je určena pro mostní objekty s řadou středových pilířů.

(3.1)

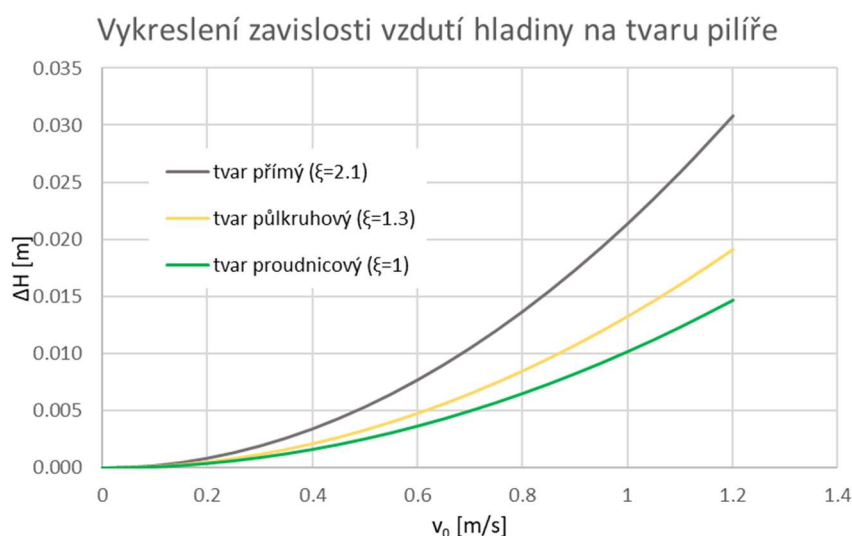
$$\Delta H \cong \xi \frac{S_p}{S} \times \frac{v_0^2}{2g},$$

kde  $\Delta H$  [m] je rozdíl hloubky vzduť,  $\xi$  [-] tvarový součinitel dle druhu zhlaví pilíře,  $S_p$  [m<sup>2</sup>] část průřecného profilu zaujatou pilíři,  $S$  [m<sup>2</sup>] průřezová plocha celého příčného profilu koryta / žlabu,  $v_0$  [m/s] vstupní rychlost,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] tíhové zrychlení [9]



Obrázek 5 Schéma výpočtu pomocí Rehbockovy rovnice, tvarové součinitele dle zhlaví pilíře. [9]

Dle Obrázek 6 je patrné, že proudnicový pilíř má nejmenší vliv na vzduť hladiny. Důležitějším parametrem je vstupující rychlost s druhou mocninou, která zřetelně mění průběh vzduť. Autor si grafem ověřil, že v měrném žlabu je potřeba udržovat menší rychlost, která výrazně neovlivní vzduť hladiny.



Obrázek 6 Vykreslení závislosti vzduť hladiny na tvaru pilíře.



### **3.2. Historie 3D tiskáren používající metodu FDM**

V dnešní době je obtížné narazit na člověka, který by nikdy neslyšel o 3D tisku. I když se lidstvo zabývá problematikou 3D tisku od 70. let 20. století, její největší vzestup a zájem širší veřejnosti se datuje k roku 2009, kdy skončila platnost patentů pro jednu ze základních metod tisku. Jedná se o metodu FDM (Fused Deposition Modeling), někdy nazývaná kvůli ochranné známce jako FFF (Fused Filament Fabrication). Důkazem, že se jedná o opravdu velký zlom v 3D tisku, je například to, že tiskárny založené na principu FDM z ceny více než 10 000 \$ klesly na méně než 1 000 \$, a jejich kvalita přesto vzrostla. [10] Trend 3D tiskáren rostl i po roce 2009. Dalším příkladem je náš český vývojář 3D tiskáren a majitel firmy Prusa Research Josef Průša, který v roce 2015 uvedl na trh první svojí komerční tiskárnu s cenovkou startující na 363,99 \$. [11] V roce 2021 lze kvalitní tiskárnu pořídit za méně než 250 \$, tedy v přepočtu na české koruny 5 500 CZK.

### **3.3. Rozhraní pro uživatele 3D tiskáren**

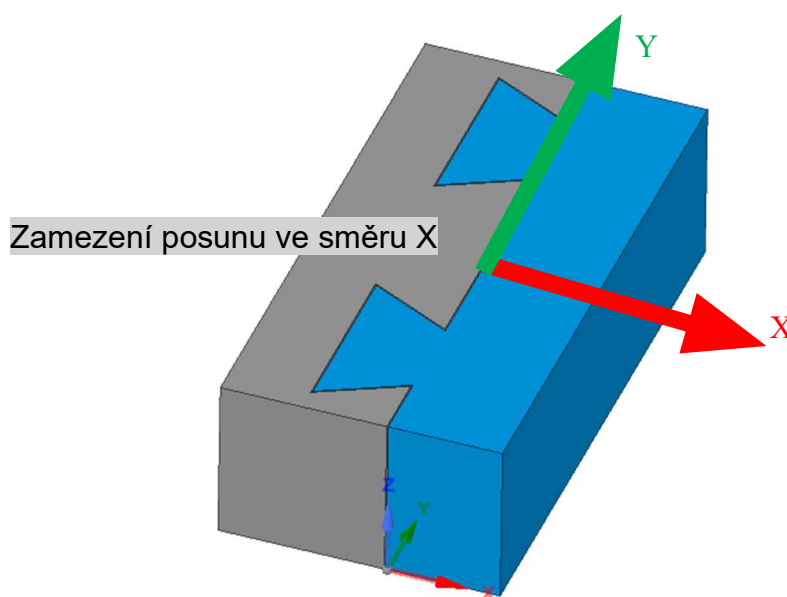
Nízká cena a rostoucí kvalita tisku má velký vliv na poptávku o 3D tiskárny, ale kdo by si tiskárnu koupil, pokud by nebylo použití tiskárny intuitivní a zvládnutelné i pro všechny věkové skupiny? Pokud by software nebyl uživatelsky přívětivý a musel by se před tiskem vytvořit kód pro správný chod tiskárny?

Software, který umí za uživatele odvést veškerou kódovací práci a jeho tištěný model připravit na tiskovou podložku, se nazývá slicer. V dnešní době je nespočet slicerů a většina firem vyrábějící tiskárny disponuje softwarem svým, který je optimalizovaný pro danou tiskárnu. Hojně používané slicery jsou například PrusaSlicer, Cura nebo také Slic3r.

Do softwaru se nahraje model s příponou \*.stl, který aproximuje tvar modelu do trojúhelníkových rovin. Následně je možné ve sliceru jednoduše nastavit veškeré parametry potřebné pro tisk, nebo nechat hodnoty již přednastavené od výrobce. Jedná se tedy o jednoduchý software, kde je možné bez nutnosti kódování změnit rychlosti tisku, zvolit rozsahu výplně modelu nebo vytvoření podpor pro převislé části modelu. V softwaru je i zobrazená doba tisku rozdělená do kategorií, jako je tisk perimetru, tisk výplně, popřípadě tisk podpor.

### 3.4. Tvorba tělesa modelu

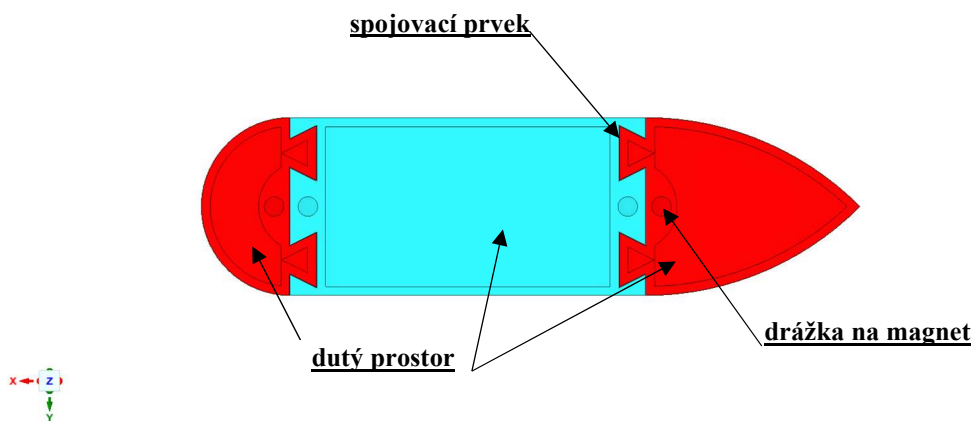
Pro vytvoření modelu byl autorem použit software SpaceClaim v edukační verzi. Autor diplomové práce zvolil tvorbu modelu metodou stavebnice, kdy bylo možné oddělit jednotlivé části pilíře od sebe. Jednotlivé části měly stejný spojovací prvek a vznikla tak možnost jednotlivé díly mezi sebou kombinovat. Tento postup byl výhodný z důvodu, že výtisk neovlivňovala limitní tiskařská plocha 3D tiskárny, která měla půdorysný rozměr 220 x 220 mm. Další výhodou stavebnice byla možnost vytisknutí dalších typů pilířů, které bylo jednoduché zaměnit s typy stávajícími. Pro jednoduchost výtisku a možnost vytisknout model na jakékoli tiskárně autor zvolil jednoduchý spojovací prvek mezi pilíři. Takový spojovací prvek, který se v truhlářství používá řadu let a funkčnost je ověřena jeho historií. [12] Spojovacím prvkem byly ozuby, které zamezují posunutí modelu ve směru příčném a podélném, ale ve směru Z je možné s jednotlivými částmi posouvat.



Obrázek 7 Model uzlového spoje v softwaru SpaceClaim.

V první fázi autor vytvořil půdorysný návrh pilíře. Návrh se skládal ze tří částí. Hlavní částí byla přímá část, která spojovala přední a zadní zhlaví pilíře. Rozměr přímé části byl 200 x 100 mm. Tvar zhlaví byl použit z kruhových oblouků, respektive tvar s půlkruhovým obloukem a tvar s dvěma kruhovými oblouky, jejichž tečny svírají v průřezu pravý úhel. Výška pilíře byla 200 mm.

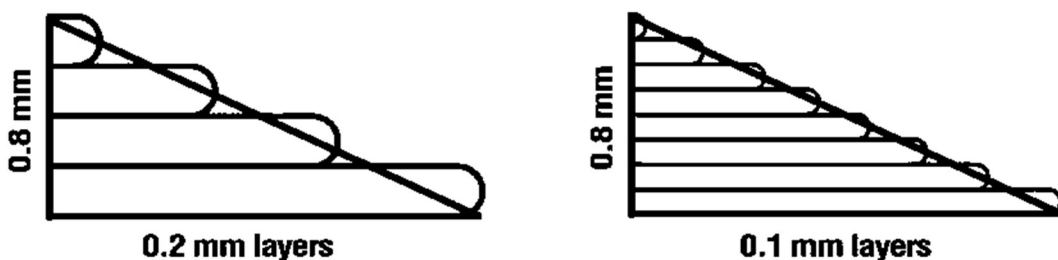
Dalším krokem bylo vyřešení způsobu upevnění modelu k laboratornímu žlabu. První myšlenkou bylo připevnění modelu k ocelovému plechu, který bude upevněn ke žlabu pomocí vrutů. Autorem byly zvoleny čtyři magnety o průměru 10 mm a výšce 4 mm, s udávanou magnetickou silou 3 kg. Magnet byl vsazen do připravených drážek a byl s modelem spojen pomocí speciálního lepidla. Bohužel tato metoda spojení nebyla dostatečně silná ve směru proudění kapaliny, byla proto nahrazena použitím betonové směsi vylité do dutých prostor v modelu, které sloužily k úspoře doby výtisku a materiálu. Jelikož tato událost nastala v době, kdy se blížil termín měření v hydraulické laboratoři, mé díky patří Bc. Janu Konvalinkovi a experimentálnímu centru na ČVUT za rychlé konání a pomoc při tvorbě této diplomové práce.



Obrázek 8 Půdorysný pohled na pilíř, který je rozdělen na tři části.

### 3.5. Příprava tiskárny

Při přípravě 3D tiskárny na tisk bylo důležité vybrat vhodný typ trysky. Tryska usměrňuje filament, který má většinou daný průměr 1,75 mm v pevném stavu. Výběrem trysky může autor ovlivnit výšku vrstev nanášeného filamentu. Podstatné je, aby výška vrstvy nebyla větší než 80 % průměru trysky. Rozměry trysek pro tiskárny FDM se pohybují v rozmezí 0,1 mm – 1,0 mm. Pokud by autor zvolil průměr trysky 0,1 mm, výtisk by trval 10x déle, než kdyby zvolil trysku o průměru 1,0 mm. Lépe představitelné to je na Obrázek 9, kde je znázorněna tloušťka vrstev a jejich počet pro dosažení požadované výšky. [13]

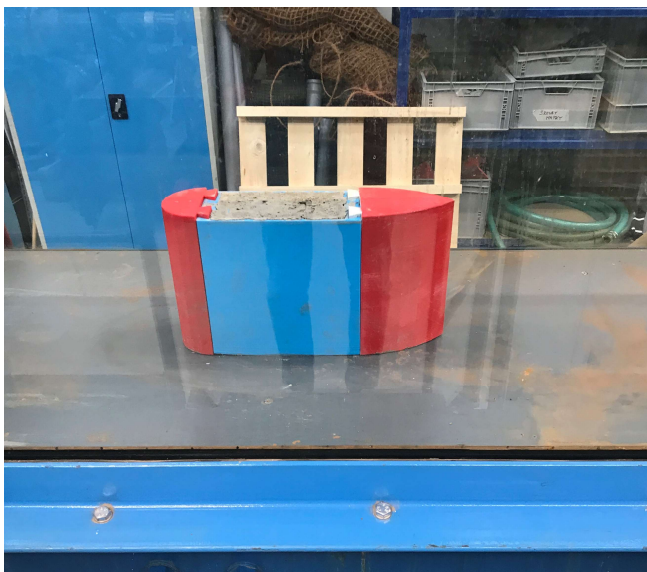


Obrázek 9 Znáznornění počtu vrstev při různých výškách nanášených vrstev. [13]

Zvýšení vrstvy nemá pozitivní vliv pouze na tisk v podobě rychlého vytištění, ale také se díky větší vrstvě snižuje kvalita detailu tisku a zvýší se spotřeba filamentu. Na Obrázek 10 je vidět rozdíl kvality tisku při použití trysky 0,4 mm a 0,8 mm. Autor zvolil na úkor kvality tisku a většího množství použitého filamentu trysku větší, jelikož kvalita výtisku s tryskou o průměru 1,0 mm je stále vysoká a plně dostačující. Při tisku přímé částí pilíře se zkrátil čas výtisku z 1 dne, 18 hod a 14 min na 22 hod a 51 min. Hmotnost modelu vzrostla z 435 g na 730 g, čímž se model stal i pevnější.



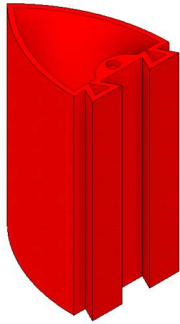
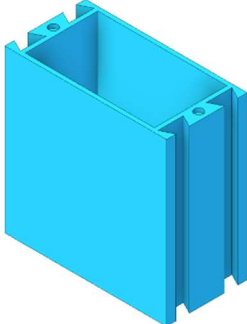

Obrázek 10 Porovnání kvality výtisku s tryskou 0,4 mm (vlevo) a 1,0 mm (vpravo).



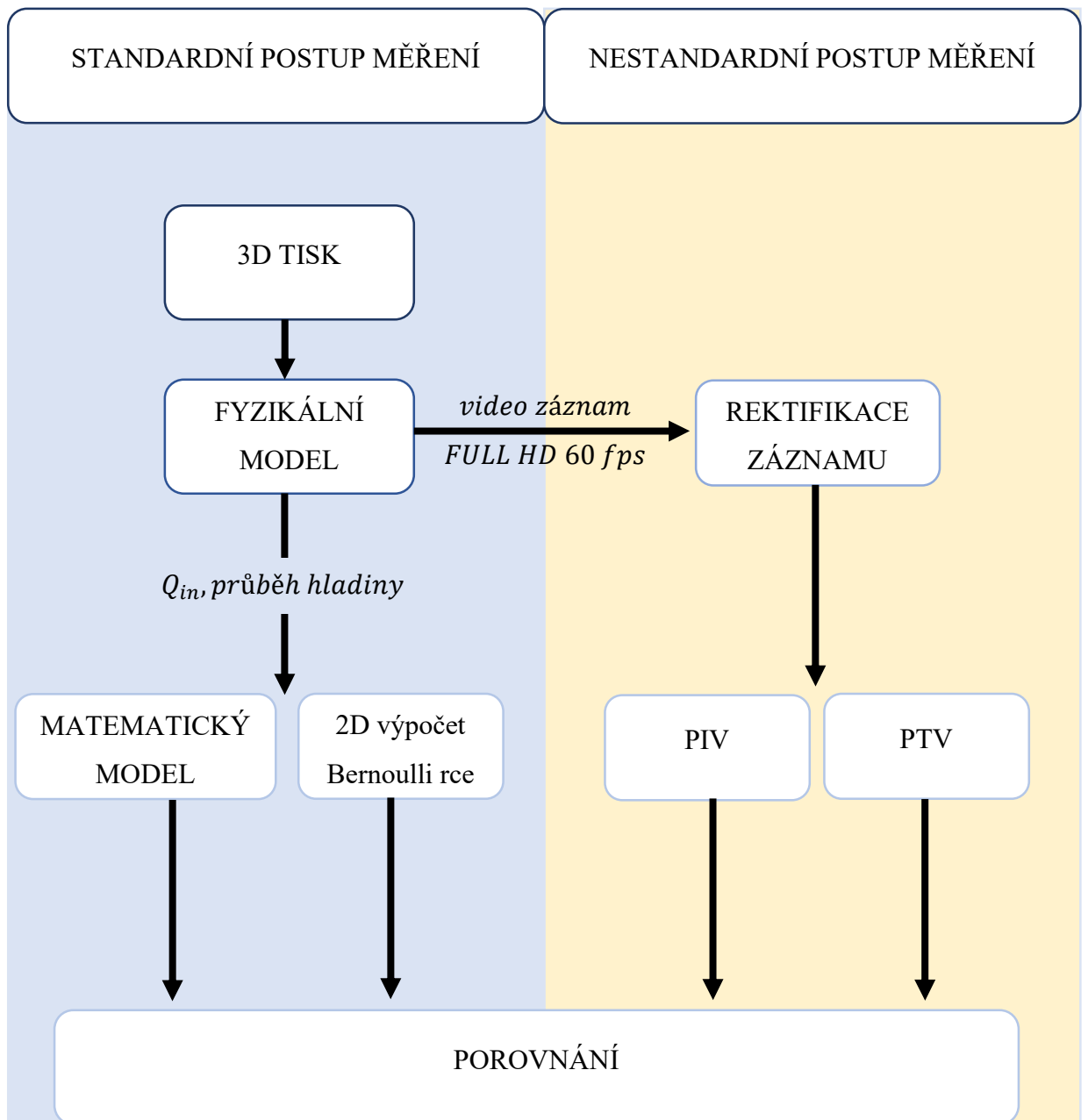
Obrázek 11 Hotový model vložený do laboratorního žlabu.

Pro shrnutí vytištěných komponent bylo do Tabulka 1 zaznamenáno množství použitého filamentu pro jednotlivé části, celková doba tisku a náklady na jednotlivé části při ceně 350,- Kč za 1 kg filamentu.

Tabulka 1 Čas, materiál a cena použitá při jednotlivých modelech.

			
rozměr modelu [mm]	135x100x200	200x100x200	65x100x200
použito filamentu [m]	161,13	244,96	121,59
použito filamentu [g]	480,58	730,60	362,65
doba tisku	15h22min	22h51min	12h06min
náklady [korun]	144,17	219,18	108,80

## 4. POSTUP MĚŘENÍ



Obrázek 12 Grafický postup měření.

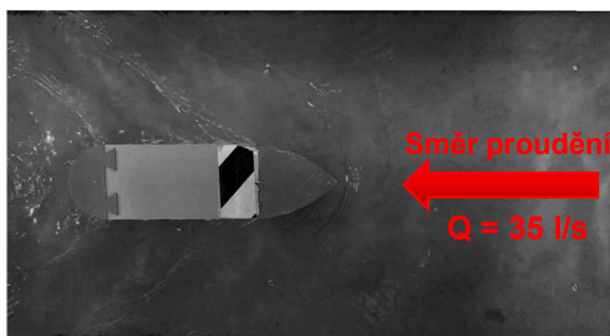
## 5. STANDARDNÍ POSTUP MĚŘENÍ

### 5.1. Fyzikální model

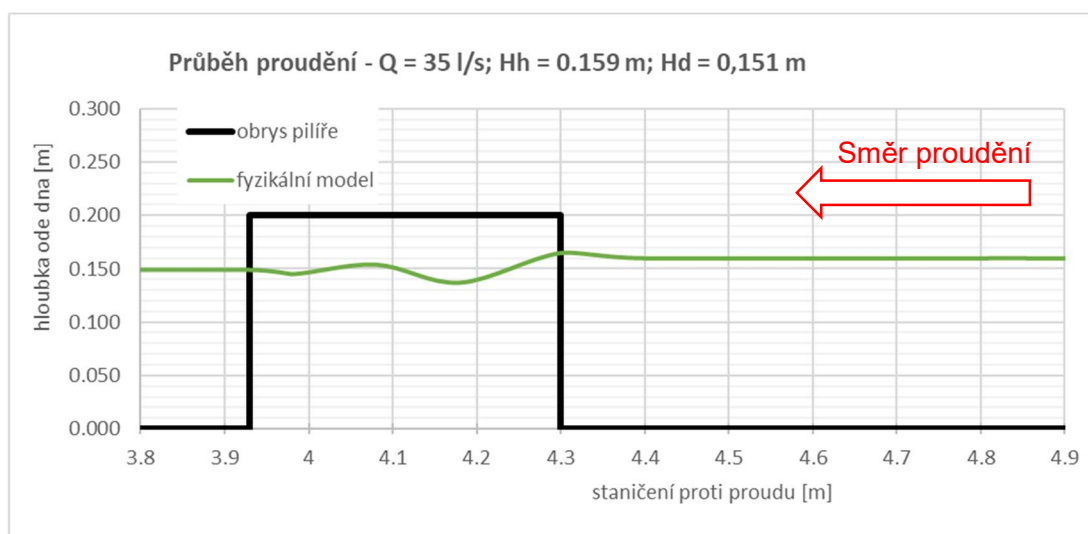
Do hydraulického žlabu byl vložen pilíř s předním zhlavím se dvěma kruhovými oblouky, jejichž tečny svírají v průřezu pravý úhel. Pilíř byl vložen na osu žlabu v podélném směru, přičemž šířka žlabu byla 0,52 m. Fyzikální model sloužil pro ověření všech výpočtů pro metody PIV, PTV a matematického modelu. Pro první variantu byly vstupní parametry:

$$Q = 35 \text{ l/s}; H_{\text{horní}} = 0,159 \text{ m}; H_{\text{dolní}} = 0,151 \text{ m}$$

Během měření byly za pomoci hrotového měřidla změřeny jednotlivé hloubky ode dna a následně byly vykresleny do grafu na Obrázek 14. Hloubky následně sloužily k ověření správnosti matematického modelu a ověření 2D výpočtu pomocí Bernoulliho rovnice. Na Obrázek 13 je zobrazen snímek z video záznamu, který ukazuje směr proudění k pilíři. Vypočtená průřezová rychlost před pilířem byla 0,434 m/s.



Obrázek 13 Pohled z objektivu na pilíř.



Obrázek 14 Vykreslení průběhu hladiny fyzikálního modelu.

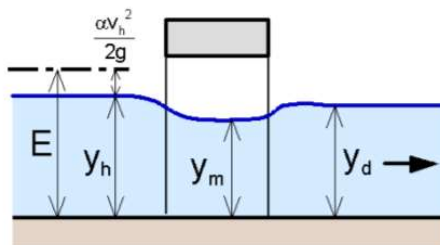
## 5.2. Analytický výpočet

Proudění bylo následně ověřeno pomocí 2D úlohy, kdy autor vypočítal průběh hladiny za pomoci Bernoulli-ho rovnice. V místě pilíře byla použita rovnice (5.1), která počítá průběh hladiny mezi mostními pilíři.

(5.1)

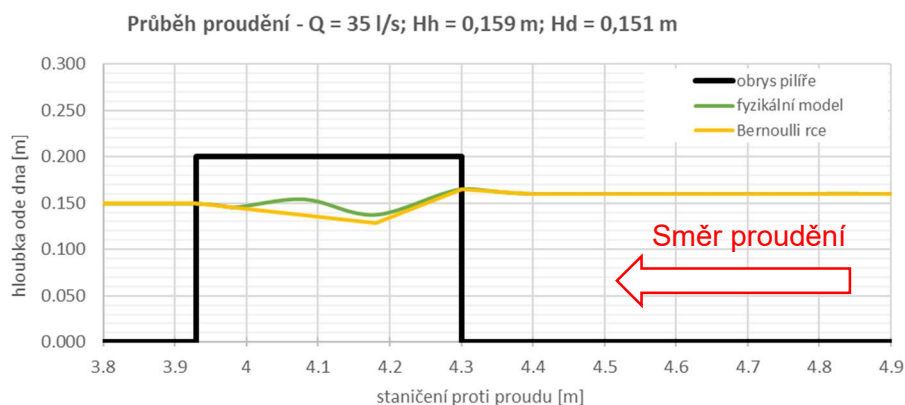
$$E = y_m + \frac{\alpha v_m^2}{2g} + \frac{\xi v_m^2}{2g}$$

Kde  $E$  [m] je energetická výška,  $y_m$  [m] je zúžená hloubka  $\alpha$  [-] je Coriolisovo číslo,  $v_m$  [m/s] je průřezová rychlost,  $\xi$  součinitel místní ztráty na vtoku [-] a  $g$  [m/s<sup>2</sup>] tíhové zrychlení.



Obrázek 15 Schéma výpočtu. [9]

Vypočtený průběh hladiny byl následně vykreslen na Obrázek 16. I přestože se jedná pouze o 2D úlohu, vykreslení hladiny zhruba odpovídá proudění ve fyzikálním modelu.



Obrázek 16 Vykreslení průběhu hladiny pomoci Bernoulli-ho rovnice.



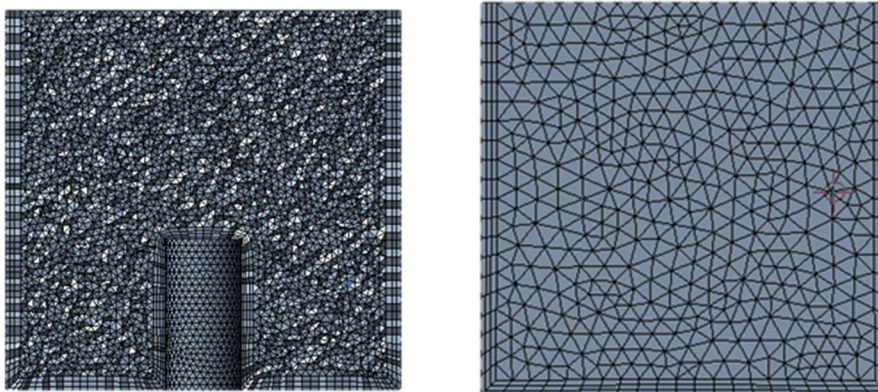
## 5.3. Matematický model

### 5.3.1. Model

Model, který vznikl pro tvorbu 3D tisku, byl následně použit pro výpočet matematického modelu. Kolem 3D modelu byla vytvořena objemová forma, která symbolizovala oblast proudění kapaliny.

### 5.3.2. Výpočetní síť

Do vzniklého objemu byla následně vložena nestruturovaná výpočetní síť Delaunay. Elementy sítě měly tvar čtyřstěnu. V místě pilíře byla délka mezi hranami jednotlivých elementů stanovena na hodnotu 10,0 mm s rádiusem do 1,0 m. Kolem stěny žlabu byla vytvořena jemnější síť o velikosti první vrstvy 5,5 mm. Stejná síť byla vytvořena i v místě pilíře, kde velikost první vrstvy byla 3,0 mm. Takto nastavená síť je zobrazena na levém snímku na Obrázek 17. Na pravém snímku je vykreslená síť mimo pilíř, kde nebyl kladen důraz na přesnost výsledných dat, díky čemuž se snížil počet elementů v celé síti a podstatně se zkrátila doba výpočtu. Délka mezi hranami jednotlivých elementů byla stanovena na 25,0 mm, nastavená síť obsahovala 5 083 744 elementů.



Obrázek 17 Nestruturovaná síť Delauney v místě pilíře vlevo a mimo pilíř vpravo.

### 5.3.3. Nastavení vlastností modelu

V úloze do výpočtu vstupuje proudění vody a vzduchu, úlohu bylo tedy nutné řešit jako dvoufázové proudění vody a vzduchu. Dalšími parametry bylo nastavení tíhového zrychlení ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ), referenční tlak (1 atm), teplota vzduchu ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a teplota vody ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Převod tepla mezi kapalinami nebyl uvažován.

### 5.3.4. Počáteční podmínky

K simulaci volné hladiny musel autor diplomové práce definovat počáteční podmínky, inspiraci proto čerpal ze své bakalářské práce. V práci bylo nutné zajistit hranici mezi kapalinou a vzduchem. Dále bylo potřeba stanovit výrazy pro správné fungování okrajových podmínek. Rychlost a hladina spodní a horní vody byla stanovena z fyzikálního modelu (viz. Tabulka 2).

Tabulka 2 Použité vstupní výrazy.

Název	Funkce	Definice
DenH	$(DenWater-DenRef)$	Relativní hustota vody (vztaženo k referenční hustotě)
DenRef	$1,185 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$	Hustota vzduchu
DenWater	$997 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$	Hustota vody
DownH	$0,151 \text{ [m]}$	Výška dolní hladiny
DownPres	$DenH * g * DownVFWater * (DownH - z)$	Hydrostatický tlak na dolní okrajové podmínce
DownVFAir	$step((z - DownH) / 1) \text{ [m]}$	Poloha vzduchu na dolní okrajové podmínce
DownVFWater	$1 - DownVFAir$	Poloha vody na dolní okrajové podmínce
UpH	$0,155 \text{ [m]}$	Výška horní hladiny
UpPres	$DenH * g * UpVFWater * (UpH - z)$	Hydrostatický tlak na horní okrajové podmínce
UpVFAir	$step((z - UpH) / 1) \text{ [m]}$	Poloha vzduchu na horní okrajové podmínce
UpVFWater	$1 - UpVFAir$	Poloha vody na horní okrajové podmínce
vellN	$0,434 \text{ [m/s]}$	Vstupní rychlost

### 5.3.5. Okrajové podmínky

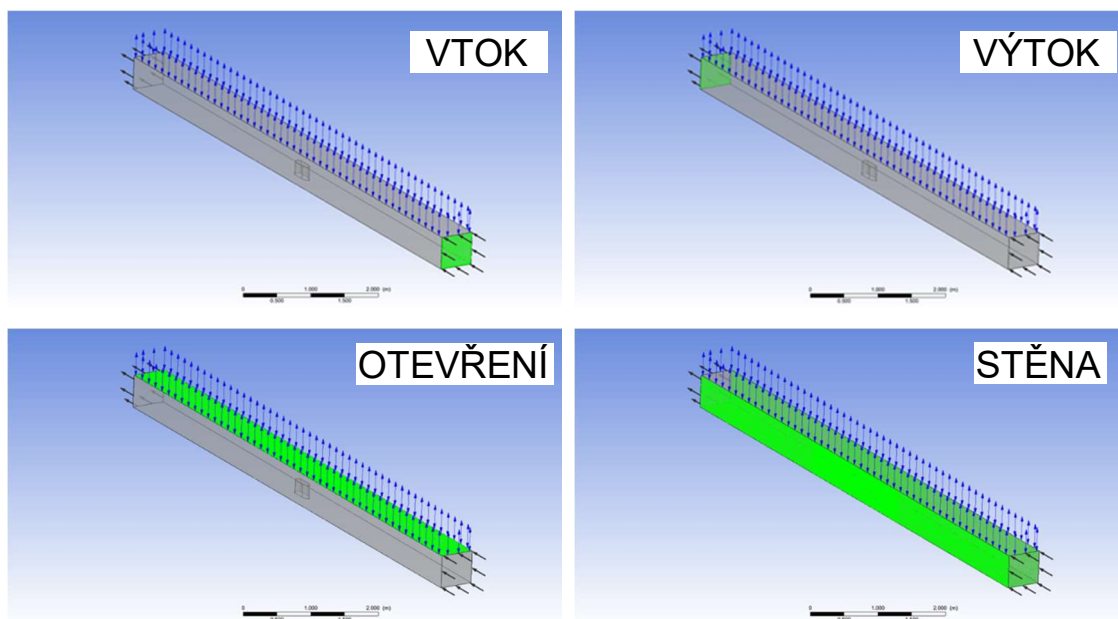
Pro matematický model byly stanoveny čtyři okrajové podmínky:

V<sub>TOK</sub> – normal speed – přítok kapaliny do modelu s definovanou rychlostí [m/s] a vstupní výškou hladiny  $UpH$  definující polohu vzduchu a kapaliny.

V<sub>ÝTOK</sub> – Static Pressure s definovaným relativním tlakem, pro vytvoření hydrostatického trojúhelníku, který zajistí, aby kapalina nevytékala do prázdna. Parametr DownH následně zajistil výšku dolní hladiny.

O<sub>TEVŘENÍ</sub> – Opening Pressure simulující kontakt s atmosférou s definovaným relativním tlakem 0 kPa, podmínka umožňující kolísání hladiny a volného vstupu a výstupu vzduchu.

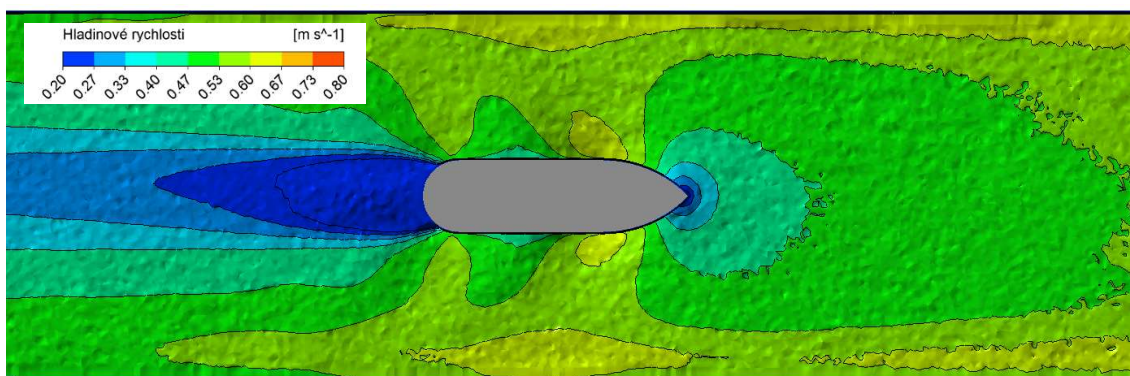
S<sub>TĚNA</sub> – Stěna žlabu a pilíř byl definován okrajovou podmínkou smooth wall. Relativní drsnost nebyla uvažována.



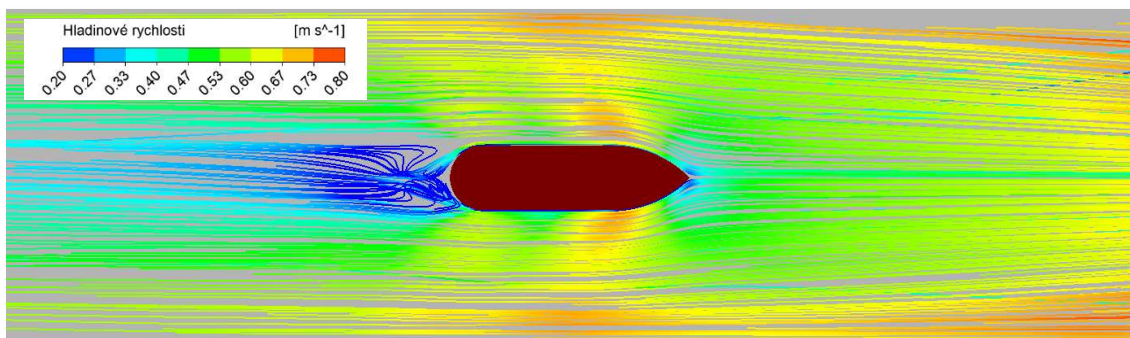
Obrázek 18 Okrajové podmínky modelu.

### 5.3.6. Výsledná data

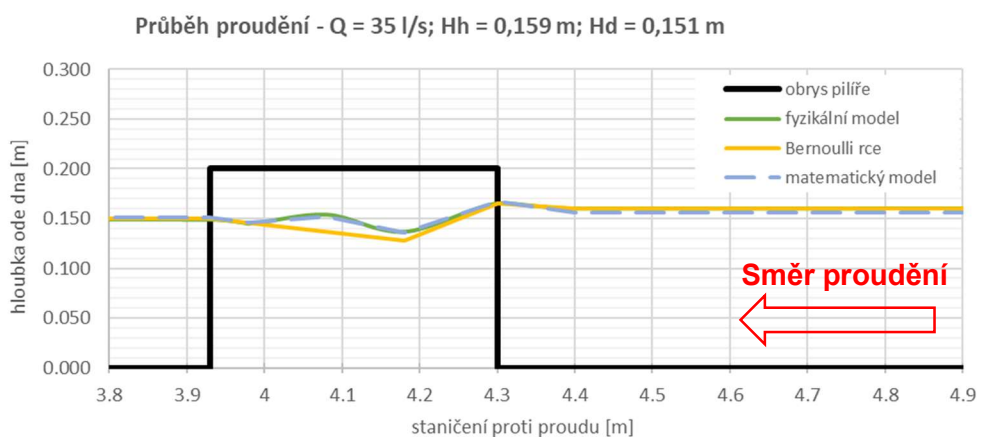
Z matematického modelu byly následně vykresleny hladinové rychlosti a trajektorie na hladině. Pro ověření správnosti dat byl průběh hladiny vykreslen do grafu na Obrázek 21.



Obrázek 19 Vykreslení hladinových rychlostí.



Obrázek 20. Vykreslení trajektorie částic na hladině.



Obrázek 21 Vykreslení průběhu hladiny matematického modelu.

## 6. NESTANDARDNÍ POSTUP MĚŘENÍ

### 6.1. Rektifikace snímku

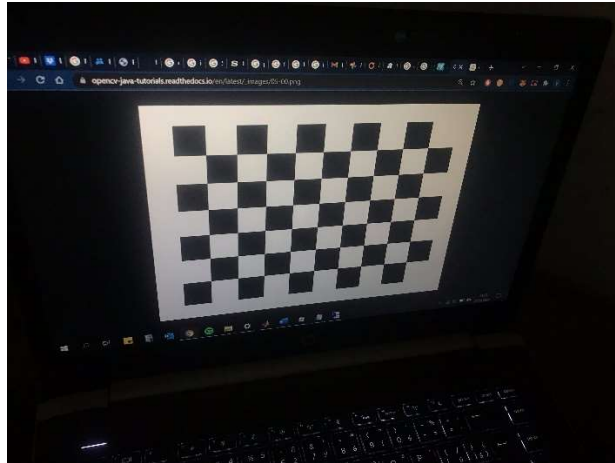
Pro práci s nestandardními měřicími metodami, jako je PIV a PTV, je nejdříve nutné transformovat jednotlivé snímky do kolmé polohy vůči hladině. Rektifikace je transformační proces, který je využíván k promítání snímků do společné roviny. Při uvažování, že vodní plocha představuje rovinu, která bude rektifikovaná, lze Z souřadnici ignorovat a rovnice vypadá následovně:

(4.1)

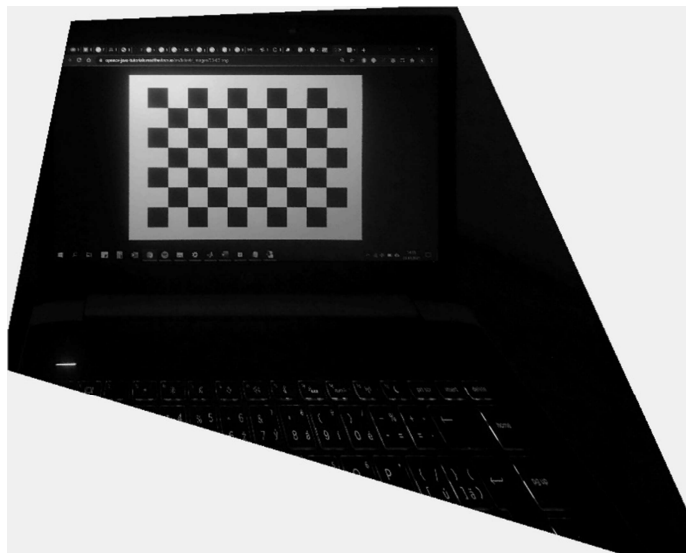
$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{pmatrix},$$

kde vektor na levé straně rovnice představuje souřadnice reálného světa, vektor na pravé straně pak promítání obrazu na souřadnice reálného světa. H je homografická matice, kde zůstává 8 neznámých, které lze vyřešit se znalostí souřadnic  $X_r$ ,  $Y_r$  čtyř kontrolních bodů, které se nachází podél stejné roviny, kde  $z = 0$  se rozumí jako hladina vodní plochy. Celý výpočet probíhá pomocí počítačové aplikace Camera Calibration Toolbox pro prostředí MATLAB, kterou vyvinula společnost vision Caltech. [5]

Pro ověření funkčnosti transformačních procesů je rektifikace snímku zobrazena na Obrázek 22, kde kontrolní body představovaly bílé rohy v místě šachovnice. Na Obrázek 23 je možno pozorovat převedení pohledu do ortografické polohy, tedy kolmo ke šachovnici. Při měření v laboratorním žlabu, byly použity čtyři kontrolní body, které byly umístěny do výšky hladiny a byly změřeny vzdálenosti mezi kontrolními body.



*Obrázek 22 Originální snímek šachovnice před rektifikací.*



*Obrázek 23 Snímek po rektifikaci.*

## 6.2. Metoda PTV

Měření PTV proběhlo pomocí kamerového záznamu, snímek byl pořízen ve full HD se 60 snímků za vteřinu. Ze záznamu byly získány snímky s časovým krokem 100 ms. Pokud by se jednalo o složitější proudění, autor diplomové práce by zvolil časový krok kratší. Jednotlivé snímky byly vloženy do vytvořeného skriptu v prostředí MATLAB, který je popsán v kapitole 6.2.1. Výstupem ze skriptu byl snímek s průběhem trajektorie na Obrázek 35 a snímek rychlostního pole na hladině Obrázek 36.

### 6.2.1. Metoda PTV – tvorba skriptu v prostředí MATLAB

Část diplomové práce se autor věnoval tvorbě skriptu v rozhraní MATLAB. Cílem skriptu bylo vytvořit kód, který by pomocí vloženého záznamu detekoval částice, které by následně automaticky trasoval a vypočítal rychlost pohybujících se částic. Zásadní problematika skriptu spočívala v naučení programu automatické detekce objektů / částic, z tohoto důvodu se autor musel zabývat počítačovou technologií související s počítačovým viděním a zpracováním obrazu. Taková technologie se používá například pro detekci aut, lidí nebo dat. Výsledkem je například změřená rychlost nebo počítání osob při vstupu do objektu. Většina programů pro detekci používá stacionární místo snímání a může rozlišit neměnné pozadí a pohybující se snímaný objekt. Bohužel tato varianta není vhodná pro měření hladiny, která se neustále pohybuje. Další nevýhodou pohybující se vody je tvoření odlesků od zdroje světla, buď umělého či přírodního, které jsou generovány nepředvídatelně a ve výpočtu ovlivňují výsledná data. Proto bylo nutné zajistit detekování jen požadované částice na vodní hladině a ostatní pohyby a odlesky od hladiny vyloučit.

Autor zvolil funkci pro vytvoření binárního obrazu z 2D nebo 3D obrazu ve stupních šedi, kdy všechny hodnoty nad globálně určeným prahem (hodnotou *thresh* ve skriptu) nahradí hodnotou 1 a zbylé hodnoty zamění za hodnotu 0. Následně byla použita funkce pro mediánovou filtraci obrazu ve dvou rozměrech, která umožňuje určit, jak velké mračno bodů, respektive šum, bude zaznamenáno. Při použití co nejvíce bílých částic bylo možné při správně zadaných vstupních parametrech potlačit pohybující se hladinu

a jiné pohybující se částice na hladině. Postupný proces skriptu byl autorem diplomové práce popsán níže.

```
%% Parametry k zadání
thresh = 0.65 % Prahová hodnota jasu zadaná jako číselný skalár nebo číselné pole s
hodnotami v rozsahu [0, 1].
noise = 25 % bílý šum, čím větší číslo, tím menší je těleso, ale i odlesky + přesnější
centroid
jas = 0 % Úmělé snížení jasu importovaného snímku
vzdalenost = 0.2 % [m] známá hodnota k převedení px - m
timeset = 1326 % celkový počet snímků vložených ze záznamu
timestep = 100.0602 % [ms] časový interval mezi snímky
```

Obrázek 24 Vstupní parametry do skriptu.

Dalším krokem bylo nutné označení dvou bodů se známou vzdáleností mezi sebou. Použitá vzdálenost je určena ze vstupního parametru *vzdalenost*. V kódu byla vypočítaná vzdálenost dvou vektorů a z poměru mezi vzdáleností v pixelech a vzdáleností v metrech bylo spočítáno měřítko *ratio*.

```
%% Meritko
frame = imread("IMGR (1).jpg"); % import 1. snímku
I = imrotate(frame,90); % otočení snímku o 90°
z = imshow(I); % zobrazení 1. snímku s otočením
xlabel ('Označ 2 body se známou vzdáleností', 'FontSize', 14); % popis osy x
[ Xpx, Ypx ] = ginput(2) % hodnoty vybraných bodů
Lengthpx(1,1) = ((Xpx(2,1)-Xpx(1,1))^2 + (Ypx(2,1)-Ypx(1,1))^2)^0.5; % Vypocet
vzdalenosti dvou vektoru
ratio = (Lengthpx/vzdalenost);
close figure 1
```

Obrázek 25 Převedení px na metry.

Pro získání potřebných dat ze snímku za pomoci computer vision byla autorem použita funkce `vision.BlobAnalysis`, která slouží k získání dat z propojených oblastí v binárním obrazu. Funkce byla využita především k zjištění těžiště bílého mračna a následně vypsání souřadnic XY pro trasování částice.

```
hblob = vision.BlobAnalysis('AreaOutputPort',false, ...
    'CentroidOutputPort', true, ...
    'BoundingBoxOutputPort', true, ...
    'MinimumBlobArea', 400, ...
    'MaximumCount', 50, ...
    'ExcludeBorderBlobs', true);

hshapeinsWhiteBox = vision.ShapeInserter('BorderColor', 'Custom', ...
    'CustomBorderColor', [1 0 0]);
```

Obrázek 26 Vložení funkce computer vision do skriptu.



Pro správné fungování bylo nutné předefinovat matici pro souřadnici X a Y, kde byly následně v každém časovém kroku *timestep* vloženy detekované částice. Pro opakování příkazů pro každý snímek byla použita funkce *while*. V každém kroku proběhlo nahrání snímku, pootočení, převedení do binárního snímku, odfiltrování šumu, získání těžiště šumu a zapsání souřadnice těžiště do matice.

```

%% Vypočet
Cxdata = NaN(timeset); %vytvoreni sablony matice pro souradnice x
Cydata = NaN(timeset); %vytvoreni sablony matice pro souradnice y
i=1;
n=1;
r=1;
while n<timeset

imr2 = imread("IMGR (" +n+" ).jpg"); %nahrani n-snimku
imr = imrotate(imr2+jas,90); % otočení snímku o 90° a změna jasu
binFrame_raw = imbinarize(imr,thresh); % vytvoření binárního snímku
binFrame = medfilt2(binFrame_raw, [noise noise]); % Odfiltrování šumu pomocí
mediánového filtru
[centroid, bbox] = step(hblob, binFrame); % Získání centroidů a ohraničující mračno
centroid = centroid - [12 18]
textimg = insertText(imr, centroid, '+', 'FontSize',18, 'BoxColor','r',
'BoxOpacity',0); % text v tezisti
imgIn = step(hshapeinsWhiteBox, textimg, bbox); %vlozeni textu a boxu do snímku

    %Souradnice tesizste pro X,Y
    Cx = centroid(:, 1)';
    Cy = centroid(:, 2)';

    u=length(Cx);
    for r=1:u %dosazeni n-tych souradnic Cx,Cy do matice Cxdata a Cydata
        Cxdata(i,r)=Cx(r);
        Cydata(i,r)=Cy(r);
    end

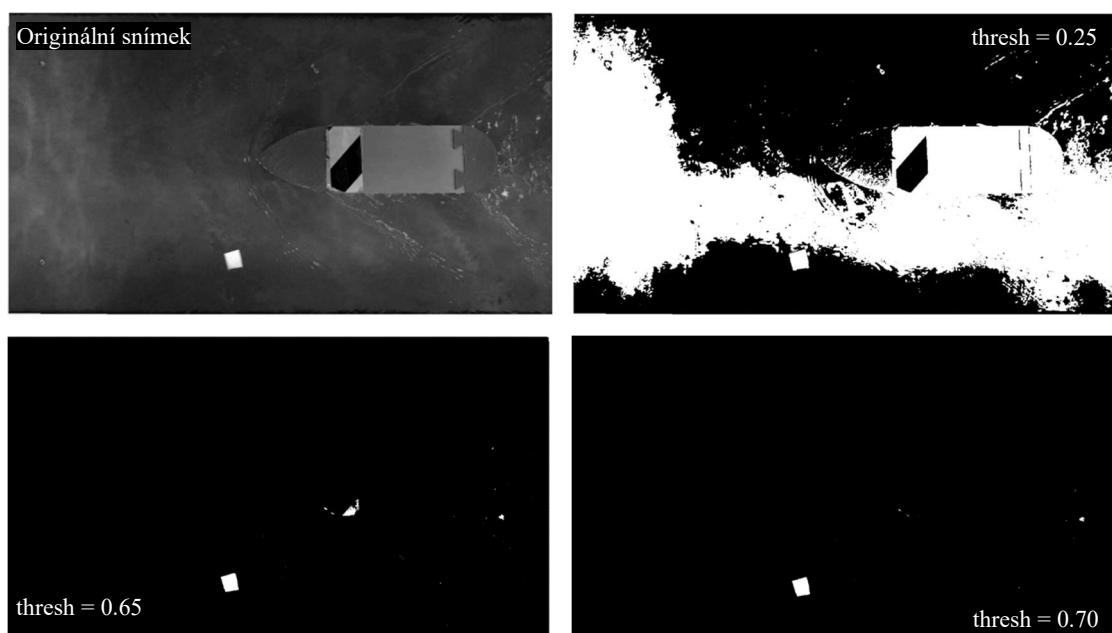
    imshowpair(imgIn,binFrame,'montage')
    hold on
    saveas(gcf,+noise+"_" +thresh+"_" +n+"_montage.png")
    hold off
    n = n+1
    i = i+1;
    r = r+1;

end

```

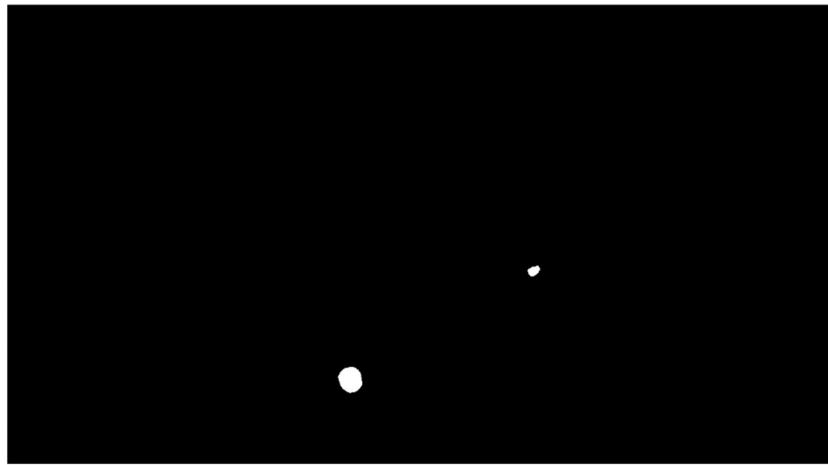
Obrázek 27 Získání souřadnic z částice.

Pro lepší představení fungování jednotlivých vstupních parametrů jsou níže zobrazeny změny, které jednotlivé parametry ovlivní. Na Obrázek 28 jsou zobrazeny čtyři snímky. První snímek je originální fotka, která prošla pouze rektifikací. Další snímek byl převeden do binární podoby s prahovou hodnotou 0.25, na snímku je patrné, že prahová hodnota je malá pro zobrazení pouze potřebné částice. S postupným zvyšováním prahové hodnoty v binárním obraze vynikají místa s nejvyšší hodnotou stupně šedi, dále vyniká také částice pro detekování. Na snímku s prahovou hodnotou 0.65 lze vidět už pouze částice s částí pilíře, kde vznikl odlesk od zdroje světla. Za použití pouze prahového parametru by nebylo možné snímek použít, ale při přidání mediánového filtru šumu je možné snímek ještě zdokonalit a zamezit nevhodným detekcím. Postupným zvyšováním prahové hodnoty lze ze snímku odstranit nepotřebné detekce, jak lze vidět na snímku s prahovou hodnotou 0.70, kde je patrná částice a drobná mračna malých odlesků.

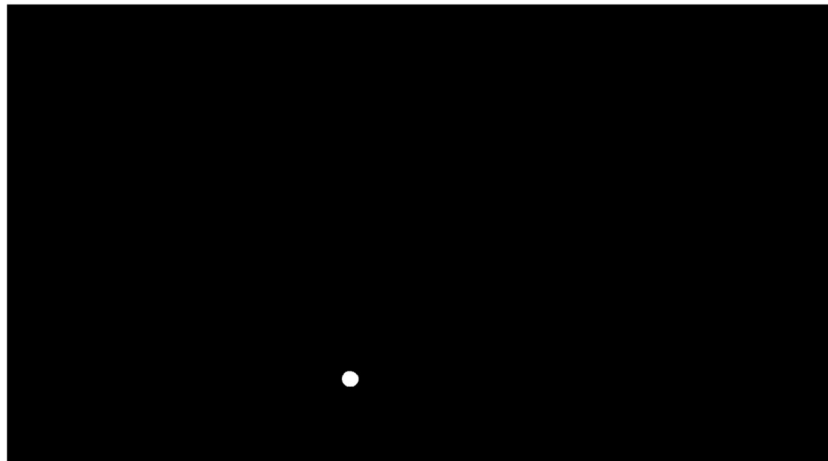


Obrázek 28 Zobrazení originálního snímku a binárních snímků s prahovou hodnotou *thresh*.

S přidáním mediánového filtru lze pak snímek ještě více doladit. Autor pro představu použil z Obrázek 28 snímek s prahovou hodnotou 0.65, na kterém demonstroval funkci bílého šumu. Na Obrázek 29 při přidání mediánového filtru s hodnotou  $noise = 25$  lze vidět vyhlazení menších částic a zaoblení částice, ke kterému došlo díky mediánovému šumu. Při zvýšení hodnoty  $noise$  na 50 lze na Obrázek 30 spatřit skutečnost, že bílý šum je z odlesku pilíře odfiltrován, jelikož hodnota bílého mračna je menší než nastavený mediánový filtr. Tento snímek lze pak považovat za hotový a je z něj možné získat těžiště z bílého mračna a zaznamenat souřadnice za pomoci kódu na Obrázek 27.

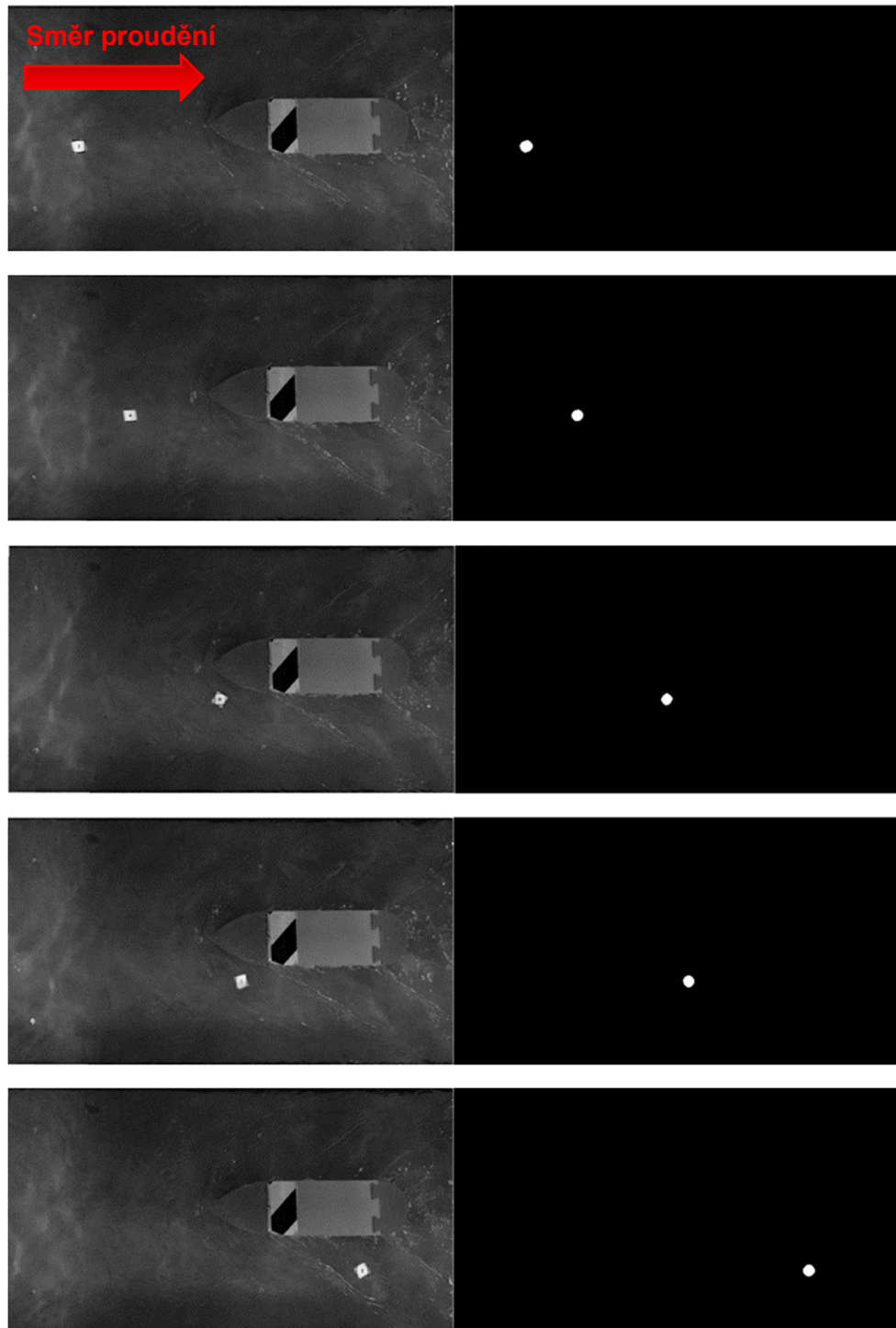


Obrázek 29 Binární obraz s parametrem  $thresh = 0.65$  a  $noise = 25$ .



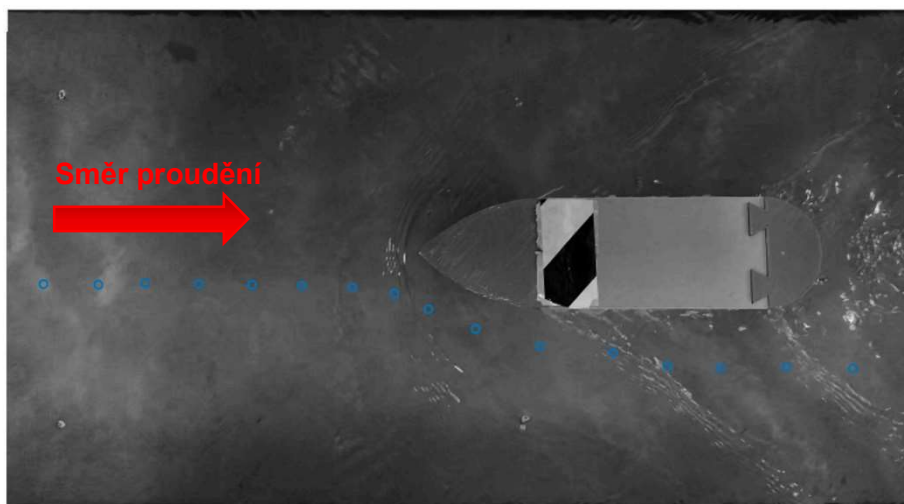
Obrázek 30 Binární obraz s parametrem  $thresh = 0.65$  a  $noise = 50$ .

Po nastavení správných parametrů dochází ke smyčce funkce *while*, kde se veškeré výše popsané kroky na Obrázek 27 opakují do doby, než hodnota  $n$  nebude větší než nastavený parametr *timeset*, který reprezentuje celkový počet snímků ze záznamu. Pro představu průběhu je na Obrázek 31 zobrazen časový průběh částice a její detekce v binárním prostředí.

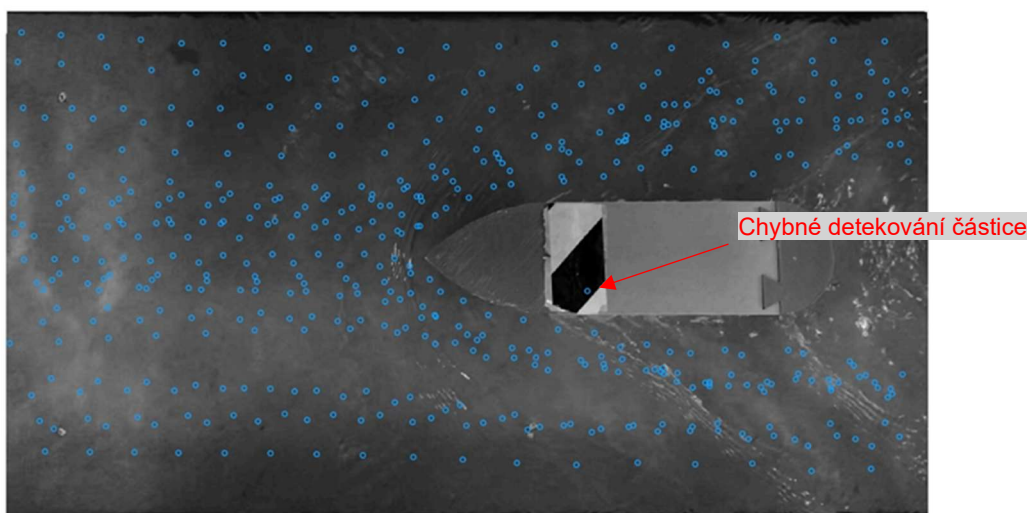


Obrázek 31 Zobrazení výpočetních kroků pro detekci částic.

Z výsledného bílého šumu byly následně získány souřadnice, které byly vykresleny do grafu, kde byla provedena kontrola správnosti dat. Na Obrázek 32 je vidět vykreslení bodů v časovém kroku pohybující se částice. Následně jsou na Obrázek 33 zobrazena mračna bodů, která byla zachycena z celého záznamu. Na Obrázek 33 je vidět zaznamenání bodu v místě pilíře, který vznikl z důvodu odlesku a bylo možné ho ještě z grafu odebrat, aby bylo zamezeno chybovosti výsledných dat.



Obrázek 32 Vykreslení zaznamenaných bodů z pohybující se částice.



Obrázek 33 Vykreslení mračna bodů pohybujících se částic.

Autor následně pro získané mračno bodů na Obrázek 34 přepočtl vzdálenosti mezi dvěma vektory a převedl vzdálenost mezi jednotlivými vektory za časový krok px/ms na m/s.

```

% Výpočet vzdálenosti mezi vektory
w=2;
s=1;
for s=1:length(VysledkyX)
if length(VysledkyX{s})>2

for w=2:length(VysledkyX{s})
VzdXY_raw{s}(w,1) = ((VysledkyX{s}(w,1)-VysledkyX{s}((w-1),1))^2 + (VysledkyY{s}(w,1)-
VysledkyY{s}((w-1),1))^2)^0.5;
w=w+1;
end
else
s=s+1;
end
end
clear w
clear s

% výpočet rychlosti mezi body

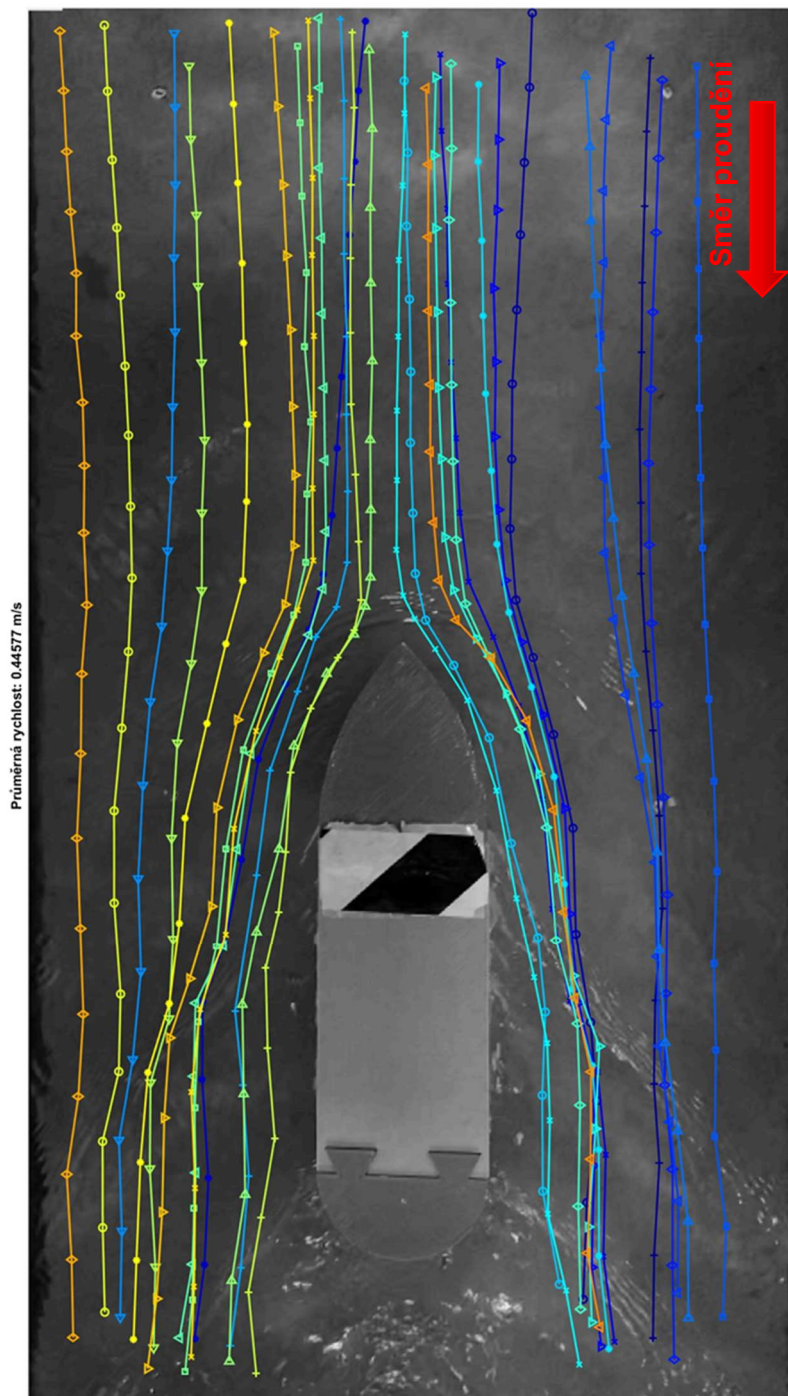
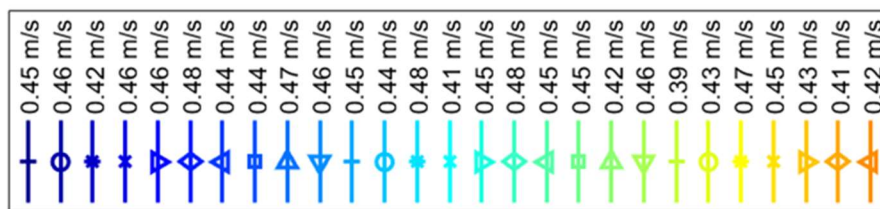
s=1;
for s=1:length(VysledkyX)
ID raw(s,1)=((sum(VzdXY_raw{s}))/ratio)/(((length(VzdXY_raw{s}))-
1)*(timestep/1000)));

s=s+1;
end

```

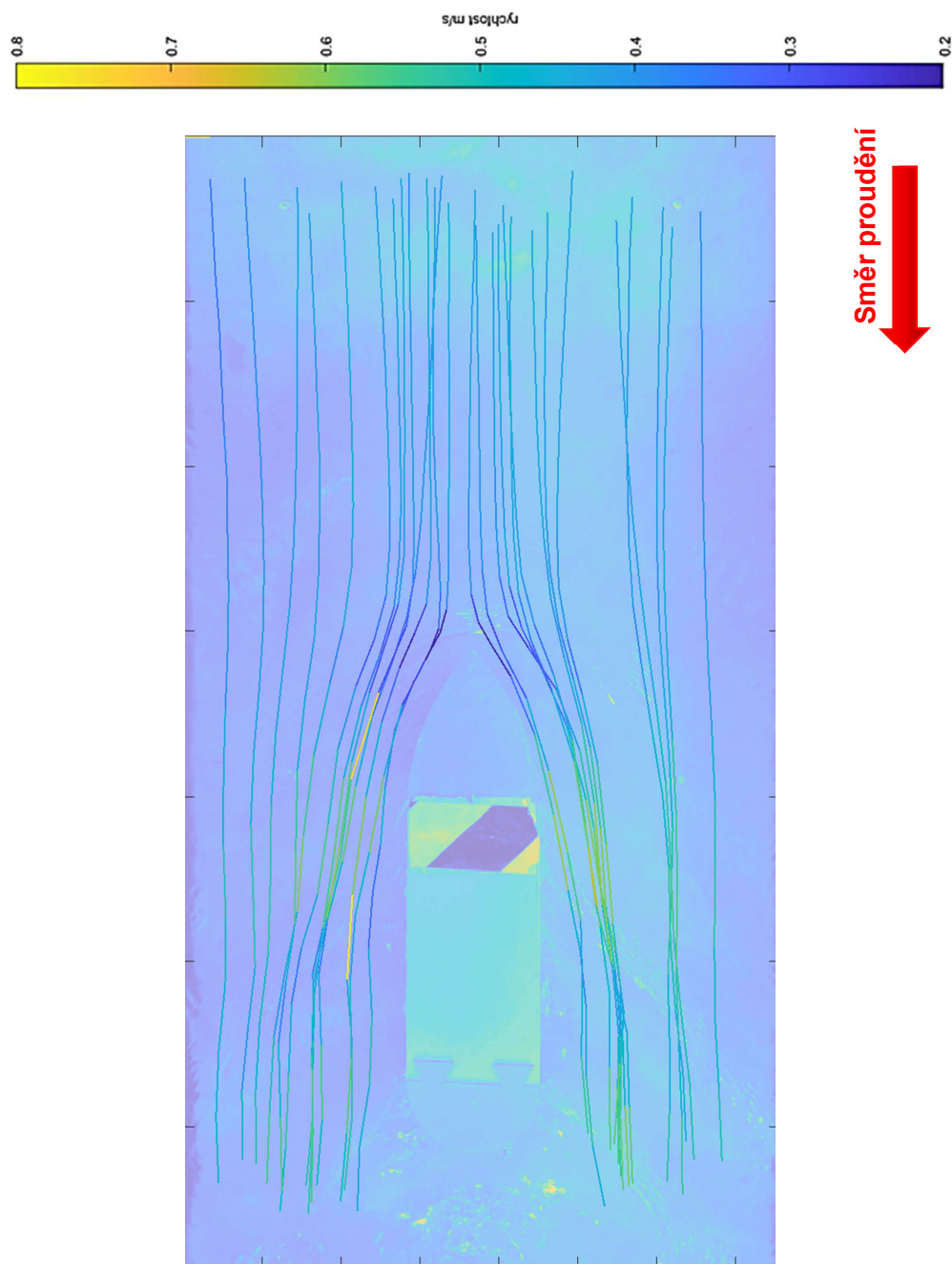
Obrázek 34 Výpočet vzdálenosti vektorů a přepočet rychlosti z px/ms na m/s.

Dále díky kamerovému záznamu, který byl rektifikován do ortofoto snímků a skriptu v prostředí MATLAB, získal vykreslení trajektorie proudění částic na hladině a jejich průměrné rychlosti. Celý postup proběhl bez nutnosti narušování vodního proudu. Na Obrázek 35 jsou vykresleny výsledné trajektorie zaměřeného mračna bodů. Průměrná rychlost všech částic byla 0,445 m/s, minimální rychlost 0,39 m/s byla zaznamenána v místě obtékání předního zhlaví pilíře. Naopak největší rychlost byla zaznamenána v místě, kde docházelo ke snížení hladiny vlivem vzduší, a tím i ke zrychlení proudění.



Obrázek 35 Vykreslení trajektorie částic a jejich průměrné rychlosti.

Autor diplomové práce následně vytvořil třírozměrný graf pro vykreslení souřadnic X, Y a Z souřadnice jako rychlost mezi jednotlivými body. Na Obrázek 36 je vykresleno rychlostní pole, které v místech před zhlavím pilíře dosahuje rychlostí 0,45 m/s. Těsně před pilířem je hladina zpomalena na hodnotu přibližně 0,2 m/s. Naopak největší rychlost byla zaznamenána v místě, kde docházelo ke snížení hladiny vlivem vzduť u zhlaví pilíře, a tím i ke zrychlení proudění.

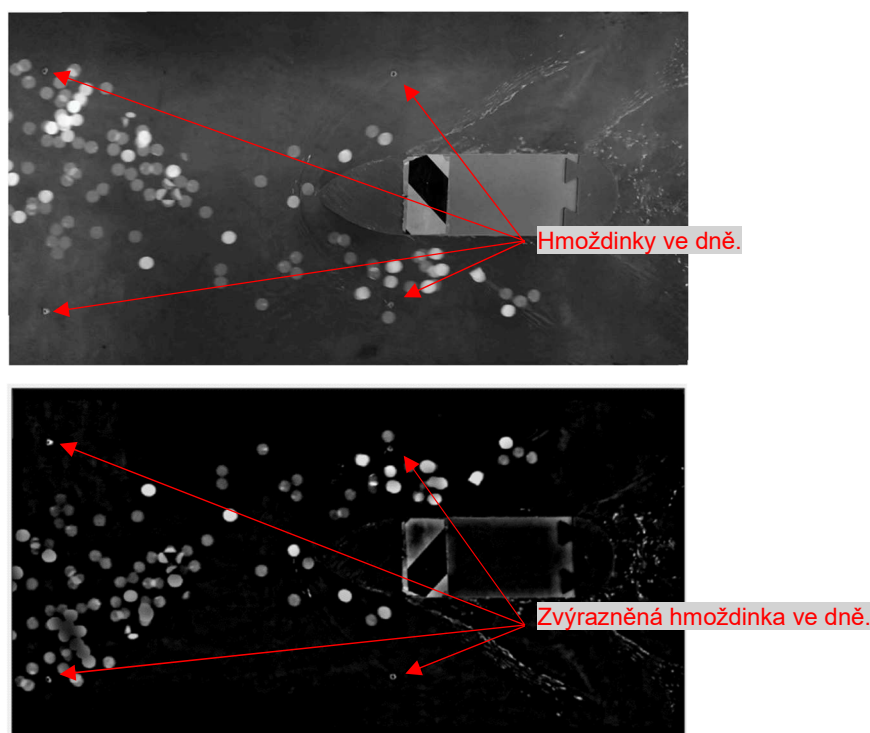


Obrázek 36 Vykreslení 3D grafu pro znázornění rychlostí mezi jednotlivými body.



### 6.3. Metoda PIV

K výpočtu pomocí metody particle image velocimetry byl použit software PIVlab, který funguje v rozhraní MATLAB. Po nahrání rektifikovaných snímků bylo možné udělat pre-process, při kterém lze změnit kontrast snímku nebo přidat filtr, při kterém byly částice více viditelné a okolní šum potlačen. Taková změna byla zobrazena na Obrázek 37, kde na horním snímku je snímek originální a na snímku dolním pak snímek upravený v pre-processingu (úpravě kontrastu a přidání filtru).

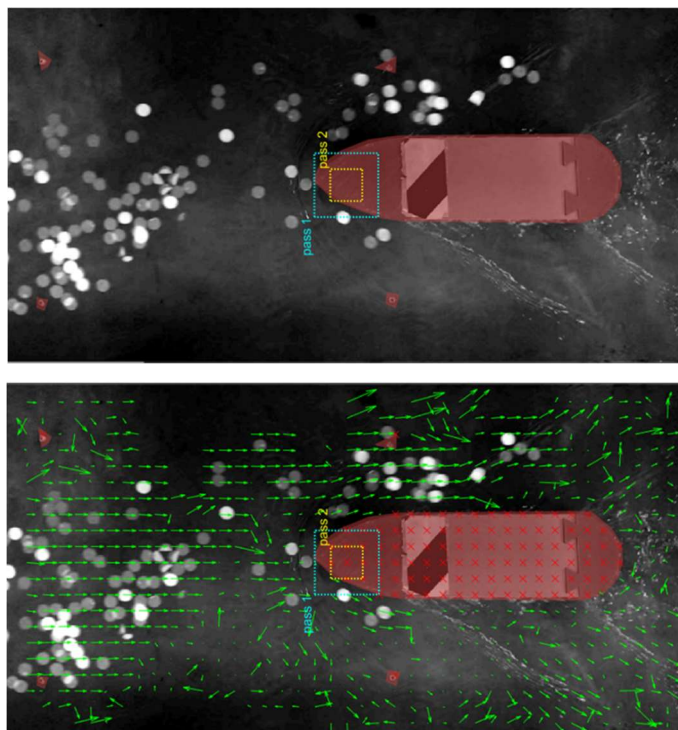


Obrázek 37 Pre-process vstupních snímku pro lepší detekci částic.

Na Obrázek 37 byl ještě nežádoucí obrys pilíře a hmoždinky ve dně žlabu, které byly díky pre-processu zvýrazněny. Pro zamezení chybného detekování byla na tato místa vytvořena maska, která zamezila v ohraničeném místě provést výpočet.

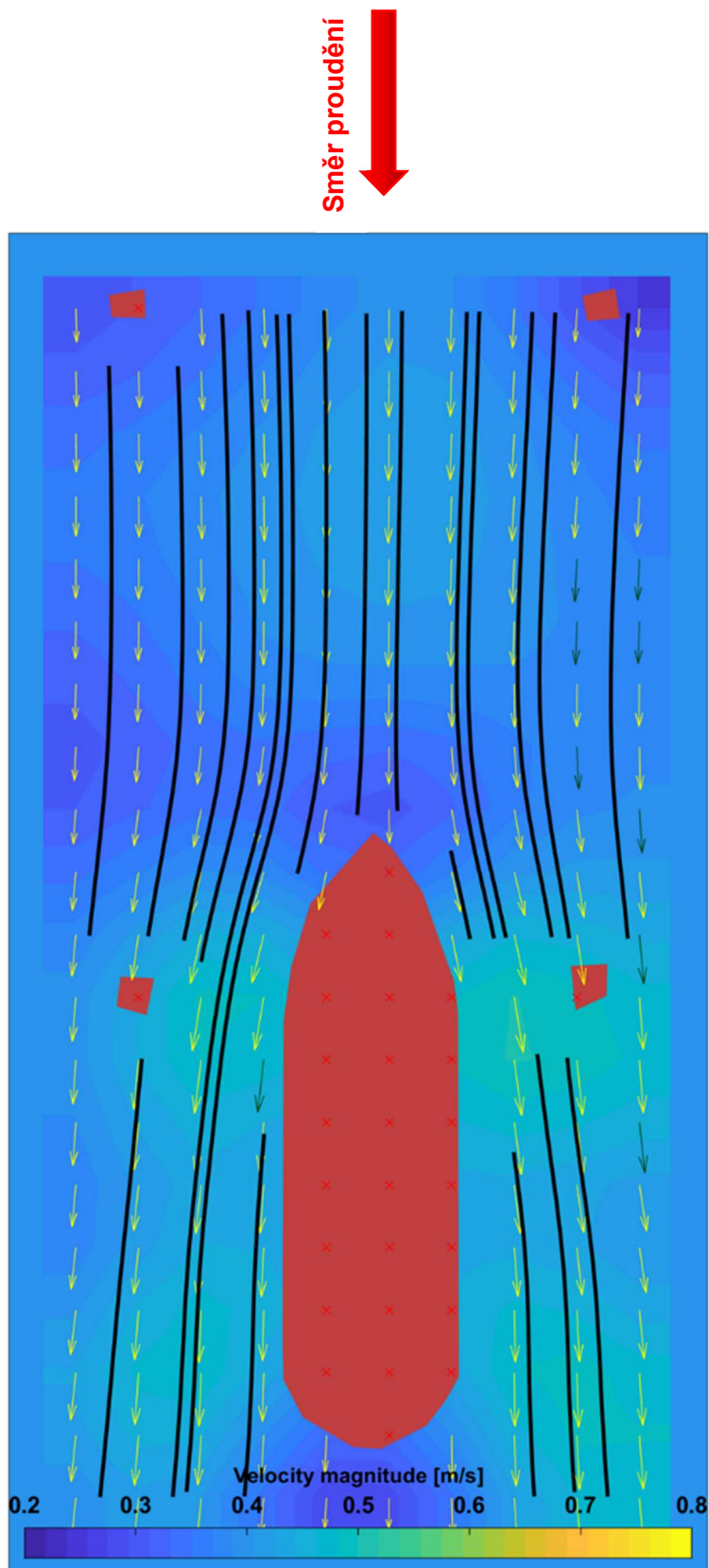
Dalším krokem byla křížová korelace, kdy v programu PIVlab lze volit mezi dvěma metodami. První a rychlejší metodou je využití algoritmu DCC, kde software postupně mezi snímky zjistí výslednou trajektorii, aniž by svou cestu opravoval. Druhou a autorem doporučenou je korelační metoda FFT, která nabízí vytvoření průchodových bloků, které symbolizují vzdálenost částice mezi snímky. Vzdálenosti by měly být voleny podle

rychlosti částic na snímku. Pro správné výsledky je nutné, aby částice v čase  $t+1$  vždy ležela v zadaném bloku. [3]



Obrázek 38 Vykreslení pole vektorů při použití dvou bloků o velikosti 128 a 64 px.

Na dolním snímku (Obrázek 38) je vykresleno vektorové pole na hladině. V místě, kde jsou papírové konfety, lze říct, že vektory symbolizují směr proudění. V místě, kde konfety nebyly, bylo vektorové pole chybné nebo méně přesné. Tato chyba je zapříčiněna nastavením metody FFT na detekování objektu o velikosti papírové konfety a pre-processem snímku, kde byla tato místa potlačena tmavou barvou. Tato chybná data lze poté upravit pomocí validace dat. Dalším krokem bylo převedení pixelů na metry, kdy bylo následně možné exportovat výsledný snímek s hladinovými rychlostmi v jednotkách m/s a trajektorii proudění (viz. Obrázek 39).



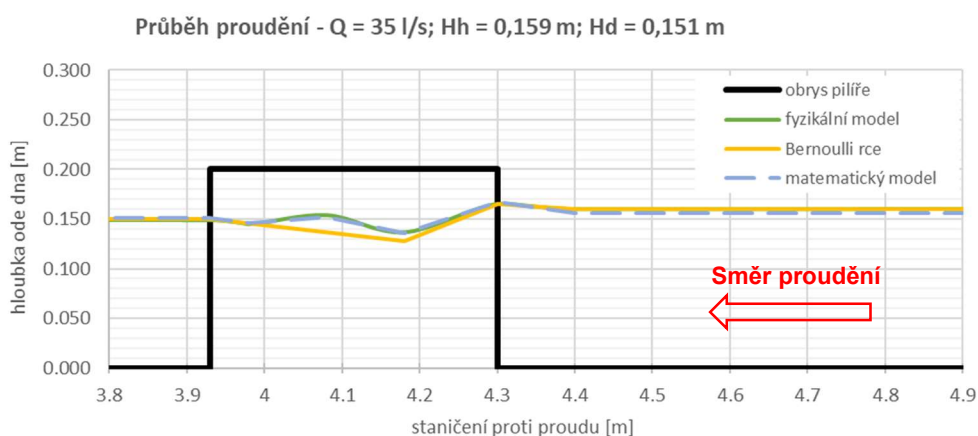
Obrázek 39 Vykreslení hladinových rychlostí metodou PIV.

## 7. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ Č. 1

Při standardním postupu měření byla ověřena správnost matematického modelu, kdy byl průběh hladiny ve fyzikálním modelu roven průběhu hladiny v modelu matematickém. Průběh hladiny ve 2D úloze není tak detailně popsán, jelikož výpočet probíhal jen v určitých místech kolem pilíře.

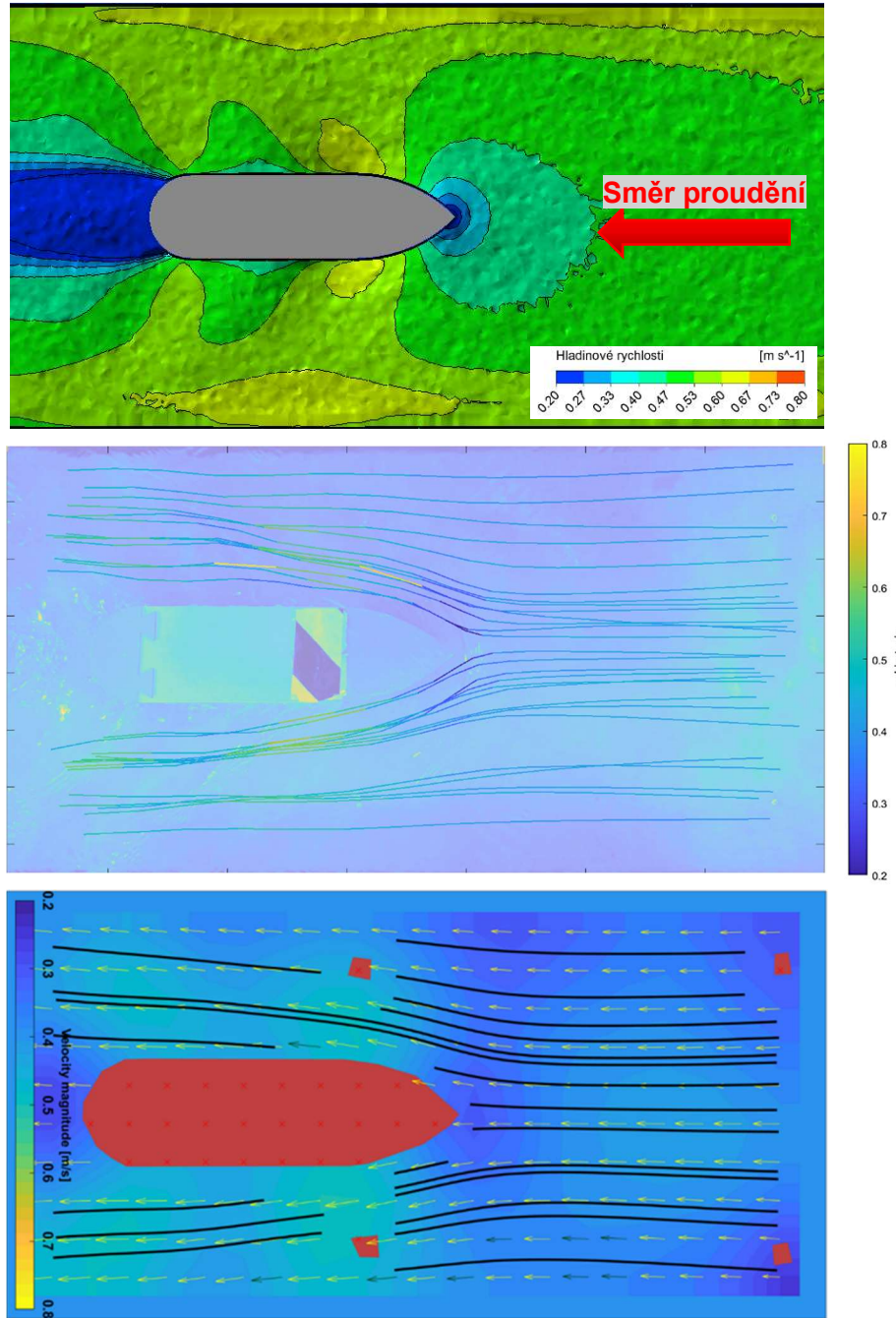
Tabulka 3 Jednotlivé hloubky ode dna.

		Staničení [m]									
		za pilířem		v místě pilíře						před pilířem	
		0.0	1.80	3.93	3.98	4.08	4.18	4.30	4.40	4.90	7.20
Hloubka ode dna [m]	fyzikální model	0.151	0.150	0.149	0.145	0.154	0.137	0.165	0.16	0.160	0.159
	Analyticky Bernoulli	0.150	0.150	0.150			0.128	0.165	0.16	0.160	0.160
	matematický model	0.150	0.152	0.151	0.146	0.152	0.136	0.167	0.156	0.156	0.156



Obrázek 40 Průběh proudění standardních metod výpočtu.

Díky tomu lze porovnávat průběh hladinových rychlostí matematického modelu s metodami PTV a PIV. Ve výsledcích všech tří metod se zobrazuje snížení hladiny v místě za předním zhlavím ve směru proudění, kde dochází k největším rychlostem. Naopak v místě před zhlavím pilíře dochází ke snížení rychlosti a vzduť hladiny. Hladinové rychlosti se liší v rozmezí 5-10 %, to je při 0,5 m/s odchylka přibližně 0,05 m/s. Výsledné vykreslení je zobrazeno na Obrázek 41. Při správném nastavení vstupních parametrů do výpočetního programu PIV a PTV lze získat reprezentativní hladinové rychlosti a trajektorii proudění na hladině.



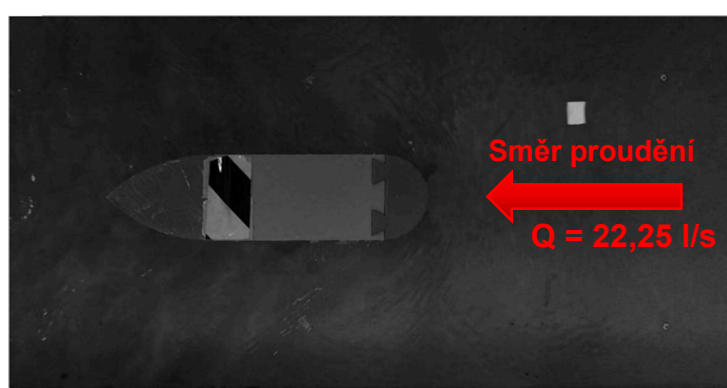
Obrázek 41 Výsledné vykreslení matematického modelu, metody PTV a PIV.

## 8. MĚŘENÍ Č. 2

Pro ověření správných výsledných dat byla provedena druhá varianta měření, kdy přední zhlaví bylo půlkruhové a zadní zhlaví tvořil tvar se dvěma kruhovými oblouky, jejichž tečny svírají v průřezu pravý úhel. Tvar pilíře je zobrazen na Obrázek 42. Z fyzikálního modelu byly získány vstupní parametry:

$$Q = 22,25 \text{ l/s}; H_{\text{horní}} = 0,120 \text{ m}; H_{\text{dolní}} = 0,117 \text{ m}$$

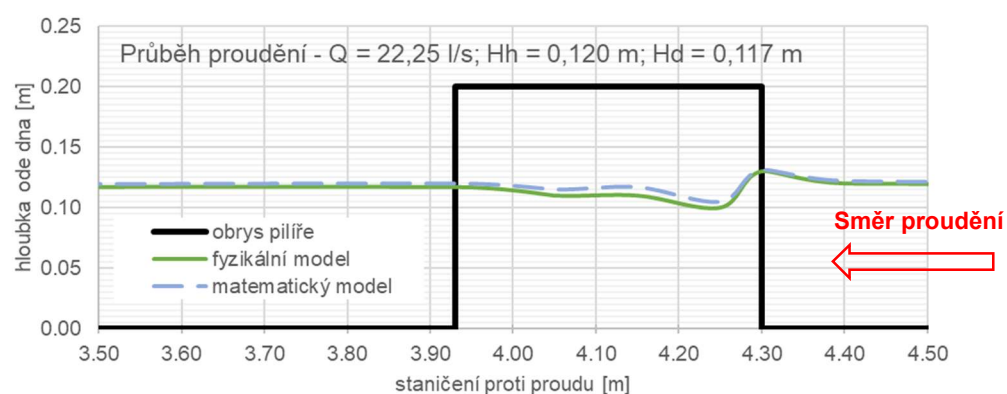
Průběh hladin byl následně vykreslen do grafu a porovnán s výslednou hladinou matematického modelu.



Obrázek 42 Pohled z objektivu na pilíř.

Tabulka 4 Zaměřené hloubky ode dna.

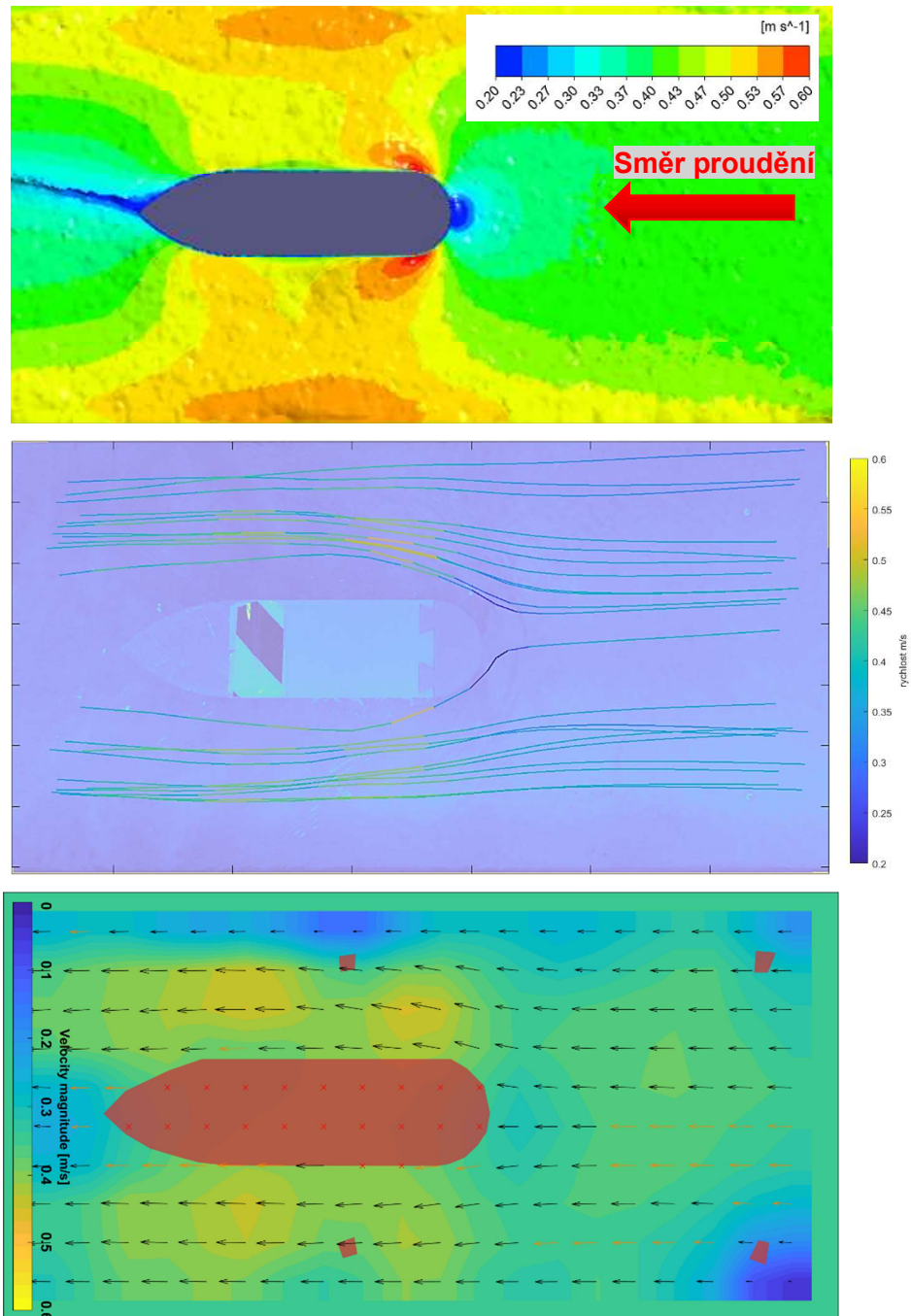
Hloubka ode dna [m]		Staničení [m]									
		za pilířem		v místě pilíře					před pilířem		
		0.0	1.80	3.93	4.05	4.15	4.25	4.30	4.40	4.90	7.20
fyzikální model		0.115	0.115	0.117	0.110	0.110	0.100	0.130	0.120	0.120	0.120
matematický model		0.116	0.116	0.120	0.115	0.117	0.105	0.131	0.122	0.121	0.121



Obrázek 43 Průběh proudění standardních metod výpočtu.

U standardního postupu měření, kdy byl pomocí fyzikálního modelu zkalibrován model matematický, lze říct, že průběh hladiny ve fyzikálním modelu je roven průběhu

hladiny v modelu matematickém. Bylo tedy možné porovnat hladinové rychlosti s rychlostmi z metody PIV a PTV. U všech tří metod se projevuje snížení hladinové rychlosti v místě předního zhlaví, kde dochází ke vzduť hladiny. Rychlosti v místě předního zhlaví se pohybují u všech metod kolem 0,23 m/s, naopak na konci předního zhlaví dochází ke snížení hladiny a nárůstu hladinových rychlostech na hodnotu 0,50 m/s. Jako v případě prvního měření je možné uvažovat odchylku rychlostí v rozmezí 5-10 %.



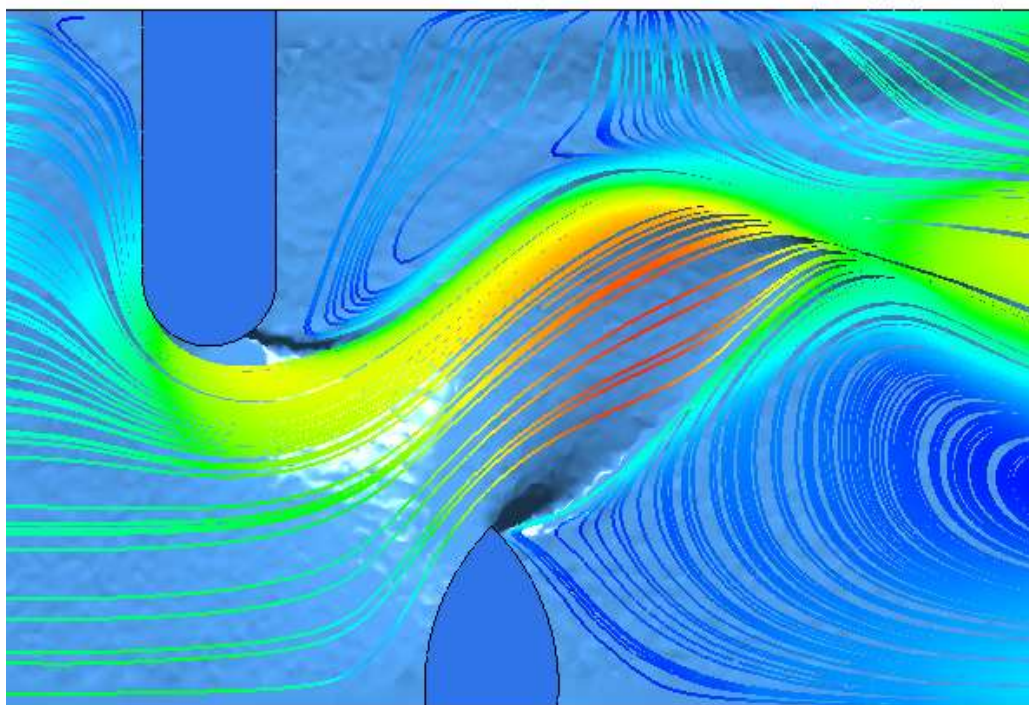
Obrázek 44 Výsledné vykreslení matematického modelu, metody PTV a PIV.

## 9. MĚŘENÍ Č. 3

V případě, kdy celou průtočnou plochu usměrníme do jedné části žlabu a části pilíře tvoří jakousi překážku proudění, dochází v místě mezi pilíři k obrovským rychlostem, a naopak po stranách žlabu k úplavům. Průběh proudění na hladině byl vykreslen na Obrázek 45. Tento stav byl nasimulován za pomoci matematického modelu.



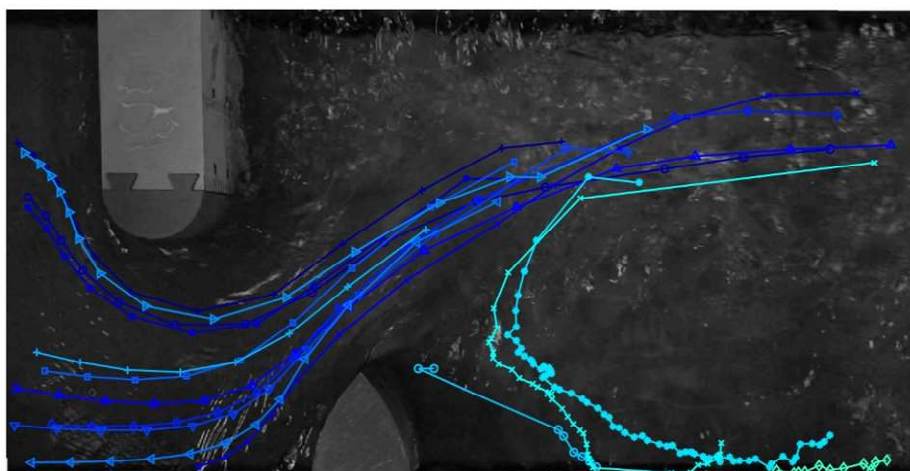
Obrázek 45 Předpokládaný průběh proudění.



Obrázek 46 Výsledné vykreslení trajektorie pomocí matematického modelování.

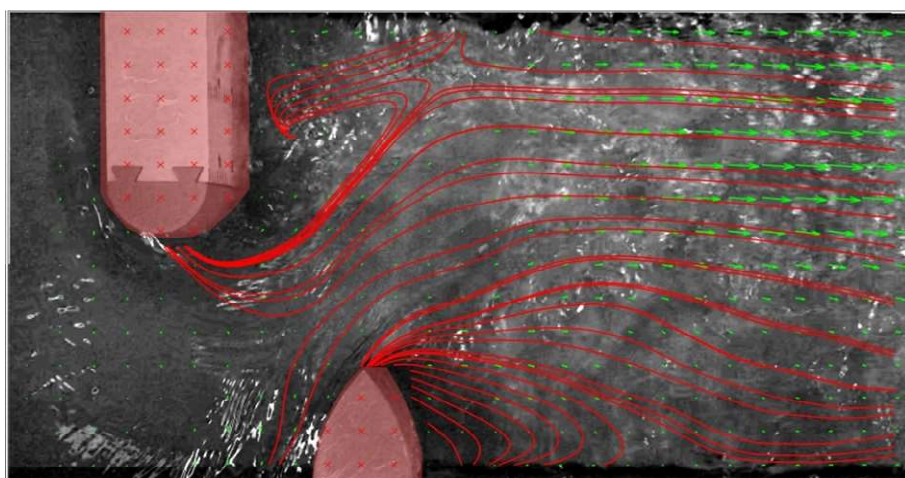


Metoda PTV dokázala vykreslit trajektorii částic v přímém proudu. S vykreslením trajektorie částic vlivem úplavu byl ve fázi post-processu problém, jelikož papírové částice byly vlivem bystrinného proudění a tvořících se vírů vtahovány pod hladinu a vlivem ponoření změnily svou specifickou barvu pro detekování či tvar. Díky tomuto vlivu nebylo možné částice dále detekovat. Pokud by autor použil k detekování jinou částici, která by vlivem ponoření nezměnila odstín barvy anebo svůj tvar, výsledná data by byla přesnější. V místě horní části se nepovedlo detekovat žádnou částici, jelikož vlivem proudění částice končila přilepena na pilíři.



Obrázek 47 Výsledné vykreslení trajektorie pomocí metody PTV.

Metoda PIV, respektive software PIVlab, si s vykreslením trajektorie proudění poradil lépe a dokázal zaznamenat směr proudění v celém žlabu. V tomto případě byla detekována samotná voda a i přesto trajektorie proudění odpovídá proudění matematického modelu.



Obrázek 48 Výsledné vykreslení trajektorie pomocí metody PIV

## 10. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo porovnání nestandardních metod měření pomocí detekování částic. Metody je možné použít pro měření rychlosti, trajektorie proudění a mnoho dalších případů, kde lze detekovat pohyb. Jedná se o metody neinvazivní, které nenarušují proudění vodního toku. S využitím krátkého videosnímku jsou tyto metody schopné vykreslit trajektorii proudění a rychlostní pole na hladině.

V případě autorových tří variant měření si nestandardní metody PTV a PIV dokázaly poradit s vykreslením hladinových rychlostí a trajektorií částic. Ve výsledcích bylo znázorněno charakteristické proudění pro obtékání pilíře a zpětné proudění vlivem úplavu u metody, kdy části pilíře tvořily jakousi překážku ve žlabu.

Z hlediska přesnosti výsledných rychlostí je přibližná odchylka dat od matematického modelu v rozsahu 5-10 %. Z hlediska pořizovacích nákladů pro jednotlivé metody a nákladů na fyzikální model či model matematický, popřípadě jiný měřicí přístroj, jsou tyto položky o stovky tisíc levnější, i přesto udávají relativně přesné hodnoty.

Při uvažování rozdělení rychlosti po svislici pomocí logaritmického zákona lze následně dostat přibližné rychlosti v celé průtočné ploše, a tím popsat celý průběh proudění v toku.

## 11. REFERENCE

- [1] **Jeníček Michal.** *Univerzita Karlova.* [Online].  
<https://is.cuni.cz/studium/predmety/index.php?do=download&did=40949&kod=MZ330P61Z>.
- [2] **R J Adrian, J Westerweel.** *Particle Image Velocimetry.* New York : Cambridge University Press, 2011.
- [3] **Thielicke William, Sonntag, René** *Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab.* Journal of Open Research Software, 2021.
- [4] **Technology Velocimetry.** *velocimetry.* [Online] <https://www.velocimetry.net/>.
- [5] **Antoine Patalano, Carlos Marcelo García, Andrés Rodríguez,.** Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). [Online] 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>. ISSN 0098-3004.
- [6] **Peter M. Lloyd, Peter K. Stansby & David J. Ball.** *Unsteady surface-velocity field measurement using particle tracking velocimetry.* Journal of Hydraulic Research, 1995.
- [7] **Flavia Tauro, Rodolfo Piscopia, Salvatore Grimaldi.** *PTV-Stream: A simplified particle tracking velocimetry framework for stream surface flow monitoring.* 2019. ISSN 0341-8162.
- [8] **P. Gabriel a kol.,** *Jezy.* SNTL, 1989.
- [9] **K141 FSv ČVUT.** [hydraulika.fsv.cvut.cz](http://hydraulika.fsv.cvut.cz). [Online] 2021. [Citace: 15. 10 2021.]  
[http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/prednasky/HY2V\\_08\\_Mosty\\_propustky.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_08_Mosty_propustky.pdf).

[10] **Schoffer Filemon.** techcrunch. [Online] 16. květen 2016. [Citace: 15. říjen 2021.] <https://tcrn.ch/2Z21vGy>.

[11] **Ertischek David.** BGR. [Online] 3. únor 2016. [Citace: 15. říjen 2021.] <https://bgr.com/general/3d-printer-sale-amazon/>.

[12] **Kodýdek Miloš.** truhlářství postaru. [Online] 30. prosinec 2013. [Citace: 15. říjen 2021.] <https://www.truhlarstvi-postaru.cz/index.php/ozuby-cinky-rybina>.

[13] **Zuza Mikolas.** blog.prusaprinters.org. [Online] 7. červen 2018. [Citace: 19. říjen 2021.] <https://bit.ly/3aXuzBb>.

## Seznam Obrázků:

Obrázek 1 Princip PIV – laserový paprsek osvětluje částice a snímání vysokorychlostní kamerou. [4].....	5
Obrázek 2 Snímek výtoku ze savky, autor Dr. Petr Nowak.....	7
Obrázek 3 Výsledné vektorové pole vytvořené pomocí metody PIV.....	7
Obrázek 4 Tvary předního zhlaví návodních pilířů a jejich tvarové součinitele $\epsilon_p$ . ....	9
Obrázek 5 Schéma výpočtu pomocí Rehbockovy rovnice, tvarové součinitele dle zhlaví pilíře. [9] .....	10
Obrázek 6 Vykreslení závislosti vzdušné hladiny na tvaru pilíře. ....	10
Obrázek 7 Model uzlového spoje v softwaru SpaceClaim. ....	12
Obrázek 8 Půdorysný pohled na pilíř, který je rozdělen na tři části. ....	13
Obrázek 9 Znázornění počtu vrstev při různých výškách nanášených vrstev. [13].....	14
Obrázek 10 Porovnání kvality výtisku s tryskou 0,4 mm (vlevo) a 1,0 mm (vpravo)....	14
Obrázek 11 Hotový model vložený do laboratorního žlabu. ....	15
Obrázek 12 Grafický postup měření. ....	16
Obrázek 13 Pohled z objektivu na pilíř.....	17
Obrázek 14 Vykreslení průběhu hladiny fyzikálního modelu. ....	17
Obrázek 15 Schéma výpočtu. [9].....	18
Obrázek 16 Vykreslení průběhu hladiny pomocí Bernoulli-ho rovnice. ....	18
Obrázek 17 Nestrukturovaná síť Delauney v místě pilíře vlevo a mimo pilíř vpravo.....	19
Obrázek 18 Okrajové podmínky modelu. ....	21
Obrázek 19 Vykreslení hladinových rychlostí.....	22
Obrázek 20. Vykreslení trajektorie částic na hladině.....	22
Obrázek 21 Vykreslení průběhu hladiny matematického modelu. ....	22
Obrázek 22 Originální snímek šachovnice před rektifikací. ....	24
Obrázek 23 Snímek po rektifikaci.....	24
Obrázek 24 Vstupní parametry do skriptu. ....	26
Obrázek 25 Převod px na metry. ....	26
Obrázek 26 Vložení funkce computer vision do skriptu.....	26
Obrázek 27 Získání souřadnic z částice. ....	27
Obrázek 28 Zobrazení originálního snímku a binárních snímků s prahovou hodnotou thresh.....	28
Obrázek 29 Binární obraz s parametrem thresh = 0.65 a noise = 25. ....	29

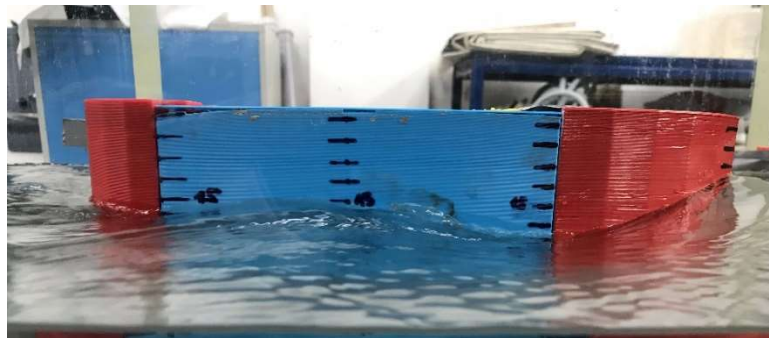
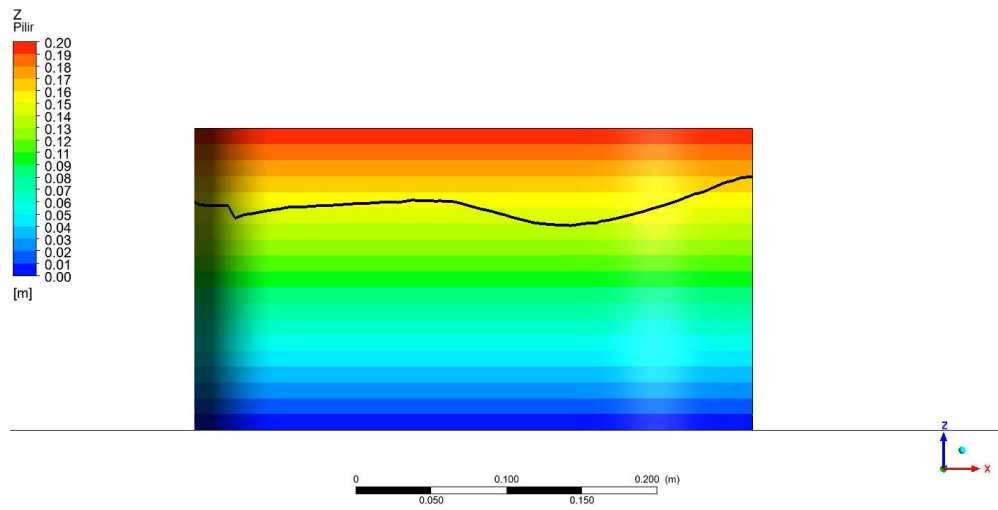
Obrázek 30 Binární obraz s parametrem thresh = 0.65 a noise = 50. ....	29
Obrázek 31 Zobrazení výpočetních kroků pro detekci částic. ....	30
Obrázek 32 Vykreslení zaznamenaných bodů z pohybující se částice. ....	31
Obrázek 33 Vykreslení mračna bodů pohybujících se částic. ....	31
Obrázek 34 Výpočet vzdálenosti vektorů a přepočet rychlosti z px/ms na m/s. ....	32
Obrázek 35 Vykreslení trajektorie částic a jejich průměrné rychlosti. ....	33
Obrázek 36 Vykreslení 3D grafu pro znázornění rychlostí mezi jednotlivými body. ....	34
Obrázek 37 Pre-process vstupních snímku pro lepší detekci částic. ....	35
Obrázek 38 Vykreslení pole vektorů při použití dvou bloků o velikosti 128 a 64 px. ...	36
Obrázek 39 Vykreslení hladinových rychlostí metodou PIV. ....	37
Obrázek 40 Průběh proudění standardních metod výpočtu. ....	38
Obrázek 41 Výsledné vykreslení matematického modelu, metody PTV a PIV. ....	39
Obrázek 42 Pohled z objektivu na pilíř. ....	40
Obrázek 43 Průběh proudění standardních metod výpočtu. ....	40
Obrázek 44 Výsledné vykreslení matematického modelu, metody PTV a PIV. ....	41
Obrázek 45 Předpokládaný průběh proudění. ....	42
Obrázek 46 Výsledné vykreslení trajektorie pomocí matematického modelování. ....	42
Obrázek 47 Výsledné vykreslení trajektorie pomocí metody PTV. ....	43
Obrázek 48 Výsledné vykreslení trajektorie pomocí metody PIV. ....	43

## Seznam Tabulek:

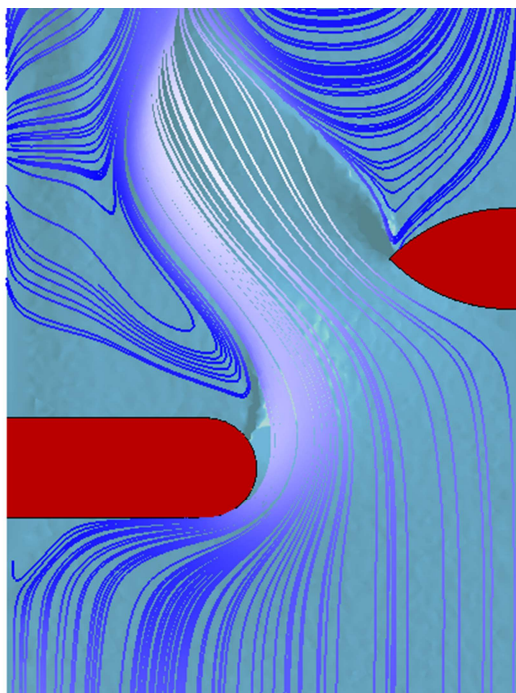
Tabulka 1 Čas, materiál a cena použitá při jednotlivých modelech. ....	15
Tabulka 2 Použité vstupní výrazy. ....	20
Tabulka 3 Jednotlivé hloubky ode dna. ....	38
Tabulka 4 Zaměřené hloubky ode dna. ....	40

## 12. PŘÍLOHY

### 12.1. Měření č. 1 - Průběh hladiny podél pilíře

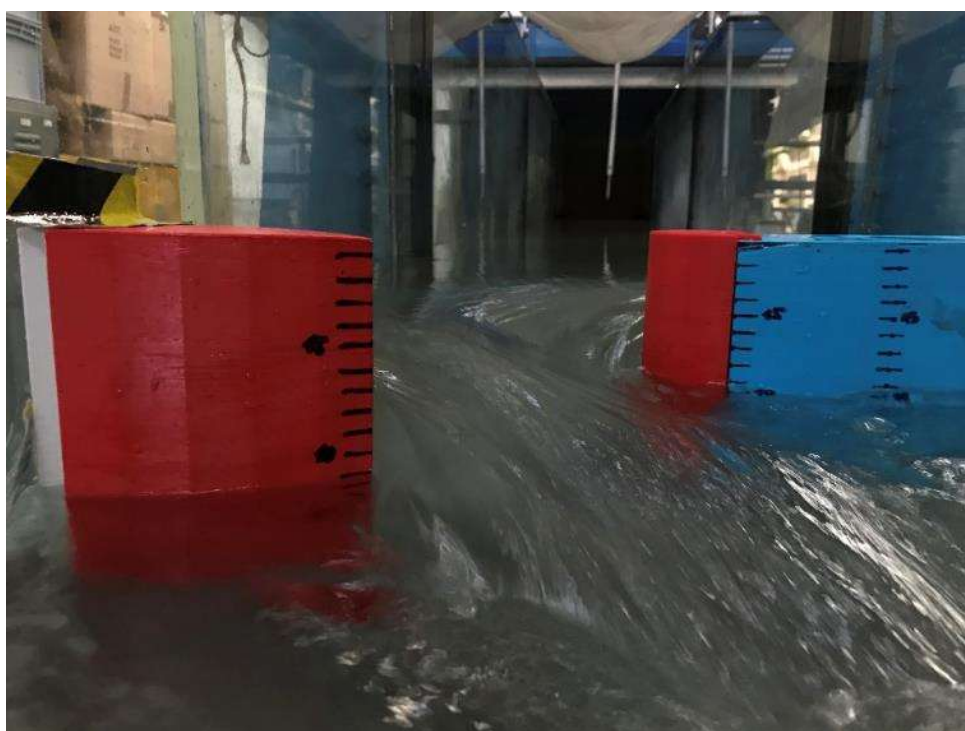
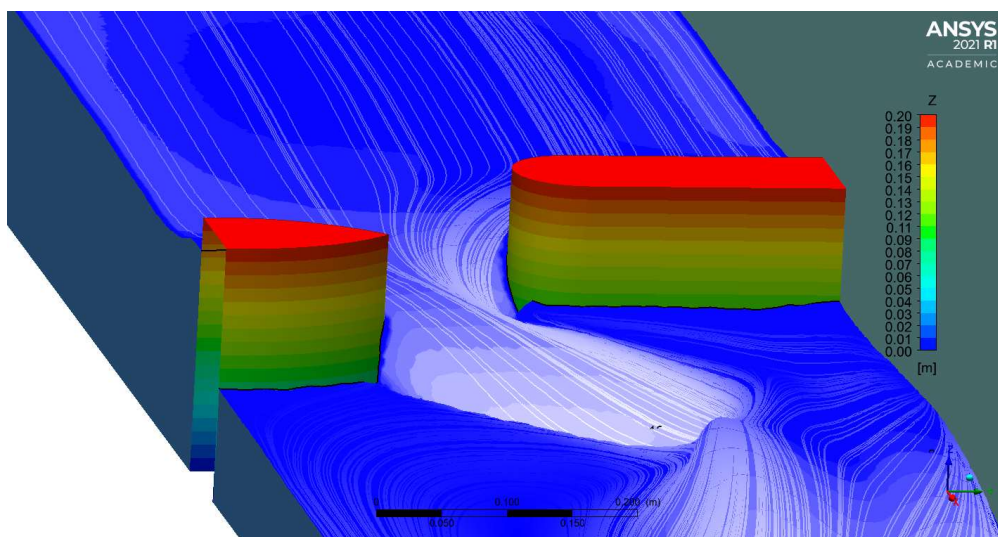


## 12.2. Měření č. 3 – Snímek průběhu proudění

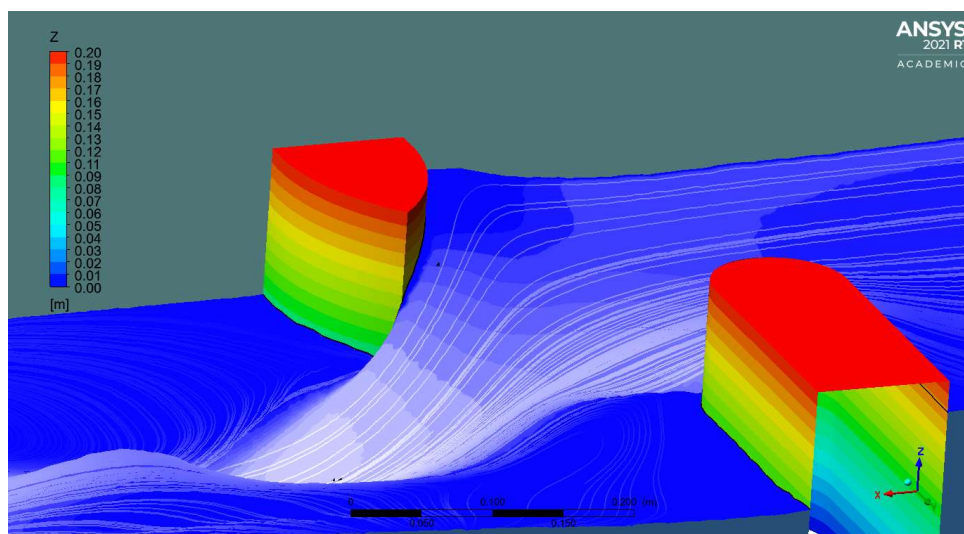




### 12.3. Měření č. 3 – Průběh proudění proti vodě



## 12.4. Měření č. 3 – Průběh proudění proti vodě



## 12.5. Měření č. 3 – Průběh proudění po vodě

