



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ RYCHLOSTÍ V MEZIVÁLCOVÉM
PROSTORU**

MEASUREMENT OF VELOCITY DISTRIBUTION IN THE SPACE BETWEEN THE CYLINDERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Kozák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ZUBÍK, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jan Kozák
Název	Měření rozložení rychlostí v meziválcovém prostoru
Vedoucí práce	Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

<http://www.dantecdynamics.com/particle-image-velocimetry>

Firemní literatura Dantec k Particle Image Velocimetry

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Student provede experimentální zjištění rozložení rychlostí v meziválcovém prostoru biologického modelu. V laboratoři ÚVS-LVV provede detailní měření rychlostního pole pomocí laserové anemometrie uvnitř modelu sloužícího k provádění biologických pokusů. Uvnitř modelu se budou měnit otáčky zdroje rotačního pohybu.

Cíl práce: Poskytnout podrobné informace o rozložení rychlostí v blízkosti dna speciální míchací nádoby pro vyhodnocování laboratorních experimentů řešených na pracovišti Masarykovy univerzity v rámci předdefinovaných hydraulických podmínek. Dále výsledky přispějí k vývoji a kalibraci experimentálního zařízení pro simulaci podmínek života vodních bezobratlých v proudící vodě (význam pro bioindikaci hydromorfologických úprav a revitalizací vodních toků).

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá rozložením rychlosti v meziválcovém prostoru. Celé měření probíhalo v laboratořích VUT Brno Fakulty stavební. Důvodem měření je výzkum, který provádí Masarykova univerzita v rámci dizertační práce jednoho ze studentů. Jedná se o výzkum chování určitých živočichů v daném vodním prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

PIV, meziválcový prostor, vektorové pole, rychlost proudění

ABSTRACT

This thesis deals with the velocity distribution in space between the cylinders. All measurement conducted in labs of VUT Brno Faculty of Civil Engineering. Cause of measurement is research, which is being done by Masarykova univerzita within the thesis of one of the students. It is a research of behavior of certain animals in the aquatic enviroment.

KEYWORDS

PIV, space between the cylinders, vector field, velocity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Jan Kozák *Měření rozložení rychlostí v meziválcovém prostoru*. Brno, 2017. 77 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2017

Bc. Jan Kozák
autor práce

Poděkování:

Děkuji panu Ing. Pavlovi Zubíkovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě práce, neocenitelné rady a velmi ochotný přístup při řešení všech problémů. Dále bych chtěl ze srdce poděkovat své rodině, které mi umožnila studium na vysoké škole a neustále mě podporovala po dobu celého studia.

Obsah

Obsah.....	9
1. Úvod	11
2. Současný stav měření proudění tekutin.....	12
2.1. Způsoby měření rychlostí proudění tekutin	12
3. Laserové měřicí metody	16
4. Metoda PIV (Particle Image Velocimetry)	19
4.1. Základní princip PIV	21
4.2. Výhody a využití PIV	23
4.3. Modifikace PIV a druhy PIV	24
4.3.1. Klasické PIV	24
4.3.2. Stereo PIV	24
4.3.3. Třírozměrné PIV	25
4.3.4. Časově rozdělené PIV (Time resolved PIV)	26
4.3.5. MikroPIV	29
4.3.6. Particle tracking velocimetry (PTV)	30
4.3.7. Planar laser-induced fluorescence (PLIF)	31
5. Prvky systému PIV	32
5.1. Popis jednotlivých prvků systému	33
5.1.1. Pulzní laser.....	33
5.1.2. Kamera s mezipamětí	34
5.1.3. Rozdělovač FlowMap System Hub	35
5.1.4. Nastavení počítače	36
5.1.5. FlowManager.....	36
6. Zpracování a vyhodnocování naměřených dat	38
6.1. Korelace.....	38
6.1.1. Auto - korelace	39
6.1.2. Vzájemná korelace	40
6.1.3. Adaptivní korelace.....	41
6.2. Maskování vektorů	43
6.3. Odstranění chybných vektorů - proces validace	44
6.3.1. Funkce Range	44
6.3.2. Funkce Klouzavý průměr (Moving average)	45

6.3.3.	Funkce Peak.....	47
6.3.4.	Funkce Manuální validace	48
6.4.	Ostatní výstupy.....	48
7.	Postup vlastního měření.....	51
7.1.	Popis modelu.....	52
7.2.	Volba základních parametrů.....	53
7.3.	Postup prací před vlastním měření	55
7.4.	Vlastní měření	56
7.4.1.	Zvolené roviny měření.....	56
8.	Zpracování naměřených hodnot	59
9.	Vyhodnocení naměřených hodnot.....	62
9.1.	Grafické výstupy	62
9.2.	Tabulkové výstupy	64
9.3.	Vyhodnocení závislosti teploty na dějích v modelu	65
9.4.	Vyhodnocení opakovatelnosti měření	67
10.	Závěr	68
11.	Seznam použitých zdrojů.....	69
12.	Seznam použitých zdrojů obrázků.....	70
13.	Seznam použitých obrázků, tabulek a grafů.....	71
14.	Seznam zkratk a symbolů	73
15.	Seznam příloh	75
16.	Přílohy.....	Error! Bookmark not defined.

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá měřením rozložení rychlostí v meziválcovém prostoru. Důvodem zkoumání rozložení rychlosti je požadavek Masarykovy univerzity (MU), kdy jeden z jejich studentů v rámci své dizertační práce s názvem *Analýza reakce říčního makrozoobentosu na kombinaci stresorů* zkoumá reakci bentických organismů v daných podmínkách.

Cílem studie z MU je pozorování organismů a vyhodnocení jejich vazeb na hydraulické podmínky (rychlost proudění a jeho variabilita). Tyto poznatky jimi budou dále využívány pro laboratorní testování interakcí organismů s rychlostí proudění a působením dalších faktorů jako množství sedimentů a jejich kontaminace. Experiment Masarykovy univerzity bude uspořádán do 6 modelů, kdy ve třech bude rychlost proudění pomalejší a v dalších třech bude rychlost výrazně vyšší. Rychlost proudění v modelu bude regulována pomocí magnetické míchačky na kterou bude model umístěn. Model se bude skládat ze dvou válců vložených do sebe. Experimenty se budou odehrávat v prostoru mezi těmito válci a to je i místo, kde probíhalo měření rychlostních poměrů v laboratořích Fakulty stavební na VUT. Výsledné naměřené rychlostní pole budou na Masarykově univerzitě srovnávat s pozicí jednotlivých organismů během jejich experimentu.

Vzhledem k požadavkům, které přednesla Masarykova univerzita proběhl výběr metody na požadované měření. Vzhledem k velikosti měřené oblasti byly vyloučeny bodové metody měření vektorů rychlosti a jako nejvýhodnější možnost byla určena metoda rovinné laserové anemometrie - PIV (Particle Image Velocimetry). Jedná se o metodu, které umožňuje měření rozložení rychlostí v dvourozměrném prostoru. Cílem práce bylo detailní měření vektorů rychlostí v daném modelu (speciálně vyrobený pro měření metodou PIV) a vytvoření grafických a tabulkových výstupů pro MU. Autor se nad rámec zadání práce zabýval i teplotní závislostí rychlostí proudění v modelu a nakonec stanovil i opakovatelnost měření touto metodou.

2. Současný stav měření proudění tekutin

V běžné průmyslové, vývojové a výzkumné praxi je, mimo jiné, často potřebné přesné měření rychlostí proudění nebo rozložení rychlostí v daném poli. Ať už jde například o protipovodňovou ochranu a návrhy jednotlivých prvků nebo úpravy koryt na návrhové průtoky až po využití měření rychlostí v automobilovém průmyslu nebo jiných technických odvětvích kde je nutné řešit aerodynamiku jednotlivých částí stroje nebo celkového produktu.¹

Měření rychlosti proudění tekutin patří mezi důležité oblasti měření neelektrických veličin. Existuje velké množství principů, které jsou používány pro měření rychlostí, i různé typy měřících zařízení. Pojem průtok se často používá i pro označení rychlosti proudění, ale nejedná se o přesné označení.¹

Tato práce se zabývá měřením rychlostního pole v meziválcovém prostoru. Na měření polí se využívají už složitější metody než na měření bodových rychlostí proudění tekutin. K nejvíce využívaným metodám patří metoda PIV (Particle Image Velocimetry) a metoda LDA (Laser Doppler Anemometry). Metody se volí dle mnoha okolností a požadavků na měření.

2.1. Způsoby měření rychlostí proudění tekutin

Proudění tekutiny je pohyb, při kterém se jednotlivé částičky látky pohybují svým pohybem a zároveň se pohybují ve směru tekutiny. Proudění tekutiny má určitou rychlost, která se mění dle druhu prostoru, který je protékán (nerovnosti, spoje) a hlavně dle tření částic mezi sebou a mezi stěnou daného prostoru.¹

Rychlost proudění se dá měřit několika způsoby a přístroji založenými na různých fyzikálních principech. Nejprve je zde uveden přehled základních způsobů měření rychlosti tekutin, v další části pak bude podrobně probrána jedna metoda – metoda PIV.

¹ Jan Kozák *Směrová charakteristika jednodrátkové žárové sondy*. Brno, 2015. 58 s., 20 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

Zařízení na měření rychlosti se dají rozdělit na kontaktní a bezkontaktní:

- **Kontaktní metody** – svojí konstrukcí zasahují do proudu měřené tekutiny a tedy mohou v určitých případech ovlivnit průtokové poměry v měřené části. Je nutné dobře volit měřicí zařízení, aby negativní ovlivnění bylo co nejvíce minimalizováno. Tato ovlivnění je nutné kompenzovat koeficienty, které závisí na tvaru a velikosti měřicích sond. ¹

Většinou jde pouze o měření bodových rychlostí, kdy se používají:

- **Tlakové sondy**: jsou využívány pro vyšší rychlosti proudění ($u > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Rychlost se většinou určuje dle rozdílů tlaků v určitých místech sondy. Využívá se Pitotova sonda (trubice), která je jedna z nejstarších a nejjednodušších možností k měření rychlosti. Pitotova trubice je tenká trubička. Trubička je otočena proti směru proudění a dále pokračuje do tlakoměru například tvaru „U“ kde se zjišťují změny tlaku. Z tohoto rozdílu tlaku je poté možno při znalosti statického tlaku dopočítat rychlost proudící tekutiny. Dále se využívá Prandtlova sonda a více otvorové tlakové sondy. ¹
- **Vodoměrné vrtule**: měří rychlost proudění v měrném bodě a určuje se počet impulsů za čas měření. Rozměry rotorů vrtulí včetně stoupání šroubovice se volí dle místních poměrů. Je důležitá správná volba zařízení, protože se tím co nejvíce eliminují nejistoty při měření. Vrtule o průměru rotoru 8 mm (mikrovrtulky) až 250 mm lze využívat v rozmezí rychlosti $u = 0,1$ až $10,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (při měření průtoků vzduchu jde měřit až $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). A naměřená rychlost proudění tekutiny je garantována zpravidla s nejistotou cca 1 až 3 %.²
- **Miskové a vrtulové sondy**: lze označit za nejjednodušší způsob. Fungují na principu, kdy proud vzduchu naráží do miskovitých lopatek umístěných na rotoru a tím ho roztáčí, ale vždy pouze jedním směrem díky tvaru lopatek. Z průměrné rychlosti otáček je pak možno určit průměrnou rychlost vzduchu. Dalším běžně používaným typem je vrtulový anemometr, který lze jednodušeji označit za větrník. Také se jedná o velmi jednoduchou konstrukci, kdy je vrtule na horizontální ose a je obrácena po proudu vzduchu popřípadě proti proudu vzduchu (dle orientace listů vrtule), který jí roztáčí a lze tak měřit rychlost. Nevýhodou oproti miskovým anemometrům je podmínka, že osa vrtulky musí být vždy orientována rovnoběžně s prouděním vzduchu. Této podmínky se však dá docílit připevněním křídla

¹ Jan Kozák *Směrová charakteristika jednodrátkové žárové sondy*. Brno, 2015. 58 s., 20 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

² *Rozvoj bezkontaktních optoelektronických měřicích metod v hydromechanice* [online]. Brno, 2004 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/vst/lvv/bezkontaktni_metody.pdf. Fakulta stavební, VUT Brno.

na osu rotace a upevněním celého zařízení na vertikální osu. Díky křídlu se pak anemometr natáčí tak, aby byl vždy rovnoběžný se směrem proudění vzduchu. Tím se dá uvažovat o výhodě tohoto zařízení jako o přístroji na získávání nejen informace o rychlosti větru, ale i jeho směru.³

- Žárové sondy: patří mezi nejvyžívanější přístroje pro měření rychlosti proudění tekutin. Obecně se jedná o měřidla (či senzory) hmotnostních průtoků tekutin. Svým principem jsou vhodné pro měření rychlostí proudění tekutin. Tato metoda měření staví na závislosti velikosti elektrického odporu většiny kovů a na jejich teplotě. Využívá nejčastěji velmi tenký drátek (průměr až v řádu mikrometrů, většinou vyrobeny z wolframu nebo platiny), který je žhaven elektrickým proudem na teplotu vyšší než je teplota okolního vzduchu. Vzduch proudící kolem drátku jej ochlazuje, a tak mění jeho vlastnosti. Lze najít závislost mezi elektrickým odporem a rychlostí proudění.
- **Bezkontaktní metody** - zdají se nejpříjemnější vzhledem k tomu, že na rozdíl od výše uvedených metod nezasahují do proudu tekutiny a tedy neovlivňují proudící tekutinu. Bezkontaktní přístroje byly vyvinuty právě kvůli minimalizaci těchto nepřesností a ovlivňování výsledků. Jedná se například o laserové měřící zařízení a určité typy ultrazvukových měřících zařízeních.
 - Ultrazvuková měřidla: se dají rozdělit na dvě základní skupiny a to:
 - Využívající Dopplerova jevu – lze použít v případě, že proudící médium obsahuje částice odrážející zvuk, tj. například pevné částice či bubliny vzduchu. Pokud nejsou v tekutině přítomny tyto částice, tak průtokoměr nemůže pracovat, protože nedochází k odrazu zvuku. Průtokoměr se skládá z vysílače a přijímače ultrazvuku, které jsou připevněny na jedné straně potrubí. Ultrazvukový signál o známé frekvenci okolo 0,5 MHz je vysílačem vyslán do proudící kapaliny. Dochází k odrazu ultrazvuku od pohybující se částice či bubliny a při zachycení odraženého signálu přijímačem se vyhodnocuje změna frekvence přijatého signálu. Změna frekvence je úměrná rychlosti proudícího média. Přesnost měření záleží na profilu proudícího

³ MALÍK, Michal a Jiří PRIMAS. *Anemometrické metody* [online]. Liberec, 2011 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=566. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci.

média, na obsahu a velikosti částic i velikosti potrubí. Kalibrací je možno docílit přesnosti $\pm 1 \%$.⁴

- U nichž se měří doba průchodu signálu – signál je vysílán v obou směrech (po i proti proudu). Ultrazvukové signály jsou vysílány jako impulsy a měří se časové rozdíly v obou směrech šíření a pomocí doby, která uplyne, od vyslání po přijetí signálu se dopočítává rychlost dané tekutiny. Jsou zde tedy zabudovány dvě dvojice vysílač/přijímač, které jsou posazeny proti sobě.¹
- Laserové měřicí metody: o těchto metodách se práce podrobněji zmiňuje v další kapitole.

⁴ KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika: Měření průtoku a proteklého množství* [online]. Praha, 2005 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm>

¹ Jan Kozák *Směrová charakteristika jednodrátkové žárové sondy*. Brno, 2015. 58 s., 20 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

3. Laserové měřicí metody

Tato skupina bezkontaktních metod je založena na technologii laseru jako zdroje světla, který slouží k pozorování zkoumané oblasti. Jsou vybaveny optickým zařízením a často rovnou i spojeny s vyhodnocovacím softwarem. Při využívání dvou níže uvedených metod se uvažuje rychlost proudu rovna rychlosti unášených částic. Jedná se o mikročástice, které jsou přidávány uměle anebo jsou součástí vody přirozeně (běžná voda těchto přirozených částic obsahuje většinou dostatek). Hustota těchto částic by se co nejlíže měla blížit hustotě media, ve kterém měření probíhá.¹

Metody, které se využívají, jsou zejména tyto dvě:

- **LDA - Laser Doppler Anemometry** – bodová laserová anemometrie – funguje na principu Dopplerova jevu. Základem jsou svazky laserových paprsků, které prochází zkoumanou tekutinou, kde se na částicích přítomných v tekutině záření rozptyluje. Vlivem Dopplerova jevu zde dochází k posuvu frekvence odraženého světla a jejím porovnáním se známou frekvencí vyslaného světla lze vypočítat rychlost částice. Je tedy zřejmé, že je pro tuto metodu nutná přítomnost částic určité velikosti v proudu tekutiny a samozřejmě také průhlednost tekutiny a optický přístup k vlastní tekutině (průhledná stěna kolem měřené oblasti). Částice vhodné velikosti lze do tekutiny dopovát uměle, jen je potřeba zajistit, aby měly velmi malou pádovou rychlost, a aby byly schopné kopírovat trajektorie proudu tekutiny. Velikost částic nutných pro tuto metodu závisí na vlnové délce použitého zdroje světla. Toho lze využít, například pokud chceme získat třídimenzionální vektor proudění. Stačí nám k tomu tři zdroje světla o různých vlnových délkách a částice o patřičných průměrech. Obvykle je Dopplerovo frekvenční posunutí (rozdíl frekvencí mezi zářením původním a rozptýleným), ke kterému dochází při rozptýlení paprsku po dopadu na pohybující se částice, velmi malé. Abychom mohli dané frekvenční posunutí vůbec registrovat, musí být zdroj světla monochromatický s velmi úzkou spektrální čarou. Vyhodnocení takovýchto malých frekvenčních posunutí lze s vysokou přesností provést např. z interferenčního obrazce vznikajícího v detektoru. Z uvedených důvodů se jako zdroje světla v těchto systémech používají lasery, které mohou vyzařovat dostatečně monochromatické a koherentní záření nutné pro vznik interference. Signály z detektoru, kterým může být např. fotonásobič, lze sledovat na

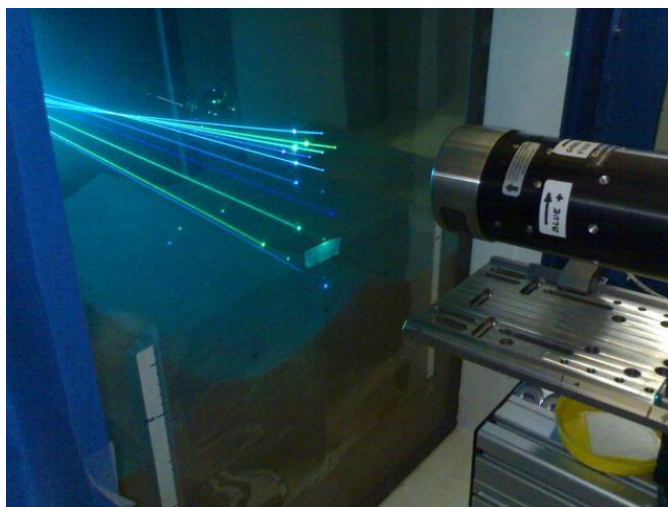
¹ Jan Kozák *Směrová charakteristika jednodrátkové žárové sondy*. Brno, 2015. 58 s., 20 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

osciloskopu. Výsledná frekvence viditelná na interferenci příslušných světelných svazků je úměrná rychlosti částic ve zkoumané oblasti.³

K důležité vlastnosti LDA patří možnost připojit doplňující optoelektronické zařízení, které nám umožní měřit záporné i nulové velikosti rychlosti. Jedná se o tzv. Braggovy celly.³

Metoda LDA má tyto hlavní výhody:²

- bezkontaktní měření,
- malý prostor měřicího objemu,
- možnost měřit i nulové a záporné rychlosti,
- lze měřit rychlost až desítky $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- možnost měření fluktuací rychlosti až v řádu kHz
- do výpočtu vstupují pouze konstanty (dle použitého laserového světla a úhlu svazků).



Obr. č. 1 Metoda LDA [1]

³ MALÍK, Michal a Jiří PRIMAS. *Anemometrické metody* [online]. Liberec, 2011 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=566. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci.

² *Rozvoj bezkontaktních optoelektronických měřicích metod v hydromechanice* [online]. Brno, 2004 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/vst/lvv/bezkontaktni_metody.pdf. Fakulta stavební, VUT Brno.

- **PIV – Particle Image Velocimetry** – rovinná laserová anemometrie – využívá laser jako zdroj světla. V PIV je účelem laseru osvětlit zkoumanou plochu. Následně je osvětlená plocha rychle za sebou nasnímana kamerou. Měří se čas mezi snímky a následně vyhodnocovací software určuje vzdálenost a směr posunutí částic obsažených v tekutině. Výsledkem je dvojrozměrný obraz s vykresleným polem vektorů rychlosti.

Tato metoda byla vybrána pro zjišťování rozložení rychlosti v meziválcovém prostoru a kapitola č. 4 se jí přímo zabývá.

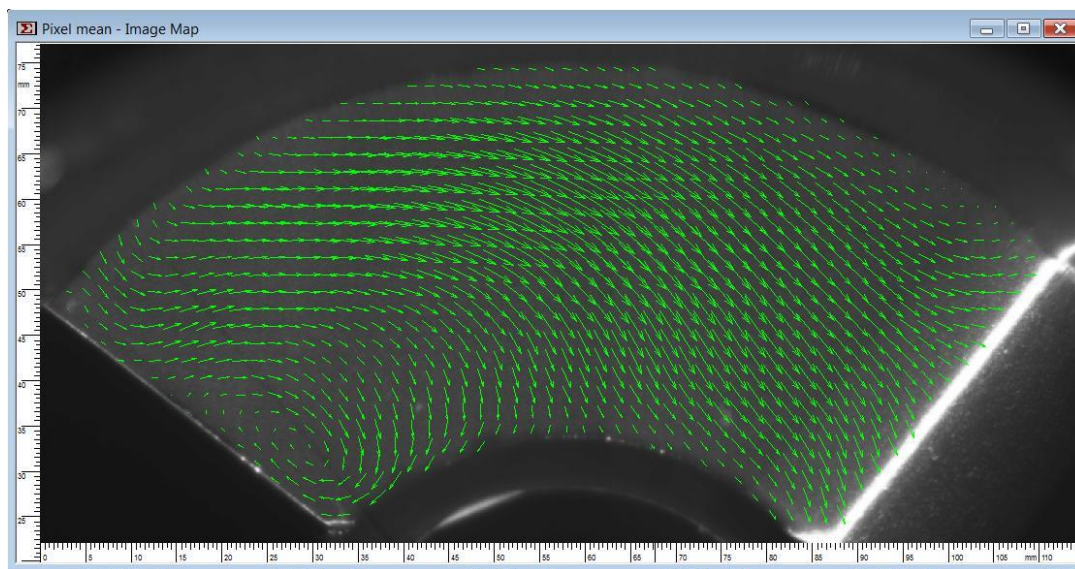


Obr. č. 2 Metoda PIV [2]

4. Metoda PIV (Particle Image Velocimetry)

Jak bylo zmíněno, jedná se o metodu měření rychlostí v celém dvourozměrném proudovém poli (případně i třírozměrném). Plocha je nasvícována silnými světelnými impulzy, jejichž nejčastějším zdrojem je laser (svazek laserových paprsků je roztažen na plochu – takto uspořádané světelné paprsky se nazývají „světelné listy“). I při této metodě musím být tekutina nasycena částicemi. U těchto částic se sleduje jejich pohyb. Při měření v dvourozměrném prostoru se používá vysokorychlostní kamera, která v určitých nastavených časových intervalech snímá danou plochu. Z těchto snímků se poté pomocí softwaru vyhodnocuje posun jednotlivých částic. Díky známému času mezi impulzy laseru lze poté jednoduše dopočítat rychlost částic, která se považuje za rychlost tekutiny.²

Jedná se o první zde uvedenou možnost, která neměří pouze bodové rychlosti, ale je schopna měřit charakteristiku rozložení rychlosti proudu na dané ploše (svislici, horizontále nebo celém profilu). Nespornou výhodou je tedy odpadnutí nutnosti měřit požadovaný profil v několika bodech a pokaždé přemísťovat měřicí techniku. Další velkou výhodou je možnost měření i neustáleného proudění.



Obr. č. 3 Ukázka rychlostního pole vytvořená metodou PIV

² Rozvoj bezkontaktních optoelektronických měřicích metod v hydromechanice [online]. Brno, 2004 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/vst/lvv/bezkontaktni_metody.pdf. Fakulta stavební, VUT Brno.

Základní postup měření se dá rozložit do 4 kroků:²

- nasycení měřeného média částicemi (dostatečné množství, vhodná velikost a hustota),
- osvětlení měřené plochy záblesky (s přesně danými intervaly),
- zaznamenání dvojice obrazů (osa zařízení by měla být kolmá na světelný list,
- vyhodnocení obrazů – několik dílčích činností.

Metoda PIV je náročná na technické vybavení a dříve byl problém synchronizovat jednotlivé komponenty tak, aby bylo měření časově únosné a hlavně technicky možné. Velký posun nastal v posledních dvaceti letech. Mezi největší výrobce zařízení pro PIV patří dánská firma Dantec Dynamics. Tato firma začala jako jedna z prvních dodávat systém pro měření metodou PIV, který obsahuje veškeré komponenty potřebné pro měření. Tento systém se jmenuje FlowMap. V tomto systému je nejdůležitějším prvkem procesor, který koordinuje všechny části systému. Dalšími výrobci techniky pro metodu PIV jsou například firmy TSI a LaVision.

Podle počtu použitých záznamníků je celkový čas pro naměření, vyhodnocení a uložení v rámci sekund. Díky této rychlosti je možné sledovat i neustálené proudění což není s bodovými měřidly většinou možné.



Obr. č. 4 Ukázka soustavy PIV [3]

² Rozvoj bezkontaktních optoelektronických měřicích metod v hydromechanice [online]. Brno, 2004 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/vst/lvv/bezkontaktni_metody.pdf. Fakulta stavební, VUT Brno.

4.1. Základní princip PIV

Základním principem PIV je derivování vektorů rychlosti z menších (vyšetřovaných) sekcí měřené oblasti. Výpočet tedy vychází ze vzorce: ⁶

$$\vec{v} = \frac{\vec{\Delta x}}{\Delta t} \quad (1)$$

Kde:

$\vec{v}$ vektor rychlosti

$\vec{\Delta x}$ posun částic v daném směru

Δt čas mezi záblesky laseru

Jak je uvedeno ve vzorci (1), tak se jedná o změnu polohy za jednotku času (posun částic za čas mezi jednotlivými snímky). Průtočný profil je nasvícován pomocí laseru (dvou záblesků), kdy při každém záblesku je plocha snímána kamerou a tím vzniknou dva časově vymezené snímky. Tyto snímky jsou následně považovány za jeden časový okamžik. ⁶

Prvním krokem je rozdělení celé zaznamenané plochy na dílčí plochy tzv. vyšetřované oblasti - „interrogation areas“ (značeno IA), tedy malé plochy, ve kterých se zjišťuje změna polohy jednotlivých částic unášených proudem. Na tyto vyšetřované oblasti jsou následně aplikovány korelační metody (adaptivní, vzájemná, auto – viz. další kapitola). Například při vzájemné korelaci dochází k integraci dle vzorce: ⁶

$$C(s) = \iint_{IA} I1(X) \cdot I2(X - s) dX \quad (2)$$

Kde:

$C(s)$ hledaný vrchol signálu

IA dílčí plochy

$I1$ ploška z 1. snímku

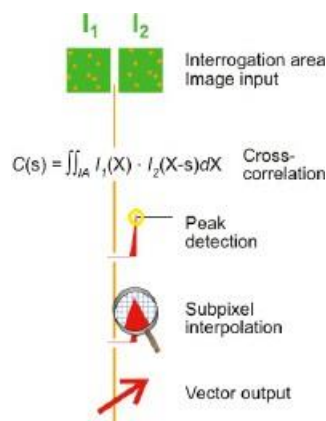
$I2$ ploška z 2. snímku

X poloha částice na prvním snímku

s posun částice na druhém snímku

⁶ Dantec Dynamics: *Princip PIV* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>

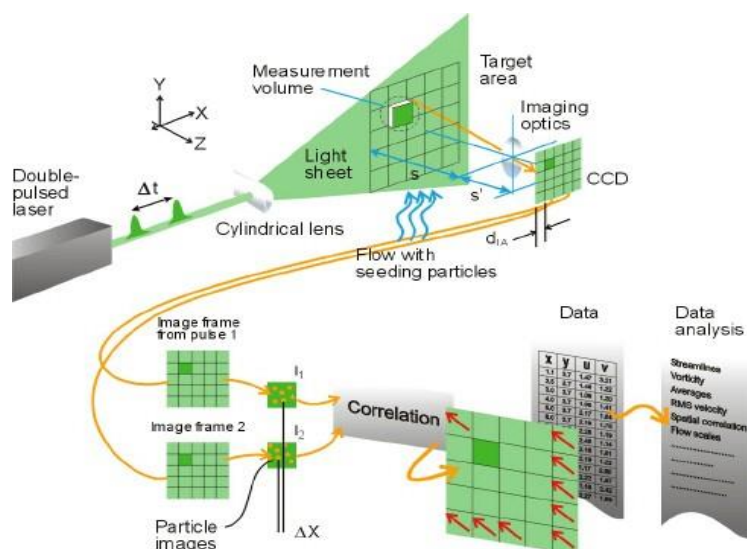
Následující obrázek vyobrazuje pracovní postup při korelaci:



Obr. č. 5 Princip korelace [4]

Korelace nám poskytuje data, ve kterých hledáme „vrcholy“ (signal peak), které nám určují průměrný posun částic ve vyšetřované oblasti a tedy i vektor rychlosti v daném směru. Korelace probíhá po jednotlivých vyšetřovaných oblastech a po vyřešení celé plochy software vykresluje jednotlivé vektory. Tento postup se opakuje pro každou dvojici snímků v řadě měření.⁶

Výhodou tohoto postupu je, že oba snímky se dají poměrně lehce porovnávat i opticky. Při překlíkávání snímků lze na jednotlivých snímcích vidět posun částic a tedy už před jakýmkoliv dalším vyhodnocením lze určit základní směry proudění a posun částic. Snímky jsou černobílé, kdy pozadí je černé a částice bílé. Tato barevnost je cílená, někdy se používá laser s infračerveným zářením a na objektivěch se používají čočky, které eliminují jiné druhy světla.⁶



Obr. č. 6 Princip PIV [4]

⁶ Dantec Dynamics: *Princip PIV* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>

4.2. Výhody a využití PIV

Tato metoda má jako všechny určité výhody i nevýhody:

- Výhody:
 - podrobné měření celého pole během jednoho okamžiku,
 - žádná část zařízení neovlivňuje proud tekutiny,
 - měření neustáleného proudění,
 - velká opakovatelnost měření,
 - možnost při použití více kamer řešit i 3D proudění,
 - velké rozlišení a přesnost.
- Nevýhody:
 - velmi drahé zařízení,
 - potřeba přesné koncentrace a typu částic rozptýlených v tekutině,
 - nutno provést náročné kalibrace pro jednotlivá měření
 - velké nároky na optickou přístupnost měřené oblasti.

Využití této metody jsou například následující:⁷

- ve větrných tunelech – experimenty zjišťující aerodynamiku aut, letadel, budov a dalších objektů,
- měření rychlostí v proudech kapaliny – případ i této práce, celkově všechny výzkumné aspekty hydrodynamiky (rotační pohyby, průtok potrubím a kanály),
- výzkum klimatu – pohyb vln, modelování přílivů, modelování hydrologie řek,
- další výzkum probíhá s pomocí PIV i v biomedicině, výzkumu turbulencí nebo k ověřování určitých modelů.

⁷ Dantec Dynamics: *Příklady použití PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/piv-application-examples>



Obr. č. 7 Ukázka využití PIV [5]

4.3. Modifikace PIV a druhy PIV

4.3.1. Klasické PIV

Jedná se o dvourozměrné měření při kterém se měří dvě složky vektoru (například vektor rychlosti v ose X a ose Y). Je nejběžněji používáno a pro provádění měření stačí pouze základní komponenty. Běžně bývá označován jako 2D2C (2 Dimensions, 2 Components – dvourozměrný prostor, dvě složky vektoru rychlosti) měření.

Diplomová práce byla zpracována pomocí tohoto typu PIV.

4.3.2. Stereo PIV

Jedná se o složitější měření, při kterém se také měří v dvourozměrném řezu prostorem, ale už tři složky vektoru rychlosti. Označuje se jako 2D3C měření.⁸

Rozdíl od klasického měření je v použití dvou kamer zároveň. Kamery jsou vůči sobě pootočené o daný úhel, a proto přináší dva mírně odlišné snímky. Je zde využíván tzv. Parallax efekt (dochází k „vytažení“ třetího rozměru z dvourozměrného obrázku). Rozdíl mezi jednotlivými obrázky představuje třetí složku měření rychlosti, který vystupuje nad měřenou

⁸ Dantec Dynamics: *Stereo PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/stereo-piv-2d3c-piv>

dvourozměrnou plochu. Po prvních výstupech nastává kalibrace a třetí složka vektoru je z nich vyhodnocována. Dodatečně poté mohou být první dvě složky (přímo měřené na jednotlivých snímcích) přepočítány a tím lze minimalizovat nepřesnosti, které by mohli vzniknout díky parallax efektu.⁸

Pravděpodobně nejdůležitější částí při tomto měření je správné nakalibrování kamer, které musí být pro obě kamery přesné a výstup z jednotlivých kamer musí mít přesahy mimo měřenou plochu tak, aby se měřená plocha na obou snímcích plně překrývala. K tomu slouží kalibrační terče, které dodává přímo i výrobce.⁸

Nevýhodou této metody oproti základnímu PIV, je ještě větší náročnost na optickou přístupnost měřeného prostoru.



Obr. č. 8 Stereo PIV [6]

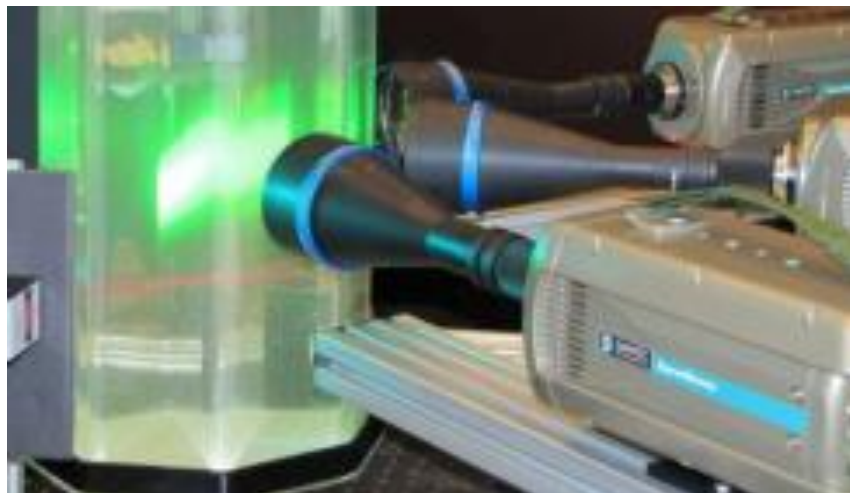
4.3.3. Třírozměrné PIV

Třírozměrné měření vektoru rychlosti se také nazývá 3D PIV (lze označit jako 3D3C) nebo v anglické literatuře jako *Volumetric Velocimetry*.⁹

Jedná se o měření, které zjišťuje rychlostní poměry ve všech třech dimenzích zároveň. K tomuto měření se využívají až čtyři kamery, které mají telecentrické čočky (zobrazují bez perspektivy – všechny obrazce jsou stejně velké nezávisle na vzdálenosti od objektivu).⁹

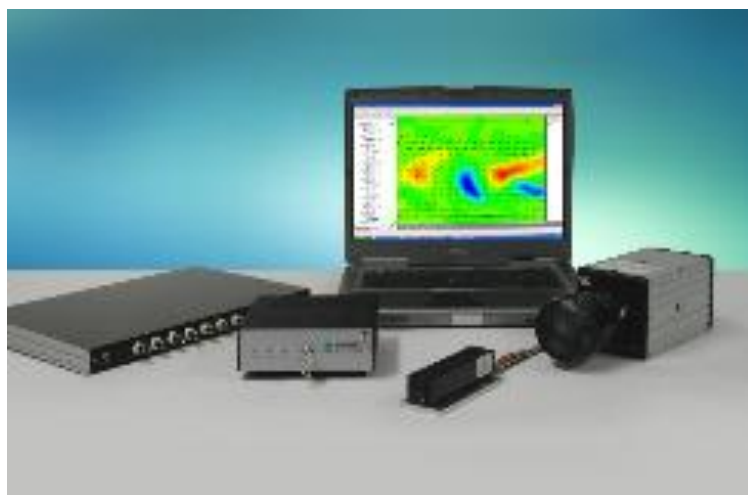
⁹ Dantec Dynamics: *Prostorové PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/volumetric-velocimetry-3d-piv>

Nevýhodou této metody ovšem je, že použití je omezeno na poměrně malé prostory a je časově velmi náročné.



Obr. č. 9 Prostorové - 3D PIV [7]

4.3.4. Časově rozdělené PIV (Time resolved PIV)



Obr. č. 10 Novější soustava PIV [8]

Jedná se o novější úpravu PIV, kdy vzhledem k vyššímu výkonu počítačů, laserů a vyšší rychlosti kamer je možno pořizovat záznamy až v tisícinách sekund. Jedná se o nejpřesnější postup při výzkumu proudění tekutin a experimentech při tom prováděných.¹⁰

¹⁰ Dantec Dynamics: *Časově rozdělené PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/time-resolved-piv>

Dantec Dynamics na svých webových stránkách uvádí velmi rozsáhle využití této metody. Významnou předností je využití jako v kapalinách tak i plynech. Také se velmi rozšířila možná měřená plocha v mnohem kvalitnějším rozlišení a to hlavně vývojem vysokorychlostních kamer.¹⁰

Hlavní výhody uváděné u této metody:¹⁰

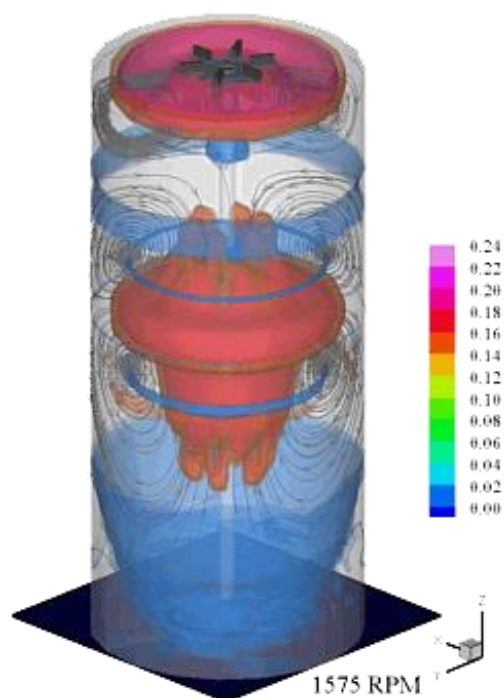
- prostorové rozlišení,
- snížení intervalů mezi záblesky laseru,
- podpora laseru u výkonu až 100 W, což je zlepšení oproti klasickým laserům, které mají mnohem větší výkon a tedy hrozí výrazně větší nebezpečí poranění oka,
- nově vyvinuté lasery s možností opakování až 200 Hz při měření vektoru rychlosti ve vodě,
- lze používat více druhů kamer (už není nutno mít pouze jednu od výrobce),
- nové kamery od výrobce, které jsou schopny snímat rychlosti až 30 000 Hz,
- možnost měření i 3D proudění,
- vylepšení vyhodnocovacího softwaru a tedy zrychlení postprocesingu naměřených dat,
- novější kamery mají lepší optické zařízení a tedy umožňují, aby mnohem větší plochy byly měřeny najednou.

Při výzkumu tohoto druhu PIV bylo také docíleno zmenšení celé soustavy. Je to jedna z dalších výhod, protože došlo k výrobě mnohem kompaktnějších laserů a jak je uvedeno výše mnohem rychlejších kamer. Tuto novou soustavu představuje obrázek č. 10.¹⁰

Tento celý systém podporuje většinu tekutin a lze jím tedy zkoumat jejich dynamiku, což je velmi přínosné pro výzkum jevů, které nastávají jak v přírodě tak okolo člověkem vytvořených věcí.¹⁰

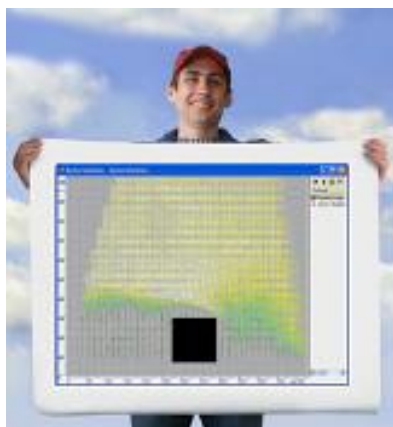
Nejdůležitějším přínosem je zrychlení celého cyklu měření. Lze již provádět měření ve vodním prostředí s opakováním až 1 kHz, tedy 1000 opakování za jednu sekundu. Na obrázku je zobrazeno měření touto rychlostí v nádrži s oběžným kolem.¹⁰

¹⁰ Dantec Dynamics: *Časově rozdělené PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/time-resolved-piv>



Obr. č. 11 Ukázka z měření rychlostí 1 kHz [8]

Dalším velkým přínosem jak už bylo zmíněno je zvětšení snímané plochy při zachování vynikající rozlišovací schopnosti kamery. Nyní lze snímat i plochy o velikosti až 1 x 1 m.¹⁰



Obr. č. 12 Ukázka možností záběru plochy 1 x 1 m [8]

Zrychlení celého systému představuje například vytvoření 2000 vektorových map za 2 sekundy, což při klasickém měření je až několik minut práce.¹⁰

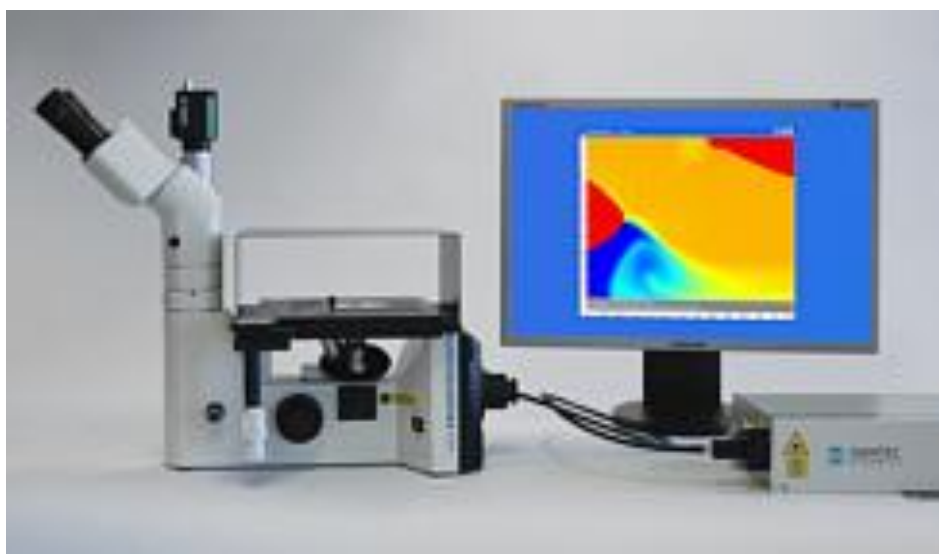
¹⁰ Dantec Dynamics: Časově rozdělené PIV. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/time-resolved-piv>

4.3.5. MikroPIV

Jedná se o takřka klasické PIV, které je velmi zmenšeno tak, aby se lépe daly zachycovat pohyby na velmi malých rozměrech. Hlavní využití tato metoda má například v laboratořích biomedicínského výzkumu. ¹¹

Touto metodou se dají měřit rychlosti, rozložení teplot, koncentrace, pH a další vlastnosti při použití až mikroskopického měřítka (často bývá součástí PLIF). Výrobce Dante Dynamics nabízí celý systém, který je schopen měřit 2D2C. Výhodou je, že se dají zároveň měřit vektory rychlosti a dalších vlastností jako například rozložení teplot ve zkoumané oblasti. Jedinou podmínkou pro měření více výstupů najednou je použití detekčního systému, který je toho schopen. ¹¹

Tato metoda má díky své velikosti upraveny všechny komponenty tak, aby celý systém byl malý, ale zároveň dostatečně výkonný pro požadované měření. Tento systém má například upravený laser tak, aby nedocházelo k možnosti poranění zraku (snížený výkon), optimalizovaný přenos signálu a možnosti úpravy výstupů. ¹¹



Obr. č. 13 Ukázka soustavy pro MicroPIV [9]

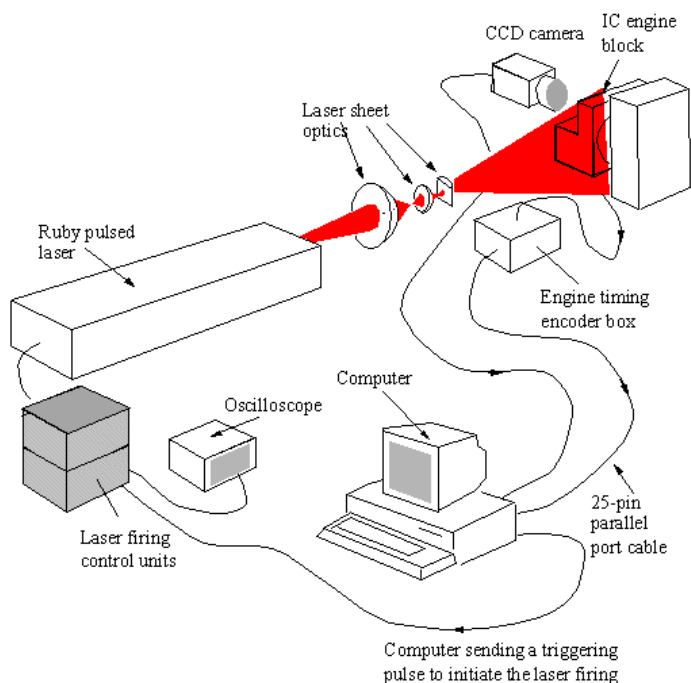
¹¹ Dantec Dynamics: *MicroPIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.Dantecdynamics.com/microfluidics>

4.3.6. Particle tracking velocimetry (PTV)

Velmi podobný způsob měření jako samotné PIV s tím rozdílem, že při vyhodnocování snímků není zkoumaná oblast rozdělena na vyšetřované oblasti na kterých pak probíhá korelace, ale každá jednotlivá částice je pozorována samostatně. Výsledkem tedy nejsou vektory, které vycházejí z jednotlivých plošek, ale každá částice má svůj vlastní vektor. Určování těchto vektorů probíhá pomocí sledování a určování jejich sousedů a pak se vzájemně vyhodnocují a vytvářejí vektorovou mapu rozložení rychlostí.¹²

Při této metodě se používá menší množství sledovaných částic rozptýlených ve sledovaném mediu. Důvodem využití této metody je doba výpočtu, která dosahuje větších hodnot než klasické PIV díky své větší složitosti.¹²

Vektory, které získáme měřením, nejsou v pravidelné mřížce jako je to u PIV a to znesnadňuje například hledání chybných vektorů. Nepravidelné uspořádání je i výhodou, protože lze mnohem snadněji sledovat jednotlivé částice a tedy určit proudnice, po kterých se pohybují s větší přesností než u PIV. Tato metoda také není omezena velikostí měřené plochy (na rozdíl o PIV), ale je omezena deformacemi, které mohou vznikat v okolí pozorované oblasti nebo překážek.¹²



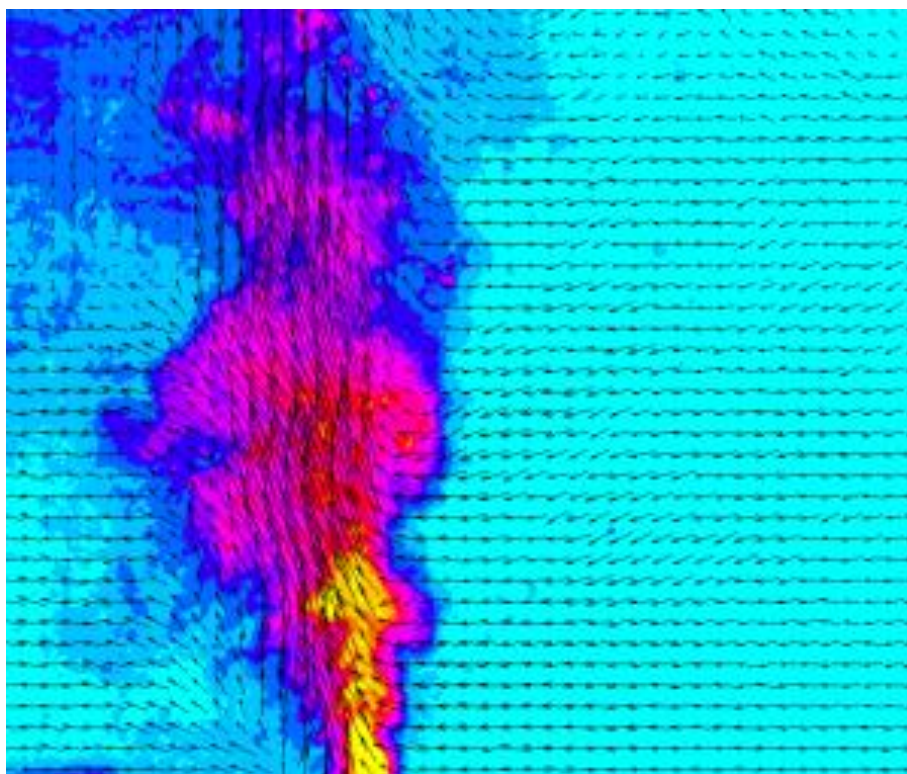
Obr. č. 14 Ukázka uspořádání soustavy PTV [10]

¹² SOKORAY-VARGA, Béla a János JÓZSA. Particle tracking velocimetry (PTV) and its application to analyse free surface flows in laboratory scale models[online]. 2008 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <http://www.pp.bme.hu/ci>. Výzkumný článek.

4.3.7. Planar laser-induced fluorescence (PLIF)

Jedná se o modifikaci PIV, kde se zároveň měří více složek než pouze vektory rychlosti. Tato metoda umožňuje simultánně měřit skalární parametry proudu (jako teplota, koncentrace) zároveň s měřením 2D nebo 3D rychlostí unášených částic.¹³

Používá se například pro vyhodnocení rychlosti přenášení hmoty a tepla při mísení dvou látek. Tuto metodu využívají také výše zmíněné mini PIV systémy. Při měření se dá zjišťovat rychlost a s tím jako další příklad pH, koncentrace dané látky, apod.¹³



Obr. č. 15 Ukázka výstupu při použití metody PLIF [11]

¹³ LAO, lasery a optika: PLIF [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/-k/plif-555p>

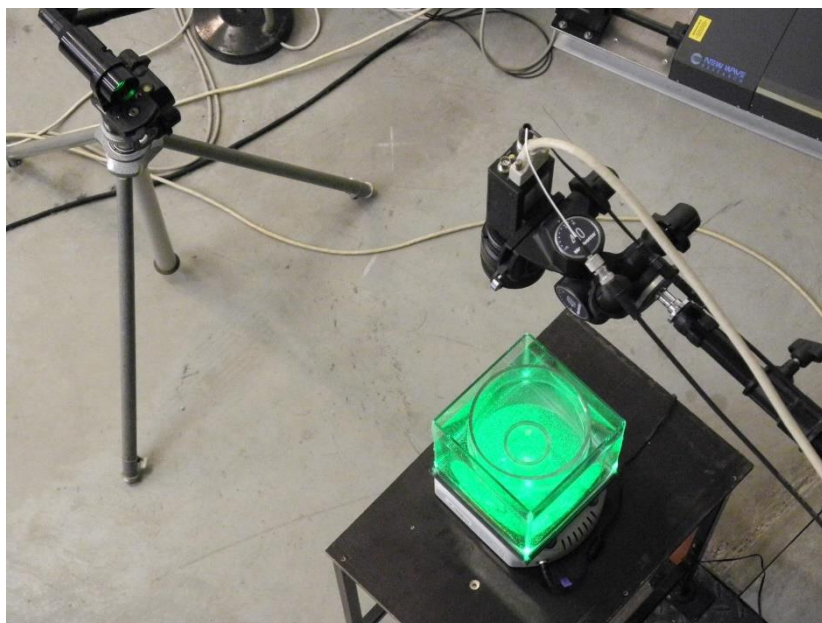
5. Prvky systému PIV

Systém pro měření obsahuje několik částí, které umožňují velkou variabilitu. Všechny části lze rozdělit do několika základních skupin. Tyto skupiny jsou:

- Osvětlení / laser: Lze použít několik způsobů na vytvoření stroboskopického světelného listu. Využívají se například pulzní lasery, elektro-optické uzávěrky (klapky) nebo kontinuální vlnový laser. Přímý výběr zařízení záleží na druhu zkoumaného proudění. Nejčastěji využívané jsou lasery pulzní.¹⁴
- Kamera: Několik druhů kamer (většinou jednoúčelových) je možné připojit do systému. Jedná se o kamery schopné pořizovat fotografie ve velké rychlosti (vysokorychlostní) a požadované kvalitě.¹⁴
- FlowMap System Hub (rozdělovač): Tato část je primární částí celého systému. Celá část zajišťuje synchronizaci všech prvků a poskytuje fyzickou komunikaci mezi svítícím zařízením, kamerou a počítači.¹⁵
- Používaný počítač: Jedná se o téměř jakýkoliv počítač, na který lze nainstalovat operační program, a analyzují se na něm naměřená data.
- FlowManager: Software, který je instalován na používaném počítači. Jedná se o databázi, ve které se uchovávají naměřená data, nastavení jednotlivých komponentů a také nastavení parametrů jednotlivých experimentů.
- Systém Hub software: Tento software je důležitým prvkem, díky kterému dochází k synchronizaci jednotlivých procesů a časování, jejichž výsledkem jsou naměřená data. Tento prvek byl přidán kvůli zjednodušení pro koncového uživatele tak, aby co nejvíce částí bylo automatických, ale přesto přehledných.¹⁵

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.

¹⁵ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: System Hub*. 1. Skovlunde, Dánsko, 2003. ISBN 9040U4122.



Obr. č. 16 Pohled na kameru, laser a model použitou při vlastním měření

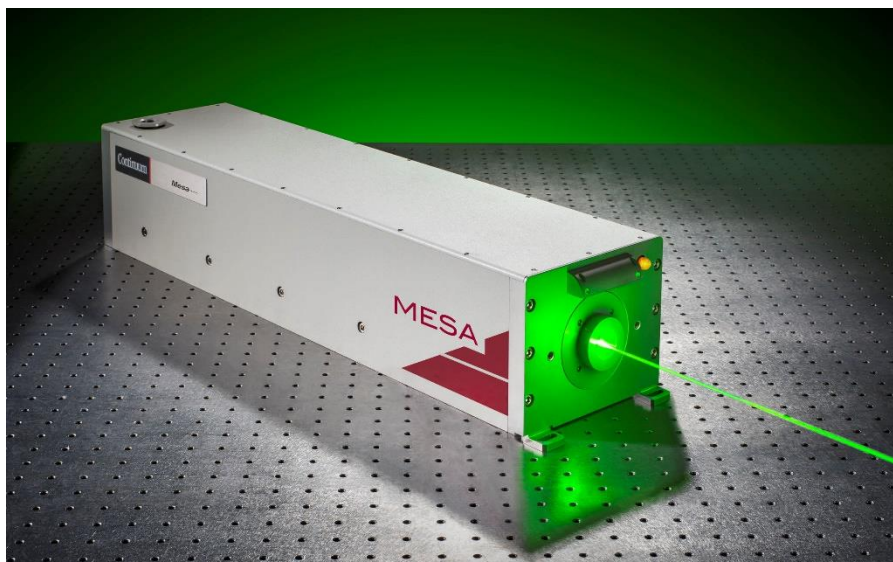
5.1. Popis jednotlivých prvků systému

5.1.1. Pulzní laser

V použité soustavě je využit pulsní laser, který má zdvojený pulzní Nd:YAG laser, který produkuje modré/zelené světelné listy. Tyto barvy jsou využívány, protože vysokorychlostní kamery a fotografické filmy jsou nejcitlivější na toto spektrum. Nd:YAG lasery totiž vyzařují infračervené světlo o vlnové délce, kterou je možno zvýšit až na 532 nm – což je zelená barva. Požadavkem na tento laser je vysílat krátké a rychlé záblesky. Délka jednotlivých záblesků je 6 – 10 ns a čas mezi jednotlivými záblesky je 250 μ s. Časový úsek mezi jednotlivými pulzy je velmi omezený – jednotlivé pulzy lze opakovat každých 10 Hz (s novějšími modely až 50 Hz) při použití jednoho laseru. Při použití dvou laserů lze tuto mezeru mezi záblesky výrazně zmenšit.¹⁴

Při používání těchto laserů je nutné dbát na bezpečnost vzhledem k tomu, že používané lasery mají výkon až 25 MW. Takže i nepatrný odraz paprsku směřující do lidského oka může mít fatální dopad na lidský zrak, je tedy nutné dodržovat bezpečnost práce a používat ochranné pomůcky.¹⁴

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.



Obr. č. 17 Ukázka typu laseru [12]

5.1.2. Kamera s mezipamětí

Kamery se dají rozlišit podle potřebného rozlišení (prostorového a časového) a citlivosti. Každá kamera má své vlastní nastavení a společnost Dantec Dynamics dodává tyto kamery s příslušenstvím. Velkou výhodou novějších typů kamer je tzv. „framegrabber“, díky kterému se pořízené fotografie ukládají do mezipaměti. Předností tohoto ukládání spočívá v tom, že se urychlilo celé měření, protože odpadla doba potřebná k přenesení jednoho snímku před pořízením druhého (k přenosu snímků dochází v době, kdy probíhá nabíjení laseru).¹⁴



Obr. č. 18 Ukázka typu kamery [13]

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.

5.1.3. Rozdělovač FlowMap System Hub

Jedná se o přístroj, který obsahuje:¹⁵

- Základní jednotku:
 - Ethernet port (100 Mbit a 1 Gbit),
 - synchronizační desku,
 - základní desku,
 - zapisovatel obrazů (dle druhu kamery).
- chráněný ethernetový kabel pro připojení,
- software (FlowMap systém hub).

Pro správné použití FlowMap System Hub je potřeba počítače, který má nainstalovaný software FlowManager. Dále je potřeba mít na počítači možnost připojení 100 Mbit i 1 Gbit ethernetového kabelu.¹⁵

Na zadní straně přístroje jsou všechny potřebné konektory pro zapojení všech částí systému.



Obr. č. 19 System Hub [4]

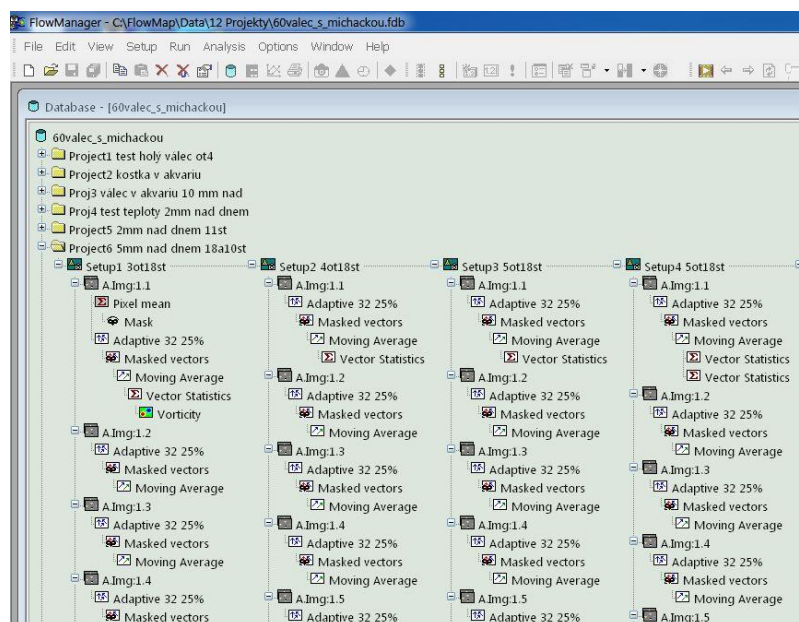
¹⁵ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: System Hub*. 1. Skovlunde, Dánsko, 2003. ISBN 9040U4122.

5.1.4. Nastavení počítače

V počítači musí být nainstalován všechny potřebný software a možnost připojení 100 Mbit ethernetového kabelu, díky kterému probíhá komunikace mezi jednotlivými prvky celého systému a 1 Gbit pro rychlý přenos naměřených dat. V počítači dochází k nastavení všech TCP/IP adres, které umožňují komunikaci mezi jednotlivými prvky. Dále slouží k prohlížení a upravování naměřených hodnot a vytváření výstupů.¹⁴

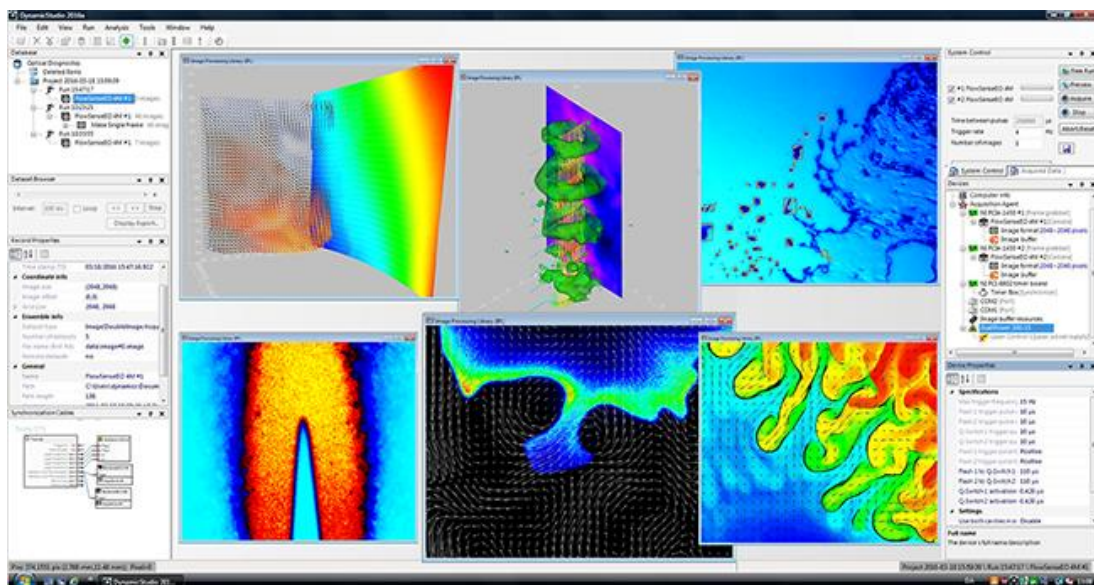
5.1.5. FlowManager

Jedná se o program, ve kterém se provádí veškeré nastavení, vytvářejí se projekty a je možnost kontrolovat a upravovat již vytvořené projekty. V programu je stromová databáze všech informací (projekty, nastavení, výsledky měření a knihovna zařízení). Dále se v programu nastavují jednotlivá zařízení, parametry proudění, druh použitých částic, měřítko). V program také dochází k zobrazování vektorových map a jejich zpracování.



Obr. č. 20 Ukázka z programu FlowManager 4.71

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.



Obr. č. 21 Ukázka z novějšího programu FlowManager [14]

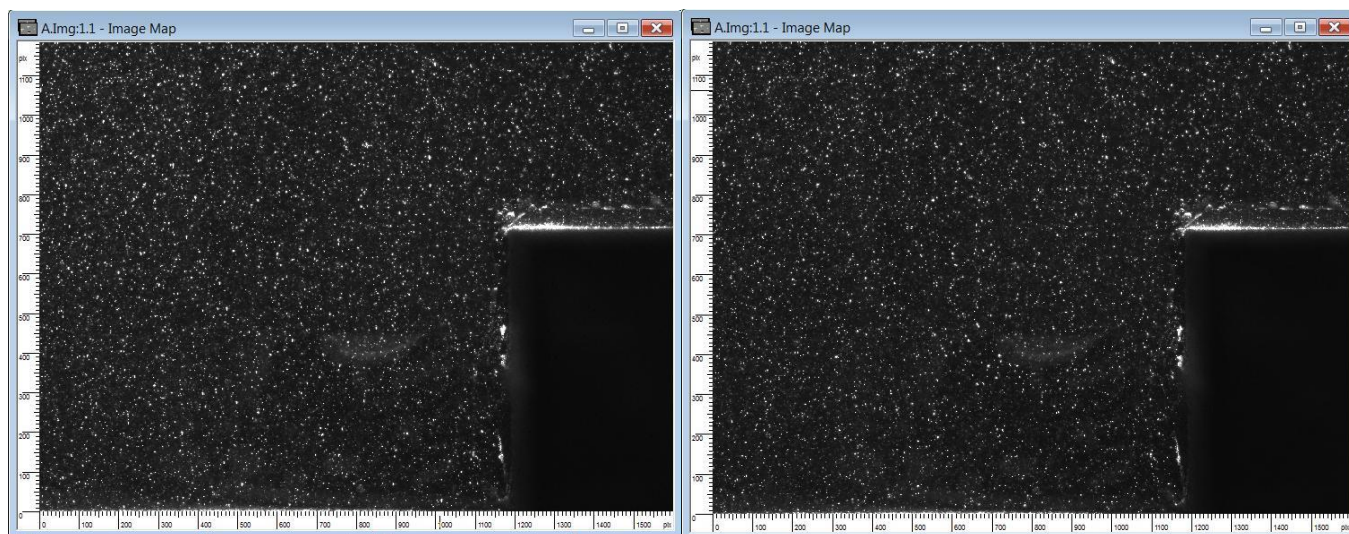
6. Zpracování a vyhodnocování naměřených dat

Každý měřicí systém má svůj software, ve kterém dochází k vyhodnocování a úpravě všech naměřených dat a vytváření výstupů, které lze následně prezentovat.

Při vyhodnocování se využívají dva snímky, které byly pořízeny při měření. Tyto dva snímky jsou základním kamenem pro další extrakci naměřených dat a vytváření výstupů. Postup při vyhodnocování a zpracování má následující základní postup:

- vytvoření dvojce snímků,
- korelace,
- maskování vektorů,
- odstranění chybných vektorů,
- průměr z celé sady měření.

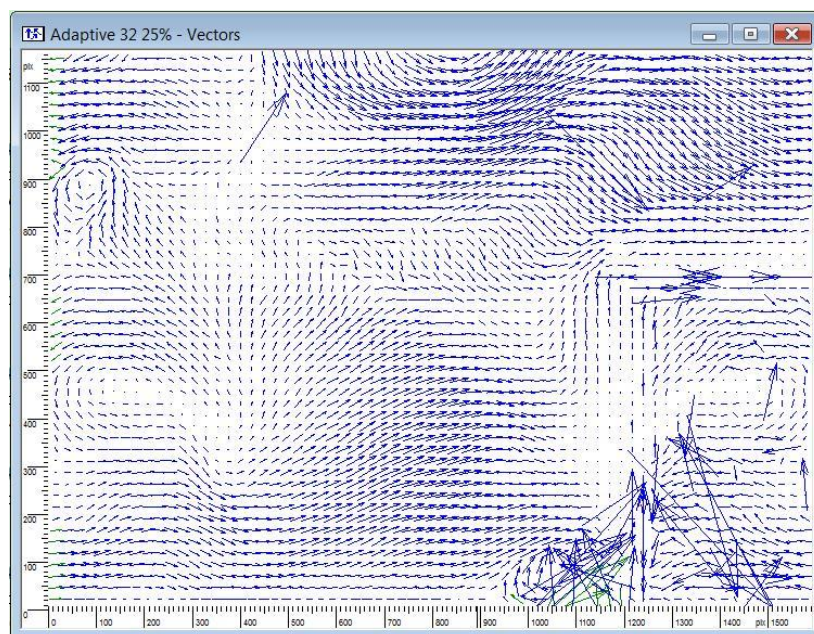
Mimo tyto základní funkce program FlowManager nabízí i mnoho jiných funkcí pro zpracování naměřených dat, ale většina jich vychází z těchto základních kroků.



Obr. č. 22 Dvojce snímků z vlastního měření (první vlevo, druhý vpravo)

6.1. Korelace

Jak už bylo zmíněno výše, existuje několik způsobů korelace, které lze použít při vyhodnocování snímků. Nejjednodušší metodou je auto – korelace, složitější je vzájemná korelace a nejsložitější a nejpřesnější je adaptivní korelace.



Obr. č. 23 Ukázka korelace dvojice snímků z obr. č. 22

6.1.1. Auto - korelace

Nejstarší využívaná metoda, která v minulosti patřila mezi nejrozšířenější. Nevýhodou bylo, že touto metodou nešlo určit, která ze zaznamenaných pozic částice byla na začátku a která na konci měření. Bylo to způsobeno tím, než nebyla technika na vytvoření dvou snímků dostatečně rychle za sebou, ale všechny obrazy částic byly zaznamenány pouze na jeden snímek. Tento snímek byl pak korelován sám se sebou – přesněji se svojí posunutou verzí.¹⁴

Nevýhodou této korelace je, že hledaný vrchol vznikne uprostřed vyšetřované oblasti a od něj se odvíjejí ostatní velikosti vektorů. Není tedy možno touto metodou určit i nulové velikosti rychlostí vektorů, neboť při vyhodnocování pokaždé vznikne pohyb, ač k němu nemusí ve skutečnosti docházet. Za výhodu této korelace se dá označit možnost rychlého výpočtu a získání předběžného obrázku sledovaného jevu.¹⁴

Hlavní nevýhodou je ale směrová nejednoznačnost. Při této korelaci totiž musí sám uživatel vložit informaci o tom, kterým směrem dané médium proudí. Což v určitých případech může být poměrně obtížné.

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.

6.1.2. Vzájemná korelace

Vzájemná korelace probíhá mezi dvojicí pořízených snímků. Dochází k porovnávání jednotlivých vyšetřovaných oblastí (interrogation areas) na jednotlivých snímcích a opět se hledá vrchol, který reprezentuje posun částice a tedy i velikost vektoru rychlosti. Funkci vzájemné korelace lze diskrétně vyjádřit pomocí vzorce: ¹⁴

$$\phi_{fg}(m, n) = E[f(m, n), g(m, n)] \quad (3)$$

Rovnici (3) lze přepsat do tvaru: ¹⁴

$$\phi_{fg}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k, l) \cdot g(k + m, l + n) \quad (4)$$

Kde:

ϕ_{fg} diskrétní vyjádření funkce

$f(k, l)$ funkce popisující intenzitu světla v čase t

$g(m, l)$ funkce popisující intenzitu světla v čase $t + \Delta t$

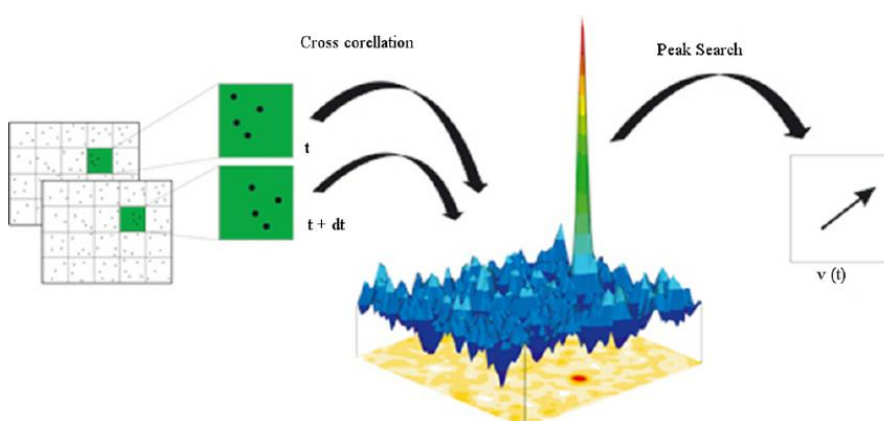
Rovnice (4) tak představuje diskrétní vyjádření vzájemné korelace mezi dvěma snímky. Běžně v literatuře bývá vzájemná korelace vyjádřena v normalizovaném stavu pouze čísly 0 a 1, ale v tomto případě potřebujeme znát přesné hodnoty, protože vysoké hodnoty funkce znamenají velkou shodu při pohybu jednotlivých částic a naopak malé hodnoty této funkce znamenají malou shodu v pohybu částic. ¹⁴

Při vzájemné korelaci může dojít k situaci, kdy některé z částic unášené proudem vystoupí z obrazu a nejsou buď na prvním, nebo druhém snímku. Při této situaci vyhodnocovací software nepřestává s těmito částicemi uvažovat, ale snaží se doplnit chybějící částice na opačném snímku dle předpokládaného pohybu ostatních částic, u kterých si je program jistý jejich pohybem. Tato situace se nazývá „loss-of-pair“ což lze volně přeložit jako „ztracený pár“. ¹⁴

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.

Každopádně hledaný vrchol lze přesně určit a prohlásit ho za nejlepší shodu mezi funkcemi $f(m,n)$ a $g(m,n)$ v případě, když je množství shodujících se částic dostatečně veliké. Poloha tohoto vrcholu je přesně dána průměrným pohybem všech částic.¹⁴

Hlavní výhodou oproti auto-korelaci je směrová jednoznačnost. Při vyhodnocování víme, která poloha částice byla první a která byla druhá. Což přispívá k přesnějšímu vyhodnocení dvou po sobě jdoucích snímků.



Obr. č. 24 Princip vzájemné korelace [15]

6.1.3. Adaptivní korelace

Součástí programu FlowManager je i technika, která se jmenuje adaptivní korelace. Je základním prvkem při vyhodnocování a počítání vektorových map z dvojice snímků pořízených kamerou.¹⁶

Základním principem je víceúrovňový algoritmus, který provádí vzájemnou korelaci. Každý stupeň vychází z předchozího a tím dochází stále k většímu zpřesňování výstupu. Při prvním stupni se porovnává druhý snímek s prvním, aby se určil přibližný posun a jeho směr. Tato informace se využije v dalším stupni k posunutí vyšetřované oblasti na druhém snímku oproti prvnímu snímku. Dříve se všechny vyšetřované oblasti posouvali stejným směrem a o stejnou vzdálenost. Díky novější adaptivní korelaci už je možno posouvat jednotlivé vyšetřované oblasti nezávisle vzhledem k ostatním což vede k velkému zpřesnění.¹⁶

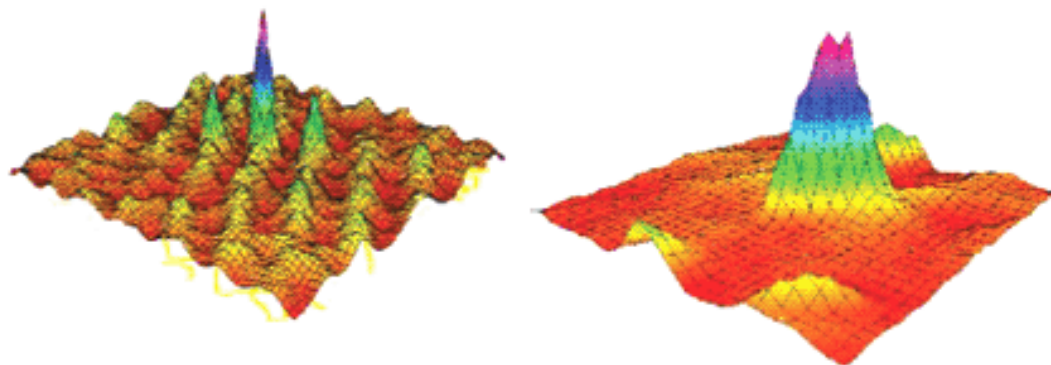
¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.

¹⁶ DANTEC DYNAMICS. *Adaptive Correlation: Addendum to FlowManager*. 1. Skovlunde, Dánsko, 2000. ISBN 9040U4122.

Při korelaci je tedy plocha rozdělena na vyšetřované oblasti tzv. „gridy“. Velikost těchto gridů se určuje podle požadované přesnosti. S jemnějším rozložením gridů dochází k větší přesnosti výstupu. Výhodou nové adaptivní korelace je, že při každém stupni korelace je možné upravit tuto velikost gridů horizontálně i vertikálně dle potřeby uživatele. I při změně velikosti jsou využívány předešlé stupně korelace pro vyhodnocení pohybu částic. Díky těmto vlastnostem je adaptivní korelace schopna vyhodnocovat vyšetřované oblasti o polovinu menší než běžná vzájemná korelace.¹⁶

Při určování rozlišení platí nepřímá úměra, kdy při menších vyšetřovaných oblastech se zvětšuje počet vektorů, které je potřeba vyhodnotit. Jak bylo zmíněno tak při metodě PIV se neměří rychlost tekutiny, ale částec, které jsou tekutinou unášeny. Je tedy nutné při určování rozlišení nezapomínat, že existuje omezení časem mezi jednotlivými snímky a zároveň i velikostí vyšetřované oblasti. Při špatně zvoleném rozlišení totiž může docházet k chybnému určení směru proudění. Pokud je proudnice například zaoblená, ale dojde k špatnému určení velikosti vyšetřované oblasti tak se vektor může napřímít a výsledkem tedy být přímka, která přesně nekopíruje pohyb částice.¹⁶

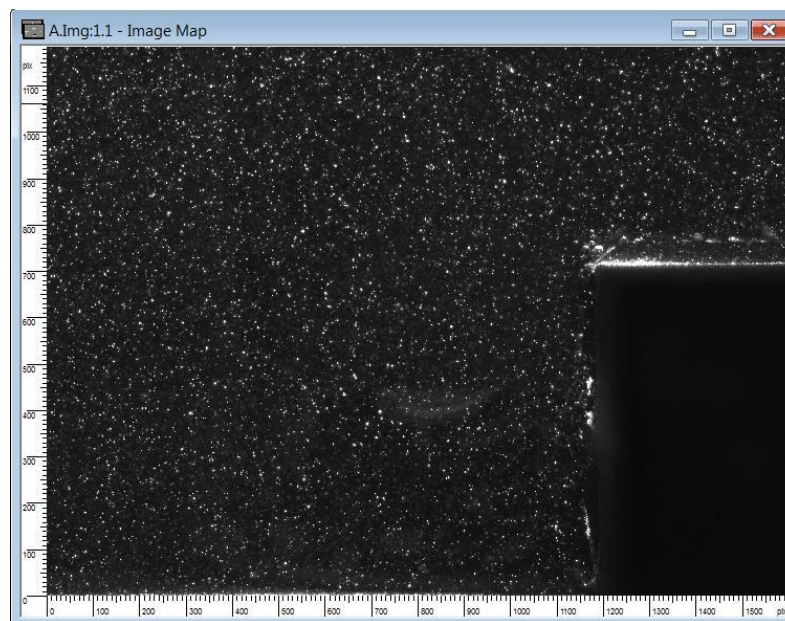
Rozdíl mezi adaptivní a klasickou vzájemnou korelací je tedy ten, že při vzájemné korelaci se nemění poloha gridů, ale při adaptivní dochází k posunu i gridů a hledá se tedy nejlepší možná varianta posunu částic.



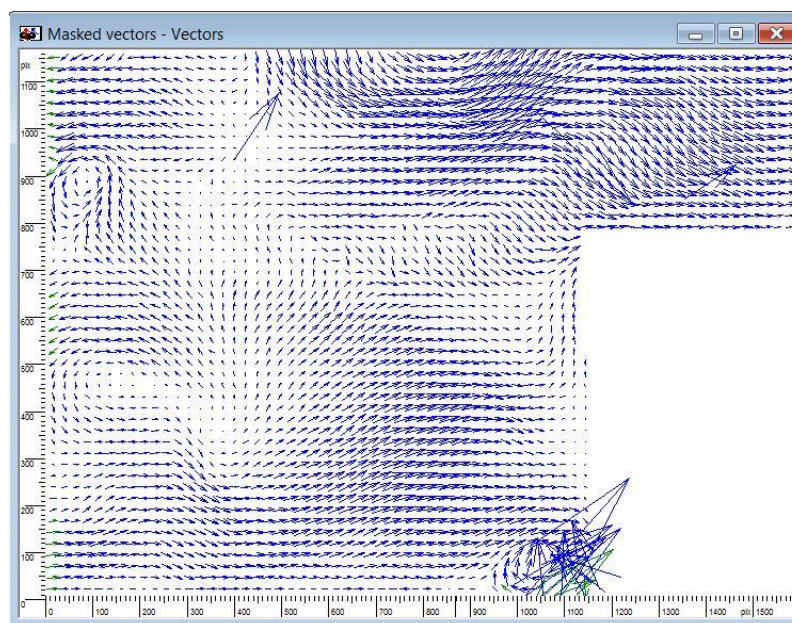
Obr. č. 25 Rozdíl mezi auto-korelací (vlevo) a vzájemnou korelací (vpravo) [16]

6.2. Maskování vektorů

Další krok, který následuje po korelaci je vytvoření masky. Masku se vytváří pro každé měření (polohu laseru a kamery) jednotlivě. Jedná se o určení plochy na snímcích, kde žádné vektory nejsou (hrany nádoby apod.). Algoritmus korelace totiž vypočítá vektory i na místech kde nedochází k proudění a je potřeba je z dalšího vyhodnocování vyloučit. K vytvoření masky a zamaskování vektorů slouží funkce *Mask*.



Obr. č. 26 Viditelná hranice modelu, ze které je pak vytvořena maska



Obr. č. 27 Zamaskování obrázku č. 23 dle masky vytvořené z obrázku č. 26

6.3. Odstranění chybných vektorů - proces validace

Po zamaskování stále může ve vytvořeném rychlostním poli zůstat několik chybných vektorů, o kterých jsme předem schopni říci, že nevyhovují a je nutno je tedy vyloučit. K tomuto účelu je v softwaru FlowManager několik nástrojů, např.: funkce *Range* (Rozsah) nebo *Moving average* (Klouzavý průměr). Při procesu validace lze změnit stav vektorů na několik různých typů (odstranit, vyjmout z výpočtu i když leží ve vyhodnocovaném poli, vyjmout z důvodu, že se nenachází v proudovém poli).

6.3.1. Funkce Range

Touto funkcí lze omezit rozpětí velikosti vektorů, které jsou považovány za správné. Lze tedy nejen vyloučit příliš velké vektory (občas vzniknou při korelaci z důvodu okamžitého místního nedostatečně kvalitního obrazu částic – např.: málo částic, příliš velká nečistota, příliš velký posun, příliš malý posun, apod.), ale naopak i třeba nulové a to dle potřeby a požadavků na výstup. Na obrázku č. 28 jsou zobrazeny červeně.

Funkce Range využívá následující vzorec při validaci dat:¹⁴

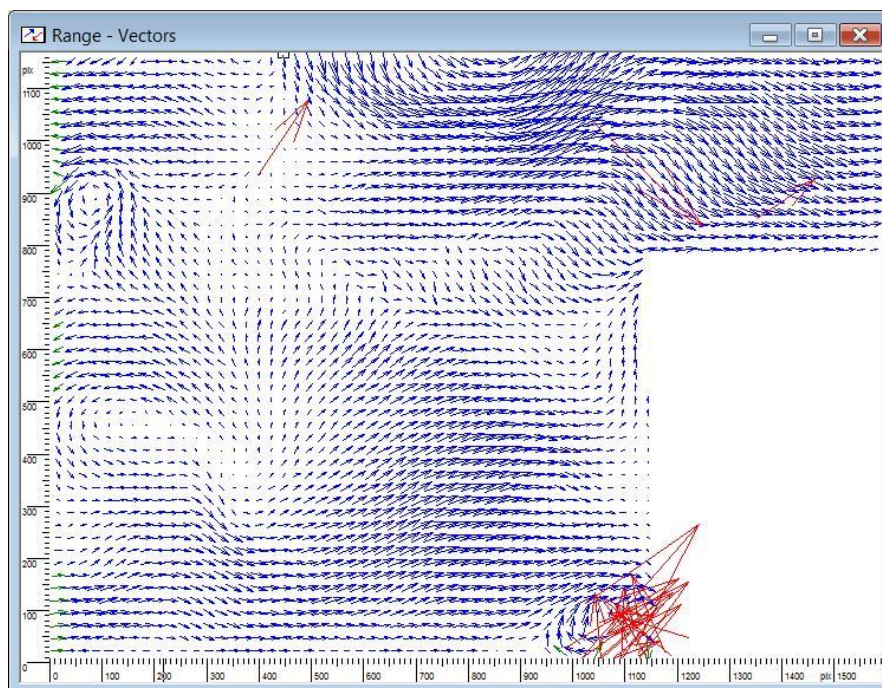
$$\textit{Minimum speed} \leq \|v\| \leq \textit{Maximum speed} \quad (5)$$

Kde:

$$\|v\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \dots \text{délka vektoru rychlosti}$$

Tuto funkci lze přepsat i do jednotlivých složek vektoru rychlosti.

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.



Obr. č. 28 Použití funkce Range na obrázek č. 27

6.3.2. Funkce Klouzavý průměr (Moving average)

Obvykle závěrečným (případně jediným) validačním nástrojem při zpracování dvojice vstupních snímků je použití klouzavého průměru – vychází ze základní úvahy, že je fyzikálně nemožné, aby se v proudovém poli vyskytovali těsně vedle sebe zásadně rozdílné rychlosti proudění. Program pro tuto úpravu nabízí funkci Moving average (klouzavý průměr). Při nastavování se jemně volí hranice mezi možným a nepravděpodobným gradientem v rychlostním poli.

Při použití této funkce je také možno nahradit vektory, které byly v předešlých krocích vyloučeny. Funkce postupně prochází jednotlivé sousední vektory a porovnává jejich velikost. Při nalezení vyčnívajícího vektoru se jeho velikost upravuje podle sousedních vektorů tak, aby lépe vyplňoval danou část pole. Výsledkem je plynulé rychlostní pole bez vyčnívajících vektorů s plynulými přechody mezi jednotlivými částmi. Ukázka je na obrázku č. 29, kdy opravené vektory mají zelenou barvu (dolní pravý roh).

Výpočet této validace probíhá dle vzorce: ¹⁴

$$\bar{v}(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=x-\frac{n-1}{2}}^{x+\frac{n-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{n-1}{2}}^{y+\frac{n-1}{2}} v(i, j) \quad (6)$$

Kde:

$\bar{v}(x, y)$ průměrný vektor rychlosti

(m, n) velikost okolní plochy

Vektor je odmítnut pokud platí: ¹⁴

$$\|v(x, y) - \bar{v}(x, y)\| > k \quad (7)$$

Kde:

$v(x, y)$ vektor rychlosti

$\bar{v}(x, y)$ průměrný vektor rychlosti

k nějaké číslo (v ang. lit. „some number“)

Ve vzorci (7) je uveden člen k , který lze vyjádřit: ¹⁴

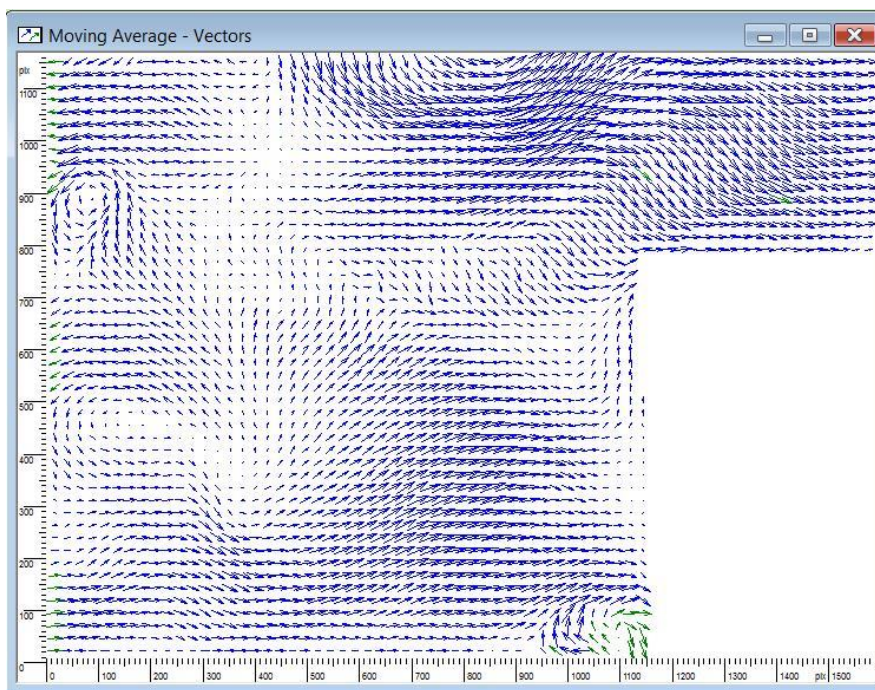
$$k = \alpha \max \|v(x, y) - \bar{v}(x, y)\| \quad (8)$$

Kde:

α faktor přípustnosti

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.

Celý výpočet validace probíhá tak, že v prvním kroku je vypočítán průměr velikosti vektoru dle vzorce (6). Jako další krok dochází k hledání maxima $\|v(x, y) - \bar{v}(x, y)\|$. Ve chvíli kdy je maximum nalezeno dochází k dopočítání hodnoty k dle vzorce (8). Faktor přípustnosti α nabývá hodnot od 0 do 1. Při této validaci tedy dochází k odmítání vektorů podle procentuální hodnoty maxima v daném poli (faktor přípustnosti po vynásobení 100 představuje procentuální vyjádření maximální hodnoty).¹⁴



Obr. č. 29 Použití funkce klouzavého průměru na obrázek č. 28

6.3.3. Funkce Peak

Tento způsob validace odstraňuje jednotlivé vektory na základě hodnot velikosti vrcholů (peaks) v korelovaném prostoru. Tato funkce hledá dva nejvyšší vrcholy, které se porovnávají. Čím více shodných částic v poli tím větší je hodnota korelační funkce a tedy i vrcholu. Jenomže tato velikost nezáleží pouze na množství shodných částic, ale i na intenzitě světla ve vyšetřované oblasti. Takže pokud není celá plocha jednotně nasvícena tak se použití této validace nedoporučuje.¹⁴

¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.

Při použití této validace dochází k výpočtu poměru nejvyššího vrcholu a druhého nejvyššího vrcholu. Čím je poměr větší tím lepší je vstupní signál (velký rozdíl mezi nejvyšším vrcholem a druhým nejvyšším – jedná se o teoreticky o šum). Vektory jsou odstraňovány dle nastavené limitní hodnoty tohoto poměru.¹⁴

6.3.4. Funkce Manuální validace

Tato funkce představuje nejjednodušší validaci, protože při ní nedochází k žádným výpočtům. Jedná se o subjektivní rozhodování uživatele, který vektor odstranit a který nechat beze změny.

Validace probíhá tak, že uživatel přímo v okně s vektorovým polem kliká na vektory, které si přeje upravit (smazat, vyřadit z výpočtu, vyřadit z výpočtového pole).

V novějších verzích softwaru FlowManager již není k dispozici, protože ji může nahradit funkce maskování.

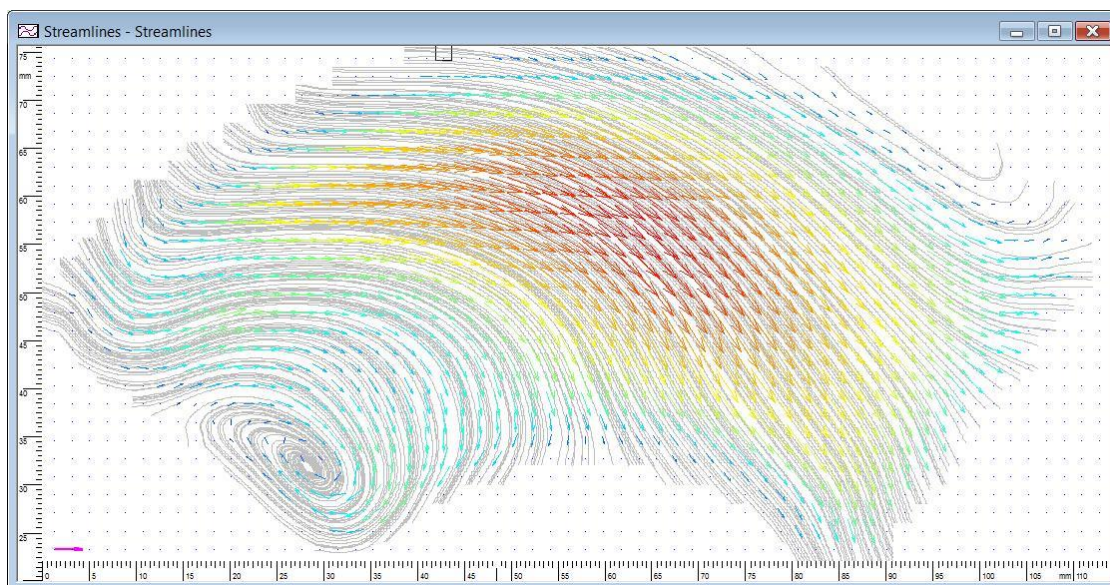
6.4. Ostatní výstupy

Software FlowManager nabízí několik způsobů jak prezentovat naměřená data. Jde vytvořit například mapy proudnic, mapy vířivosti, vytvářet vlastní funkce a výstupy v programu MATLAB. Nejpoužívanějším způsobem výstupu je časově střední – průměrné vektorové rychlostní pole, které se vytváří ze všech validovaných okamžitých stavů rychlostního pole v dané sadě měření.

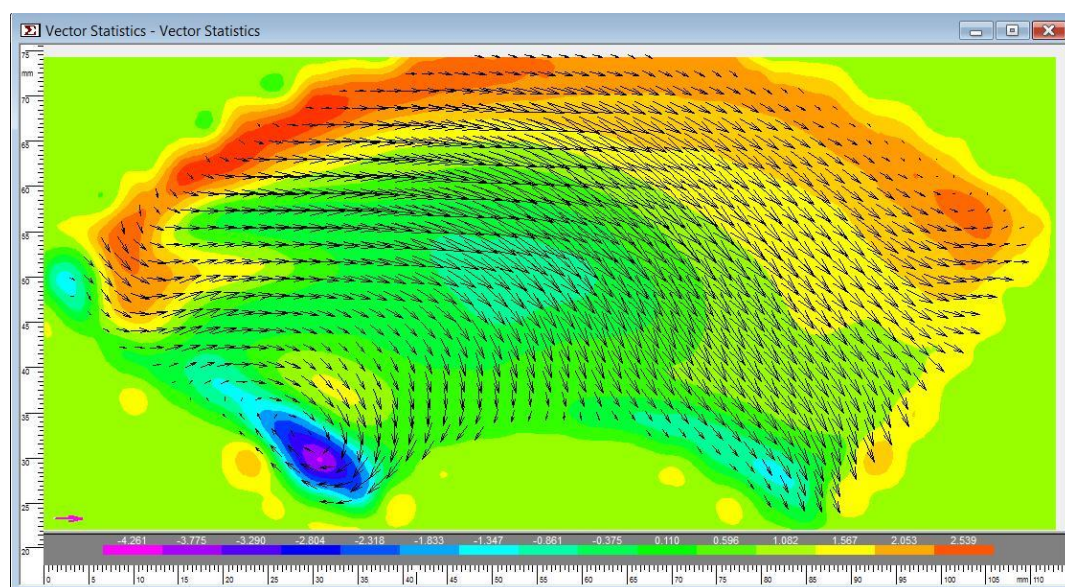
Jednotlivé výstupy se dají kombinovat a vytvářet například rychlostní vektorové pole podložené vířivostí. Výstupy se dají i barevně upravovat a doplňovat měřítka, aby bylo jasné čitelné a přehledné vše co obsahují. Dalším volbou, která se běžně používá, je zobrazení referenčního vektoru pomocí kterého lze odhadnout velikost vektorů v poli.

Na obr. č. 30 až 32 jsou příklady různých možných výstupů.

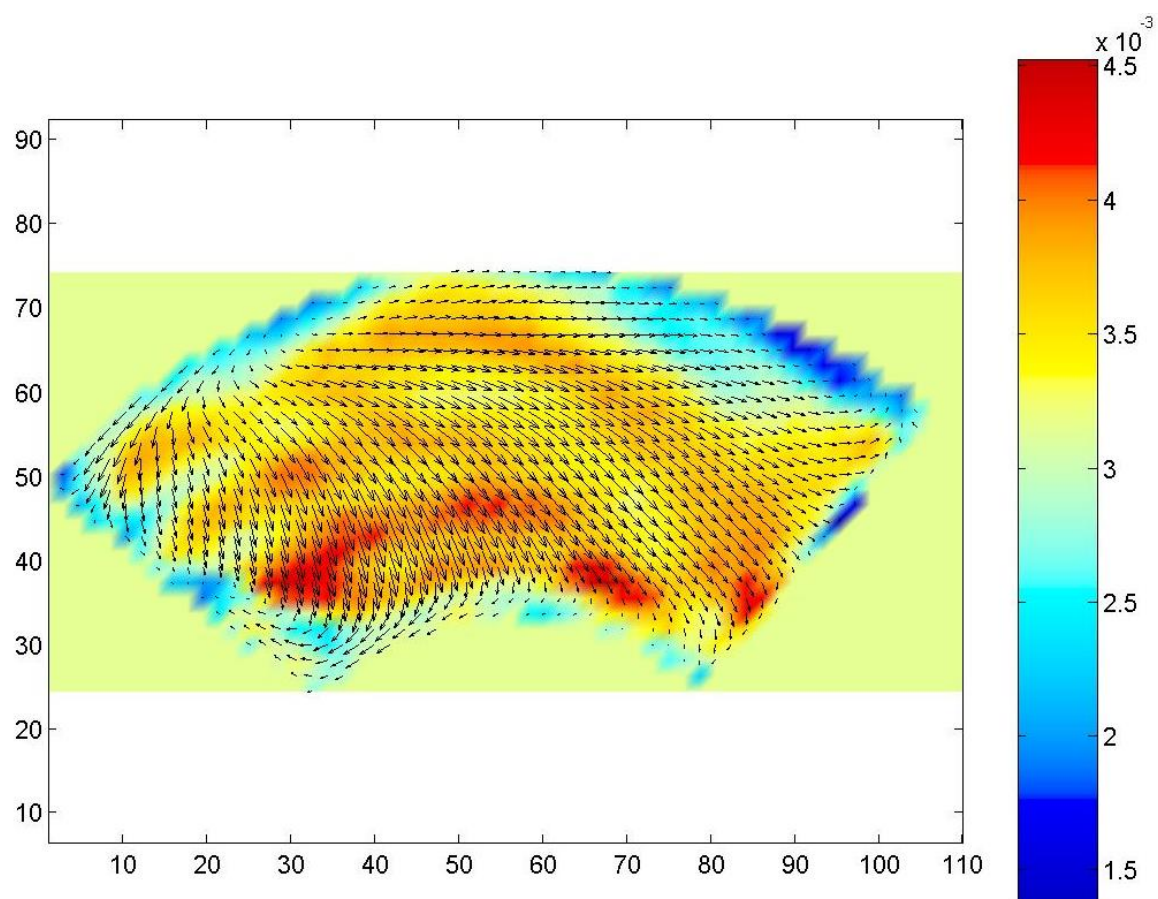
¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.



Obr. č. 30 Vykreslení proudnic a zobrazení vektorů rychlostí



Obr. č. 31 Vykreslení vířivosti a zobrazení vektorů rychlostí



Obr. č. 32 Vykreslení kvadratických odchylek délek vektorů rychlosti (vypočítaných pomocí MATLABu) a zobrazení vektorů rychlostí

7. Postup vlastního měření

Při vlastní práci byla použita měřicí souprava PIV: Dvojitý pulzní laser typu Nd:YAG, výrobce New Wave Research, typ Gemini PIV, s nastavitelnou opakovací frekvencí 0 až 15 Hz. Záznamová kamera FlowSense 2M od výrobce Dantec s rozlišením 1600 x 1200 pixelů. Synchronizaci všech prvků v měřicím kompletu zajišťovala centrální řídicí jednotka System Hub od firmy Dantec, PC s měřicím a vyhodnocovacím softwarem Flowmanager 4.71.

K syčení vody byly použity dodatečně přidané částice Polyamid Seeding Particles (PSP) se střední velikostí 50 μm . Dále byla využita magnetická míchačka a model, který byl vyroben přímo dle požadavků Masarykovy Univerzity.



Obr. č. 33 Ukázka pracoviště 1



Obr. č. 34 Ukázka pracoviště 2

7.1. Popis modelu

Model, který byl při měření použit, se skládal ze dvou válců vložených do sebe mezi kterými se nacházejí dva segmenty u dna, které slouží k rozrážení proudu tak, aby vznikl vířivý pohyb v modelu. Vnější válec slouží pouze k vymezení prostoru, zatímco vnitřní válec má velký význam při vytváření potřebných proudových poměrů v meziválcovém prostoru. Do vnitřního válce se vkládá kovový váleček, který se při zapnutí magnetické míchačky roztáčí a vytváří tak pohyb vody v modelu. Vnitřní válec má hlavní funkci k bránění přímému ovlivnění pohybu v celém modelu. Vzhledem k této okolnosti se jedná o velmi vhodné uspořádání modelu tak, aby vznikl rotační pohyb v zájmovém meziválcovém prostoru modelu, ale zároveň nebyl plně ovlivněn právě tělískem, které tento pohyb vytváří.

Nevýhodou modelu pro měření PIV je válcový vnější povrch modelu. Tato oblá plocha by způsobovala při měření optickou deformaci. Tento problém byl vyřešen vložením celého modelu do skleněné nádoby tvaru kvádru. Tento kvádr byl naplněn vodou do stejné výšky jako válcový model. Obraz snímáný kamerou i světelný list prochází přes rovinnou plochu kvádru. Při průchodu vodou od nebo k válcovému modelu již téměř nedochází k ohybu světla na rozhraních různě opticky hustých hmot.

Model byl umístěn na zmíněnou magnetickou míchačku, která po zapnutí začala s kovovým tělískem uvnitř vnitřního válce modelu vytvářet pohyb vody. Na použité míchačce lze nastavit několik rychlostních stupňů pomocí otočného mechanismu. Rychlost lze nastavit mezi stupni 1 až 7.

Celý model byl vyroben z průhledného plexiskla z důvodu umožnění prostoupení světelného listu bez překážek do celého modelu a možnosti fotografovat osvětlené unášené částice. Pouze dno a segmenty byly natřeny matnou černou barvou a to z důvodu pohlcení světla z laseru (cílem bylo, aby světlo nebylo odráženo zpět do modelu). Další problém, který nastal, byl způsoben bílou barvou a lesklým povrchem tělíska ve vnitřním válci. Při nízké poloze světelného listu odrážel světlo laseru a způsoboval na snímcích přesvětlené plochy, které narušovali měřené pole. Tento problém byl vyřešen oblepením vnitřního válce černou lepicí páskou, která zabráňovala průniku světelného listu až k tělísku a tedy nežádoucím odrazům světla.



Obr. č. 35 Pohledy na původní model s míchačkou, jak jej používají na MU.

7.2. Volba základních parametrů

Volba rychlosti otáčení míchadla pro měření se ukázala jako velmi podstatná. Stupně 1 a 2 byli vyloučeny pro příliš pomalou rychlost, která vznikla v meziválcovém prostoru. Stupeň 6 byl naopak příliš rychlý, takže docházelo k rozkmitání tělíska a jeho poskakování ve vnitřním válci na místo pravidelné rotace. Při měření tedy byly využity otáčky dané hodnotou na stupnici míchadla 3, 4 a 5. Tyto rychlosti nejlépe vystihují požadavky MU na výstupy tohoto měření. Rychlost 3 se ukázala, že už je dostatečně velká, aby vzniklo výraznější proudění v meziválcovém prostoru. Nejsložitější situace z pohledu proudění nastala při rychlosti 4. Jde totiž o oblast, při které nastala uvnitř míchačky největší změna v rychlosti a tvaru proudění. Jedná se o jakousi přechodnou oblast, která vypadala z pohledu měření nejzajímavěji. Poslední rychlost 5 už měla opět ustálenější charakter, ale s největšími rychlostmi v celém poli.

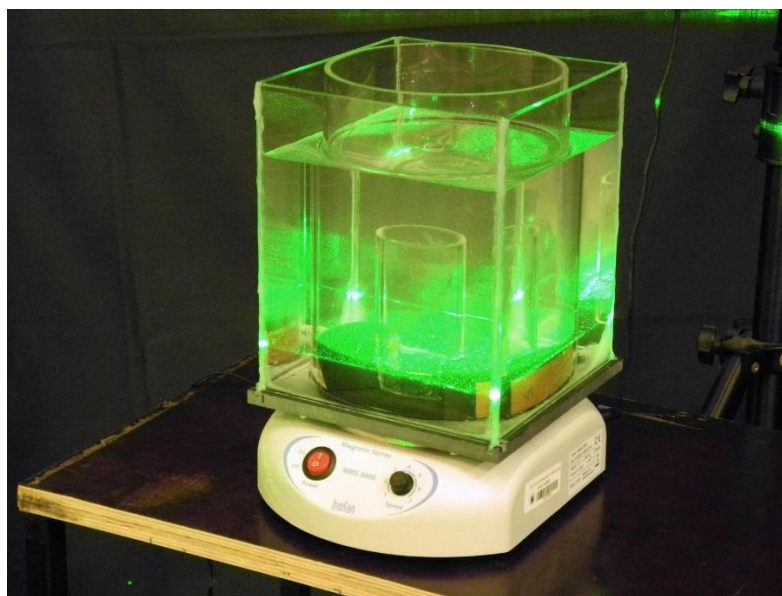
Další důležitým požadavkem od MU byla teplota vody při měření. Dle požadavků měla mít voda teplotu 10°C. Při celém měření byla voda v celém modelu neustále ochlazována

na požadovanou teplotu. Ochlazování probíhalo rozpouštěním ledu v modelu s průběžným měřením teploty. V přípravné fázi měření byla zjišťována i závislost rychlosti proudění v poli na teplotě vody. To bylo provedeno ve vodorovné poloze ve vzdálenosti 10 a 20 mm od dna modelu při teplotách od 8 do 19 °C.

Rychlosti i teploty pro jednotlivé části měření jsou vždy uvedeny v popisu výstupu pro dané měření.

Dalším základním parametrem, který ovlivňuje proudění, byla hloubka vody v modelu. Tato hloubka byla zvolena 155 mm výšky vodního sloupce nad vnitřním dnem modelu. Do modelu byla vždy doplňována destilovaná voda.

Nastavení laseru bylo vybráno po několika zkušebních měřeních tak, aby co nejlépe vyhovovalo požadavkům na výstupy. Pro jednotlivé rychlosti i jednotlivé sady měření byla vždy měněna rychlost snímání. Hodnoty intervalu mezi záblesky laseru se pohybovali v rozmezí 2000 až 10 000 μ s. Pro pomalejší rychlosti otáčení magnetické míchačky byly voleny vyšší časové intervaly. Při měření byla použita frekvence opakování 5 Hz při měření a 1 Hz při nastavování soustavy.



Obr. č. 36 Osvícený model

7.3. Postup prací před vlastním měření

Před každým měření byla potřeba zopakovat řadu kroků, které předcházejí vlastnímu měření PIV soustavou.

Celý proces měl několik kroků:

- zapnutí počítače a programu FlowManager,
- zapnutí míchačky,
- zapnutí FlowMap system hub a jeho inicializace po naběhnutí v programu FlowManager v počítači,
- zapnutí laseru, stažení výkonu na minimum a přechod do fáze stand-by,
- otevření daného projektu v softwaru.

Další část lze rozdělit na práci v softwaru FlowManager a na práci s nastavením laseru a kamery. Tyto práce se protínají a jejich nastavení probíhá zároveň:

Práce v programu FlowManager:

- nastavení rychlosti záblesků laseru,
- nastavení rychlosti snímání kamery,
- kontrolní zapnutí všech částí a vytvoření několika vzorových snímků na zjištění správného nastavení jednotlivých komponentů,
- kontrola běhu systému,
- kontrola ukládání dat.

Práce s nastavením laseru, kamery, míchačky:

- nastavení výkonu laseru (pro nastavování snímání snížení výkonu, pro vlastní měření zvýšení výkonu),
- nastavení výšky světelného listu od dna modelu,
- kontrola kolmosti světelného listu na stěnu modelu,
- kontrola polohy kamery,
- kontrola zaostření kamery,
- nastavení otáček na míchačce,
- kontrola množství částic ve vodě,
- kontrola hloubky vody,
- kontrola teploty vody.

Po provedení všech těchto dílčích činností bylo možné prohlásit, že je přesně definované měrné pole a tedy začít s vlastním měřením.

7.4. Vlastní měření

Při vlastním měření bylo nutné neustále opakovat několik činností, které bylo potřeba provést i před měřením. Ve chvíli kdy vše vyhovovalo, začalo vlastní měření. Při vlastním měření už docházelo k ukládání dat do počítače.

Rozsah ukládaných dat byl určen na 200 opakování pro rychlosti 3 a 4. Pro rychlost 5 byl zvolen rozsah na 300 měření, kvůli větší rychlosti proudění a lepšímu zachycení všech jevů, které v modelu mohly nastat. Pro rychlost 5 byly snímány dvě série po 300 snímcích, kvůli zjištění opakovatelnosti a také kontrole jestli měření probíhá správně.

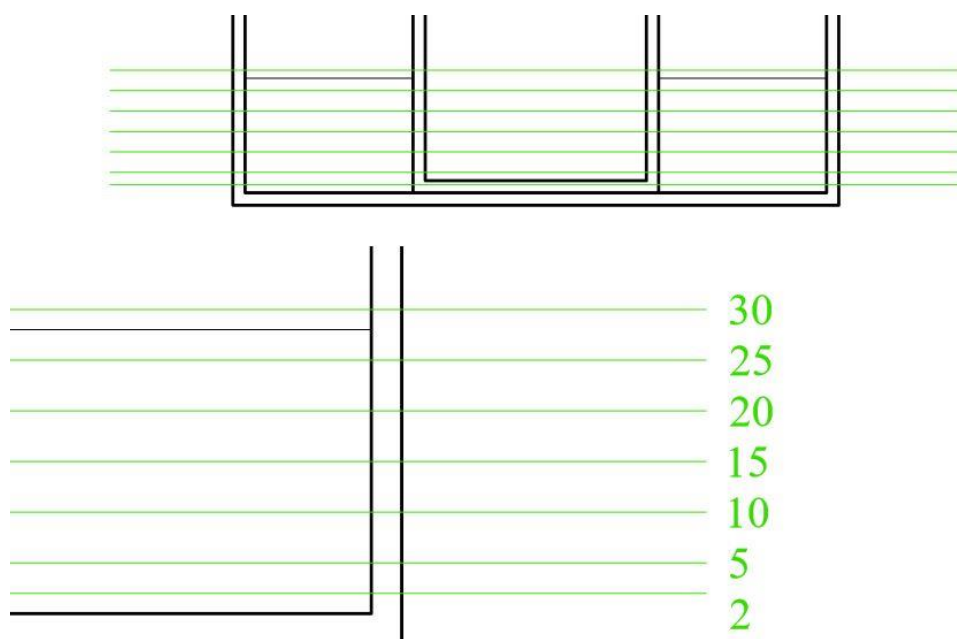
Při vlastním měření se vždy měřila jedna rovina pro všechny 3 rychlosti, aby nedocházelo k nepřesnostem stálým přenastavováním soustavy do daných poloh. Při zvyšování nebo snižování rychlosti na magnetické míchačce bylo nutno vždy počkat na ustálení proudových poměrů na hladině a hlavně uvnitř nádoby.

7.4.1. Zvolené roviny měření

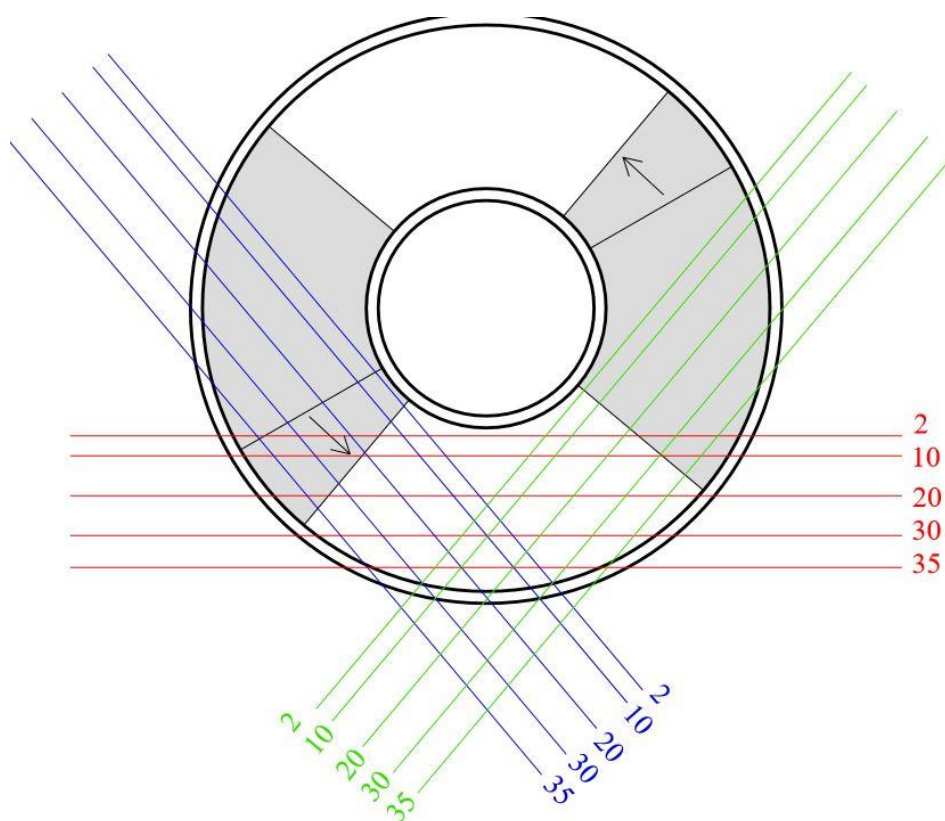
Při měření se měnila poloha světelného listu tak, aby došlo k co nejpodrobnějšímu rozboru proudových poměrů v meziválcovém prostoru. Měření probíhala v jedné sadě vodorovných rovin a třech sadách svislých rovin.

Vodorovná poloha byla měřena od vnitřního dna modelu a to směrem k hladině. Vzdálenosti měrných rovin, které byly měřeny: 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm. Bližší vzdálenost ke dnu než 2 mm dané provedení modelu neumožňovalo, protože už docházelo k osvětlování dna laserem a tedy nemožnosti dále vyhodnocovat pohyby unášených částic. A výška 30 mm od dna byla zvolena vzhledem k vrchní straně segmentů v meziválcovém prostoru.

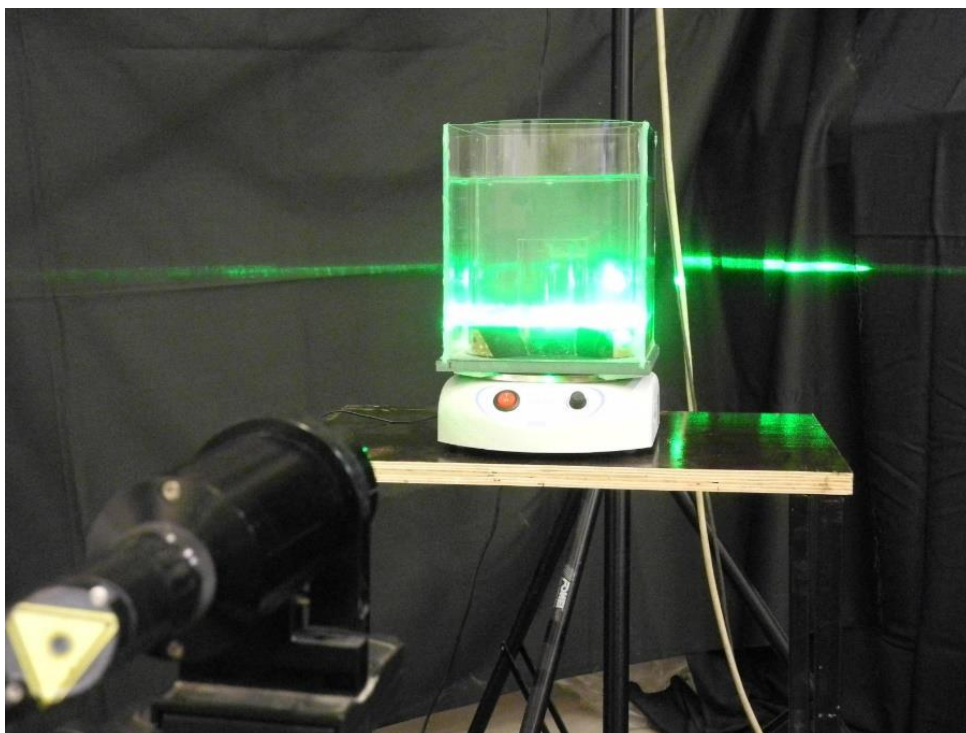
Svislé polohy byly měřeny tak, že v první poloze byl zabrán celý prostor mezi segmenty a další dvě polohy byly určeny tak, aby vždy kolmá osa procházela středem segmentu na jedné a na druhé straně. Vzdálenosti při tomto měření byly brány od vnější strany vnitřního válce směrem od středu. Tyto vzdálenosti byly 2, 10, 20, 30 a 35 mm.



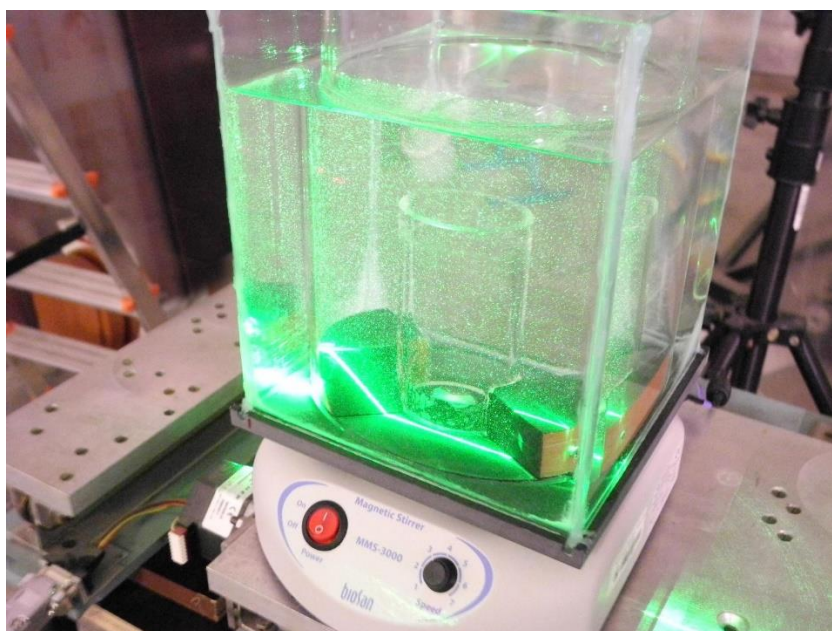
Obr. č. 37 Rozložení vodorovných rovin při měření



Obr. č. 38 Rozložení svislých rovin při měření (červeně přední poloha, zeleně poloha vpravo, modře poloha vlevo)



Obr. č. 39 Ukázka z měření vodorovné roviny



Obr. č. 40 Ukázka z měření svislé roviny

8. Zpracování naměřených hodnot

Při zpracování bylo nutné provést několik kroků, aby byly odstraněny nedostatky nebo případné chyby. Jako první věc bylo nutné projít většinu dvojic snímků a subjektivně zkontrolovat jestli nedošlo ke grafickému znehodnocení rozmazáním, přezářením snímku laserem (tato chyba se projevuje vytvořením „ocásků“ za jednotlivými částicemi) nebo rozvlněním hladiny během měření. Pokud takováto situace nastala, nekvalitní snímky byly vymazány. Při větším množství nekvalitních snímků byla celá sada měření opakována.

Prvním krokem tedy byla optická kontrola snímků. Na většině snímků při měření ve svislých rovinách došlo k rozzáření dna modelu, které způsobovalo chyby vektorů v blízkosti dna. Tato vada byla odstraněna tak, že došlo k úpravě jednotlivých snímků a to tím způsobem, že snímky byly oříznuty na spodní straně a dostatečný počet pixelů tak, aby už rozzáření dna nevadilo dalšímu vyhodnocování. Tento postup bylo nutné ručně provést u většiny snímků svislých měření.

Dalším krokem byla úprava měřítka mezi skutečností a obrazem u všech snímků. Jedná se o velmi důležitý krok, neboť při špatné volbě měřítka dochází v následném vyhodnocování k systematické chybě v určení velikosti rychlosti, která se později nedá odstranit a je nutno celý proces opakovat. Měřítka bylo ručně nastaveno u všech obrázků dle známe vzdálenosti v obraze. Jako známá vzdálenost byl použit rozměr meziválcového prostoru (vzdálenost vnějšího a vnitřního válce), která je 41 mm. Při nastavování měřítka se musel zvolit i správný poměr stran snímku. Takto byly ručně upraveny všechny snímky, aby mohlo začít vyhodnocování a provádění základních úkonů zpracování dat.

Při dalším zpracování naměřených dat bylo postupováno dle předpisu v kapitole 6. Jako korelace byla použita Adaptivní korelace, která poskytuje nejlepší a nejpresnější výsledky ve většině použití. Tato část byla časově nejnáročnější z celého měření.

Poté co byly veškeré snímky vyhodnoceny (korelace, zamaskování, range, klouzavý průměr) proběhla opět kontrola výstupů. Když vše vyhovovalo tak se vytvořil poslední a hlavní výstup z měření. Pomocí funkce „Vector statistic“ byl vytvořen průměr ze všech klouzavých průměrů a výsledkem tedy bylo časově střední rychlostní vektorové pole pro danou sadu měření, které bylo upraveno (barevná škála, doplnění referenčního vektoru) tak, aby nejlépe prezentovalo danou polohu měrné roviny a rychlosti otáčení míchadla.

Vytvořená časově střední vektorová pole byla následně doplněna pomocí MATLABu a speciálního skriptu o podložení, které na barevné škále znázorňuje rozložení kvadratického rozptylu hodnot (délek), kterého dané vektory nabývají. Při vytváření toho výstupu bylo

zjištěno, že program sám o sobě neumí vytvořit mapu kvadratický odchylek pro obě složky rychlosti najednou. Tento problém byl pro výstupy pro MU velmi zásadní. Při měření 2D (při měření 3D už toto dokáže vyhodnotit) totiž program nedokáže vyhodnotit společnou kvadratickou odchylku, ale pouze odchylku pro jednotlivé složky vektoru rychlost (U,V). Takže při použití pouze základních vlastností softwaru by byly vyrobeny dva výstupy, kdy na každém by byla kvadratická odchylka pouze pro jednu složku. To nebylo přijatelné, vzhledem ke skutečnosti, že by se jednalo a velmi matoucí a hlavně špatně čitelnou informaci. Tento problém je pravděpodobně zapříčiněn tím, že program sám nedokáže určit jaké změny s vektorem nastávají. Vektor totiž může vykonávat během měření několik pohybů, které nelze s přesností určit. Vektory se mohou natáčet (odklon od původního směru o daný úhel) nebo se může měnit jeho velikost. Oba tyto jevy mohou nastat současně a je velmi obtížné je určit. Kvůli tomuto problému byl napsán zvláštní skript, který po propojení FlowManageru s MATLABem už byl schopný tento výstup vytvořit. Ukázka toho skriptu je uvedena v přílohách této práce.

Výpočet kvadratické odchylky délky vektoru vychází ze vzorce: ⁵

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (v(x, y) - \bar{v}(x, y))^2 \quad (9)$$

Kde:

σ^2	 kvadratická odchylka (rozptyl)
$v(x, y)$	 vektor rychlosti na pozici X,Y
$\bar{v}(x, y)$	 průměrný vektor rychlosti na pozici X,Y

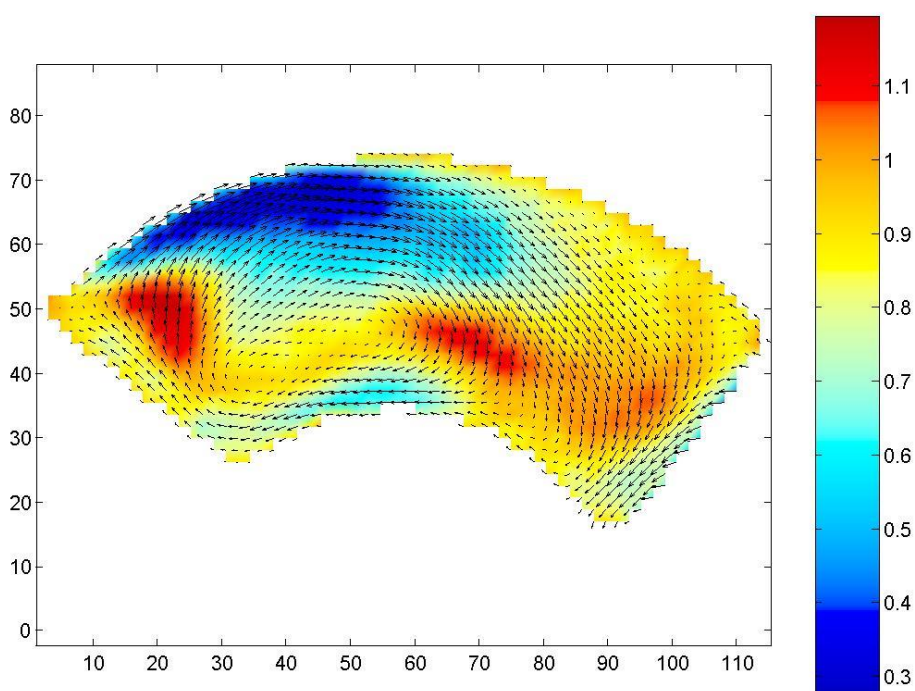
Určení kvadratické odchylky úhlů vektorů lze vypočítat dle vzorce (9), kdy stačí místo délky vektorů dosadit jednotlivé úhly odklonů pro každý vektor a jejich průměrnou hodnotu. Hodnota této odchylky nám říká, v jakém průměrném rozmezí se střední hodnota směru vektoru pohybuje a dává nám lepší představu o tom, jak moc je proměnný směr proudění v daném místě.

Dalším výstupem, který byl z programu FlowManager použit, jsou tabulky, které zobrazují polohu jednotlivých vektorů jak v pixelech, tak i v mm, skutečné vzdálenosti a velikost těchto

⁵ Matematika.cz: *Směrodatná odchylka* [online]. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.matematika.cz/smerodatna-odchylka>

vektorů při jednotlivých otáčkách. Dále obsahují průměrnou hodnotu rychlosti a maximální rychlost v daném vektorovém poli.

Při zpracování naměřených dat vlivu teploty na stav proudění v modelu bylo vytvořeno celkem 12 grafů, které zobrazují závislost délky vektoru rychlosti na teplotě vody. Tyto grafy jsou přiloženy v přílohách diplomové práce.



Obr. č. 41 Vykreslení kvadratických odchylek délek vektoru rychlosti (vypočítaných pomocí MATLABu) a zobrazení vektorů rychlostí

9. Vyhodnocení naměřených hodnot

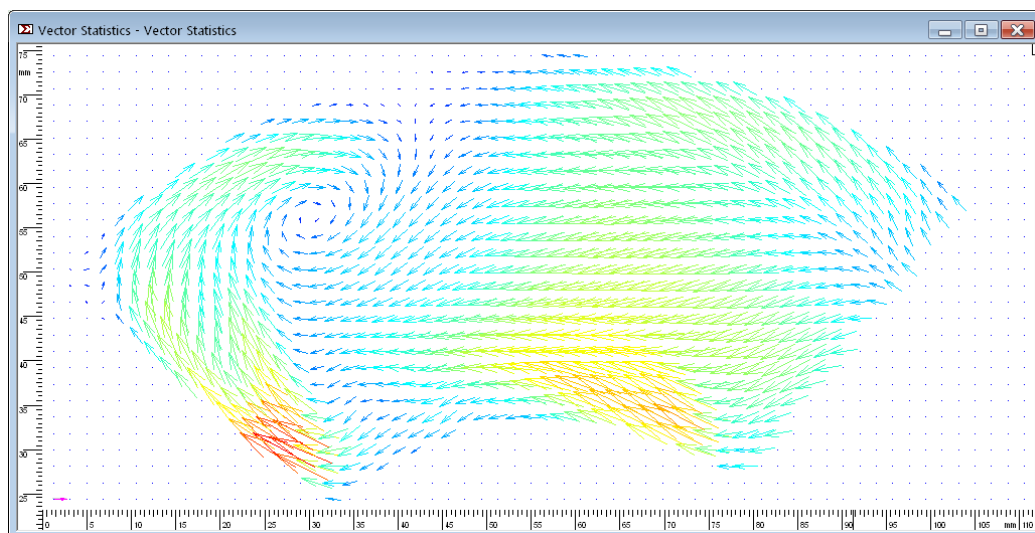
Celé vyhodnocení měřičské práce spočívá v prezentaci grafických výstupů doplněných o číselné hodnoty v tabulkách. Vyhodnocení naměřených hodnot má dvě části, které se odevzdávají spolu s diplomovou prací MU. Další výstupy, které bylo potřeba vyhodnotit je závislost rychlostních jevů na teplotě v modelu a autor se zaměřil i na opakovatelnost měření.

9.1. Grafické výstupy

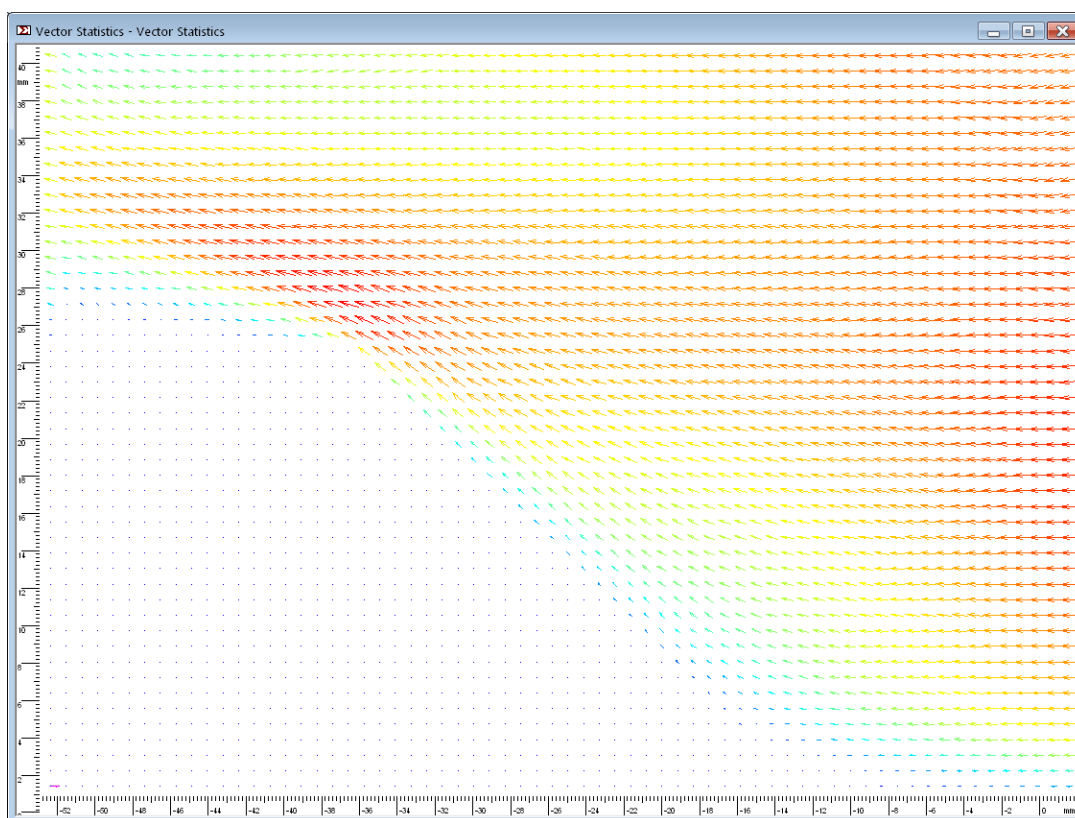
Na grafických výstupech lze vidět jednotlivá vektorová pole, která jsou zobrazeny v barevné škále, kdy teplejší barvy znamenají vyšší rychlost proudění (příklady na obr. 41 až 43). Ale je nutno pamatovat, že se jedná o průměr z 200 (resp. 300) opakování měření. Takže výsledkem je stav, který ve skutečnosti nemusí nikdy reálně v modelu nastat. Jedná se pouze o matematický (statistický) průměr a je nutno na tento výstup nahlížet pouze jako na ukazatel stavu, ke kterému proudění nejvíce inklinuje. Přesto software nenabízí lepší základní možnost jak takovéto množství dat prezentovat.

Druhým a třetím grafickým výstupem jsou vektorová pole, která jsou podložena kvadratickým rozptylem velikosti každého vektoru a kvadratickým rozptylem směru každého vektoru. Vektorové pole je zobrazeno černě a podložená mapa má barevnou škálu, kdy teplejší barva znázorňuje větší rozptyl hodnot velikosti vektoru. Tento výstup byl vytvořen pomocí propojení FlowManageru s MATLABem a je nejvíce vyhovující pro potřeby MU. Lze z něj jednoduše určit, kde nastávají největší změny proudění.

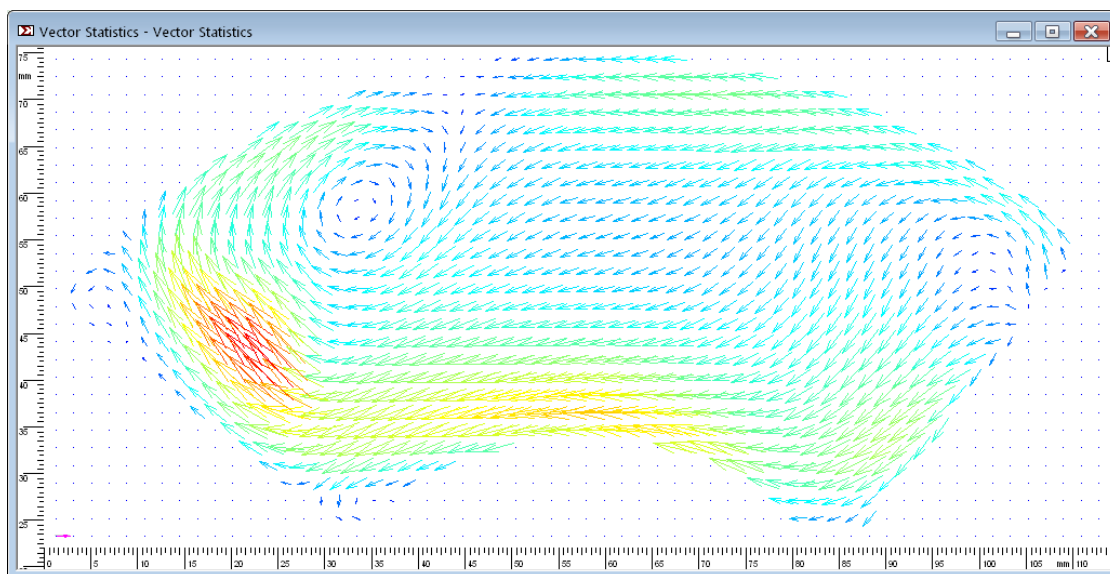
Ve všech grafických výstupech je referenční vektor (růžový v levém dolním rohu), který má pro všechny výstupy velikost $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. č. 42 Vykreslení vektorového pole pro rychlost otáčení 5 a výšku 2 mm nad dnem



Obr. č. 43 Vykreslení svislého vektorového pole při rychlosti otáčení 3 a vzdálenosti 20 mm od stěny vnějšího válce



Obr. č. 44 Vykreslení rychlostní pole při 10 °C 10 mm nad dnem

Všechny výstupy základních vektorových polí jsou uvedeny v přílohách. Jsou doplněny částí výstupů, které obsahují i podložení kvadratickými odchylkami délky vektoru rychlosti. Celkem bylo vytvořeno 129 různých průměrných vektorových polí a stejné množství těchto polí s podložním kvadratické odchylky délky vektoru.

9.2. Tabulkové výstupy

Tabulkové výstupy jsou ve formě tabulek programu Excel. Tabulky jsou vždy jednotné pro jednu polohu (například horizontální rovina, 2 mm nad dnem) a všechny 3 měřené rychlosti. Obsahují každá okolo 3000 řádků, kdy každý řádek představuje jeden vektor a udává jeho polohu v pixelech a mm. Tabulky poskytují i informaci o velikosti jednotlivých vektorů. Dalším tabulkovým výstupem jsou maximální a průměrné rychlosti v daných vektorových polích pro jednotlivé rychlosti. Dalším tabulkovým výstupem jsou, již zmíněné, střední hodnoty rychlosti v celém poli a také maximum, které se v daném poli nachází.

Kvůli množství naměřených dat a rozsáhlosti všech tabulek jsou v práci uvedeny pouze ukázky a kompletní tabulkové výstupy budou předány přímo pracovníkům MU.

Poloha vektoru				Rychlost otáček: Teplota:	Délka vektoru rychlosti:			
x	y	x	y		3	4	5	5
[-]	[-]	[mm]	[mm]		15°	15°	15°	15°
0	0	1.226	1.226		0.01975	0.02036	0.01258	0.01391
1	0	3.065	1.226		0.02001	0.02014	0.01089	0.01268
2	0	4.904	1.226		0.02072	0.01984	0.00956	0.01083
3	0	6.743	1.226		0.02130	0.01958	0.00859	0.00945
4	0	8.582	1.226		0.02159	0.01815	0.00941	0.00742
5	0	10.421	1.226		0.02171	0.01680	0.01224	0.00773
6	0	12.26	1.226		0.02154	0.01470	0.01526	0.01021
7	0	14.099	1.226		0.02124	0.01275	0.01793	0.01306
8	0	15.938	1.226		0.02069	0.01035	0.01974	0.01589
9	0	17.777	1.226		0.02004	0.00849	0.02019	0.01856
10	0	19.616	1.226		0.01913	0.00685	0.02133	0.02019
11	0	21.455	1.226		0.01775	0.00574	0.02230	0.02061
12	0	23.294	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
13	0	25.133	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
14	0	26.972	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
15	0	28.811	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
16	0	30.65	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
17	0	32.489	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
18	0	34.328	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
19	0	36.167	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
20	0	38.006	1.226		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Tab. č. 1 Ukázka tabulkového výstupu z programu FlowManager

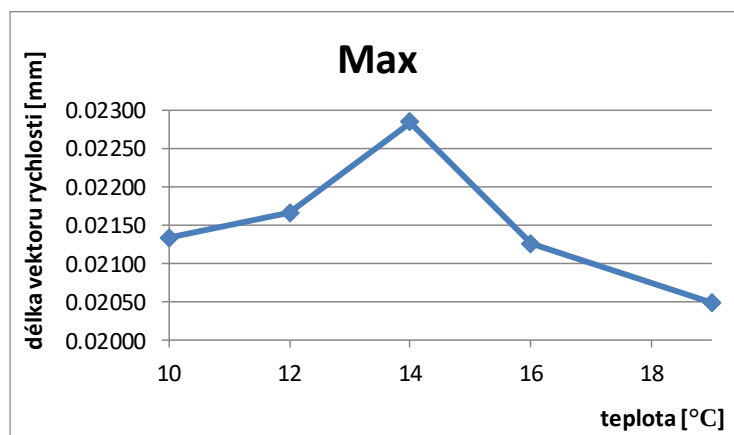
Rychlosti: Maximální Střední hodnota	3 otáčky	4 otáčky	5 otáčky	5 otáčky
	[m·s ⁻¹]	[m·s ⁻¹]	[m·s ⁻¹]	[m·s ⁻¹]
	0.02532	0.03108	0.03936	0.03890
	0.0172494	0.0150881	0.0160407	0.0166592

Tab. č. 2 ukázka prezentace rychlostí

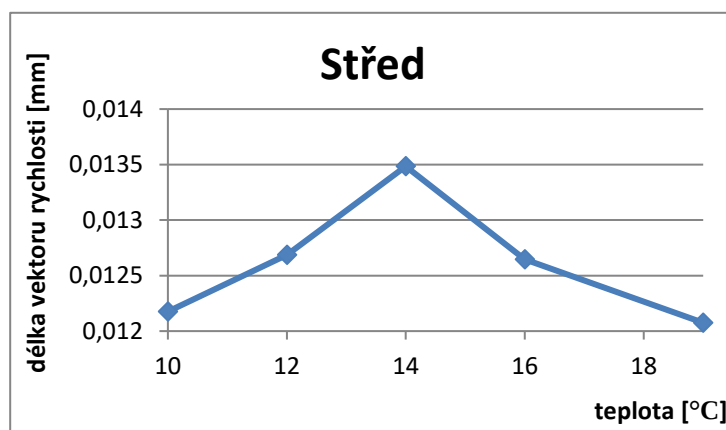
9.3. Vyhodnocení závislosti teploty na dějích v modelu

Jak bylo zmíněno výše tak nad rámec požadavků od MU se autor zabýval i teplotní závislostí na jevech v modelu. Byly provedeny dvě sady měření, kdy teplota postupně narůstala po 2 °C. Po dosažení požadované teploty bylo provedeno standartní měření, které bylo vyhodnoceno. Výstupem z tohoto měření jsou grafy, které zobrazují závislost délky vektoru rychlosti na teplotě vody.

Měření probíhalo ve vodorovné poloze 10 a 20 mm nad dnem pro všechny tři rychlosti. Byla porovnávána změna maximální a průměrné rychlosti.



Graf č. 1 teplotní závislost maximální rychlosti v poli 20 mm nad dnem pro rychlost otáčení 3



Graf č. 2 teplotní závislost střední rychlosti v poli 20 mm nad dnem pro rychlost otáčení 3

Jak z těchto grafů vyplývá tak ve výšce 20 mm nad dnem dosahuje průměrná rychlost v měřeném poli svého maxima při přibližně 14 °C. Původně byl očekáván přibližně lineární trend nárůstu rychlosti s rostoucí teplotou, ale u většiny grafů tento trend byl vyvrácen. Všechny tyto grafy jsou uvedeny v přílohách diplomové práce.

Zjevně při dosažení teploty 14 °C nastává při těchto otáčkách míchadla v modelu změna charakteru proudění, která je velmi znatelná. Rozdíl mezi střední hodnotou rychlosti při 10 a 14 °C je přibližně 7 %. Což vzhledem k rozložení rychlostí v celém poli (od nulových po 0,01135 m·s⁻¹) je zanedbatelný nárůst. I přes to, že prokázaný trend je zajímavý, nebylo cílem práce zjišťovat více podrobností a důvody k této změně proudění. Hlavní závěr, který z daného zjištění vyplynul, bylo vyloučení původního záměru provést měření při běžné teplotě a

výsledky případně kompenzovat na požadovanou teplotu. Následující hlavní měření tedy, přes s tím související komplikace, bylo provedeno při požadované nízké teplotě.

9.4. Vyhodnocení opakovatelnosti měření

Ve výhodách metody PIV bylo napsáno, že tato metoda má velkou opakovatelnost. Dalším úkolem, který si autor zadal, bylo zjistit jaká je opakovatelnost při tomto druhu měření. Opakovatelností se v tomto případě myslí schopnost dosažení co nejvíce podobných výsledků při opakovaném měření. Při měření rychlostního rozložení v poli nebo celkově průtoků samozřejmě není možné mít pro každé měření absolutně stejné výsledky díky nahodilosti přírodních jevů. Snahou je ovšem provést měření a vybrat vhodnou metodu tak, aby jednotlivá měření byla co nejvíce shodná s těmi dalšími když jsou zachovány stejné podmínky při měření.

Opakovatelnost byla určena dle vzorce:

$$\text{Opakovatelnost} = \left(\frac{1.\text{měření}}{2.\text{měření}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (10)$$

Jako 1. a 2. měření byly použity hodnoty průměrných rychlostí při měření s nejvyššími otáčkami magnetické míchačky. Opakovatelnost byla vyhodnocena pro všechny vodorovné měření. Výsledky výpočty jsou následující:

		Střední hodnota velikosti vektorů rychlosti			Opakovatelnost [%]
Výška měření od dna [mm]	2	0.0204	0.0213	4.06	
	5	0.0202	0.0207	2.20	
	10	0.0178	0.0184	3.20	
	15	0.0131	0.0134	2.64	
	20	0.0124	0.0133	6.22	
	25	0.0140	0.0134	4.79	
	30	0.0160	0.0167	3.71	

Tab. č. 3 Výpočet opakovatelnosti

Hodnota opakovatelnosti je v rozmezí cca 2 až 6,5 %. Při běžných měřeních v hydrodynamice je-li opakovatelnost do 1% tak se považuje za výbornou. Ale i hodnoty okolo 2 až 6 % jsou dobré a je možné prohlásit toto měření za opakovatelné s dosažením velmi podobných výsledků.

10. Závěr

Celé měření a vyhodnocení bylo provedeno ve vodohospodářských laboratořích Fakulty stavební VUT Brno pomocí metody PIV. Proběhlo podrobné proměření rychlostních poměrů v meziválcovém prostoru v typu modelu, který budou používat kolegové z Masarykovy univerzity v Brně pro další experimenty.

V celém prostoru modelu bylo naměřeno proudění vířivé, kde vznikaly jak horizontální tak i vertikální víry. Jedná se tedy o komplikované prostorové proudění. Všechny tyto pohyby byly zaznamenány na grafických výstupech, kterých je okolo 300 (část je přiložena v přílohách této práce). Výstupem z měření byly tři sady grafických výstupů. První zobrazovaly vektorové pole rychlostí, kde jednotlivé vektory byly označeny barevnou škálou pro lepší orientaci (teplejší barvy znamenaly větší rychlost). Druhým grafickým výstupem byly taktéž vektorová rychlostní pole, ale v tomto případě podložená barevnou mapou, která znázorňovala velikosti kvadratických odchylek délek vektorů rychlosti (opět byla použita barevná škála, kde teplejší barvy znamenaly větší odchylku) a třetí sadou byly vektorová rychlostní pole podložená barevnou mapou, která znázorňovala velikosti kvadratických odchylek směrů vektorů rychlosti. Tyto grafické výstupy byly doplněny tabulkami, ve kterých byl popis jednotlivých vektorů (přesná pozice v modelu, velikost).

Všechna tato data byla předána na Masarykově univerzitě pro jejich další výzkum.

V práci byla nad rámec zadání zkoušena závislost rychlosti proudění na teplotě. Při měření této závislosti došel autor k závěru, že při změně teploty nastávají v modelu změny charakteru proudění a je tedy nutné provádět všechna měření při konstantní teplotě. Dále byl na části naměřených dat proveden výpočet opakovatelnosti měření. Opakovaná měření vykazovala rozdíly v průměrné velikosti vektoru rychlosti z celého pole od 2 do 6,5 % což lze považovat, při takto složitém proudění, za dobrou opakovatelnost.

11. Seznam použitých zdrojů

- ¹ Jan Kozák *Směrová charakteristika jednodrátkové žárové sondy*. Brno, 2015. 58 s., 20 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
- ² *Rozvoj bezkontaktních optoelektronických měřicích metod v hydromechanice* [online]. Brno, 2004 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/vst/lvv/bezkontaktni_metody.pdf. Fakulta stavební, VUT Brno.
- ³ MALÍK, Michal a Jiří PRIMAS. *Anemometrické metody* [online]. Liberec, 2011 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=566. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci.
- ⁴ KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika: Měření průtoku a proteklého množství* [online]. Praha, 2005 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm>
- ⁵ *Matematika.cz: Směrodatná odchylka* [online]. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.matematika.cz/smerodatna-odchylka>
- ⁶ Dantec Dynamics: *Princip PIV* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>
- ⁷ Dantec Dynamics: *Příklady použití PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/piv-application-examples>
- ⁸ Dantec Dynamics: *Stereo PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/stereo-piv-2d3c-piv>
- ⁹ Dantec Dynamics: *Prostorové PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/volumetric-velocimetry-3d-piv>
- ¹⁰ Dantec Dynamics: *Časově rozdělené PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/time-resolved-piv>
- ¹¹ Dantec Dynamics: *MicroPIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/microfluidics>
- ¹² SOKORAY-VARGA, Béla a János JÓZSA. *Particle tracking velocimetry (PTV) and its application to analyse free surface flows in laboratory scale models* [online]. 2008 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <http://www.pp.bme.hu/ci>. Výzkumný článek.
- ¹³ LAO, lasery a optika: PLIF [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/-k/plif-555p>
- ¹⁴ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: Particle Image Velocimetry Instrumentation*. 4. Skovlunde, Dánsko, 1998. ISBN 9040U3623.
- ¹⁵ DANTEC DYNAMICS. *FlowMap: System Hub*. 1. Skovlunde, Dánsko, 2003. ISBN 9040U4122.
- ¹⁶ DANTEC DYNAMICS. *Adaptive Correlation: Addendum to FlowManager*. 1. Skovlunde, Dánsko, 2000. ISBN 9040U4122.

12. Seznam použitých zdrojů obrázků

- [1] *University of Illinois: Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory* [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://vtchl.illinois.edu>
- [2] *ILA: Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.ila.de>
- [3] *MicroVec Pte. Ltd.* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://piv.com.sg>
- [4] *Dantec Dynamics: Princip PIV* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv> [5] <http://www.dantecdynamics.com/piv-application-examples>
- [5] *Dantec Dynamics: Příklady použití PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/piv-application-examples>
- [6] *Dantec Dynamics: Stereo PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/stereo-piv-2d3c-piv>
- [7] *Dantec Dynamics: Prostorové PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/volumetric-velocimetry-3d-piv>
- [8] *Dantec Dynamics: Časově rozdělené PIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/time-resolved-piv>
- [9] *Dantec Dynamics: MicroPIV*. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/microfluidics>
- [10] *HoloMap: Digital Particle Tracking Velocimetry (DPTV)* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.holomap.com>
- [11] *Dantec Dynamics: Laser-Induced Fluorescence* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/laser-induced-fluorescence-liquid>
- [12] *Direct Industry: Lasers* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com>
- [13] *Dantec Dynamics: CCD Kamery* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/ccd-and-scmos-cameras>
- [14] *Dantec Dynamics: DynamicStudio* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/images/content/products-and-services/fluid-mechanics/DynamicStudio>
- [15] *ResearchGate: PIV data evaluation via cross correlation* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/288774176_fig2_Figure-2-PIV-data-evaluation-via-cross-correlation
- [16] *Scielo: Flow measurements* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.scielo.br/scielo.php>

13. Seznam použitých obrázků, tabulek a grafů

Obr. č. 1 Metoda LDA

Obr. č. 2 Metoda PIV

Obr. č. 3 Ukázka rychlostního pole vytvořená metodou PIV

Obr. č. 4 Ukázka soustavy PIV

Obr. č. 5 Princip korelace

Obr. č. 6 Princip PIV

Obr. č. 7 Ukázka využití PIV

Obr. č. 8 Stereo PIV

Obr. č. 9 Prostorové - 3D PIV

Obr. č. 10 Novější soustava PIV

Obr. č. 11 Ukázka z měření rychlostí 1 kHz

Obr. č. 12 Ukázka možností záběru plochy 1 x 1 m

Obr. č. 13 Ukázka soustavy pro MicroPIV

Obr. č. 14 Ukázka uspořádání soustavy PTV

Obr. č. 15 Ukázka výstupu při použití metody PLIF

Obr. č. 16 Pohled na kameru, laser a model použitou při vlastním měření

Obr. č. 17 Ukázka typu laseru

Obr. č. 18 Ukázka typu kamery

Obr. č. 19 System Hub

Obr. č. 20 Ukázka z programu FlowManager

Obr. č. 21 Ukázka z novějšího programu FlowManager

Obr. č. 22 Dvojce snímků z vlastního měření (první vlevo, druhý vpravo)

Obr. č. 23 Ukázka korelace dvojce snímků z obr. č. 22

Obr. č. 24 Princip vzájemné korelace

Obr. č. 25 Rozdíl mezi auto-korelací (vlevo) a vzájemnou korelací (vpravo)

Obr. č. 26 Viditelná hranice modelu ze které je pak vytvořena maska

Obr. č. 27 Zamaskování obrázku č. 23 dle masky vytvořené z obrázku č. 26

Obr. č. 28 Použití funkce Range na obrázek č. 27

Obr. č. 29 Použití funkce klouzavého průměru na obrázek č. 28

Obr. č. 30 Vykreslení proudnic a zobrazení vektorů rychlostí

Obr. č. 31 Vykreslení vířivosti a zobrazení vektorů rychlostí

Obr. č. 32 Vykreslení kvadratických odchylek délek vektorů rychlosti (vypočítaných pomocí MATLABu) a zobrazení vektorů rychlostí

Obr. č. 33 Ukázka pracoviště 1

Obr. č. 34 Ukázka pracoviště 2

Obr. č. 35 Pohledy na základní model s míchačkou

Obr. č. 36 Osvícený model

Obr. č. 37 Rozložení vodorovných rovin při měření

Obr. č. 38 Rozložení svislých rovin při měření (červeně přední poloha, zeleně poloha vpravo, modře poloha vlevo)

Obr. č. 39 Ukázka z měření vodorovné roviny

Obr. č. 40 Ukázka z měření svislé roviny

Obr. č. 41 Vykreslení kvadratických odchylek úhlů vektorů rychlosti (vypočítaných pomocí MATLABu) a zobrazení vektorů rychlostí

Obr. č. 42 Vykreslení vektorového pole pro rychlost otáčení 5 a výšku 2 mm nad dnem

Obr. č. 43 Vykreslení svislého vektorového pole při rychlosti otáčení 3 a vzdálenosti 20 mm od stěny vnějšího válce

Obr. č. 44 Vykreslení rychlostního pole při 10 °C 10 mm nad dnem

Tab. č. 1 Ukázka tabulkového výstupu z programu FlowManager

Tab. č. 2 ukázka prezentace rychlostí

Tab. č. 3 Výpočet opakovatelnosti

Graf č. 1 teplotní závislost maximální rychlosti v poli 20 mm nad dnem pro rychlost 3

Graf č. 2 teplotní závislost střední rychlosti v poli 20 mm nad dnem pro rychlost 3

14. Seznam zkratk a symbolů

PIV	Particle Image Velocimetry
LDA	Laser Doppler Anemometry
PTV	Particle tracking velocimetry
PLIF	Planar laser – induced fluorescence
IA	interrogation areas – vyšetřovaná oblast
2D	dvourozměrné prostředí
3D	třírozměrné prostředí
X	souřadnice na ose X
Y	souřadnice na ose Y
2D2C	dvourozměrný prostor, dvě složky rychlosti
2D3C	dvourozměrný prostor, tři složky rychlosti
3D3C	třírozměrný prostor, tři složky rychlosti
Nd:YAG	označení typu laseru
TCP/IP	přenosový protokol
MU	Masarykova univerzita
VUT	Vysoké učení technické v Brně
PSP	Polyamid seeding particle
u	bodová rychlost proudění
$\vec{v}$	vektor rychlosti
$\overrightarrow{\Delta x}$	posun částic v daném směru
Δt	čas mezi záblesky laseru
$C(s)$	hledaný vrchol signálu
I_1	ploška z 1. snímku
I_2	ploška z 2. snímku
X	poloha částice na prvním snímku
s	posun částice na druhém snímku
$\emptyset_{fg}$	diskrétní vyjádření funkce
$f(k, l)$	funkce popisující intenzitu světla v čase t
$g(m, l)$	funkce popisující intenzitu světla v čase t+ Δt
U	složka vektoru rychlosti v ose X
V	složka vektoru rychlosti v ose Y

$\ v\ $	délka vektoru rychlosti
v_x	složka rychlosti v ose X
v_y	složka rychlosti v ose Y
$\bar{v}(x, y)$	průměrný vektor rychlosti
(m, n)	velikost okolní plochy
σ^2	kvadratická odchylka
k	nějaké číslo
α	faktor přípustnosti

15. Seznam příloh

- [illegible]

- [illegible]

Příloha č. 104 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 4, teplota 18 °C
 Příloha č. 105 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 5, teplota 8 °C
 Příloha č. 106 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 5, teplota 10 °C
 Příloha č. 107 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 5, teplota 12 °C
 Příloha č. 108 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 5, teplota 14 °C
 Příloha č. 109 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 5, teplota 16 °C
 Příloha č. 110 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 5, teplota 18 °C
 Příloha č. 111 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 3, teplota 10 °C
 Příloha č. 112 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 3, teplota 12 °C
 Příloha č. 113 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 3, teplota 14 °C
 Příloha č. 114 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 3, teplota 16 °C
 Příloha č. 115 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 3, teplota 19 °C
 Příloha č. 116 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 4, teplota 10 °C
 Příloha č. 117 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 4, teplota 12 °C
 Příloha č. 118 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 4, teplota 14 °C
 Příloha č. 119 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 4, teplota 16 °C
 Příloha č. 120 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 4, teplota 19 °C
 Příloha č. 121 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 5, teplota 10 °C
 Příloha č. 122 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 5, teplota 12 °C
 Příloha č. 123 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 5, teplota 14 °C
 Příloha č. 124 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 5, teplota 16 °C
 Příloha č. 125 – Teplotní závislost, vodorovné měření, 20 mm, otáčky 5, teplota 19 °C
 Příloha č. 126 - Graf závislosti délky vektoru na teplotě, 3 otáčky, 20 mm, změny maximální rychlosti
 Příloha č. 127 - Graf závislosti délky vektoru na teplotě, 3 otáčky, 20 mm, změny průměrné rychlosti
 Příloha č. 128- Graf závislosti délky vektoru na teplotě, 4 otáčky, 20 mm, změny maximální rychlosti
 Příloha č. 129- Graf závislosti délky vektoru na teplotě, 4 otáčky, 20 mm, změny průměrné rychlosti
 Příloha č. 130- Graf závislosti délky vektoru na teplotě, 5 otáčky, 20 mm, změny maximální rychlosti
 Příloha č. 131- Graf závislosti délky vektoru na teplotě, 4 otáčky, 20 mm, změny průměrné rychlosti
 Příloha č. 132 – Skript výpočtu do programu MATLAB na odchylku délky vektorů
 Příloha č. 133 – Skript výpočtu do programu MATLAB na odchylku úhlů vektorů
 Příloha č. 134 – Kvadratická odchylka délky vektoru, vodorovné měření, 2 mm, otáčky 5a
 Příloha č. 135 – Kvadratická odchylka délky vektoru, vodorovné měření, 2 mm, otáčky 5b
 Příloha č. 136 – Kvadratická odchylka délky vektoru, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 4
 Příloha č. 137 – Kvadratická odchylka délky vektoru, vodorovné měření, 10 mm, otáčky 3
 Příloha č. 138 – Kvadratická odchylka délky vektoru, svislé měření vlevo, 2 mm, otáčky 3
 Příloha č. 139 – Kvadratická odchylka délky vektoru, svislé měření vlevo, 2 mm, otáčky 4
 Příloha č. 140 – Kvadratická odchylka délky vektoru, svislé měření vlevo, 2 mm, otáčky 5a
 Příloha č. 141 – Kvadratická odchylka délky vektoru, svislé měření vlevo, 2 mm, otáčky 5b
 Příloha č. 142 – Kvadratická odchylka délky vektoru, svislé měření vpravo, 20 mm, otáčky 4
 Příloha č. 143 – Kvadratická odchylka délky vektoru, svislé měření uprostřed, 10 mm, otáčky 4