

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální studium úplavu za překážkou v proudové části turbíny

Autor: **Bc. Tomáš Dufek**

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**

Akademický rok 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš DUFEK**
Osobní číslo: **S14N0002P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Název tématu: **Experimentální studium úplavu za překážkou v proudové části turbíny**
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je vyšetření úplavu za špatně obtékaným tělesem, které se vyskytuje v proudové části turbíny. Jedná se o zjednodušený model podpory ložiska rotoru umístěného ve výstupní části turbíny. K experimentům bude využita metoda stereo PIV.

Máte za úkol:

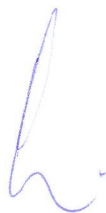
1. Zvládnout metodiku měření stereo PIV.
2. Provést kalibraci metody.
3. Proměřit měřicí prostor aerodynamického tunelu ve vybraných režimech a konfiguracích.
4. Vyhodnotit rychlostní pole.
5. Provést analýzu získaných výsledků, odhad chyb měření.
6. Navrhnout traverzovací zařízení včetně softwaru v LabVIEW.

Rozsah grafických prací: -
Rozsah kvalifikační práce: 50 - 70 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

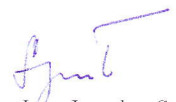
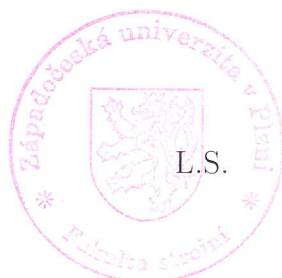
- Manuál PIV DynamicStudio, DANTEC
- Manuál LabVIEW, National Instruments
- Raffel M., Willert Ch. E., Wereley S., Kompenhans J., Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Springer 1998
- Kopecký V.: Laserová anemometrie v mechanice tekutin, TU Liberec, 2008

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant diplomové práce: **Ing. Katarína Ratkovská**
Centrum energetického výzkumu

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

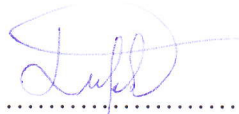
V Plzni dne 3. října 2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: 30. 5. 2017



.....

podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování vedoucím práce Prof. Ing. Václavu Urubovi, CSc. a Ing. Kataríně Ratkovské za veškeré cenné rady, připomínky, ochotu a čas.

Také bych touto cestou chtěl poděkovat svým rodičům a těm nejbližším za jejich nedocenitelnou podporu během celého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Dufek	Jméno Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Uruba, CSc.	Jméno Václav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Experimentální studium úplavu za překážkou v proudové části turbíny		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	76	TEXTOVÁ ČÁST	76	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)	Diplomová práce se zabývá měřením úplavu za obtékanou překážkou pomocí metody PIV respektive stereo PIV. Cílem práce je především ukázat účinnost použití metod PIV při měření úplavu. V úvodu je metoda teoreticky popsána, následuje popis postupu měření (sestavení experimentu, kalibrace, samotné měření a vyhodnocení). V závěru je provedena analýza výsledků. Na práci je možné navázat a podle uvedených postupů provádět měření za odlišných podmínek.
ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	
KLÍČOVÁ SLOVA	PIV, stereo PIV, experiment, kalibrace, korelace, rychlostní pole

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Dufek	Name Tomáš		
FIELD OF STUDY	N2301 “Design of Power Machines and Equipment“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Uruba, CSc.	Name Václav		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Experimental study of the wake behind a barrier in the flow of a turbine.			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKE	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	76	TEXT PART	76	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	<p>The diploma thesis deals with the measurement of the wake behind a barrier using PIV and stereo PIV methods. The aim of the work is mainly to demonstrate efficiency of using the PIV methods for measuring the wake. In the introduction, the method is theoretically described, followed by a description of the measurement procedure (experiment calibration, measurement and evaluation); the results are analyzed at the end. It is possible to follow up on this thesis and carry out measuring under otherwise defined conditions.</p>
TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	
KEY WORDS	PIV method, stereo PIV method, experiment, calibration, correlation, velocity field

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	10
Vysvětlení některých termínů	10
Úvod.....	11
1 Projekt Dunbar	12
2 Metody experimentálního měření	14
2.1 Principy laserové anemometrie	14
3 Metoda PIV	14
3.1 Vývoj metody PIV.....	15
3.2 Princip metody PIV	16
3.2.1 Sytící částice.....	16
3.2.2 Osvětlovací technika	17
3.2.2.1 Dvoukomorový Nd:YAG laser	17
3.2.3 Optika	18
3.2.4 Záznamové zařízení.....	18
3.2.5 Expozice	20
3.2.6 Vyhodnocení	20
3.2.6.1 Vzájemná korelace.....	21
3.2.6.2 Autokorelace	24
3.2.6.3 Fourierova transformace	26
3.2.6.4 Zpracování PIV záznamů.....	26
3.3 Porovnání metody PIV s dalšími metodami	27
4 Metoda stereo PIV	27
5 Vlastní měření	30
5.1 Popis sestavy experimentu.....	31
5.1.1 Experimentální tunel	32
5.1.2 Použitý laser	33
5.1.3 Záznamové zařízení.....	33
5.1.4 Generátor částic.....	34
5.2 Kalibrace.....	34

5.2.1	Funkce minima/maxima („Image min/max“)	37
5.2.2	Knihovna úprav snímků („Image Processing Library (IPL)“)	37
5.2.2.1	Uzavírací filtry („Closing filters“)	38
5.2.2.2	Středové filtry („Median filters“)	39
5.2.2.3	Filtry průměru („Mean filters“)	40
5.2.3	Funkce obrazové aritmetiky („Image Arithmetic“)	42
5.2.4	Knihovna úprav snímků („Image Processing Library (IPL)“)	43
5.2.4.1	Filtry odstranění vzdálených hodnot („Remove Outliers“)	44
5.2.4.2	Středové filtry („Median filters“)	44
5.2.4.3	Gaussovy filtry („Gaussian filters“)	44
5.2.5	Zobrazovací model („Imaging Model Fit“)	44
5.2.5.1	Dírkový zobrazovací model („IMF: Pinhole“)	45
5.2.6	Funkce obrazového zkreslení („Image Dewarping“)	45
5.3	Zkušební měření	46
5.4	Umístění překážky	47
5.5	Částice	47
5.6	Měření v rovině kolmé k ose tunelu	47
5.7	Vyhodnocení	48
5.7.1	Adaptivní korelace („Adaptive Correlation“)	48
5.7.2	Metoda prostorového PIV („Stereo PIV Processing“)	48
5.7.3	Funkce universální detekce vzd. hodnot („Universal Outlier Detection“)	49
5.7.4	Funkce vektorové statistiky („Vector statistics“)	49
5.8	Měření ve vodorovné rovině procházející osou tunelu	50
5.8.1	Kalibrace	51
5.8.2	Vlastní podélné měření	51
5.8.3	Vyhodnocení	53
5.8.3.1	Metoda adaptivní PIV („Adaptive PIV“)	53
6	Analýza výsledků a odhad chyb	54
6.1	Chyby při měření	54
6.2	Chyby a limity PIV	54

6.3	Rozbor výsledků v rovinách kolmých k ose tunelu.....	55
6.3.1	Průběh rychlostí.....	55
6.3.1.1	Izoplochy rychlostí.....	60
6.3.2	Stanovení Reynoldsova čísla.....	62
6.3.3	Suma variací.....	63
6.3.4	Směrodatná odchylka	64
6.3.5	Korelační koeficient	66
6.4	Rozbor výsledků měření ve vodorovné rovině procházející osou tunelu.....	68
6.5	Traverzovací zařízení	69
Závěr.....		70
Seznam použité literatury a podkladů		71
Seznam obrázků		72

Seznam použitých zkratk

PIV – Particle Image Velocimetry – metoda PIV

stereo PIV – stereo Particle Image Velocimetry – metoda trojrozměrného PIV

CCD – Charge Coupled Device – zařízení s vázanými náboji [5]

DGV – Doppler Global Velocimetry – metoda DGV

MTV – Molecular Tagging Velocimetry – metoda MTV

LDA – Laser Doppler Anemometry – Laserová Dopplerovská anemometrie

DLT – Direct Linear Transform – přímá lineární transformace

TKE – Turbulence Kinetic Energy – turbulentní kinetická energie

IPL – Image Processing Library – knihovna úprav snímků

IMF – Imaging Model Fit – zobrazovací model

Vysvětlení některých termínů

Termoanemometrický princip měření – měří se ochlazování žhaveného drátku v proudící tekutině

Stroboskopická lampa – zařízení, které umožňuje s velkou rychlostí vysílat krátké záblesky světla

Fotoefekt – je fyzikální jev, podle kterého jsou z povrchu některých látek dopadajícím zářením uvolňovány elektrony. Tyto elektrony následně mohou vést elektrický proud v obvodu. [9]

progressive-scan-interline - je způsob zobrazení a ukládání snímků, který využívají kamery se CCD senzorem [4]

interrogation areas – malé pravoúhlé vyhodnocovací oblasti

Konvoluce – operátor využívaný v matematice

DGV (Doppler Global Velocimetry) a MTV (Molecular Tagging Velocimetry) – nové metody laserové anemometrie. Podrobnější vysvětlení těchto metod je uvedeno například v publikaci [2] ze seznamu použité literatury.

Laserová Dopplerovská anemometrie (LDA) – jedna z metod laserové anemometrie. Jde o bodovou měřicí metodu. Pro proměření proudového pole vyžaduje přesné traverzování. Podrobnější vysvětlení této metody je uvedeno například v publikaci [3] ze seznamu použité literatury.

Metoda nejmenších čtverců – je metoda používaná k odhadu řešení přeuredných soustav rovnic (soustav, které mají méně neznámých než rovnic).

Atomizér – zařízení vytvářející malé kapalně částice do proudu plynu

Úvod

Experiment jako prostředek pro ověření fyzikálních jevů má i v dnešní době pokročilé výpočetní techniky nezastupitelnou úlohu.

Ve své diplomové práci jsem se zaměřil na experimentální metody měření v aerodynamickém tunelu. Jmenovitě metodu PIV, respektive stereo PIV, která z ní přímo vychází. Inspirací pro měřený systém mi bylo obtékání vzpěry zadního ložiska parní turbíny s axiálním difuzorem. Ač měřený systém vychází z konkrétní turbíny navržené a vyrobené společností Doosan Škoda Power pro elektrárnu Dunbar ve Skotsku, je moje práce zaměřena spíše obecně. Především je mým úkolem pochopit a zvládnout postupy a principy měření metodou stereo PIV, a prokázat výhodnost použití této metody na konkrétním měření úplavu za překážkou. Z těchto důvodů jsou postupy měření při respektování odlišností přenositelné na jiné podmínky – obtékání jiných těles jinými médii. Na první teoretické části práce, které se zabývají popisem jednotlivých metod a principů, navazují další. Ty koncipuji jako postup měření metodou stereo PIV. Popisuji zde sestavení experimentu, kalibraci, proměření prostoru v různých režimech, vyhodnocení rychlostního pole, analýzu výsledků a odhad chyb měření.

Získané výsledky vedou k lepší představě o podobě úplavu za špatně obtékaným tělesem. Zároveň věřím, že tato práce může pomoci k dalšímu rozvoji měření touto moderní metodou.

1 Projekt Dunbar

Na začátku své práce bych rád zmínil několik vět o spalovně Dunbar a do ní instalované turbíny od společnosti Doosan Škoda Power. To proto, že podpora ložiska zadního rotoru této turbíny, slouží jako inspirace pro prováděné měření úplavu.



Obrázek 1 - Turbína Dunbar

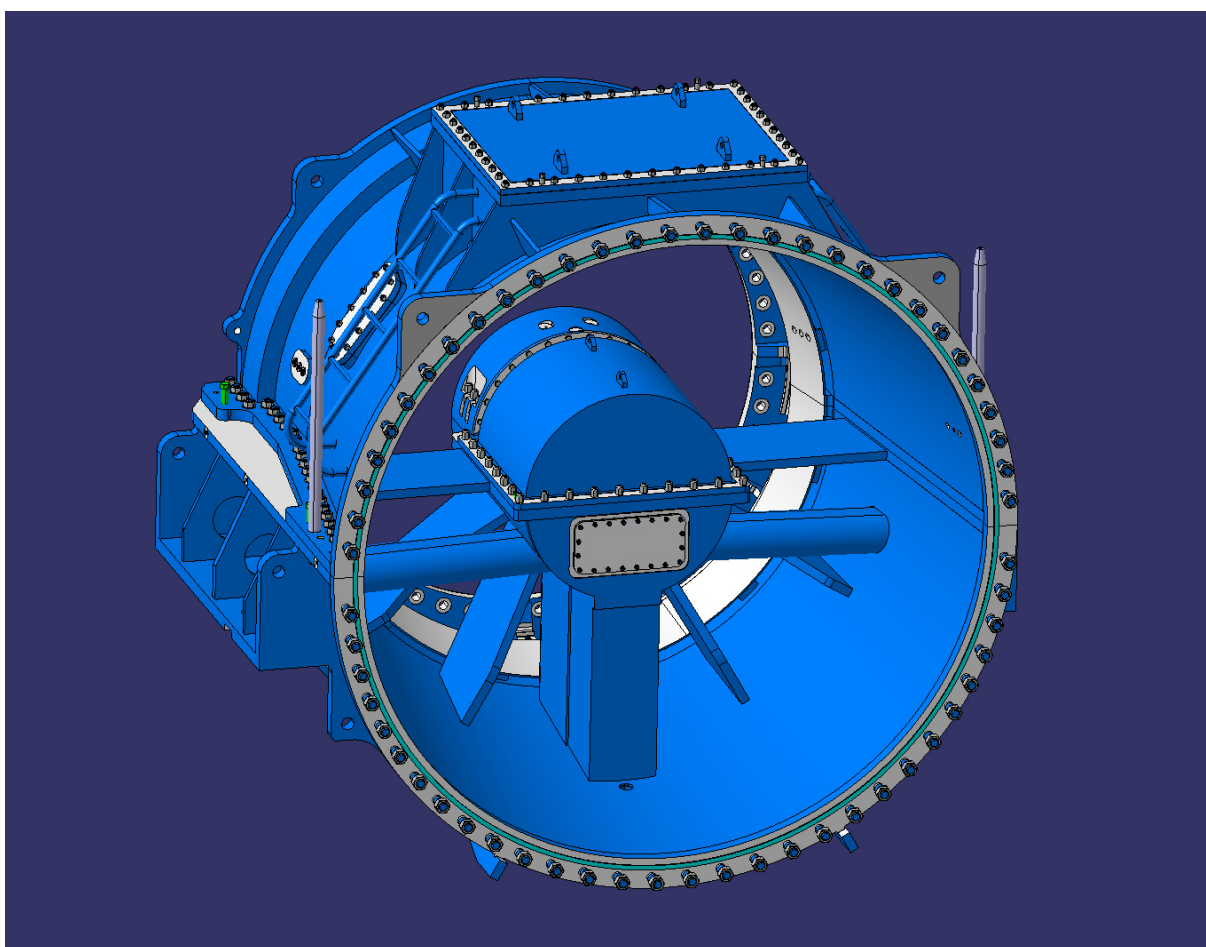
Spalovna odpadu Dunbar se od roku 2016 staví ve stejnojmenném městě ve Skotsku. Jedná se o projekt Zero Waste Dunbar, který podporuje iniciativu Scotland's Zero Waste Plan. Snahou projektu je omezit ukládání odpadu na skládky. Toho se kromě spalování dosahuje především zlepšením třídění a recyklování odpadu. [1]

Stavbu provádí společnost Interserve Construction ve spolupráci s Babcock & Wilcox Vølund a dalšími partnery. Dodavatelem parní turbíny, projektu a realizace strojovny je společnost Doosan Škoda Power. Spalovna bude po dokončení dodávat 30MW elektrické energie a 10MW tepla.

Jedno-tělesová, jednoplášťová, kondenzační parní turbína je přes převodovku napojena na generátor s 1500 ot/min. Turbína má čtyři neregulované odběry. Admisní pára má tlak 65 bar a teplotu 440 °C. Oběžné i rozváděcí lopatky jsou přetlakové. Výstup z turbíny je napojen na kondenzátor. V přední části je turbína uložena na patkách tělesa na předním ložiskovém stojanu. Zadní výstupní těleso pak na patkách rámu turbíny.



Obrázek 2 - Pohled na zadní ložisko turbíny Dunbar



Obrázek 3 - Počítačový model zadního ložiska

2 Metody experimentálního měření

Experimentální metody měření v mechanice tekutin procházely a stále prochází neustálým vývojem. Od pouhého pozorování přírodního proudění Leonardem Da Vincim, přes řízená proudění v experimentech Ludwiga Prandtla, která se stále omezovala pouze na kvalitativní popis jevů, až po současné kvantitativní vyjádření výsledků experimentů. Dnešní metody jsou založeny na řadě fyzikálních principů, od těch jednodušších mechanických až po principy termoanemometrické nebo optoelektronické. [2]

Ve své práci se zaměřuji především na metodu stereo PIV, která patří mezi nejnovější metody laserové anemometrie, tedy metody pracující na optoelektronickém principu. Na začátku své práce představím její vývoj, principy a porovnáji ji s dalšími metodami.

2.1 Principy laserové anemometrie

Rozmach metod pracujících na optoelektronickém principu nastal s rozvojem vhodných laserových zařízení, moderního optického vybavení a samozřejmě výkonné výpočetní techniky. K měření vektorů rychlosti a dalších vlastností proudění tekutiny dochází v těchto metodách skrze určování polohy malých částic, které jsou v ní rozptýlené. K jejich osvětlení se využívá laser jako zdroj monochromatického světla, který přes optické zařízení osvětluje měřicí prostor. Z tohoto vyplývá nezbytnost zajištění prostupů a průhledů do měřicího prostoru a samozřejmě použití transparentní měřené tekutiny. [2] [3]

Záznam osvětlených částic v měřicím prostoru je dnes nejčastěji pořizován pomocí kamer a je zpravidla okamžitě převáděn do digitální podoby. Z důvodu vysokého požadavku na výkon výpočetní techniky a záznamového zařízení se však ještě v relativně nedávné době uplatňoval i výstup v podobě fotografií a jejich následné několikadenní zpracování, které použití metody výrazně ztěžovalo. [2] [3]

Při měření těmito metodami nedochází k přímé interakci měřicího nástroje s měřenou tekutinou a tedy jejímu nechtěnému ovlivňování. Mluvíme o metodách bezdotykových. Díky této vlastnosti jsou metody laserové anemometrie velmi perspektivní. [2] [3]

3 Metoda PIV

Metoda PIV umožňuje v jednom okamžiku měřit rychlost proudění v celém vyšetřovaném poli, poskytuje tak nový vhled do této problematiky. Je výhodná pro měření nestacionárního proudění. Spolu s ostatními metodami měření, které poskytují další informace, umožňuje dobře popsat proudící médium. [3]

Největší uplatnění má dnes PIV při práci v aerodynamice. Pomáhá popsat a pochopit nestacionární proudění a další jevy spojené s odtrháváním proudu za překážkou. Experiment s použitím PIV je široce uplatňován při ověření a porovnání s výsledky získanými numerickou simulací, které jsou díky vývoji ve výpočetní technice v aerodynamice stále používanější. Z tohoto pohledu je nutné zachytit měřené pole s dostatečnou hustotou experimentálních údajů a tím i vhodných sytících částic v proudu. S tímto souvisí i požadavek, pomocí experimentu

PIV hned na začátku výpočtu správně fyzikálně popsat numericky modelovanou situaci. Spolupráce odborníků na numerické simulace a výzkumníků používajících PIV je tedy rozhodně na místě. Díky rychlosti záznamu, umožňuje PIV zachytit malé změny velkých rychlostí v proudovém poli a je tak pro tyto požadavky ideálním nástrojem. Metoda umožňuje provádět měření při obtékání nejen pevně ustavených a nepoddajných těles, ale i objektů měnících během měření svoji pozici nebo tvar. [2]

Použití metody PIV ve velkých průmyslových větrných tunelech naráží na několik specifických problémů. Především se jedná o větší vzdálenosti mezi měřenou oblastí, zdrojem světla a kamerami. Velká měřená plocha vyžaduje vysokou hustotu měření pro zachycení vzhledem k velikosti plochy malých struktur. Dále pak vysokými náklady na měření, které se nutně s provozem velkých větrných tunelů pojí. Z hlediska ekonomiky provozu je vhodné, aby větrný tunel umožňoval měření proudu od nejnižších rychlostí až například po supersonické rychlosti. [2]

3.1 Vývoj metody PIV

Zmínit některé historické milníky ve vývoji komponent PIV může být vhodné s ohledem na jejich vliv pro dnešní měření.

Proveditelnost měření s využitím sytících částic byla prokázána R. Meynartem na počátku osmdesátých let minulého století. Další výzvou bylo vyvinutí výkonného generátoru sytících částic o požadované velikosti a v potřebném množství. [2]

Vývojem samozřejmě prošel i způsob osvětlení měřicí roviny. V minulosti se používala stroboskopická lampa, u níž bylo vytvoření světelného listu zajištěno pomocí jednoduchého úzkého průzoru v představené desce. Stroboskopické lampy však nevyhovovaly ani z hlediska intenzity osvětlení a rozlišitelnosti světla rozptýleného částicemi a okolí. Tyto nedostatky byly vyřešeny použitím laseru jako monochromatického zdroje světla. Přes kontinuální lasery, u kterých je nutné řešit vytvoření světelných pulsů pomocí elektrooptické závěrky nebo rotačního polygonového zrcadla určené dnes pouze ke studiu pomalého vodního proudění, až po dvoukomorové pulsní lasery, které jsou nejen schopny produkovat osvětlení o vysoké hustotě energie. Ale protože pulsní lasery světlo směřují do krátkého pulsu, jsou i energeticky mnohem efektivnější. [3]

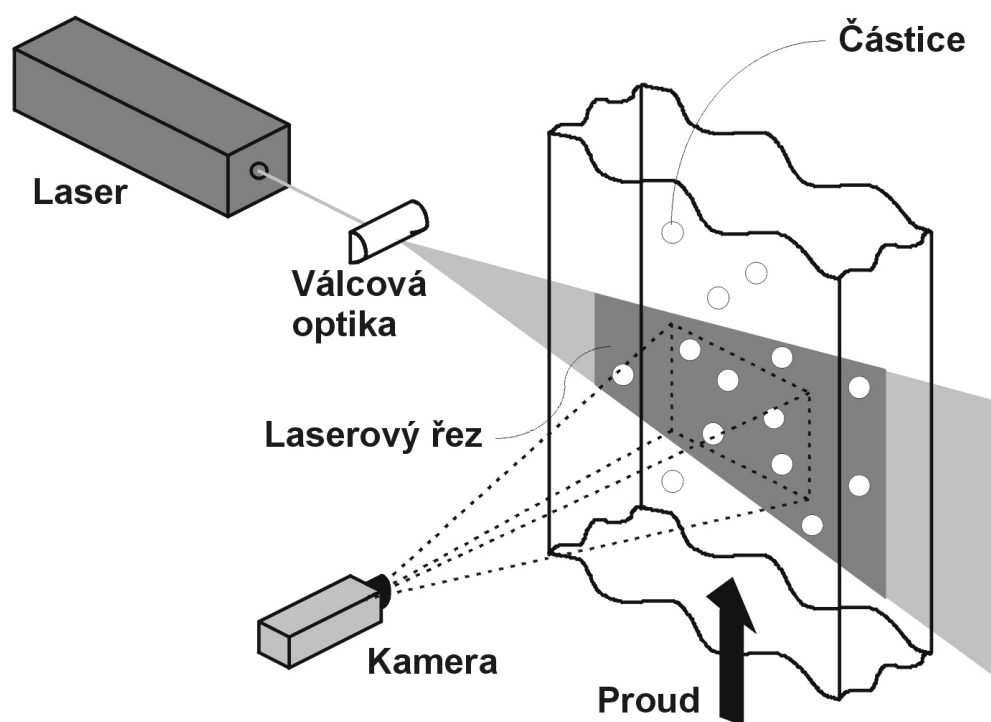
V posledních dekádách dvacátého století dochází na úkor analogového záznamu a vyhodnocovacích metod k rozvoji digitálních technik. A s tím samozřejmě i k potřebě stále výkonnější výpočetní techniky. Zpočátku bylo pochopení metody PIV spíše intuitivní. Dnes už jsou principy této metody z velké většiny vysvětleny. Teoretický popis metody stereo PIV je znám od začátku devadesátých let dvacátého století. Od té doby byla metoda podpořena řadou výzkumných prací a laboratorních experimentů. [3]

Dnes je metoda PIV velmi používaným nástrojem pro studium rychlostních polí v řadě oblastí výzkumu. Pokrok ve vývoji metody PIV z ní dnes učinil už téměř rutinně používaný nástroj výzkumu v mechanice tekutin. Několik aplikací metody bylo vytvořeno přímo pro

použití v úzce specializovaných oblastech, například v návrhu a konstrukci turbostrojů nebo také v biologii, přibývají další použití. Aplikace v oblasti proudění vody jsou téměř shodné s použitím v aerodynamice, ale obvykle méně problematické na provedení experimentu. Zkušenosti z jedné oblasti jsou tedy velmi dobře přenositelné do druhé, což prospívá jejich dalšímu rozvoji. [2]

3.2 Princip metody PIV

Základní princip metody vychází z elementárního vzorce: $v = \frac{s}{t}$. Rychlost proudící tekutiny tedy spočítáme jako podíl dráhy a času. Dráhu, kterou tekutina urazí, určíme přes takzvané stopovací částice, které jsou v tekutině rozptýleny. Tyto částice jsou při měření osvětleny minimálně dvěma časově odstupňovanými pulsy laseru a pomocí fotografického filmu nebo kamerou je zaznamenána jejich poloha. Laser sledovanou oblast osvětluje přes válcovou optiku, tím je vytvořen takzvaný světelný řez a osvětlena celá předem definovaná měřicí rovina. Po záznamu takových obrazů následuje jejich analýza. Ta spočívá v rozdělení měřicí roviny na vyhodnocované oblasti a stanovení průměrného posunutí sytících částic v každé z nich. Konečným výstupem je pak pole vektorů rychlostí. [2] [3]



Obrázek 4 - Schéma uspořádání PIV metody [3]

3.2.1 Sytící částice

Potřeba rozptýlení sytících částic je podstata celé metody PIV. Jejich základní vlastností je, že musí kopírovat pohyb částic proudícího média. Každý jednotlivý experiment může mít specifické požadavky na sytící částice, což je důležité zvážit. Obecně platí, že menší částice jsou molekulami proudu unášeny snáze. Největší problémy v tomto ohledu nastávají při měření

v plynném médiu, pro kapalném médiu obvykle dostačují částice větší. Na částice jsou ale kladeny i další požadavky. Nesmí interagovat s měřeným médiem a neměly by být abrazivní. Mají mít podobnou hustotu, jinak by hrozilo jejich shlukování. A důležitá je samozřejmě i jejich cena. [3]

Výsledek zobrazení silně závisí také na způsobu a místě sycení proudu částicemi. Pro vysokou kvalitu PIV záznamů je důležitá homogenní distribuce částic. Co se hustoty sytících částic v proudícím médiu týká, rozlišujeme tři stupně nasycení: nízkou, střední a vysokou nasycenost v pořízeném záznamu. V prvním případě není problém identifikovat částice v jednotlivých pořízených fotografiích. V každé vyšetřované oblasti je zpravidla ve stejný čas maximálně jedna částice. Při tomto stupni sycení však často v některých vyšetřovaných oblastech sytící částice úplně chybí a výsledky tak bývají značně nespojitě. [2] [3]

I v případě středního stupně sycení je možné provést identifikaci částic. Není však proveditelná vizuálně jako v prvním případě, ale je nutné použít standartní statistické PIV vyhodnocovací techniky. Tyto techniky budou vysvětleny dále. Při tomto stupni sycení je velmi pravděpodobný výskyt částic v každé z vyhodnocovaných oblastí a nebývá tak problém se spojitostí rychlostních informací. [2] [3]

Při vysokém stupni nasycení není možné rozeznat jednotlivé částice, často se překrývají a vytváří shluky. Z pohybu takových shluků je možné pomocí určitých algoritmů vyhodnotit průměrné posunutí ve vyšetřovaných oblastech. [2] [3]

Proti snaze mít co nejlépe unášené a tedy malé částice, jde potřeba částice zachytit pomocí fotoaparátu nebo kamery. Malé částice samozřejmě odráží méně světla a je tedy potřeba zajistit silnější zdroj světla (měření v plynném médiu). [2]

3.2.2 Osvětlovací technika

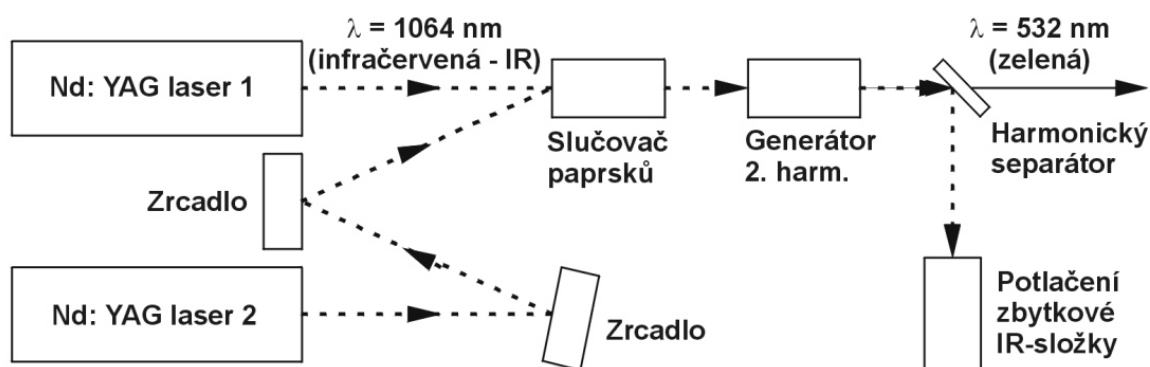
Měřicí rovina je definována tenkým laserovým řezem. Částice, které se v dané chvíli v laserovém řezu nachází, jsou osvětleny a dopadající světlo rozptyluje. Záznamovým zařízením jsou pak zachyceny jako světlé body na tmavém pozadí. Doba osvětlovacího pulsu musí být tak krátká, aby nedošlo k zachycení pohybu v průběhu jednoho osvětlovacího pulsu. V takovém případě by nastávalo rozmazávání a zachycování pruhů namísto izolovaných částic. Doba mezi jednotlivými pulsy musí být dostatečně dlouhá, aby byl patrný pohyb sytících částic a zároveň ne tak dlouhá, aby velké množství sytících částic opustilo vyšetřovanou oblast a naopak do ní připluly ve velké míře další. [2] [3]

To, že se měřicí prostor neosvětluje spojitě a je nutné ho osvětlit energií o velké hustotě, vede v poslední době k dominantnímu používání takzvaných pulsních laserů. Především dvoukomorových pulzních laserů. [3]

3.2.2.1 Dvoukomorový Nd:YAG laser

Dvoukomorový Nd:YAG laser je typem pulzního laseru. V tomto pevnolátkovém laseru se infračervené světelné záření produkuje impulzní výbojkou. Budící energie vyprodukovaná

výbojkou se odrazy od eliptické dutiny dopravuje do Nd:YAG krystalu, který je spolu s výbojkou v ohniscích této dutiny. „Dvoukomorový“ znamená, že laser obsahuje dvě komory, tedy dva zdroje paprsku. To je velmi výhodné právě pro použití při PIV, neboť nejsme v podstatě omezeni dobou, kterou zdroj potřebuje na vygenerování dalšího pulzu o potřebné energii. Problém s různými pozicemi zdroje paprsků je řešen pomocí soustavy zrcadel a slučovače paprsků. Paprsky tak díky tomu vycházejí ze stejného místa. Laser produkuje neviditelné infračervené záření o vlnové délce $\lambda=1064$ nm, což není výhodné při seřizování paprsku. I další nevýhoda spočívající v nízké citlivosti CCD kamer na takové záření, vede k používání harmonického generátoru. Ten vlnovou délku upravuje na $\lambda=532$ nm, tedy vlnovou délku viditelného zeleného světla. Zbytkové infračervené záření je odstraněno separátorem. Celá sestava laseru je znázorněna na následujícím obrázku. V případech, kdy neměříme v příliš velkých rychlostech a obecně při měření v kapalinách lze i s ohledem na nižší vyzářovanou energii použít kontinuální lasery. Při jejich použití je nutné zajistit pulsaci, a to buď pomocí elektroskopické závěrky nebo polygonového skeneru. [3]



Obrázek 5 - Schéma dvoukomorového laseru [3]

3.2.3 Optika

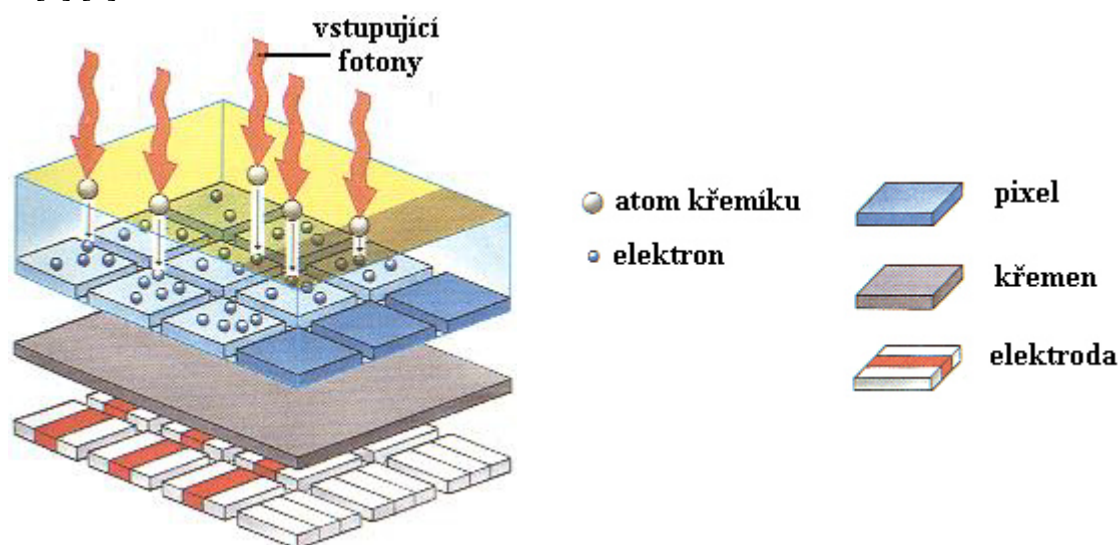
Optika vytváří pomocí soustavy čoček z paprsku vystupujícího ze zdroje světla laserový řez. Ten osvětluje měřenou rovinu. Předpokladem pro zajištění jejího rovnoměrného osvětlení je vytvoření řezu s konstantní tloušťkou. [3]

3.2.4 Záznamové zařízení

Dnes už je v naprosté většině aplikací poloha sytících částic při měření metodou PIV zaznamenávána pomocí moderních digitálních kamer používajících CCD senzor s architekturou „*progressive-scan-interline*“. Není tak jako při použití fotoaparátu nutné fotografie po vyvolání převádět do digitální podoby a snímky jsou k vidění na obrazovce počítače okamžitě. Tyto kamery jsou určeny pro vzájemnou korelaci, avšak lze je využít i pro autokorelaci. V takovém případě je požadavek na kameru s velmi vysokým rozlišením. Dříve byla absence současných kamer řešena právě používáním fotoaparátů, které velmi vysoké

rozdílení poskytovaly. To s sebou kromě nutnosti převádění fotografií do digitální podoby přinášelo i komplikaci s nezbytným přetáčením filmu mezi dvěma snímky. [3]

CCD (Charge-Coupled Device) senzor je široce používaná elektronická součástka sloužící k přeměně energie dopadajícího světla na elektrický signál, pracuje na principu fotoefektu. Zjednodušená konstrukce zařízení je znázorněna na následujícím obrázku. Světločivý křemíkový plátek je polovodič uložený na kovové elektrodě dokonale izolované vrstvičkou oxidu křemičitého SiO_2 . Tím je zajištěno, že uvolněné elektrony nejsou odvedeny pryč. [4] [5]

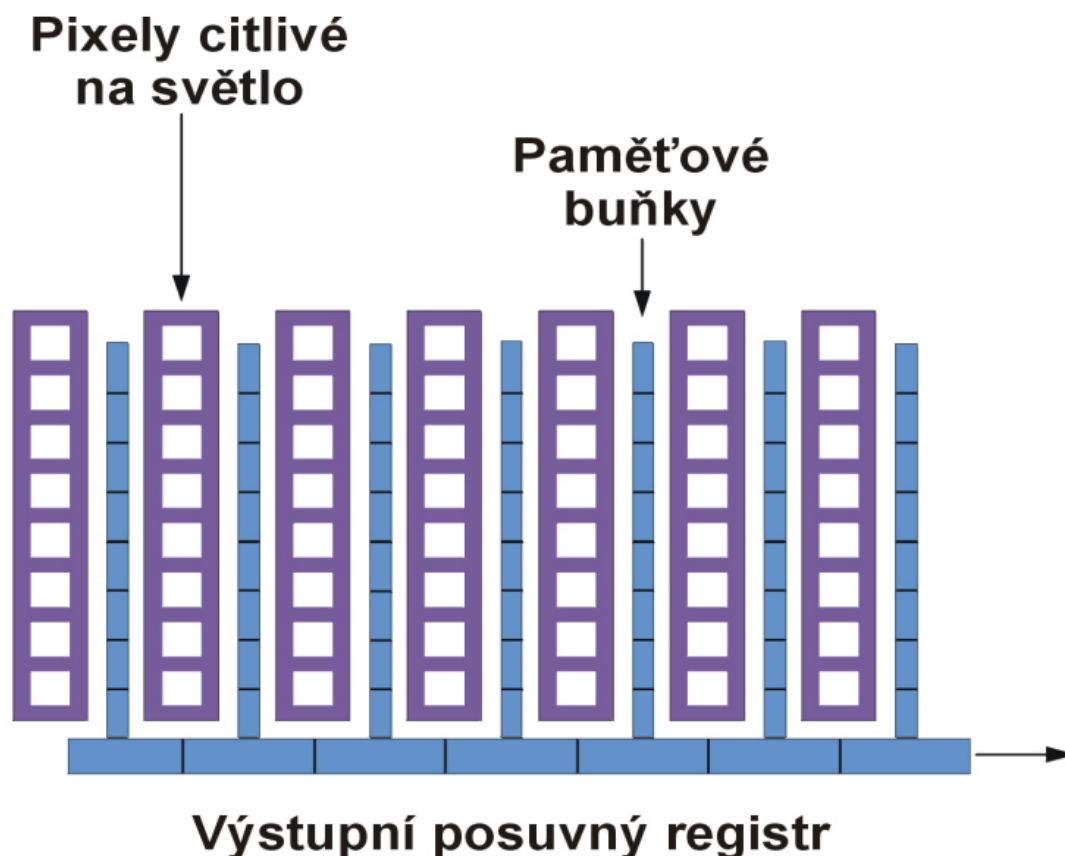


Obrázek 6 - Konstrukce CCD senzoru [4]

Základní princip zařízení spočívá v opakování třech základních kroků. V prvním dochází ke smazání zbytků předchozího snímaného obrazu tím, že jsou bez přístupu světla odebrány všechny volné elektrony. V druhém kroku je umožněno působení světla. Na atomy křemíku dopadají fotony a tím jsou podle zmíněného principu fotoefektu z polovodiče uvolňovány záporně nabitě elektrony. Elektrony jsou přitahovány kladně nabitou elektrodou umístěnou pod každým pixelem. Elektrody s více elektrony tak odpovídají pixelům, na které dopadlo více fotonů. Ve třetím kroku je ukončeno působení světla a přichází fáze čtení. Na některých elektrodách je postupně zvyšováno napětí, zatímco na jiných je souběžně snižováno. Kladný náboj elektrony přitahuje pod elektrody se zvýšeným napětím a postupně je tak přesouvá k výstupnímu terminálu. Celý děj se postupně po jednotlivých řadách opakuje. Nakonec jsou všechny elektrony ve výstupním terminálu, který jejich proud zesílí a vytvoří spojitý signál. Vrcholy v takovém signálu odpovídají místům s nejvíce uvolněnými elektrony. Reálná aplikace vyžaduje senzor pro snímání dvojrozměrného obrazu a princip se tím do jisté míry komplikuje. [4] [5]

„Základní“ konstrukce je v PIV používaná při autokorelaci, mluvíme o tzv. „full frame“ CCD senzoru. V principu jsou na CCD zachyceny oba obrazy a až poté je přenesen signál. U kamer používaných pro vzájemnou korelaci jsou řady pixelů citlivých na světlo proloženy řadami se stejným počtem paměťových buněk. Při záznamu je pak první, pixely zachycený obraz, hned přemístěn do paměťových buněk a uvolní tak místo druhému, který v pixelech

zůstane. Následně dochází k přesunu obou obrazů do výstupního terminálu respektive do počítače. K eliminaci fotonů, které by v tomto uspořádání s paměťovými buňkami nedopadly na pixely, ale právě na paměťové buňky, jsou senzory obvykle nad pixely vybaveny vrstvou miniaturních čoček, které fotony soustřeďují do pixelů. [4]



Obrázek 7 - Schéma CCD senzoru s paměťovými buňkami [4]

3.2.5 Expozice

Je nezbytné synchronizovat pulsy laseru se zaznamenáváním snímků kamerou.

Dva ostré a časově určené záběry pak definují vždy počáteční a koncovou polohu jednotlivých částic. Pravidla pro dobu osvětlení a rozestupy mezi záběry jsou zmíněna výše. Jejich záznam je možný buď do jednoho obrazu – dvojnásobná expozice nebo jako jednotlivé expozice do samostatných obrazů. Jednotlivé částice nebo jejich shluky se jeví jako světlé skvrny na tmavém pozadí. [3]

3.2.6 Vyhodnocení

Jednotlivé expozice jsou pro účely vyhodnocení rozděleny na takzvané „interrogation areas“ ve kterých se určuje průměrné posunutí jednotlivých částic.

Při slabém sycení proudu je možné v každé takové vyšetřované oblasti určit počáteční a koncovou polohu částice na základě jasů jednotlivých pixelů v souřadnicích X, Y a tím

i posunutí částice. V případě silnějšího syčení je však již nutné pro určování poloh částic a jejich průměrného posunutí používat složitější techniky. V případě záznamu dvojnásobné expozice je jako technika k nalezení průměrných posunutí používána autokorelace. U záznamu s jednotlivými expozicemi se používá technika vzájemné korelace.

Dráha, kterou syčící částice urazí za dobu mezi dvěma pulsy, musí být menší než čtvrtina strany vyhodnocované oblasti, na které byla měřící rovina rozdělena. V každé takové oblasti se vyhodnotí průměrné posunutí částic. Přes poměr M rozměrů obrazu a objektu se z posunutí v obrazové rovině získají posunutí v rovině objektové. Hledané rychlosti v objektové rovině se pak vypočítají z časového odstupu mezi záběry podle základního principu metody zmíněného výše. Získáme tak vektorové pole měřené oblasti, kde každý jeden vektor vždy reprezentuje jednu vyhodnocovanou oblast. [3]

3.2.6.1 Vzájemná korelace

V následující citaci ze stran 129 až 131 publikace *Laserová anemometrie v mechanice tekutin* od Václava Kopeckého (zdroj [3] ze seznamu použité literatury) je popsán algoritmus pro vzájemnou korelaci:

„Nejprve definujeme symboly používané v následujícím textu:

$x...$	<i>polohový vektor v objektové rovině</i>
$X...$	<i>polohový vektor v obrazové rovině</i>
$M...$	<i>zvětšení (obraz/objekt)</i>
$X_1, X_2...$	<i>středů vyšetřujících paprsků</i>
$d_1, d_2...$	<i>průměry vyšetřujících paprsků</i>
$I_{11}(X), I_{12}(X)...$	<i>intenzity vyšetřujících paprsků</i>
$\tau_1(X), \tau_2(X)...$	<i>propustnost prvního a druhého fotografického záznamu</i>
$I_{01}(x), I_{02}(x)...$	<i>intenzita laserového řezu při prvním a druhém záznamu</i>
$T_0(X-Mx_i)...$	<i>normalizovaná propustnost obrazu i-té částice</i>

Pro případ jednotlivých expozic dvou samostatných obrazů lze zapsat jejich propustnosti jako:

$$\tau_1(X) = \int I_{01}(x)g(x, t)\tau_0(X - Mx)dx$$

Rovnice 1

Kde $g(x, t) = \sum_i \delta(x - x_i(t))$ je vzorkovací funkce, která vyjadřuje polohu částice v čase t a

$$\tau_2(X) = \int I_{02}(x')g(x', t + \Delta t)\tau_0(X - Mx')dx'$$

Rovnice 2

Kde $g(x', t + \Delta t = \sum_i \delta(x' - x'_i(t + \Delta t))$ je vzorkovací funkce, která vyjadřuje polohu částic v čase $t + \Delta t$.

Je vhodné rozložit vzorkovací funkci $g(x, t)$ na střední a flukтуаční část:

$$g(x, t) = C(x) + \Delta g(x, t)$$

Rovnice 3

Kde $C(x)$ reprezentuje koncentraci částic (tj. průměrný počet částic v jednotce objemu), která je časově nezávislá. Pro časovou střední hodnotu flukтуаční složky platí $\langle \Delta g(x, t) \rangle = 0$.

Dále pro I_1 a I_2 platí:

$$I_1(X) = I_{11}(X - X_1)\tau_1(X)$$

Rovnice 4

$$I_2(X) = I_{12}(X - X_2)\tau_2(X)$$

Rovnice 5

Pro stanovení průměrného posunutí částic v případě dvou samostatných obrazů (jednotlivé expozice) se používá vzájemná korelace I_1 a I_2 :

$$R_{12}(s) = \int I_1(X)I_2(X + s)dX$$

Rovnice 6

Kde s je separační vektor.

Dosazením rovnic 4 a 5 do rovnice 6:

$$R_{12}(s) = \int I_{11}(X - X_1)I_{12}(X - X_2 + s)\tau_1(X)\tau_2(X + s)dX$$

Rovnice 7

S pomocí rovnic 1 a 2:

$$\begin{aligned} & \tau_1(X)\tau_2(X + s) \\ &= \int I_{01}(x)g(x, t)\tau_0(X - Mx)dx \cdot \int I_{02}(x')g(x', t + \Delta t)\tau_0(X - Mx' + s)dx' \end{aligned}$$

A po dosazení rovnice 3 pak:

$$\begin{aligned} \tau_1(X)\tau_2(X+s) &= \left(\int I_{01}(x)C(x)\tau_0(X-Mx)dx + \int I_{01}(x)\tau_0(X-Mx)\Delta g(x,t)dx \right) \\ &\cdot \left(\int I_{02}(x')C(x')\tau_0(X-Mx'+s)dx' \right. \\ &\left. + \int I_{02}(x')\tau_0(X-Mx'+s)\Delta g(x',t+\Delta t)dx' \right) \end{aligned}$$

Rovnice 8

V dalším textu jsou použita následující zkrácená označení:

$$I_{01}(x) = I_{01}, I_{02}(x') = I'_{02} \quad a \quad C(x) = C, C(x') = C'$$

Roznásobením rovnice 8:

$$\begin{aligned} \tau_1(X)\tau_2(X+s) &= \int I_{01}C\tau_0(X-Mx)dx \\ &\cdot \int I'_{02}C'\tau_0(X-Mx'+s)dx' \\ &+ \iint \tau_0(X-x)\tau_0(X-Mx'+s)I_{01}I'_{02}\Delta g(x,t)\Delta g(x',t+\Delta t)dx dx' \\ &+ \iint \tau_0(X-x)\tau_0(X-Mx'+s)I_{01}I'_{02}(C\Delta g(x',t+\Delta t) + C'\Delta g(x,t))dx dx' \end{aligned}$$

Rovnice 9

Dosazením do rovnice 7:

$$R_{12}(s) = R_C(s) + R_D(s) + R_F(s)$$

Rovnice 10

Kde:

$$\begin{aligned} R_C(s) &= \int I_{11}(X-X_1)I_{12}(X-X_2+s) \\ &\cdot \left(\int I_{01}C\tau_0(X-Mx)dx \cdot \int I'_{02}C'\tau_0(X-Mx'+s)dx' \right) dX \end{aligned}$$

Rovnice 11

$$\begin{aligned} R_D(s) &= \int I_{11}(X-X_1)I_{12}(X-X_2+s) \\ &\cdot \left(\iint \tau_0(X-x)\tau_0(X-Mx'+s)I_{01}I'_{02}\Delta g(x,t)\Delta g(x',t+\Delta t)dx dx' \right) dX \end{aligned}$$

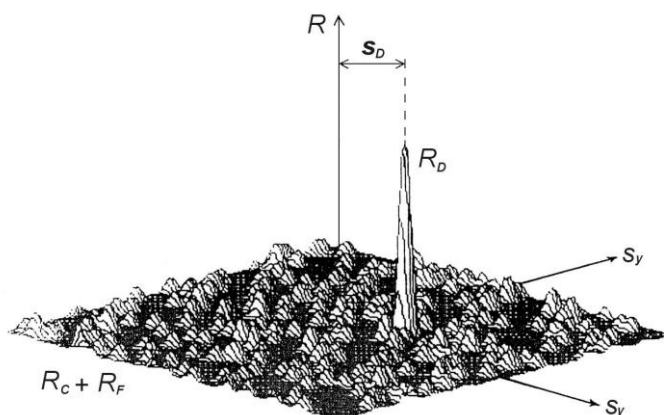
Rovnice 12

$$R_F(s) = \int I_{I1}(X - X_1) I_{I2}(X - X_2 + s) \cdot \left(\iint \tau_0(X - x) \tau_0(X - Mx' + s) I_{01} I'_{02} (C \Delta g(x', t + \Delta t) + C' \Delta g(x, t)) dx dx' \right) dX$$

Rovnice 13

R_C je konvoluce průměrných intenzit, R_F je složka fluktuálního šumu korelačního odhadu a R_D je korelace posunutí, které reprezentuje posunutí obrazu. [3]

Výsledkem vzájemné korelace je mapa vrcholů ve vyhodnocované oblasti (příklad obrázek 8). Výška konkrétního bodu na povrchu reliéfu vrcholů vůči ostatním bodům reliéfu definuje pravděpodobnost, se kterou v daném místě mapy došlo k posunutí částic. S největší pravděpodobností je pak vektor průměrného posunutí částic v této oblasti definován jako spojnice středu oblasti s jejím nejvyšším vrcholem (R_D). Při znalosti časového odstavu Δt se poté určí vektor rychlosti. Součet $R_C + R_F$ reprezentuje korelační šum. Tato metoda je v současné době CCD kamer používanější než autokorelace. [2] [3]



Obrázek 8 - Výsledek analýzy vzájemnou korelací [3]

3.2.6.2 Autokorelace

V následující citaci ze strany 131 a 132 publikace *Laserová anemometrie v mechanice tekutin* od Václava Kopeckého (zdroj [3] ze seznamu použité literatury) je uveden algoritmus pro autokorelaci, ke kterému lze dojít podobným způsobem:

„Opět nejprve zopakují používané symboly:

- $x...$ polohový vektor v objektové rovině
- $X...$ polohový vektor v obrazové rovině
- $X_1, X_2...$ středy vyšetřujících paprsků

$d_1, d_2 \dots$	<i>průměry vyšetřujících paprsků</i>
$I_{I1}(X), I_{I2}(X) \dots$	<i>intenzity vyšetřujících paprsků</i>
$\tau_1(X), \tau_2(X) \dots$	<i>propustnost prvního a druhého fotografického záznamu</i>

V případě dvojnásobné expozice PIV záznamu do jednoho obrazu je propustnost výsledného nesaturovaného záznamu aditivní:

$$\tau(X) = \tau_1(X) + \tau_2(X)$$

Rovnice 14

Intenzita vyšetřujícího paprsku I (pro $I_{I1}=I_{I2}$) je pak dána rovnicí:

$$I(X) = I_1(X - X_1)\tau(X)$$

Rovnice 15

Vhodnou technikou pro určení průměrného posunutí je v tomto případě autokorelace:

$$R(s) = \int I(X)I(X + s)dX$$

Rovnice 16

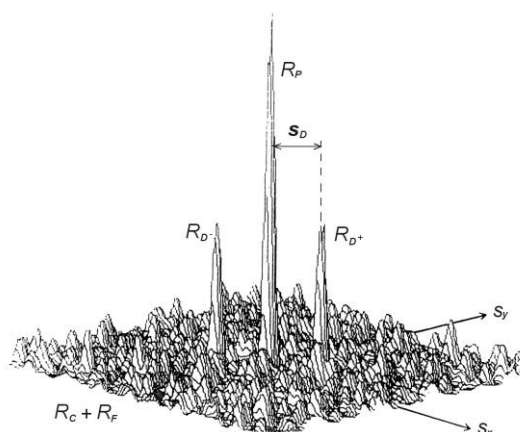
Autokorelace poté vede na rovnici tvořenou pěti členy:

$$R(s) = R_C(s) + R_{D+}(s) + R_{D-}(s) + R_F(s) + R_P(s)$$

Rovnice 17

Kde R_{D+} a R_{D-} jsou zrcadlově symetricky umístěné vrcholy korelace posunutí vůči centrálnímu vrcholu R_P .“ [3]

Charakteristický výsledek autokorelace je zobrazen na obrázku 9. Vzhledem k vrcholu R_P jsou typicky umístěny dva symetrické vrcholy R_{D+} a R_{D-} . Průměrné posunutí je pak definováno spojnicí jednoho z nich a centrálního vrcholu R_P . Největší nevýhoda autokorelace je dána nejednoznačností směru takového posunutí. Vrcholy R_{D+} a R_{D-} jsou zhruba poloviční a naopak korelační šum definovaný R_C+R_F je dvojnásobný. To způsobuje horší kvalitu obrazu. [2] [3]



Obrázek 9 - Výsledek analýzy autokorelací [3]

Z výše uvedeného vyplývá, že pro analýzu PIV záznamů je ke stanovení průměrného posunutí částic, výhodnější použití vzájemné korelace. A tedy záznam jednotlivých expozic.

3.2.6.3 Fourierova transformace

Fourierova transformace je často používaná metoda pro výpočet korelací. Je možné obecně použít dva základní výpočtové postupy.

Prvním z nich je metoda dvojnásobné Fourierovi transformace, která se s výhodou používá pro autokorelaci. Dalším je metoda Wienerova-Chinčinova teorému. Tím je možno vypočítat autokorelaci i vzájemnou korelaci. [3]

3.2.6.4 Zpracování PIV záznamů

K analýze PIV záznamů pomocí metod Fourierovi transformace je možné využít buď optické, nebo numerické metody zpracování PIV záznamů. V dnešní době rozvoj výpočetní techniky nahrává rozvoji numerických metod. Optické metody zpracování jsou poměrně složité a v současné době nevyhovují s ohledem na jejich rychlost a náročnost. Vstupem pro výpočet korelací numerickými metodami je digitální záznam obrazů pomocí CCD kamer. Určení průměrného posunutí částic je ztíženo přítomností tzv. „ztracených párů“. Ztracené páry jsou částice, které v době mezi dvěma záznamy, přibýly nebo naopak ubyly v konkrétní vyhodnocované oblasti. K potlačení tohoto šumu je možné aplikovat několik speciálních technik. [2] [3]

Okenní funkce hned na začátku roznásobí intenzitu šedi jednotlivých pixelů od středu (x_1) k okrajům (x_0) a tím potlačí částice vyskytující se na krajích vyhodnocované oblasti. Eliminuje tak tzv. „fantómové částice“ vzniklé na předpokládaném periodickém opakování předlohy. Obdobně funguje funkce tzv. „Gaussova okna“. K tomu, abychom počáteční i koncovou polohu částice byli schopni určit u co možná největšího počtu částic, ale i k odstranění negativních důsledků aplikace okenních funkcí, slouží technika překrývání vyhodnocovaných oblastí. Světlo, které vstupuje do objektivů kamer, je vhodné filtrovat

a odstranit tak šum, který nepřináší žádné informace o PIV signálu. K přesnějšímu určení polohy, šířky a výšky vrcholu v korelační rovině slouží metoda sub-pixelové interpolace. [2] [3]

Podrobnější vysvětlení těchto technik je uvedeno například v publikacích [2] a [3] ze seznamu použité literatury.

3.3 Porovnání metody PIV s dalšími metodami

Široké využití metody PIV vyplývá z jejich specifických vlastností. Porovnání s dalšími metodami měření je provedeno právě přes tyto vlastnosti.

Na rozdíl například od metody žhaveného drátu je tato metoda optická a tedy neinvazivní, a tak neovlivňuje svou přítomností proudící médium. To je výhodné především v mezních vrstvách u stěny nebo v případě vysokorychlostního proudění s rychlými změnami proudu. [2] [3]

Stejně jako laserová Dopplerovská metoda měření i metoda PIV využívá tzv. nepřímé měření rychlosti. Tekutiny jsou syceny malými částicemi a na ně se při měření zaměřuje optika záznamového zařízení. V případě měření rychlosti dvoufázových médií mohou být částice rozptýleny v obou fázích současně. V takovém případě je možné měřit i relativní pohyb obou fází. Částice mohou být do proudu přidávány až v průběhu měření, ale někdy s výhodou už před jeho začátkem. [2] [3]

S PIV jako technikou pro měření velkých oblastí mohou být srovnatelné pouze nové speciální metody: DGV – Doppler Global Velocimetry (Planar Doppler Velocimetry) a MTV – Molecular Tagging Velocimetry. Všechny ostatní metody měření umožňují měření rychlosti pouze v jednotlivém bodě rychlostního pole, avšak většinou s vyšší přesností.

Jediným limitem pro větší podrobnosti v čase je úroveň fotografické techniky (rychlost snímání). V konečném důsledku PIV umožňuje zachycení nestacionárních proudových polí. Při porovnání s metodou LDA musí být při metodě PIV zajištěna vyšší hustota sycení částicemi, které musí být rovnoměrně rozprostřené a jejich velikost smí vykazovat menší odchylky. Metoda PIV také potřebuje z několika důvodů větší intenzitu osvětlení než například metoda LDA. Především kvůli velikosti oblasti, kterou je nutné osvětlit, ale i z důvodu směru snímání částicemi rozptýleného světla. U PIV se zaznamenává tzv. boční rozptyl, který je však u sytících částí o několik řádů menší než rozptyl dopředný a zpětný. Dalším důvodem pro výkonnější zdroj je způsob detekce světla. Při měření PIV se používá CCD kamera, která má menší citlivost než fotonásobič používaný k zesilování světla u LDA. [3]

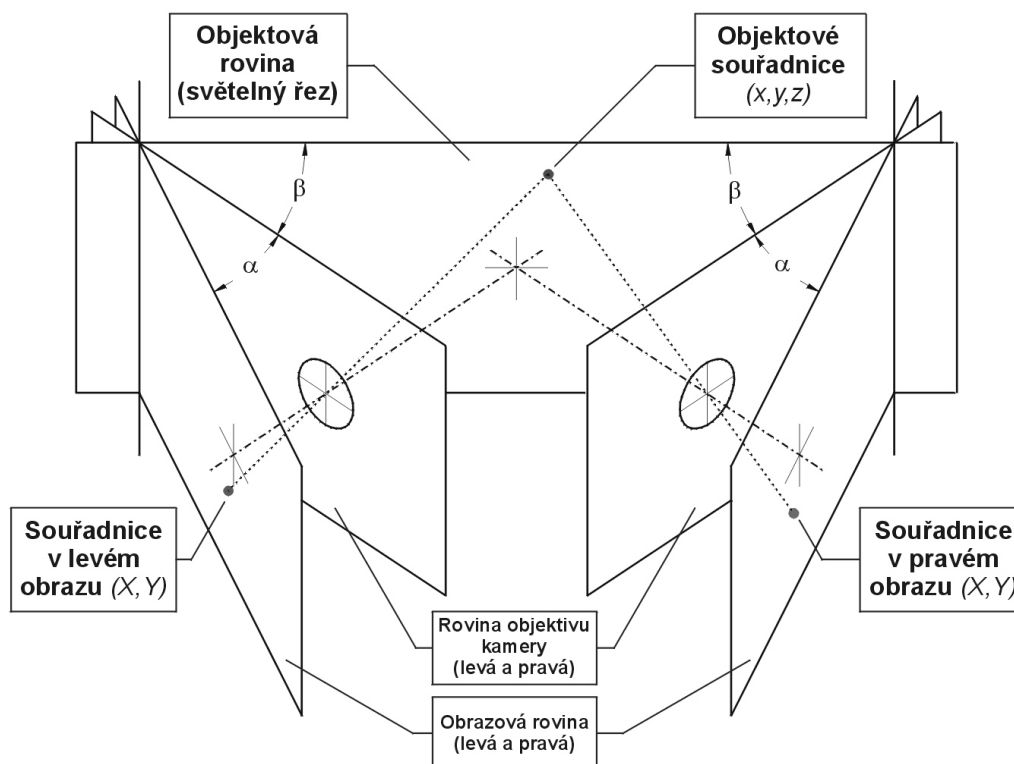
4 Metoda stereo PIV

Metoda stereo PIV je stejně jako 2D-PIV založena na principu měření posunutí částic za definovaný časový interval. Částice jsou zde však na rozdíl od konvenční metody snímány ne jednou, ale dvěma kamerami. Tím je dosaženo efektu „prostorového vidění“, který využívají i například lidské oči. Snímáním stejného prostoru laserového řezu z různých pozic – pod jinými úhly zaznamenávají kamery rozdílné obrazy. Stejně jako v lidském mozku,

jsou pak tyto obrazy složeny a výsledkem je třetí rozměr záznamu. Bez tohoto spojení obou kamer pod definovanými úhly snímání by stejně jako člověk při pohledu pouze jedním okem, nebyl software schopen určit parametry proudu kolmo ke kameře. [3]

Empiricky se ukazuje, že nejpřesnější výsledky jsou generovány za předpokladu, že osy objektivů kamer jsou od normály měřicí roviny vychýleny o $\pm 45^\circ$. V odůvodněných případech, kdy je přístup do měřicího prostoru omezen, lze úhly snížit na $\pm 30^\circ$ respektive $\pm 15^\circ$ a výstupy mohou být stále přijatelné. [3]

Jednou ze základních podmínek úspěšného měření metodou stereo PIV je splnění takzvané Scheimpflugovy podmínky. Podle ní platí, že pokud se obrazová rovina, objektová rovina a rovina objektivu kamery vzájemně protínají v jedné společné prostorové přímce, jeví se objektová rovina v obrazové rovině, v celém zorném poli kamery dostatečně ostrá. Tohoto nastavení se docílí naklopením obrazové roviny (roviny CCD senzoru) vůči rovině objektivu kamery. [3]



Obrázek 10 - Prostorová geometrie záznamu splňující Scheimpflugovu podmínku [3]

Promítání objektů z trojrozměrného prostoru do dvojrozměrných záznamů obrazů jednotlivých kamer je definováno vhodným numerickým obrazovým modelem. Třetí složky vektorů je nutné vypočítat z dvojic párů jednotlivých 2D posunutí zaznamenaných oběma kamerami. K tomu je nutné sestavit čtyři zobrazovací rovnice o třech neznámých, které se opírají o daný obrazový model. Podle použitého modelu jsou pak rovnice lineární nebo nelineární. [3]

V praxi jsou s ohledem na nelineární jevy, jako komplexní lom světla na rozhraní vody, skla a vzduchu, nebo zkreslení obrazu nedokonalou optikou kamery, s výhodou použity modely polynomické. Lineární obrazové modely založené na geometrické optice nedokáží takové jevy popsat. Naproti tomu polynomické modely nevychází z žádných fyzikálních jevů a jsou stanoveny empiricky. Tyto modely sestavili například, Soloff nebo Adrian a Liu. [3]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = & A_{000} + A_{100} \cdot x + A_{010} \cdot y + A_{001} \cdot z + A_{110} \cdot xy + A_{101} \cdot xz + A_{011} \cdot yz + A_{200} \cdot x^2 \\ & + A_{020} \cdot y^2 + A_{002} \cdot z^2 + A_{300} \cdot x^3 + A_{210} \cdot x^2y + A_{120} \cdot x^2z + A_{030} \cdot y^3 \\ & + A_{120} \cdot xy^2 + A_{021} \cdot y^2z + A_{120} \cdot xz^2 + A_{012} \cdot yz^2 + A_{111} \cdot xyz, \end{aligned}$$

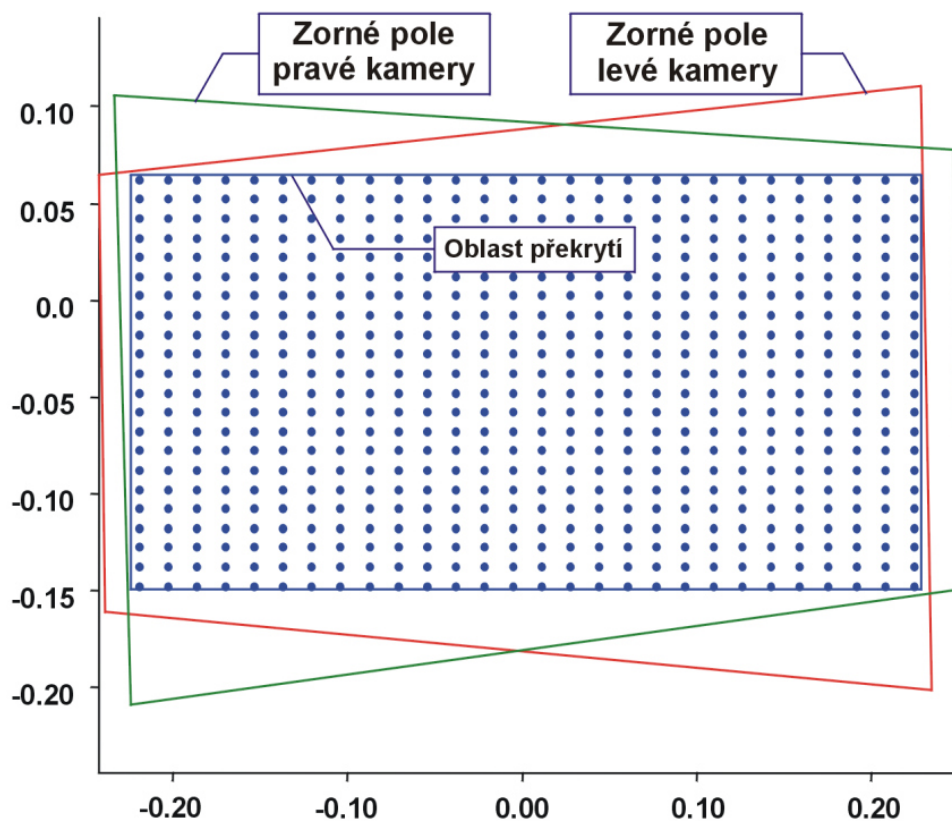
Rovnice 18

A zde představuje 2D vektory a tento zápis tak reprezentuje dvě polynomické rovnice pro obrazové souřadnice X, Y. [3]

Kalibrací kamer nastavujeme konkrétní hodnoty parametrů obrazových modelů a tím získáváme množinu kalibračních koeficientů. U modelů s fyzikálním pozadím je teoreticky možné takové koeficienty vypočítat ze známých vzdáleností a úhlů, ale v praxi není v naprosté většině experimentů možné vzdálenosti a úhly odměřit s potřebnou přesností. U empirických polynomických obrazových modelů pak samozřejmě o teoretickém odvození nemůže být řeč a kalibrace je prováděna experimentálně. Taková kalibrace je použita i při měření obtékání překážky v této diplomové práci. [3]

Ke kalibraci se používají etalony, což jsou rovinné terče s přesně polohově definovanými kalibračními značkami. Terč se v prvním kroku kalibrace umístí do světelného řezu a v dalších krocích se posouvá ve směru normály řezu do několika poloh před a za řez. Tyto posuvy jsou zaznamenávány jako pohyb v ose z. Běžně se při kalibraci takto zaznamenává pět poloh, minimálně tři. Značky zachycené kamerami se potom porovnají ze známými polohami na terči. [3]

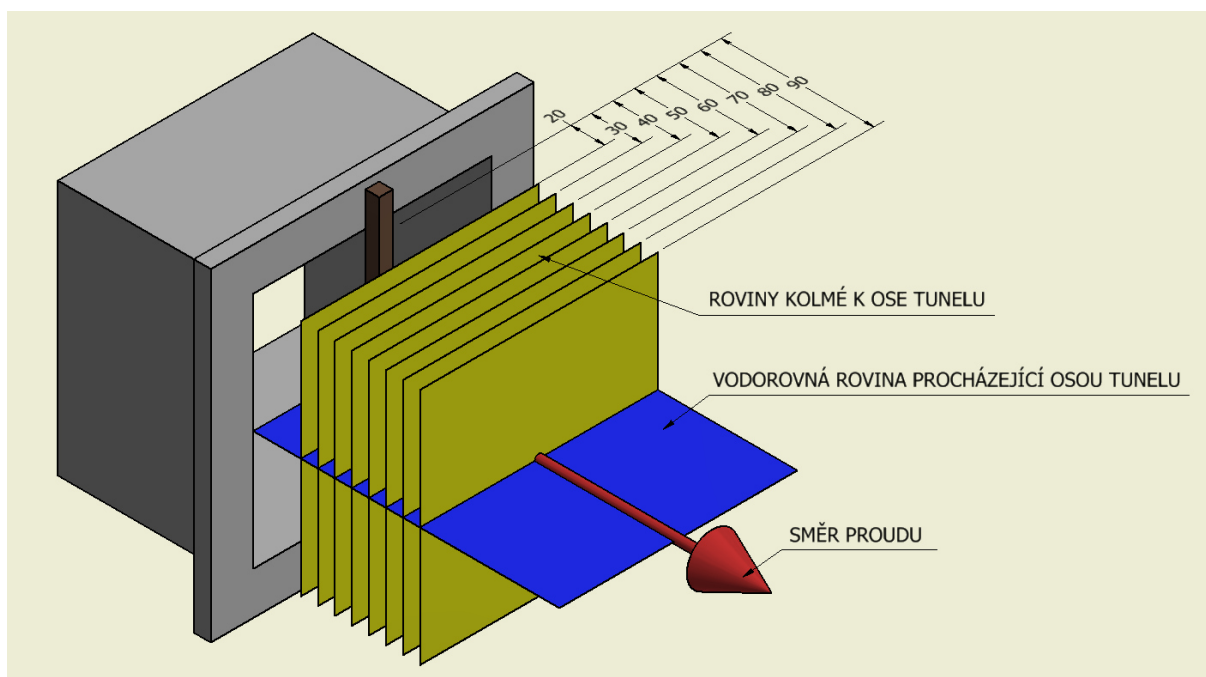
Při měření jsou nejprve současně zaznamenávány záběry obou kamer. Jejich zpracováním jako při konvenčním dvojrozměrném PIV jsou vytvořeny dvojice 2D vektorových polí proudu viděných v jednom okamžiku z levé i z pravé kamery. Pravoúhlá trojrozměrná síť je pak vytvořena pouze v oblasti světelného řezu, kde se překrývají perspektivně deformované pohledy dvojice kamer. Pomocí kalibračně zjištěného obrazového modelu se poté řeší zmíněná soustava rovnic a výsledkem je 3D vektorové pole. [3]



Obrázek 11 - Překrývání zorných polí dvojice kamer [3]

5 Vlastní měření

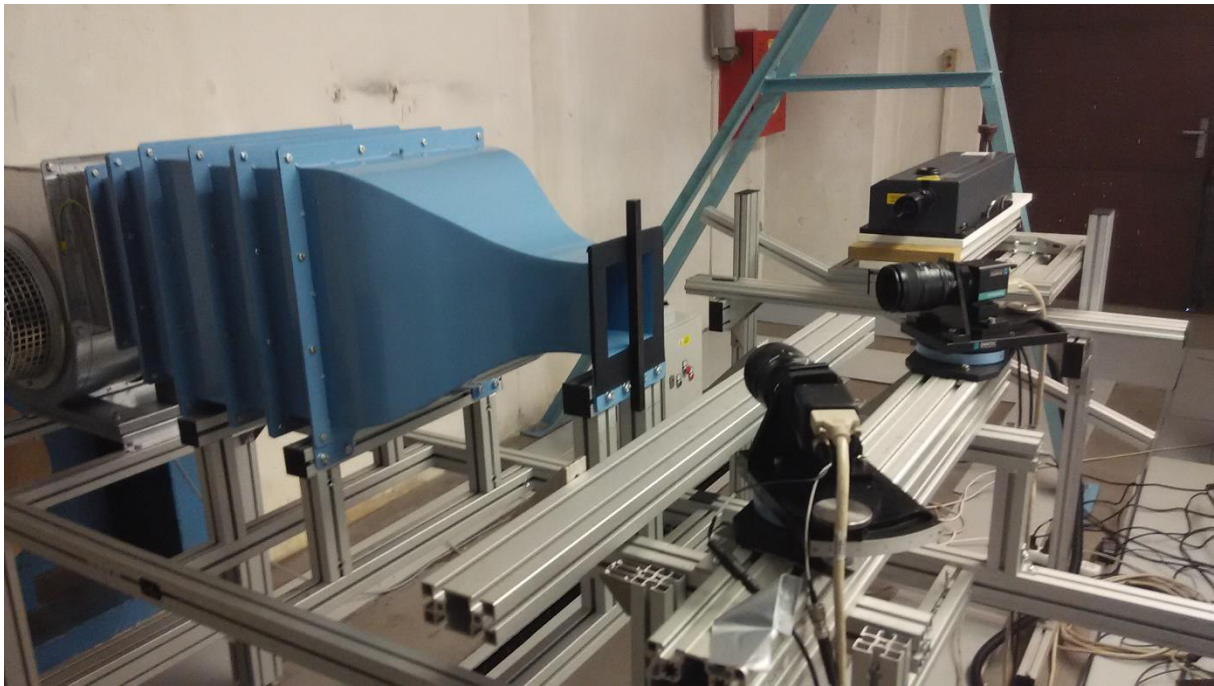
Měření bylo provedeno v laboratořích Katedry energetických strojů a zařízení, Strojní fakulty ZČU. Byl použit experimentální aerodynamický tunel. Nejprve byly sestaveny všechny komponenty systému pro měření metodou PIV. Poté následovala kalibrace metody. Po kalibraci byla do výstupu z větrného tunelu umístěna obtékaná překážka. Měření úplavu za obtékanou překážkou metodou stereo PIV proběhlo v několika svislých rovnoběžných rovinách kolmých k ose tunelu. Následovalo přestavění komponent pro měření standardní metodou PIV. Touto metodou byl proměřen úplav ve vodorovné rovině procházející osou tunelu v polovině výšky obtékané překážky. Toto měření bylo provedeno ve třech rychlostních režimech. Na provedené měření navazovalo vyhodnocení jednotlivých rychlostních polí.



Obrázek 12 - Schéma zobrazující roviny měření

5.1 Popis sestavy experimentu

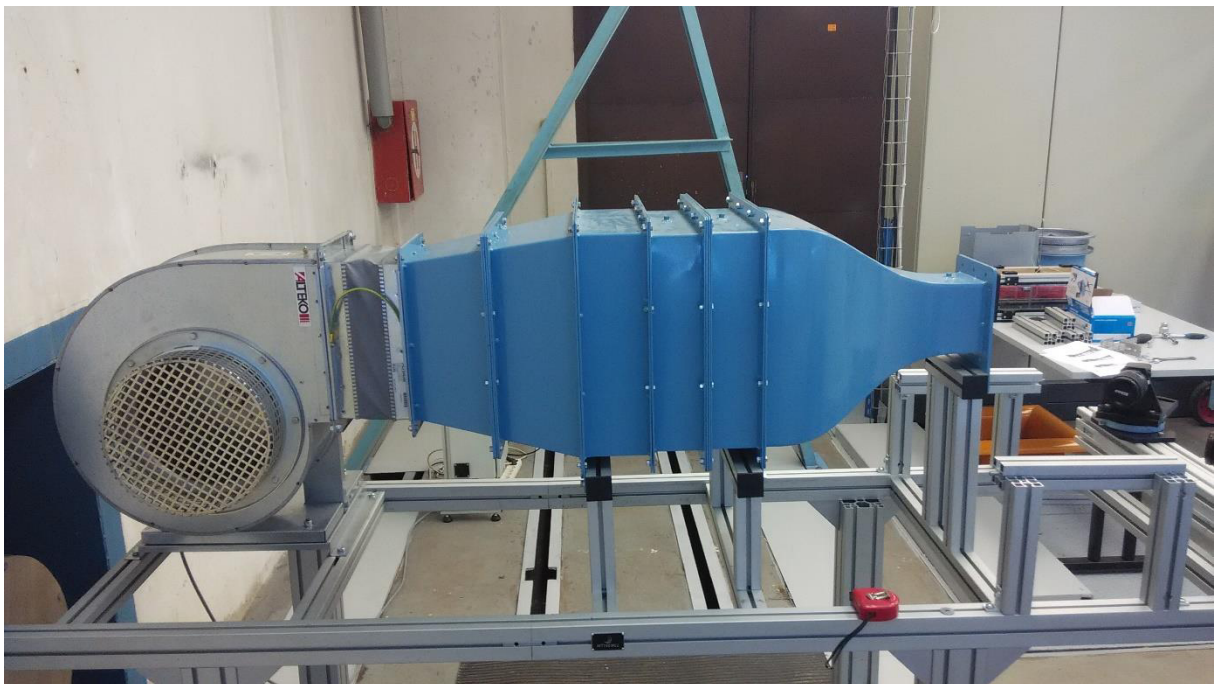
K aerodynamickému tunelu byly přistaveny všechny komponenty systému PIV od společnosti Dantec, podle požadavků kladených na měření těmito metodami. V první řadě byl upraven rám z hliníkových profilů použitý již pro sestavu aerodynamického tunelu. Na posuvný nosník byly podle zásad měření stereo PIV umístěny kamery tak, že osy objektivů kamer byly od normály měřicí roviny vychýleny o 45° na obě strany. Celý rám byl důkladně vyrovnán a proměřen. Na samostatný pohyblivý hliníkový rám s posuvníkem byl umístěn laser. Rám byl opět vyrovnán a to i vzhledem k hlavnímu rámu. Nakonec byly všechny komponenty propojeny se synchronizérem a počítačem. Laserový řez byl nastaven do první polohy zatím v obecné vzdálenosti od tunelu. Cílem prvních měření bylo vyzkoušet techniku i celou měřicí sestavu.



Obrázek 13 - Sestava pro měření

5.1.1 Experimentální tunel

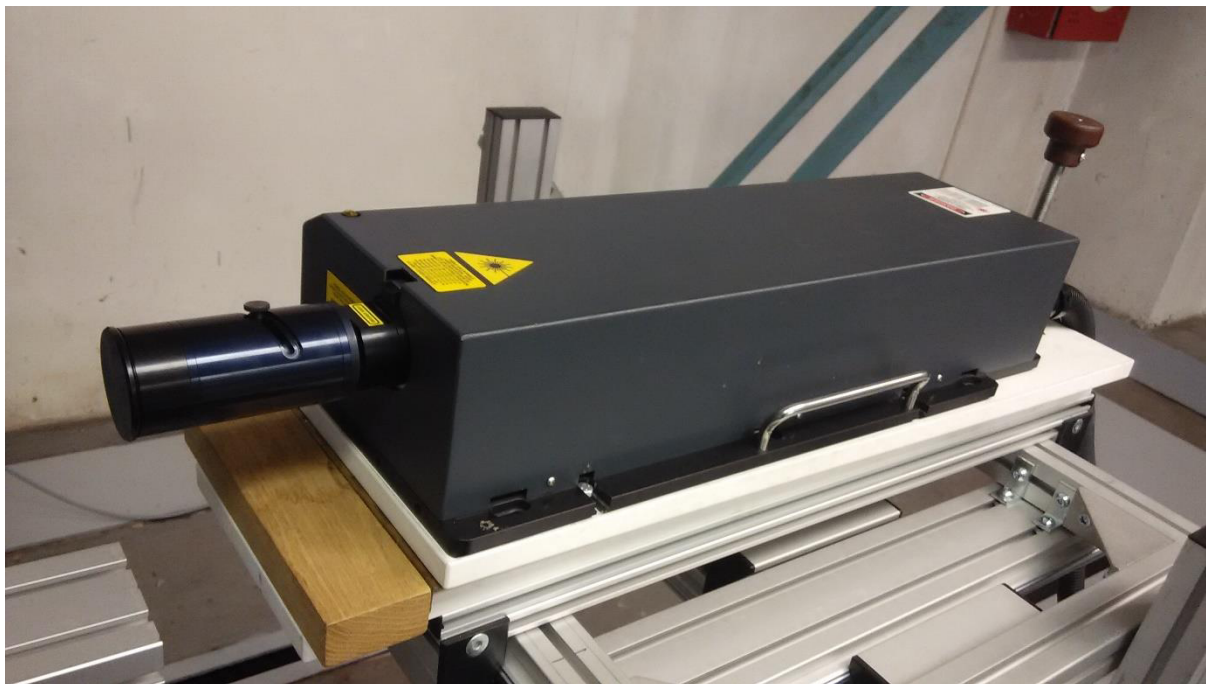
Pro experiment byl využit nízkorychlostní aerodynamický tunel LSWT-OC-014-50 s otevřeným oběhem. Tunel je orientován horizontálně, jeho součásti jsou vyrobeny převážně z oceli.



Obrázek 14 - Aerodynamický tunel LSWT-OC-014-50

5.1.2 Použitý laser

K vytvoření světelného řezu byl použit laser Solo 200XT 2 x 200 mJ s optikou série 70.



Obrázek 15 - Laser Solo 200XT x 200 mJ

5.1.3 Záznamové zařízení

Pro záznam proudících částic se byly využity dvě kamery FlowSense 4M s optikou AF MICRO NIKKOR 60 mm.



Obrázek 16 - Kamera FlowSense 4M

5.1.4 Generátor částic

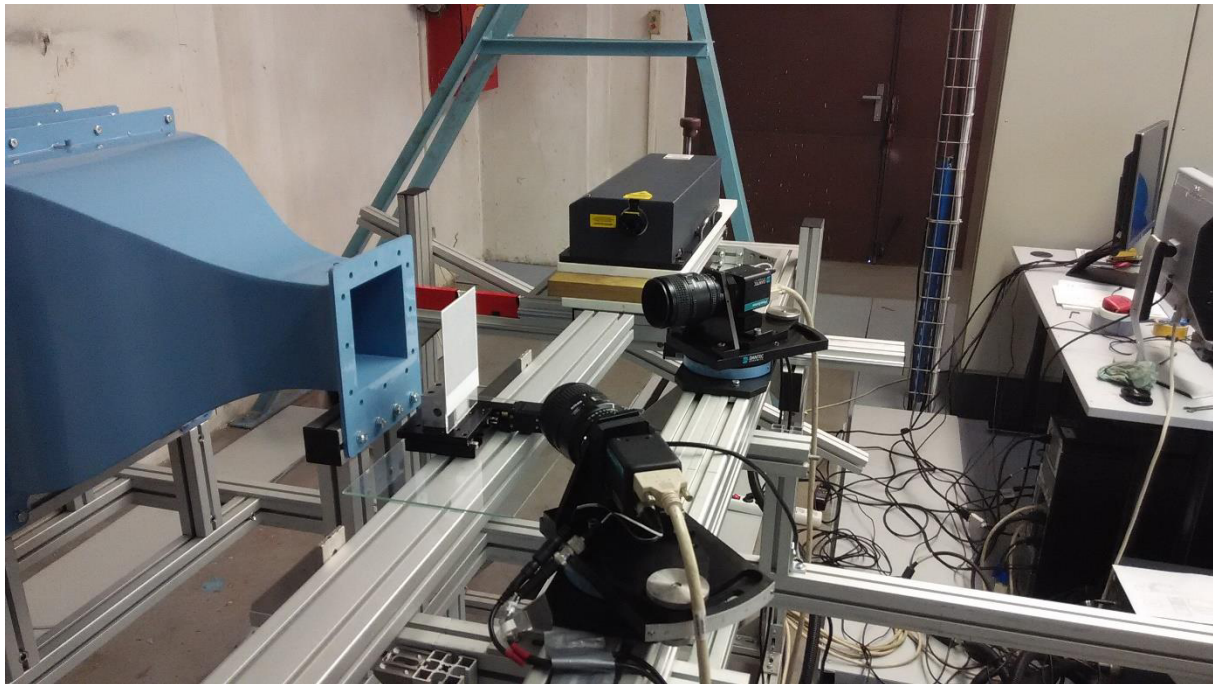
Po pokusech se syčením proudu pomocí generátoru jemných kapiček olivového oleje, se nakonec v tomto měření osvědčilo syčení proudu termickým generátorem kouře typu „SAFEX“. Tento generátor pracuje se speciální kapalinou, určenou pro testování proudění větrnými tunely v interiérech.



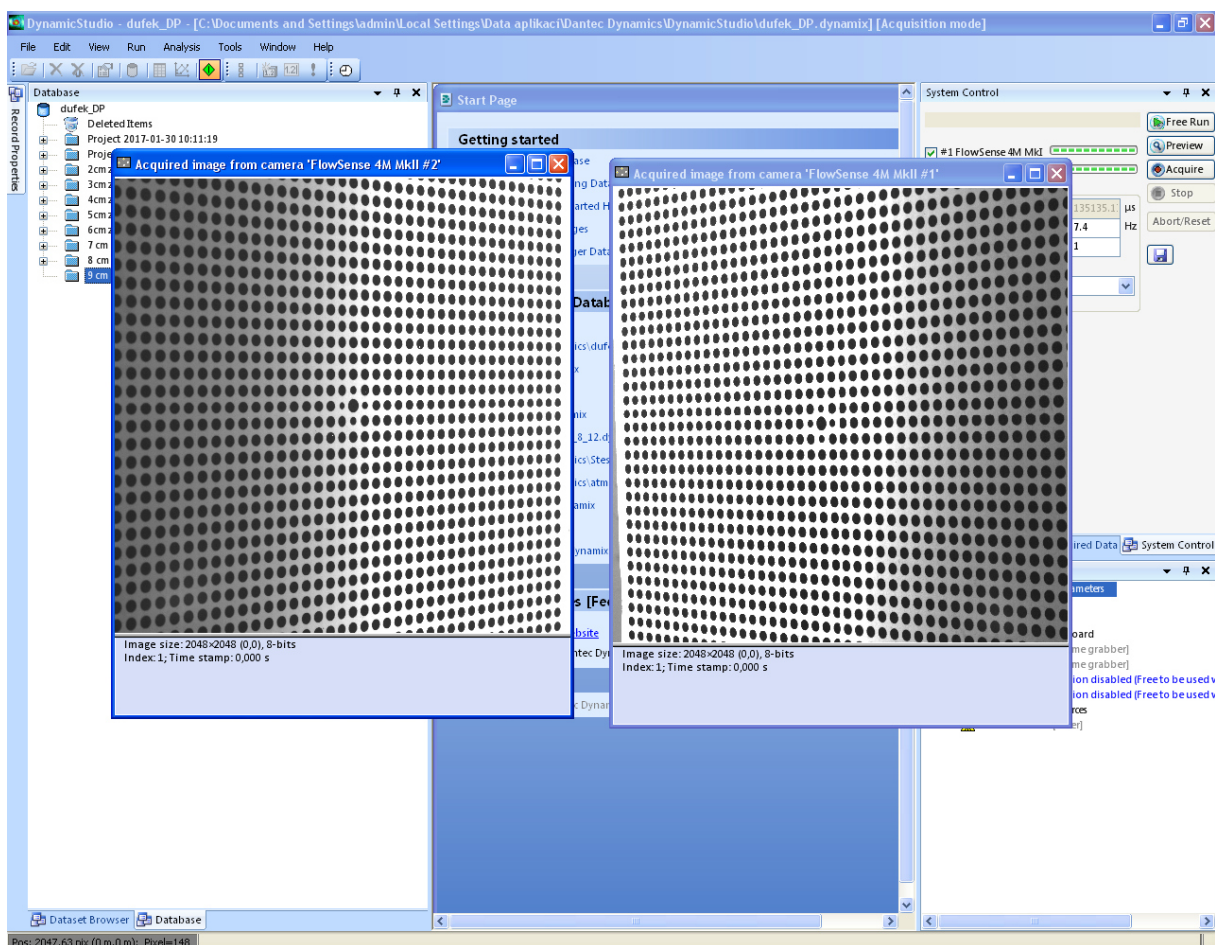
Obrázek 17 - Generátor částic SAFEX

5.2 Kalibrace

Prvním krokem měření je provedení kalibrace. Do roviny dané laserovým řezem byl umístěn posuvník s kalibračním terčem. Ve své diplomové práci jsem provedl kalibraci na přesně definovaném bodovém terči o rozměrech 100x100 milimetrů. Terč byl ustaven v rovině, která bude později proměřena. Jeho poloha se musí měnit, proto byl spojen s automatickým posuvníkem. Před kalibrací byl terč rovnoměrně osvětlen přídatným světlem a kamery zaostřeny. Nutné je splnění Scheimpflugovy podmínky. Vertikálně i horizontálně musí obě kamery zachycovat stejný počet bodů. Toho se docílí mimo jiné i jejich posouváním po nosném profilu. Pro další postup kalibrace je především nezbytné dosažení dostatečného kontrastu bodů a bílého pozadí.

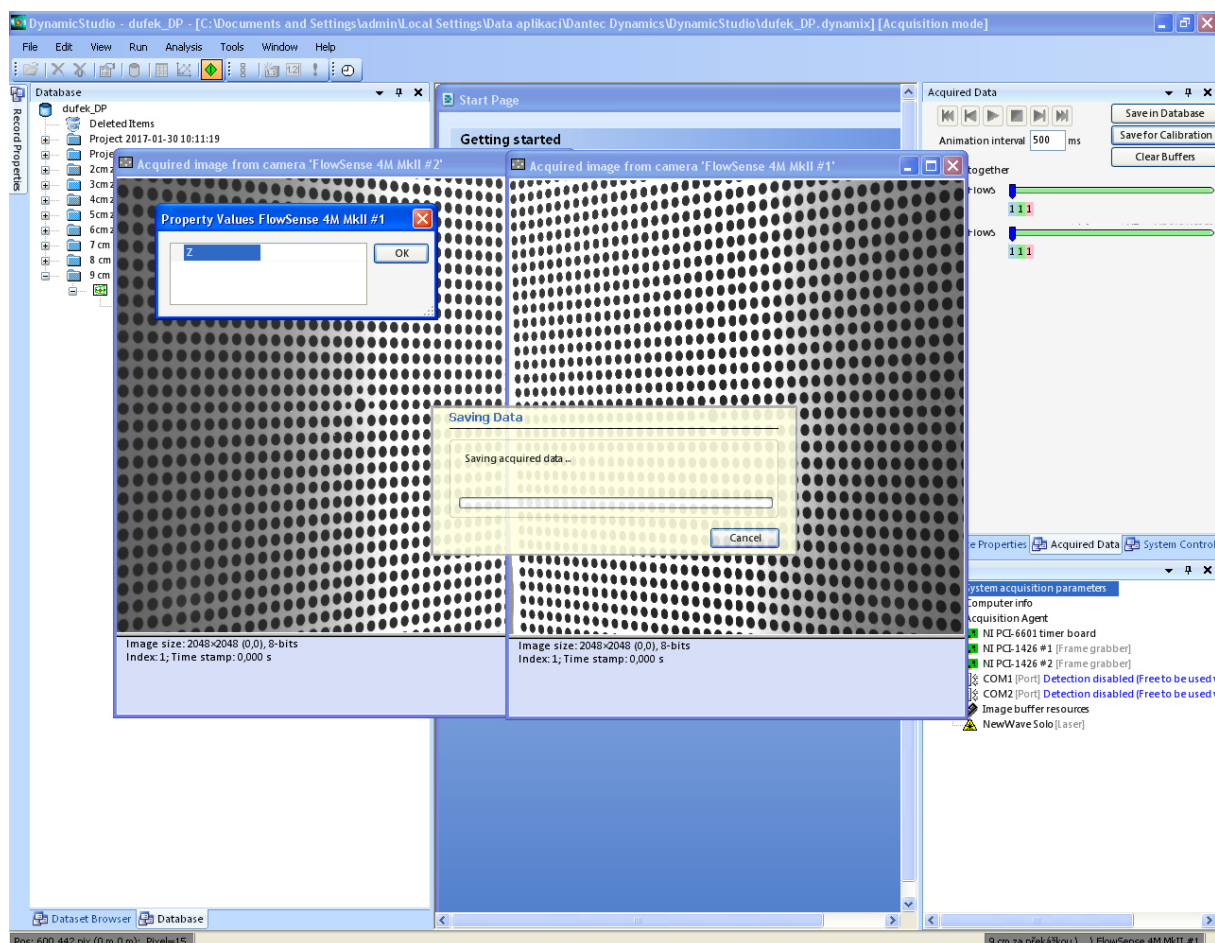


Obrázek 18 - Sestava komponent pro kalibraci



Obrázek 19 - Záznamy kalibračních terčů

Z podstaty sestavení kamer, kalibračního terče a přidavného osvětlení vyplývá, že plocha terče není zachycována jako dokonale rovnoměrně osvětlená. Je tedy vždy nutné pomocí ostření, clonění a dalších úprav najít konečný kompromis. Výsledné záběry musí mít takovou kvalitu, aby je byl vyhodnocovací software schopen vyhodnotit. Při měření byl použit software DynamicStudio od společnosti Dantec.



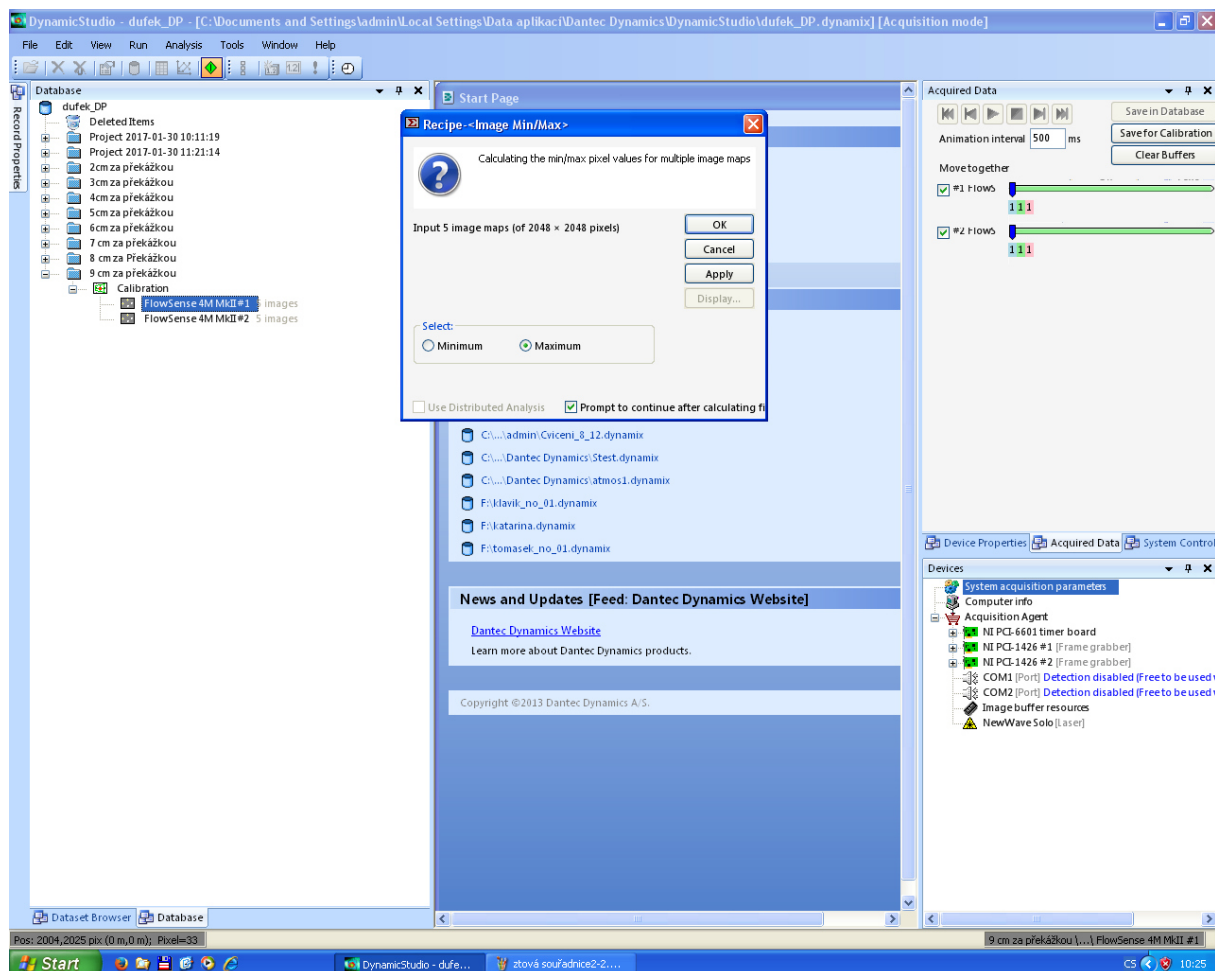
Obrázek 20 - Zadání souřadnice roviny ve směru osy "z"

Pro vytvoření kalibrační matice potřebuje software zachytit přesný bodový terč v definovaných vzdálenostech. Terč byl posouván v rovině proudění média z větrného tunelu. Z polohy nula, která byla rovinou laserového řezu pro další měření, docházelo postupně k posunu terče o jeden a dva centimetry za i před polohu nula. V každé poloze byl terč zachycen kamerami. Polohy byly zapsány jako souřadnice roviny ve směru osy „z“.

V případě ideálních podmínek by výsledkem byla dostatečící série pěti fotografií z každé kamery a následovalo by vytvoření matematického modelu. Takové výsledky, ale vychází zřídka. Proto jsem i ve své práci musel přistoupit k postupu, který pomocí úprav jednotlivých fotografií tento výstup zlepší.

5.2.1 Funkce minima/maxima („Image min/max“)

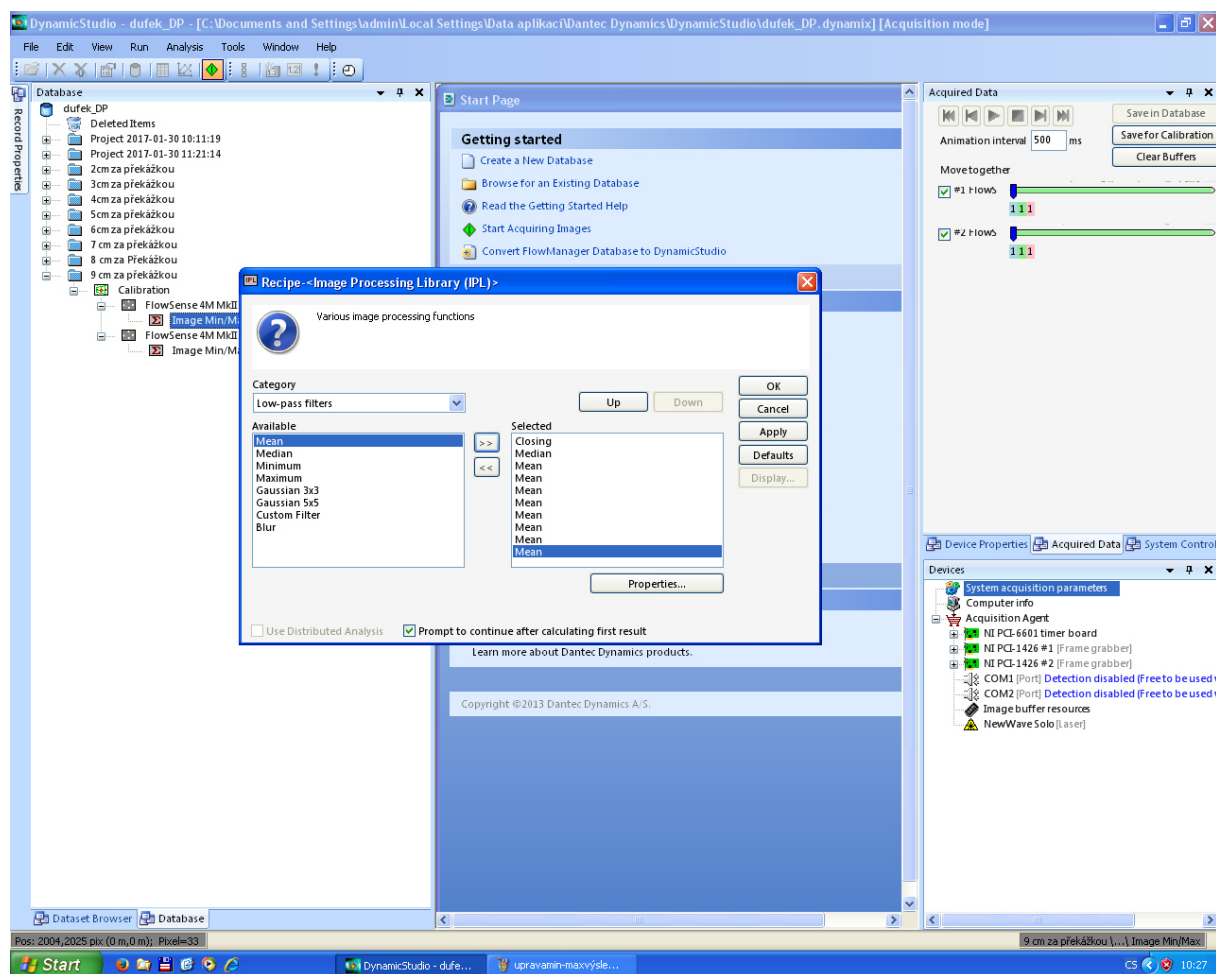
První úpravou byla funkce min/max. Tato funkce se používá k vytvoření pole maxima nebo minima v sérii snímků. Lze ji kombinovat s dalšími metodami „Image Processing“ jako například s „Image Mean“ nebo „Image Arithmetic“. V mém případě bylo vytvořeno pole maxima. [6]



Obrázek 21 - Snímek obrazovky při aplikaci funkce min/max

5.2.2 Knihovna úprav snímků („Image Processing Library (IPL)“)

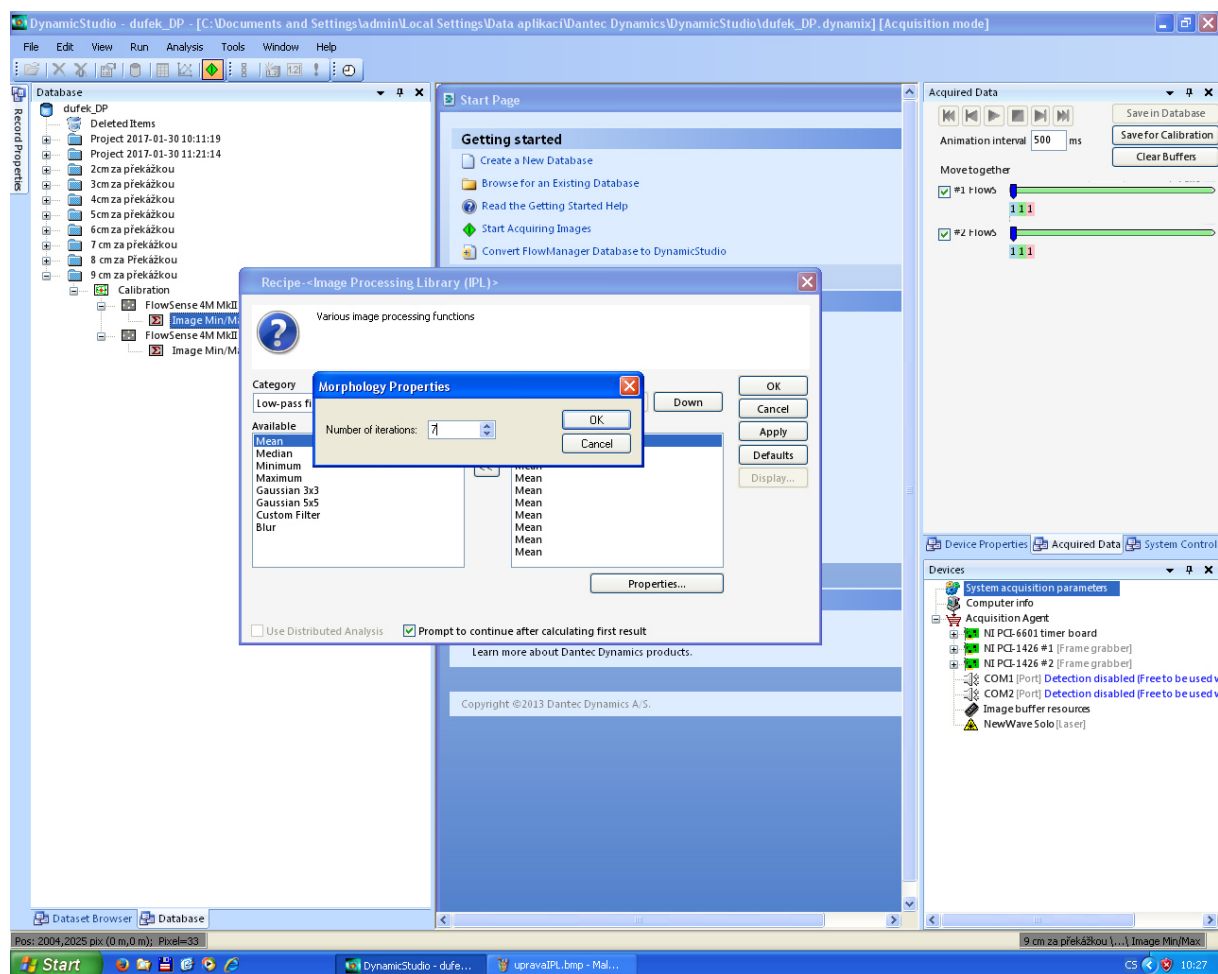
Na výstupy z „Image min/max“ se aplikovala série filtrů „Image Processing Library“. Ty umožňují vyhladit snímky, zvýraznit hrany nebo například zvýšit kontrast. [6]



Obrázek 22 - Snímek obrazovky při aplikaci série filtrů

5.2.2.1 Uzavírací filtry („Closing filters“)

Prvním použitým filtrem byl „Closing filter“. Ten slouží pro odstranění izolovaných tmavých oblastí. Počet iterací byl nastaven na sedm a tím podle vztahu: $2N+1 \times 2N+1$ velikost jádra na 15×15 . Tento nástroj nejprve eliminuje tmavé oblasti menší než jádro a následně spojí okolní světlé oblasti. S výhodou se tak používá k úpravě snímků tmavých objektů na světlém pozadí. [6]



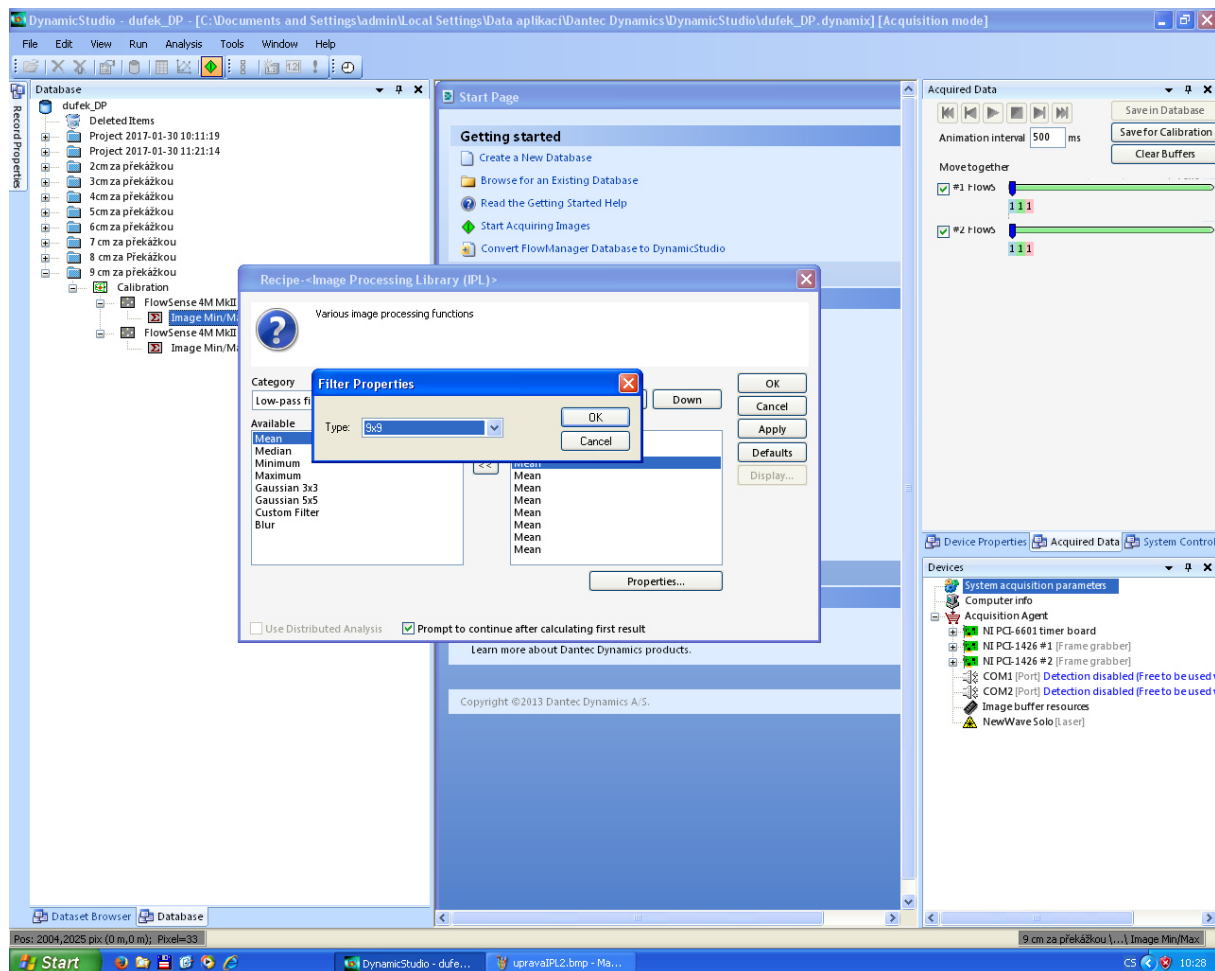
Obrázek 23 - Snímek obrazovky - nastavení uzavíracího filtru

5.2.2.2 Středové filtry („Median filters“)

Následoval „Median filter“, který se řadí mezi takzvané nelineární filtry. Filtr třídí prvky podle intenzity stupně šedi a nahrazuje centrální body střední hodnotou. Tím pomáhá eliminovat vysokofrekvenční šum při zachování hran. [6]

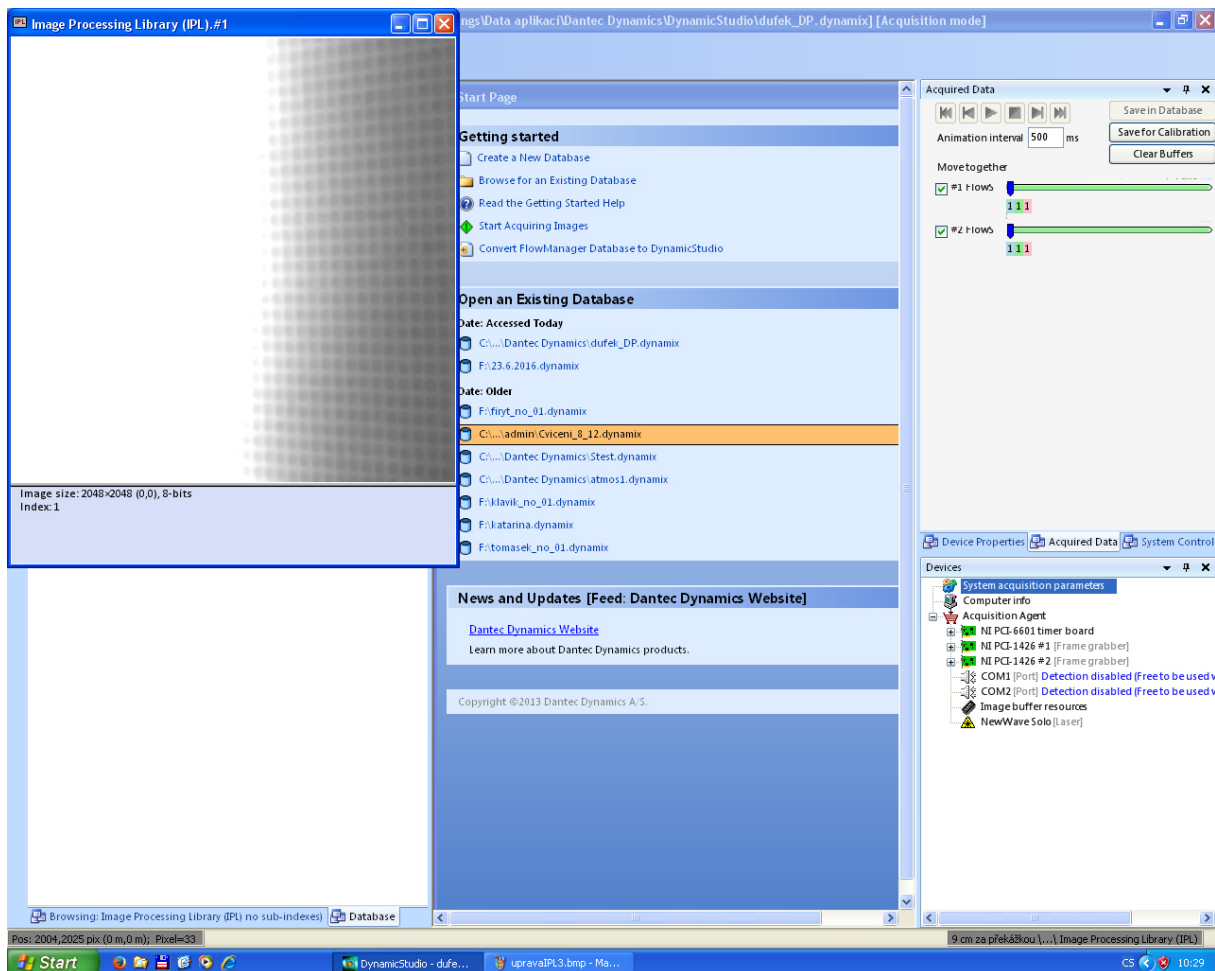
5.2.2.3 Filtry průměru („Mean filters“)

„Mean filter“ je nejjednodušší lineární lokální filtr používaný k vyhlazení snímků. Filtr nezohledňuje gradient uvnitř definovaného jádra, proto se pro aplikace v mechanice tekutin doporučuje velikost 3x3 nebo 5x5. Při mém měření se však nejvíce osvědčila velikost 9x9. Tento filtr jsem osmkrát opakoval. [6]



Obrázek 24 - Snímek obrazovky - nastavení filtru průměru

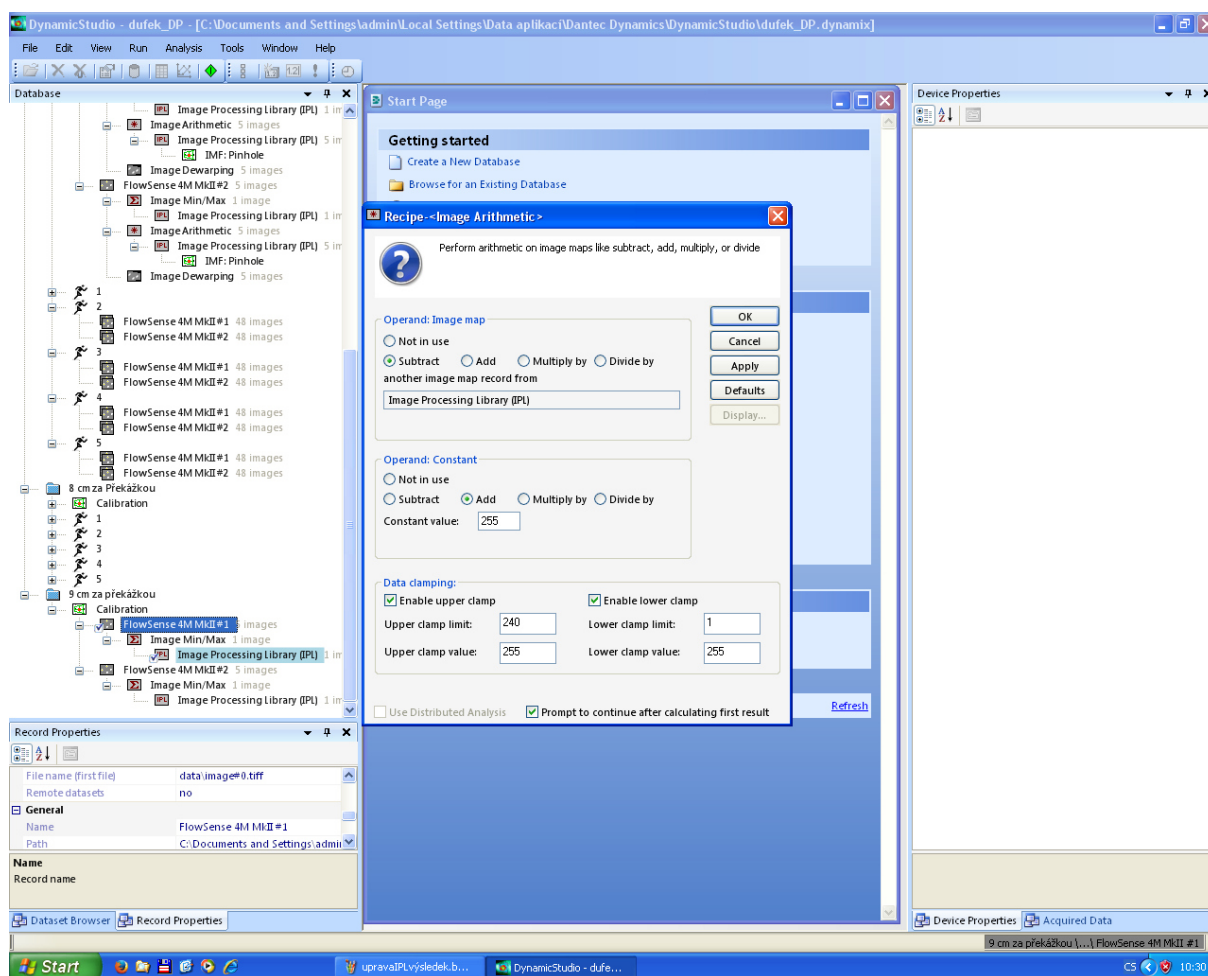
Výsledek těchto úprav je patrný z následujícího snímku obrazovky.



Obrázek 25 - Snímek obrazovky - výsledek úprav

5.2.3 Funkce obrazové aritmetiky („Image Arithmetic“)

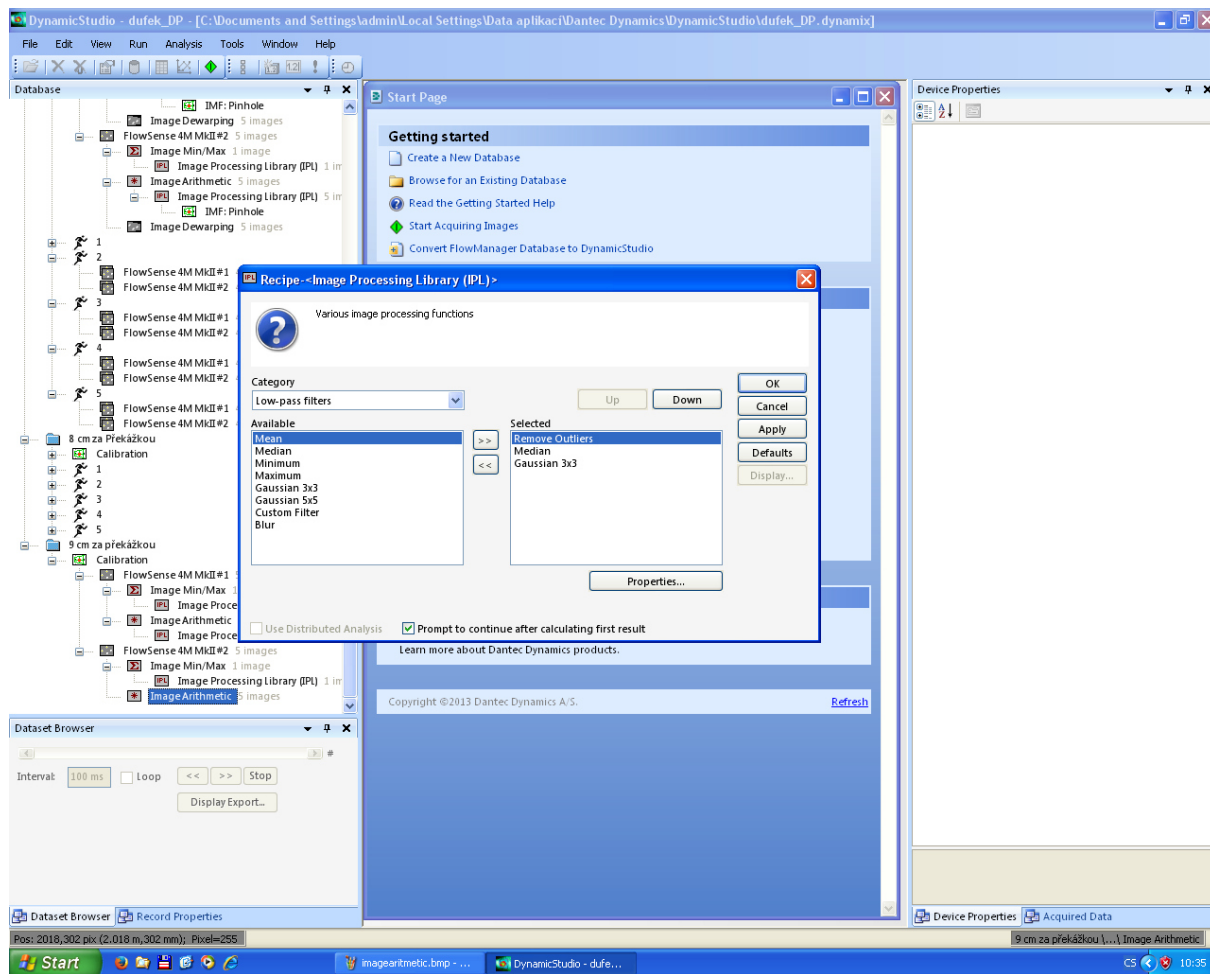
Následovala úprava pomocí funkce „*Image Arithmetic*“, která umožňuje provádět aritmetické operace s jednotlivými pixely záznamů. S touto funkcí lze pracovat při úpravě jednotlivých expozic i expozice dvojnásobné. Umožňuje sčítat a odčítat případně násobit nebo dělit hodnoty pixelů jednotlivých záznamů s určitou konstantní hodnotou případně s pixely jiného záznamu. Takové operace je možné libovolně kombinovat. Zároveň tato metoda umožňuje omezit jednotlivé hodnoty pixelů v určitém rozmezí a okolní tak eliminovat. Většinu zmíněných úprav této funkce jsem při kalibraci využil. Od sérií původních snímků byla odečtena pole vytvořená výše zmíněnými úpravami. Dále byla připočtena konstantní hodnota a určeny meze. Nastavení je patrné z následujícího snímku obrazovky. [6]



Obrázek 26 - Nastavení funkce obrazové aritmetiky

5.2.4 Knihovna úprav snímků („Image Processing Library (IPL)“)

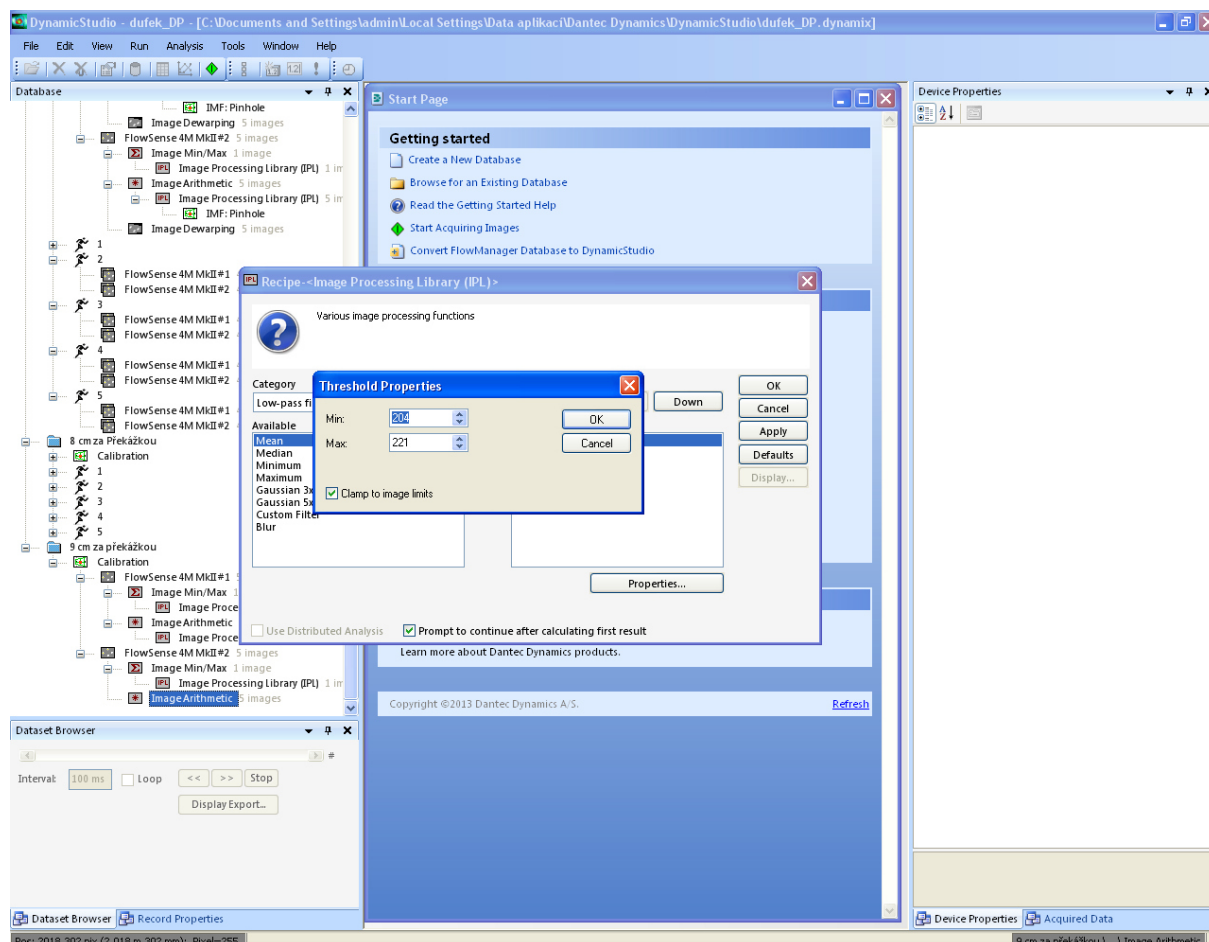
Na fotografie, které prošly zmíněnými úpravami, se opět aplikovaly filtry IPL.



Obrázek 27 - Snímek obrazovky při aplikaci série filtrů

5.2.4.1 Filtry odstranění vzdálených hodnot („Remove Outliers“)

Tento filtr umožňuje nastavit dolní a horní limit akceptovaných hodnot pixelů ve stupních šedi. Pro 8-bitové obrazy se hodnoty pohybují v rozmezí 0 až 255. Já jsem zvolil limity 204 – 221. [6]



Obrázek 28 - Snímek obrazovky při nastavování filtru pro odstranění vzdálených hodnot

5.2.4.2 Středové filtry („Median filters“)

Bylo zvoleno nastavení 3x3.

5.2.4.3 Gaussovy filtry („Gaussian filters“)

„*Gaussian filter*“ také patří mezi lineární filtry. Hodnota ve středu jádra je v tomto případě vypočítávána pomocí dvourozměrného Gaussova rozdělení. Já jsem zvolil velikost jádra 3x3. [6]

5.2.5 Zobrazovací model („Imaging Model Fit“)

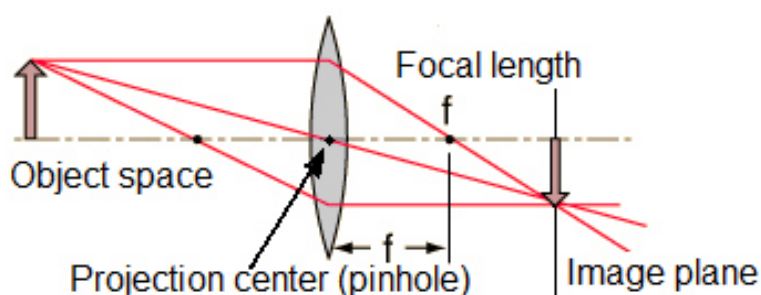
„*Imaging Model*“ je matematický model popisující to, jak promítnout body z objektové roviny do roviny obrazové. V objektové rovině jsou rozměry definované v milimetrech, v obrazové pak v pixelech. V závislosti na zvoleném zobrazovacím modelu může transformace popisovat různé prostorové deformace. Všechny modely jsou charakterizovány určitými

parametry a proces jejich zjištění se označuje jako „*Imaging Model Fit*“. Parametry jsou určeny tak, aby co nejlépe definovaly vztah mezi objektovou a obrazovou rovinou. Výsledkem této operace je umožnění přesného měření v reálném prostoru na základě pixelových souřadnic ze získaných záznamů. V případě 3D měření model popisuje body v prostoru zaznamenané do obrazové dvourozměrné roviny. Po každém přenastavení polohy měřicího prostoru nebo například kamer je nutné parametry matematického modelu aktualizovat. V závislosti na parametrech konkrétního experimentu poskytuje software DynamicStudio několik různých zobrazovacích modelů. Z důvodů přesnosti není v praxi stanovení parametrů možné provádět přes odměření jednotlivých vzdáleností a úhlů. Bez výjimky se tak využívá analýzy fotografií kalibračních terčů. [6]

Podstata „*Imaging Model Fit*“ sestává ze dvou úloh. Za prvé identifikovat pixelové souřadnice známých bodů v prostoru. Ty software automaticky v jednotlivých fotografiích přesných kalibračních terčů rozpozná. Za druhé upravit trojrozměrný model do dvojrozměrných obrazů, k čemuž se používá upravená metoda nejmenších čtverců. Při měření 2D PIV stačí jedna fotografie kalibračního terče v měřicí rovině. V případě stereo PIV se terč musí z nulové polohy laserového řezu posouvat o definovanou vzdálenost před a za. Kromě mnou použitého typu kalibračního terče jsou vhodné i další druhy. [6]

5.2.5.1 Dírkový zobrazovací model („IMF: Pinhole“)

Při svém měření jsem využil matematický model „*Pinhole camera*“. Výhodou tohoto modelu je to, že nepotřebuje přesný travverzovací systém, který jsem však já k dispozici měl. Také není při nastavování potřeba zadávat vzdálenost ke kalibračnímu terči. Určitou nevýhodou je nutnost pořízení záznamů alespoň ve třech vzdálenostech. Model je založen na zjednodušeném modelu čočky, kde je čočka umístěna do centra projekce. [6]

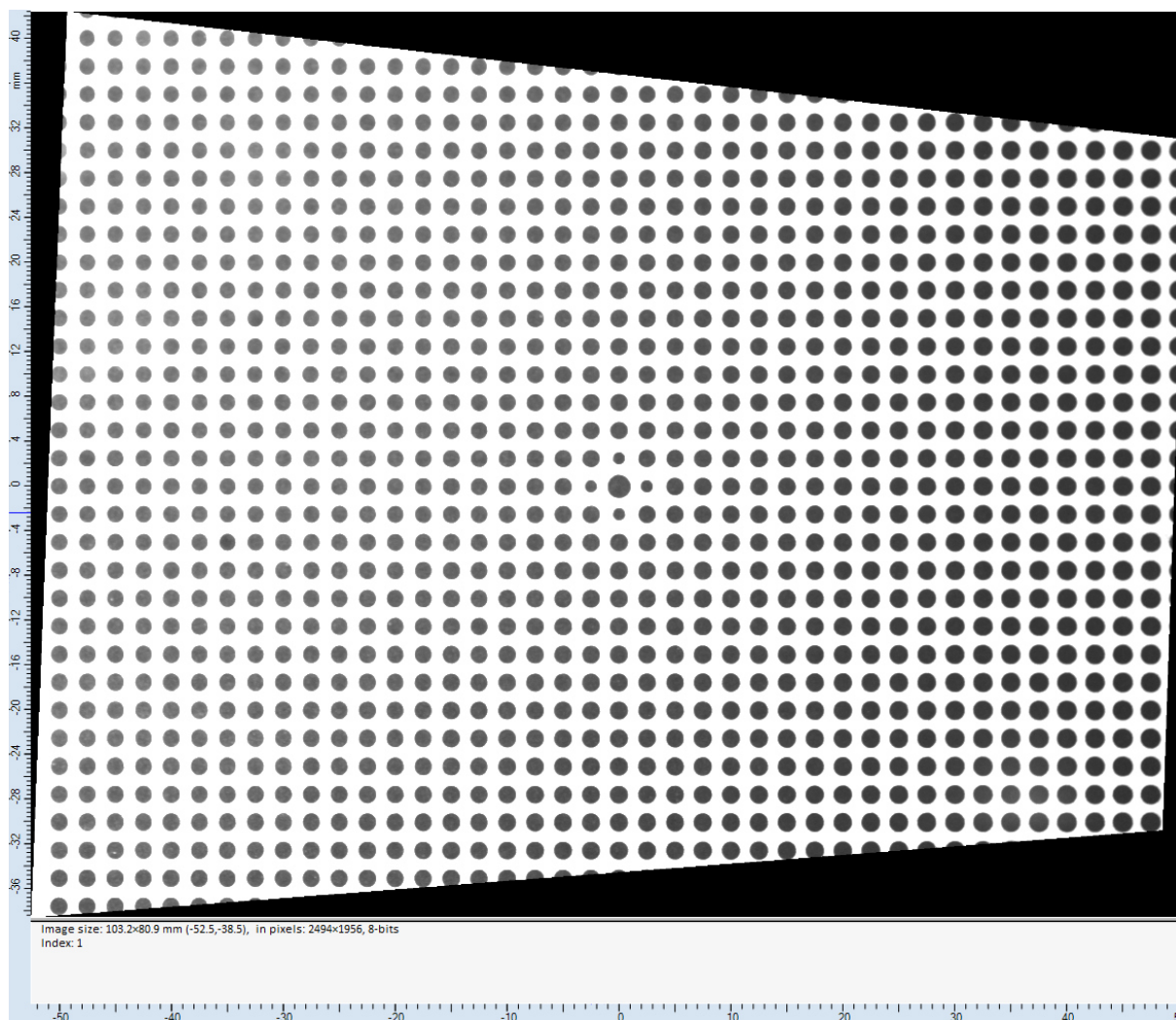


Obrázek 29 - Princip dírkového zobrazovacího modelu [6]

5.2.6 Funkce obrazového zkreslení („Image Dewarping“)

Z důvodů perspektivy a neosového pohledu kamer na kalibrační terč jsou záznamy z obou kamer zkresleny. Pomocí této funkce lze ověřit, že program při úpravě IMF rozpoznal dostatečné množství bodů na kalibračním terči a našel střed terče, který je zvýrazněn jedním větším bodem a kolem něj čtyřmi body oproti normálu zmenšenými. Po každé kalibraci jsem si toto ověřil a na záznamy jsem funkci „*Dewarping*“ aplikoval. Výstupem byly série pěti výstupů kombinujících dvojice záznamů z jednotlivých kamer. Okraje jsou zkresleny z důvodu

narovnání perspektivy a středy všech výsledných výstupů musí ležet v počátku zobrazeného souřadnicového systému. [6]



Obrázek 30 - Snímek obrazovky - výsledek funkce obrazového zkreslení

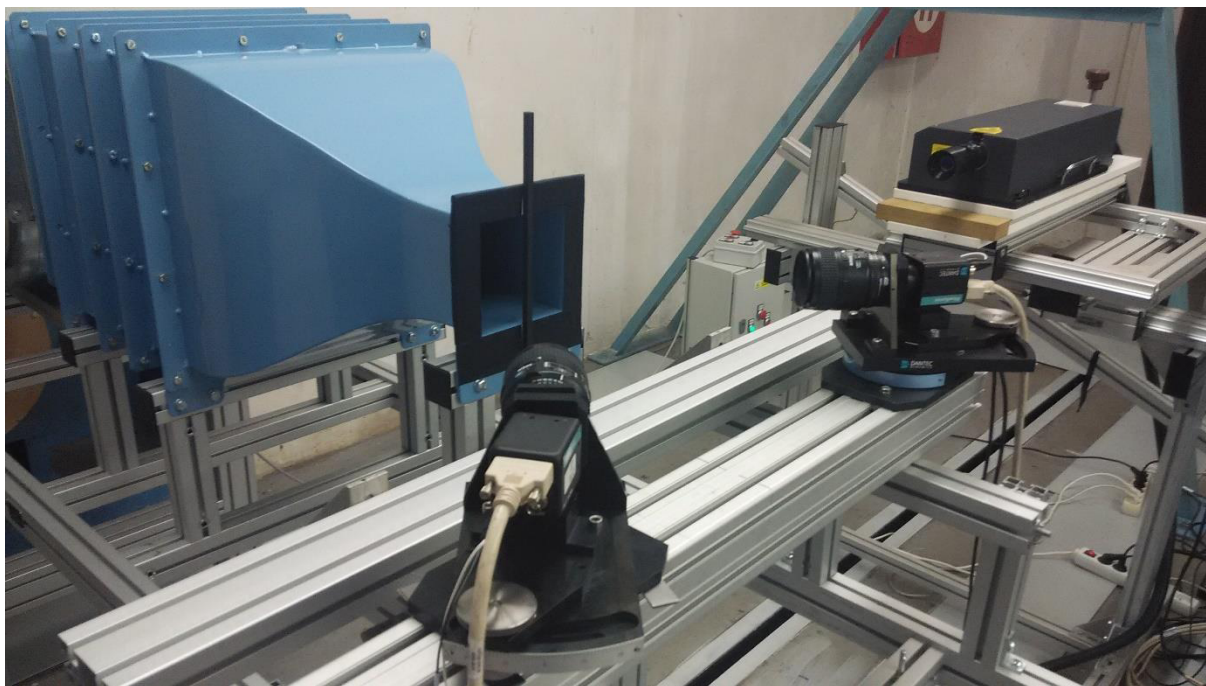
Po provedení uvedeného postupu úprav byla kalibrace úspěšná.

5.3 Zkušební měření

Po provedení kalibrace jsem přistoupil ke zkušebním měřením. Cílem bylo ověřit funkčnost metody. Z měřicího prostoru byl odstraněn posuvník s kalibračním terčem. Bylo odstraněno pomocné světlo pro kalibraci a do sání ventilátoru tunelu byly přiváděny stopovací částice. Postupně byly odzkoušeny různé rychlosti otáček ventilátoru, dále množství přiváděných částic a výkon laseru. Byly nafoceny zkušební snímky a ty následně vyhodnoceny. Po ověření funkčnosti celého systému jsem přistoupil k zadanému měření za překážkou.

5.4 Umístění překážky

Jak ze zadání vyplývá, cílem práce je vyšetření úplavu za špatně obtékaným tělesem v proudové části turbíny, jakým je podpora ložiska rotoru. S ohledem na rozměry měřicího prostoru i reálný tvar podpory, byla překážka značně zjednodušena. Výsledkem je měření úplavu za překážkou s čtvercovým průřezem, který bylo nakonec nutné volit o rozměrech 8x8 milimetrů. Překážka v černé matné barvě byla připevněna k přírubě na konci tunelu.



Obrázek 31 - Umístění překážky

5.5 Částice

Pro měření byly použity stopovací částice na olejové bázi. Generátor kouře je popsán výše. V průběhu hledání ideálních rozměrů obtékané překážky byl dlouho problém s příliš velkým rozvířením kouře za překážkou. Byly zkoušeny různé rychlosti proudění vzduchu i množství sytících částic. Přestože zařízení SAFEX bývá obecně při měření v plynech nejvhodnější, proběhly i pokusy se sycením proudu pomocí atomizéru na olivový olej. To však nepřinášelo uspokojivé výsledky. Nakonec jsem byl nucen zmenšit obtékanou překážku až na konečných 8x8 mm. A měření s generátorem SAFEX bylo proveditelné.

5.6 Měření v rovině kolmé k ose tunelu

Po umístění překážky a odladění parametrů sycení stopovacími částicemi, jsem přešel na konečné měření. Laserový řez byl přestaven do vzdálenosti 20 mm za obtékanou překážku. Podle uvedeného postupu byla kompletně provedena kalibrace a následně úplav v této vzdálenosti proměřen. Vždy bylo provedeno několik měření, abych nakonec měl dostatečné množství dat a mohl provést statisticky přesvědčivé vyhodnocení. Tento postup se následně opakoval pro řezy ve vzdálenostech 30, 40, 50, 60, 70, 80 a 90 milimetrů za překážkou.

Vše bylo, z důvodu nutnosti přestavování a seřizování celé sestavy včetně kamer a laseru po každém posunutí, velmi časově náročné. Snímky byly zaznamenávány s frekvencí 7,4 Hz, doba mezi pulzy byla nastavena na 50 μ s. Prostorové rozlišení CCD chipu bylo 2048x2048 pixelů.



Obrázek 32 - Měření v rovině kolmé k ose tunelu

5.7 Vyhodnocení

Z pořízených záznamů bylo provedeno vyhodnocení. Ke zpracování byl použit software *DynamicStudio*. Pro získání kvalitních vektorových map rychlostních polí byla aplikována řada metod úprav.

5.7.1 Adaptivní korelace („Adaptive Correlation“)

Adaptivní korelace je algoritmus, který posouvá druhou vyhodnocovanou oblast vůči první. Tím se zvyšuje dynamický rozsah metody (minimální a maximální měřitelná rychlost). Na rozdíl od tzv. „offsetu“, který je běžně využíván při vzájemné korelaci a posouvá všechny vyhodnocované oblasti stejně. Adaptivní korelace aplikuje individuální posunutí pro každou vyhodnocovanou oblast. Opakováním výpočtů vzájemné korelace s využitím předchozích výsledků dochází k postupnému zpřesňování. Aplikací adaptivní korelace lze dosáhnout eliminace ztracených párů – snížení šumu. [3]

5.7.2 Metoda prostorového PIV („Stereo PIV Processing“)

Tato metoda vypočítává stereo PIV vektory na základě IMF. Jejimi podklady mohou být jakékoliv typy vektorových map. [6]

5.7.3 Funkce universální detekce vzd. hodnot („Universal Outlier Detection“)

Tato analýza se používá k detekci a k optimalizovanému nahrazení očividně špatně určených vektorů. Je založena na použití střední hodnoty určené z okolních vektorů. Software *DynamicStudio* umožňuje nastavit velikost obdélníkového vektorového okolí. V případě, že upravovaný vektor se nachází na okraji, nebo v rohu upravované oblasti, je výpočet proveden z menšího počtu okolních vektorů. Vektory, které již byly označeny jako chybné, nejsou do dalších výpočtů zahrnuty. [6]

5.7.4 Funkce vektorové statistiky („Vector statistics“)

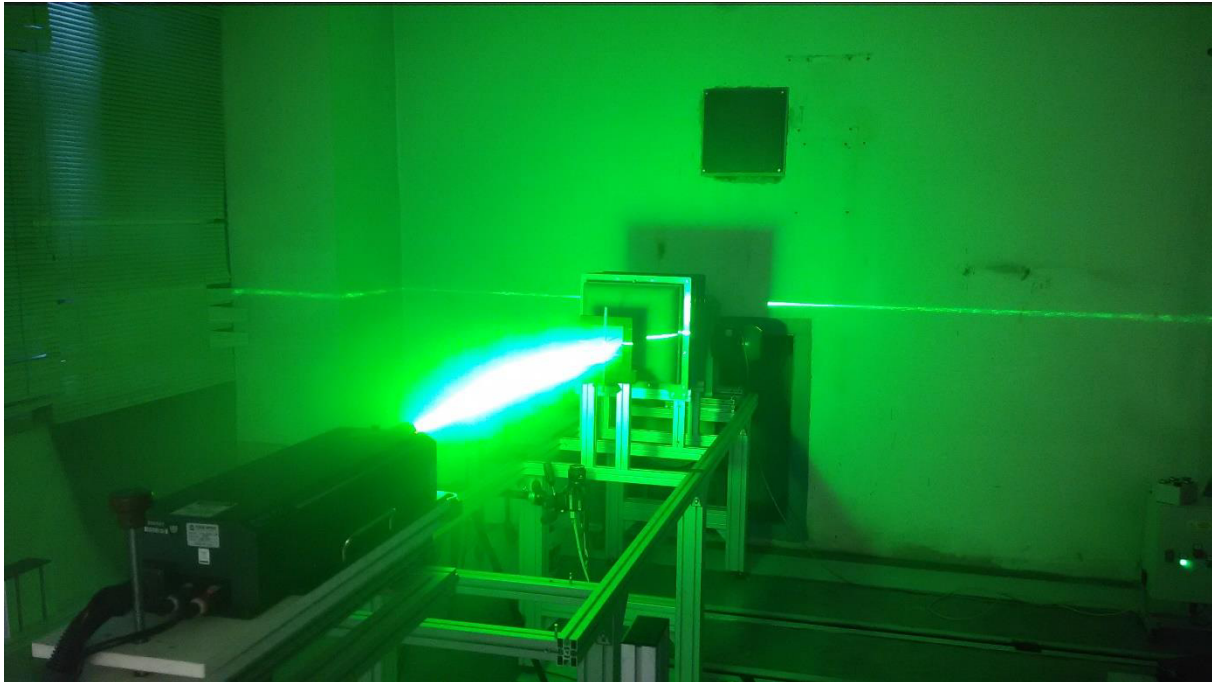
Jak název napovídá, tato funkce vypočítává statistické údaje ze série vektorových map rychlostí. Grafický výstup pak reprezentuje vektorovou mapu vektorů středních rychlostí. Kromě středních rychlostí lze pomocí této metody zjistit i střední hodnoty dalších veličin. V této práci jsou ještě uvedeny: sumy variancí, směrodatné odchylky rychlosti ve směru kolmém na měřicí rovinu a korelační koeficienty rychlostí ve směrech u a v roviny měřené v jednotlivých řezech. [6]

K dalšímu zpracování byla výstupní data exportovány do programu *Tecplot*.

Záznam z měření metodou PIV je uložen a lze ho poté vyhodnotit kdykoliv, případně ho v budoucnu opakovat bez nutnosti znovu provést experiment. To umožňuje vrátit se ke starším datům a aplikovat na ně nové postupy vyhodnocení, například za použití modernější techniky.

5.8 Měření ve vodorovné rovině procházející osou tunelu

Nad rámec zadání bylo provedeno měření také ve vodorovné rovině procházející osou proudu. Zde byla použita metoda 2D PIV. Před měření bylo měřicí zařízení kompletně přestaveno. Laserový zdroj světla byl namířen proti vystupujícímu proudu vzduchu a kamera zaznamenávala proudění zespodu. Obtékané těleso bylo samozřejmě ponecháno stejné. S ohledem na novou geometrii měření se objevily nové problémy s nasvícením a odlesky, došlo tedy k drobným úpravám na výstupní části tunelu.



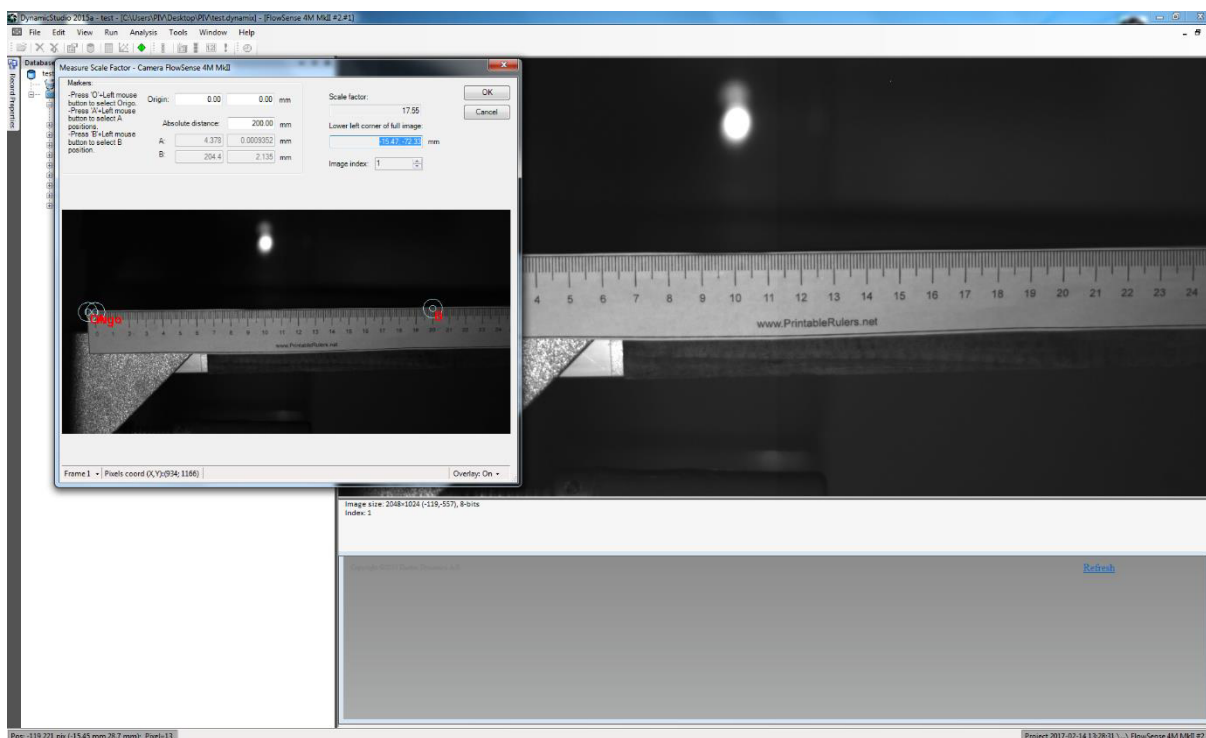
Obrázek 33 - Měření ve vodorovné rovině procházející osou tunelu

Měření bylo prováděno v horizontální rovině, v polovině výšky obtékané překážky. Při měření byly postupně měněny výstupní rychlosti proudícího vzduchu. Vyhodnocení je provedeno pro tři rychlostní režimy.

5.8.1 Kalibrace

Z použití jiné měřicí metody a jiného rozestavení jednotlivých komponent vyplývá i nutnost použití jiného způsobu kalibrace.

Kalibrování bylo provedeno pomocí metody zjištění faktoru měřítka „*Measure Scale Factor*“, která se používá ke stanovení měřítka pro přepočítání rozměrů v pixelech na milimetrové rozměry. Pomocí značek (A, B, Origo) se přesně vytyčí určitá známá vzdálenost. V mém případě bylo jako podklad použito pravítko. Následně se do dialogového okna vyplní skutečná vzdálenost mezi body A a B.

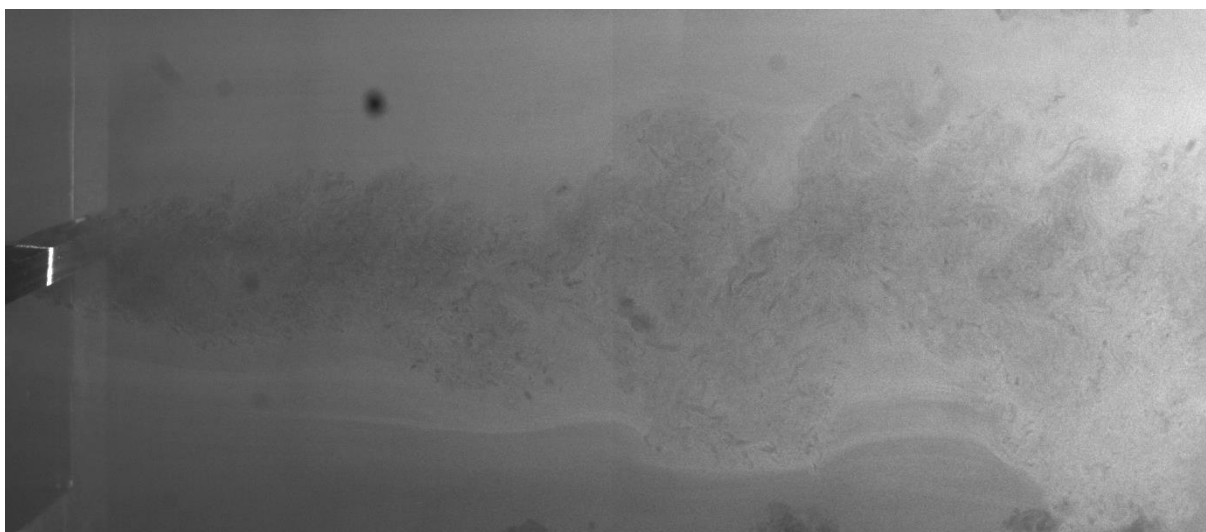


Obrázek 34 - Snímek obrazovky – nastavení faktoru měřítka

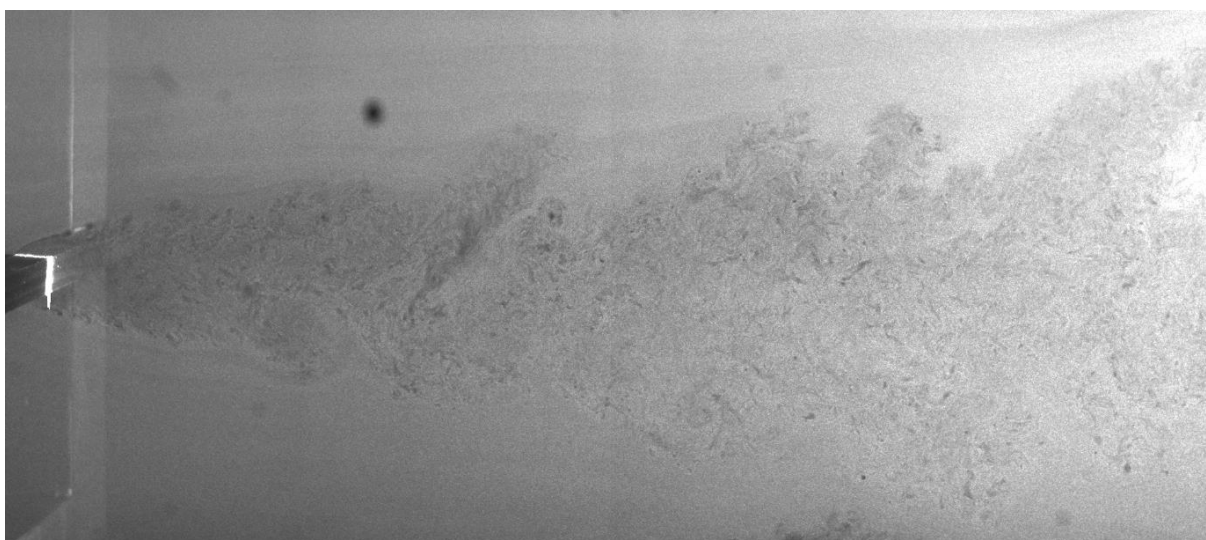
5.8.2 Vlastní podélné měření

K sycení proudu byly použity stejné částice jako při příčném měření.

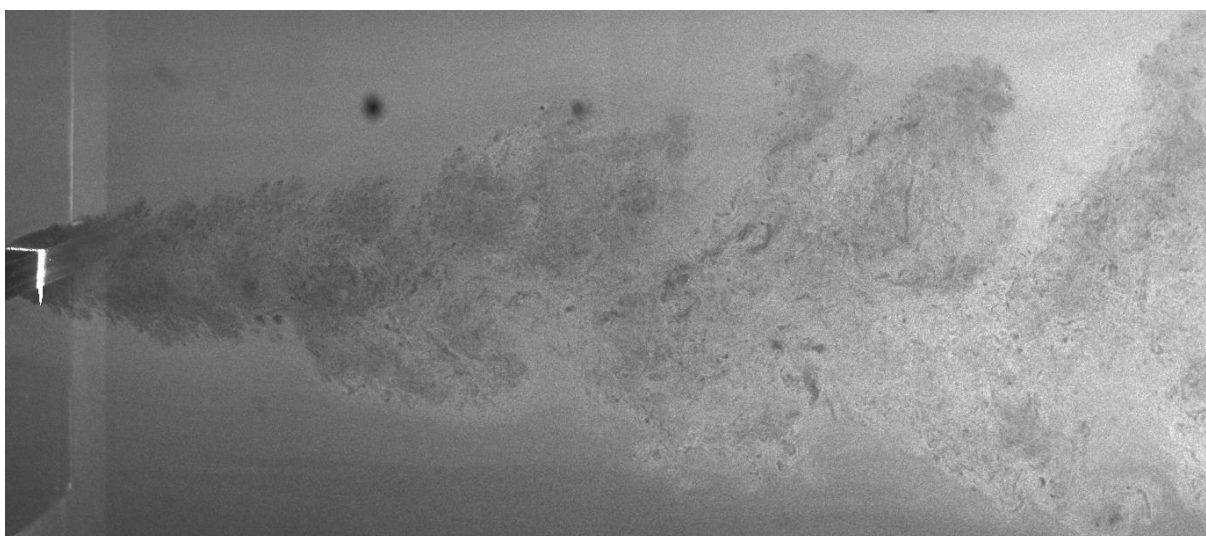
Na následujících třech fotografiích je zaznamenána vizualizace proudu, reálný tvar úplavu za obtékanou překážkou při různých rychlostech proudění.



Obrázek 35 - Vizualizace úplavu za překážkou při maximální rychlosti proudícího vzduchu 10 m/s



Obrázek 36 - Vizualizace úplavu za překážkou při maximální rychlosti proudícího vzduchu 15 m/s



Obrázek 37 - Vizualizace úplavu za překážkou při maximální rychlosti proudícího vzduchu 20 m/s

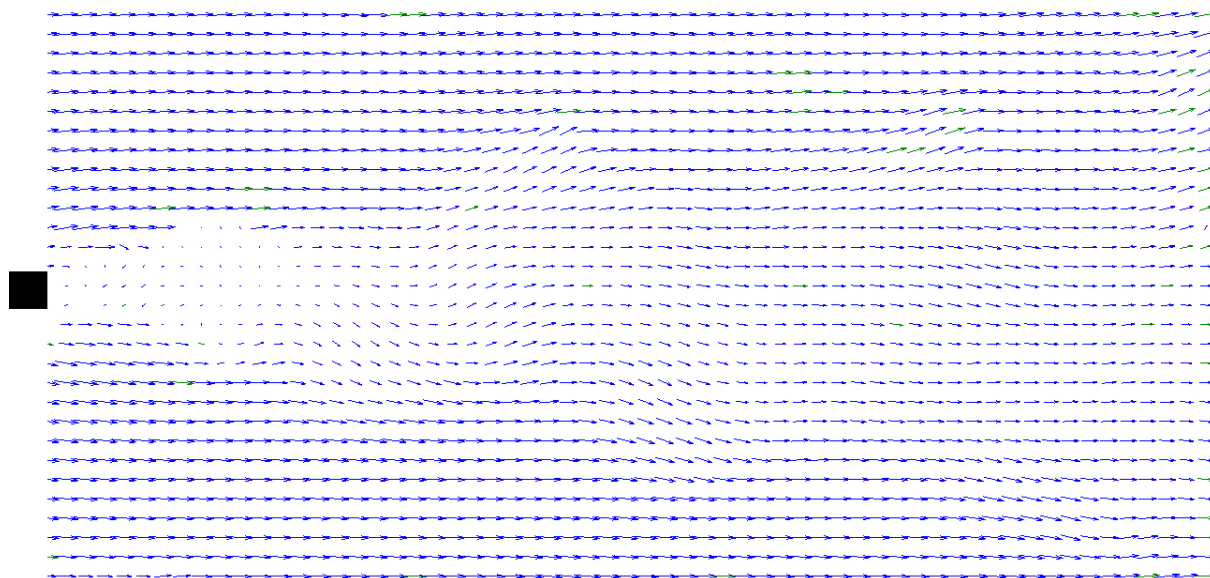
5.8.3 Vyhodnocení

Stejně jako v příčném měření byla i zde použita řada vyhodnocovacích metod. Dále je popsána pouze metoda „*Adaptive PIV*“, která nebyla použita při vyhodnocování příčného měření.

Na pořízené snímky byly nejprve, podobně jako při příčném měření, aplikovány: „*Image Min/Max*“, „*Image Arithmetic*“, následovala „*Adaptive PIV*“.

5.8.3.1 Metoda adaptivní PIV („*Adaptive PIV*“)

Tato metoda analýzy je přímo určená pro výpočet rychlostního pole vektorů založeném na sledování částic. Na základě hustoty sycení a gradientu proudu metoda opakovaně upravuje tvar a velikost vyšetřovacích oblastí. Umožňuje také používání okenní funkce. Na následujícím obrázku je zobrazeno okamžité rychlostní pole při vyhodnocení měření v režimu s maximální rychlostí proudícího vzduchu 20 m/s. [6]



Obrázek 38 – Okamžité rychlostní pole za překážkou při maximální rychlosti proudícího vzduchu 20 m/s
Následně byla aplikována funkce „*Vector statistic*“.

6 Analýza výsledků a odhad chyb

6.1 Chyby při měření

Při každém měření dochází k určitému rozdílu mezi skutečnou a naměřenou hodnotou zjišťované veličiny. Tento rozdíl je chybou měření. V důsledku tak při měření nezjišťujeme skutečnou hodnotu, ale hodnotu nejpravděpodobnější a následně stanovíme její přesnost. Snahou je samozřejmě při měření generovat chyby co možná nejmenší. Podle původu lze chyby dělit na soustavné a nahodilé. [7] [8]

Soustavné chyby mívají původ v lidském selhání, v nedostatku měřící metody nebo ve špatném měřicím zařízení. Lidský faktor může být ovlivněn prostředím, únavou, ale i povahovými rysy člověka. Takové chyby jsou do značné míry nepředvídatelné a často velmi významné. Z těchto důvodů je důležitá kontrola a někdy je nutné měření opakovat. Chyby způsobené měřící metodou nebo měřicím zařízením mohou vyplývat z opomenutých okolních vlivů, nebo fyzikálních příčin, dále z možných limitů konkrétní metody, její přesnosti a přesnosti měřicího zařízení. Taková chyba bývá při opakovaných měřeních konstantní. V případě jejího zjištění a stanovení je možné ji následně zohlednit. Chyby měřicích přístrojů lze eliminovat jejich kalibrací. [7] [8]

Náhodné chyby bývají menší, ale jejich počet je v porovnání s většími chybami větší. Je v podstatě nemožné je z měření úplně odstranit. Četnost záporných chyb je stejná jako četnost chyb kladných, jejich rozložení odpovídá Gaussovu rozdělení pravděpodobnosti. Tyto chyby je možné eliminovat velkým počtem opakovaných měření a jejich následným statistickým zpracováním. Ve své práci jsem pro každou pozici oběma kamerami naměřil více, než 200 dvojsnímků. Takovéto množství by mělo po statickém zpracování poskytovat dostatečně přesný výsledek. [7] [8]

6.2 Chyby a limity PIV

Z podstaty měření metodou PIV vyplývají určitá omezení a vznikající soustavné chyby. První z problematických situací je stav, kdy v době mezi prvním a druhým snímkem, určitá částice vstoupí nebo naopak vypadne z vyhodnocované oblasti. Není pak možné najít její druhou polohu, hovoříme o takzvaných „ztracených párech“. Dochází ke zvyšování počtu náhodných korelací a s tím souvisejícím nárůstem korelačního šumu. Čím vyšší rychlostí se konkrétní částice pohybuje, tím větší je pravděpodobnost, že mezi snímky změní vyhodnocovanou oblast. To v konečném důsledku vede k zanedbání rychlejších částic a ke snížení naměřené rychlosti. Největší doporučené posunutí částic v tomto časovém intervalu je uváděno jako čtvrtina délky strany vyhodnocované oblasti. Podstatnou roli v těchto nastaveních také hraje hustota sycení proudu částicemi. Malá hustota může s větší pravděpodobností generovat velké chyby. Do určité míry je tedy možné problém ztracených párů eliminovat zvýšením stupně sycení. [3]

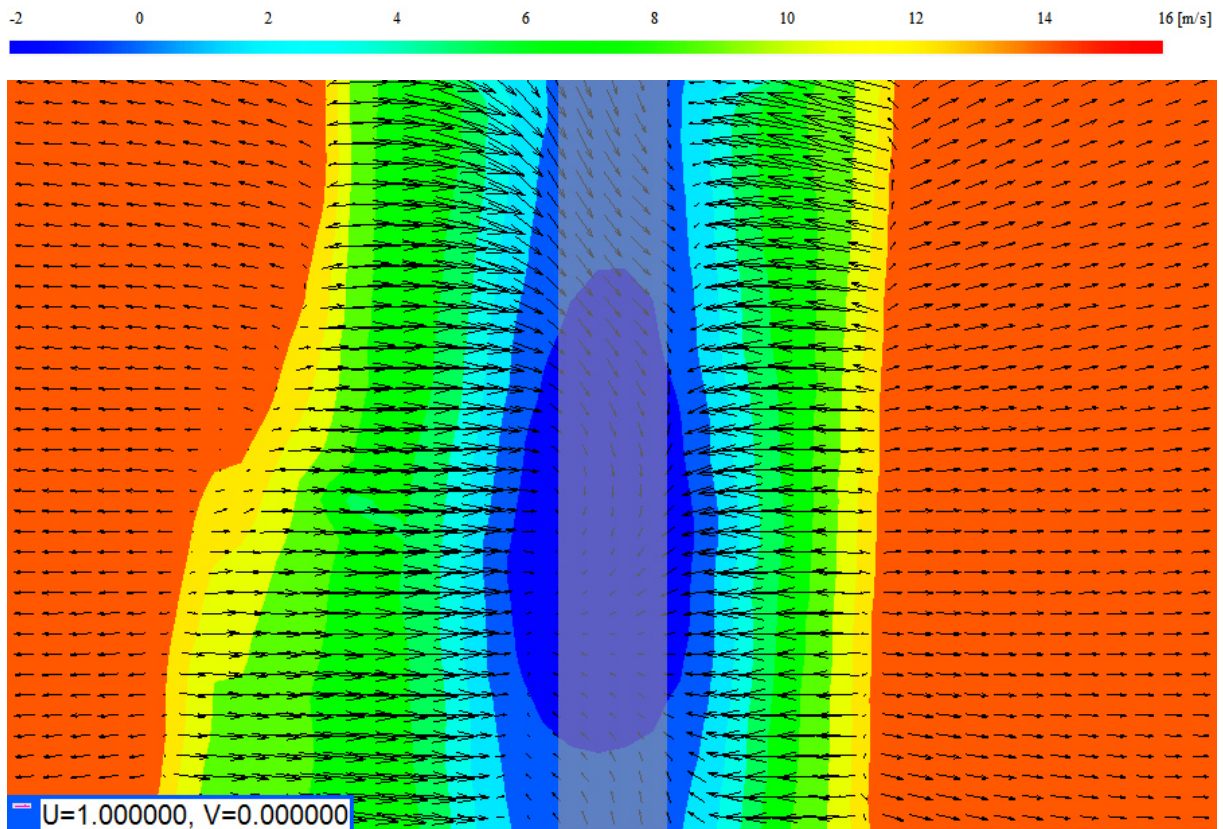
Dynamický rozsah měřitelných rychlostí metody PIV je definován minimální a maximální rychlostí, kterou jsme schopni měřením určit. Zvyšuje se s růstem rozměrů vyhodnocované oblasti a snižuje se s tzv. efektivním průměrem obrazu částice. Z důvodu nejednoznačnosti směru posunutí při použití autokorelace v případě dvojnásobné expozice, je dynamický rozsah, v porovnání se vzájemnou korelací poloviční. Při dnešním používání CCD kamer, v případě vzájemné korelace je možné aplikací subpixelové interpolace zaznamenat posuv menší než 1 pixel. Použitím autokorelace však lze změřit pouze posuv o minimálně 2 pixely, při menších vzdálenostech dochází ke splývání dvojice korelačních vrcholů s centrálním vrcholem. Jak již bylo zmíněno dynamický rozsah lze zvětšit aplikací offsetu (definovaného posunutí) nebo adaptivní korelace. Nepřesné výsledky měření vznikají také v souvislosti s velkými rychlostními gradienty ve vyhodnocovaných oblastech. Dochází ke snižování korelačních vrcholů a jeho přebíjení okolním šumem, v důsledku toho se objevují naprosto chybné tzv. „bludné vektory“. Konečný výsledek lze opět částečně zlepšit pomocí vyššího sycení proudu. Obecně je vždy nutné hledat kompromis mezi maximálním prostorovým rozlišením a velkým dynamickým rozsahem. [3]

6.3 Rozbor výsledků v rovinách kolmých k ose tunelu

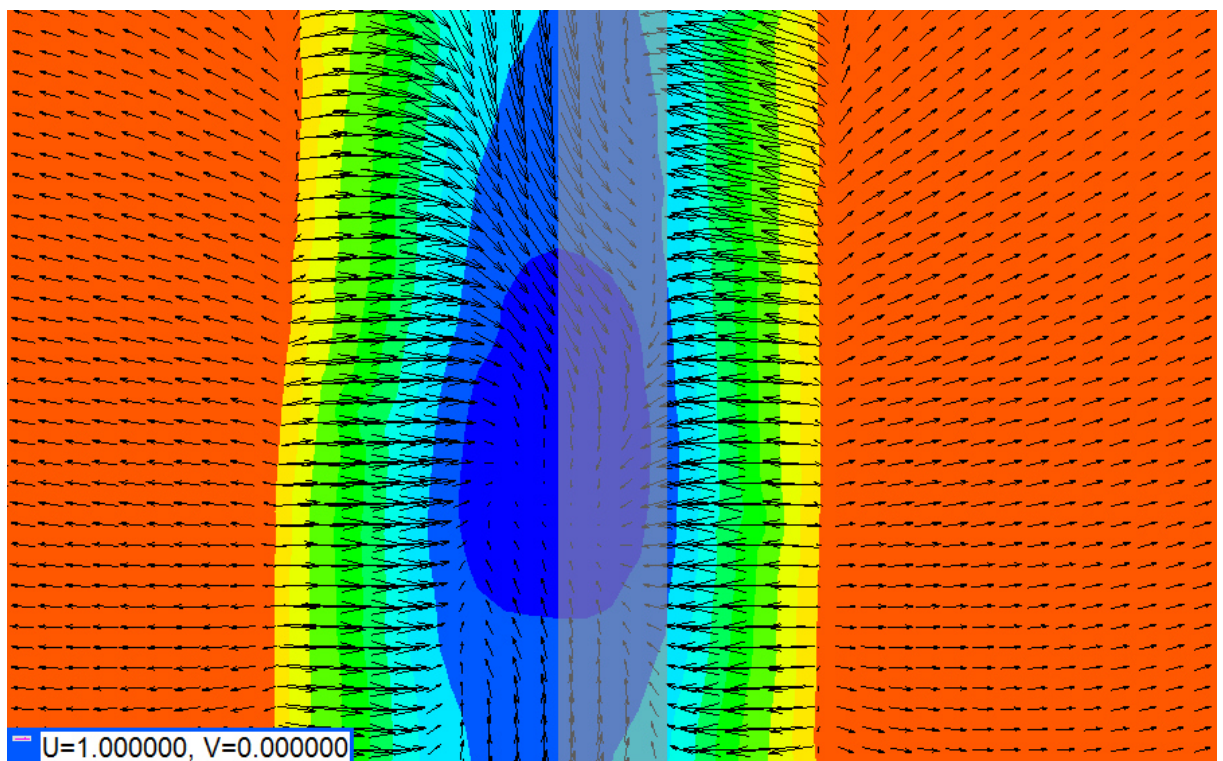
Osy u a v tvoří měřící rovinu, osa w je orientovaná ve směru normály k této rovině. Určité zkreslení vektorové mapy, kdy se vektory jakoby rozbíhají do stran, namísto orientace ve směru proudění, plyne z podstaty „*IMF: Pinhole*“. Na oblast je pohlíženo z jednoho bodu, jde tedy o perspektivní zkreslení.

6.3.1 Průběh rychlostí

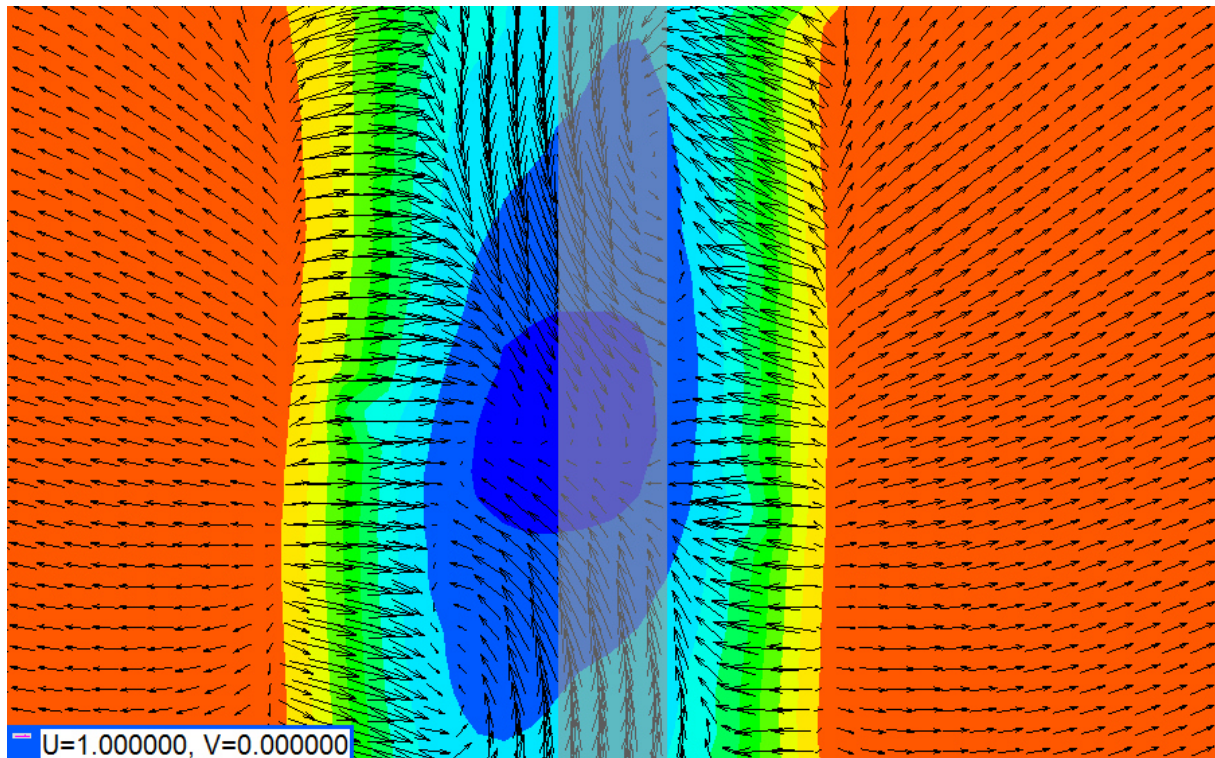
Rychlosti v měřené rovině jsou na následujících výstupech vyjádřeny běžnou vektorovou mapou a rychlost ve směru normály pak barevnou škálou. V oblastech neovlivněných úplavem je dosahováno rychlosti ve směru w kolem 16 m/s. Za překážkou se tvoří úplav. Na hranici mezi proudícím vzduchem a vzduchem zabrzděným vzniká smyková vrstva. V prostoru těsně za překážkou vzniká zpětné proudění. To dosahuje hodnoty rychlosti - 2 m/s. Naopak nejvyšší rychlosti v oblasti se dosahuje v místech těsně za výstupem z tunelu, kde není proud ovlivněn překážkou. V těchto místech je rychlost až 16 m/s. Úplav, který za překážkou vzniká, vykazuje předem předvídané parametry. Od osy a od překážky rychlost postupně stoupá a ze záporných hodnot zpětného proudění přes oblast nulové rychlosti se postupně zvyšuje. Nakonec se ustálí na hodnotě zhruba 14,5 m/s. Dále jsem uvedl vektorové mapy ve všech měřených řezech, počínaje řezem ve vzdálenosti 20 mm za překážkou až po řez 90 mm za překážkou.



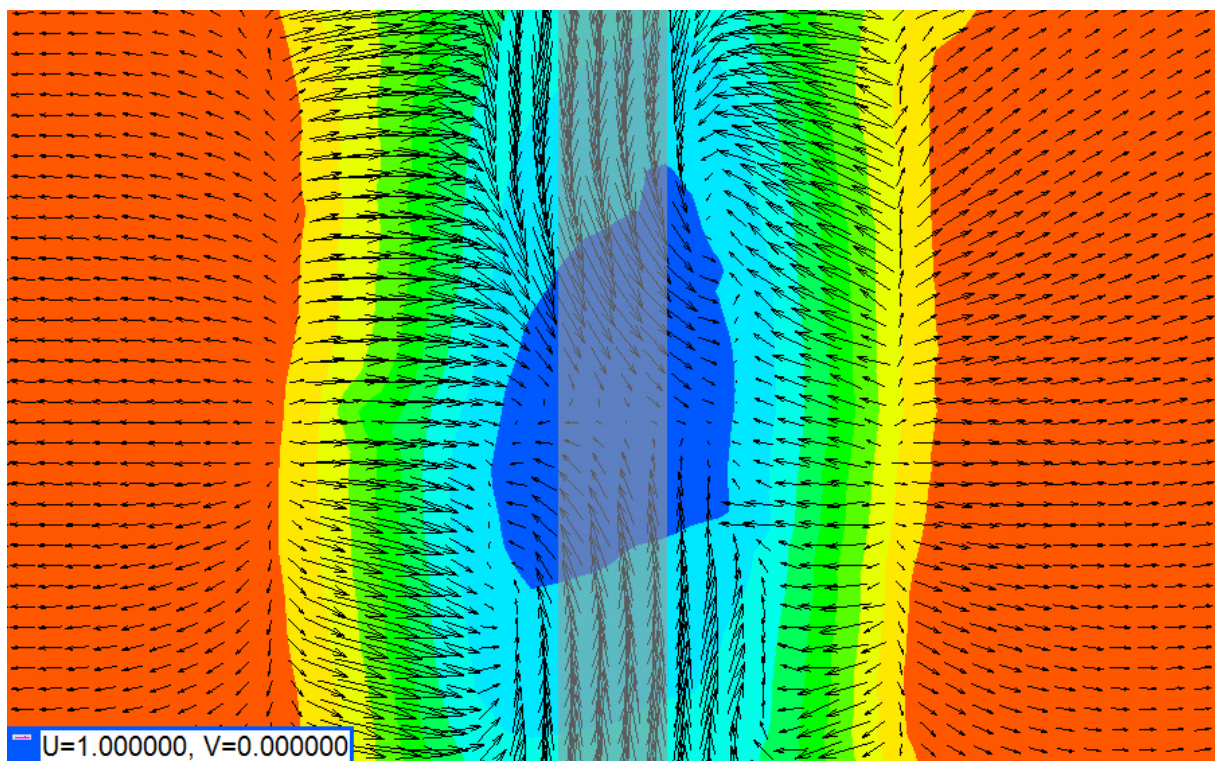
Obrázek 39 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 20 mm za překážkou



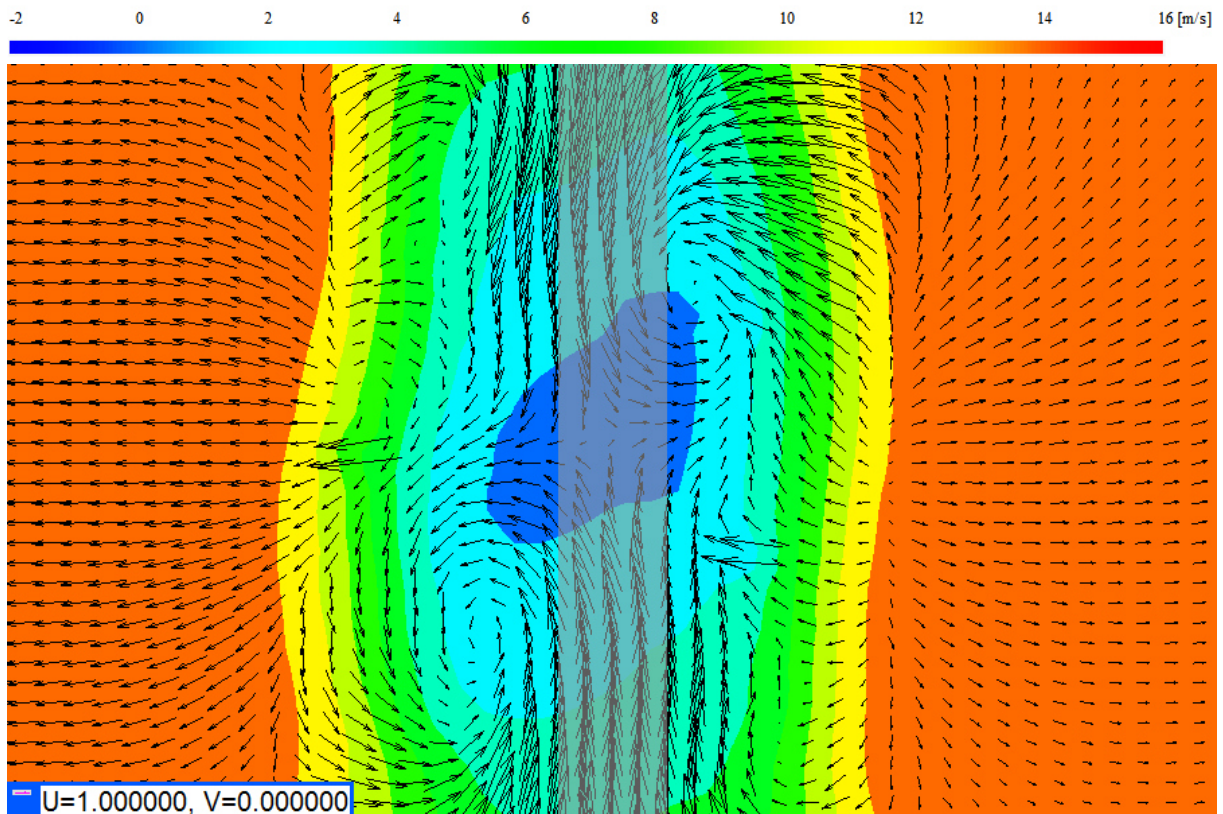
Obrázek 40 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 30 mm za překážkou



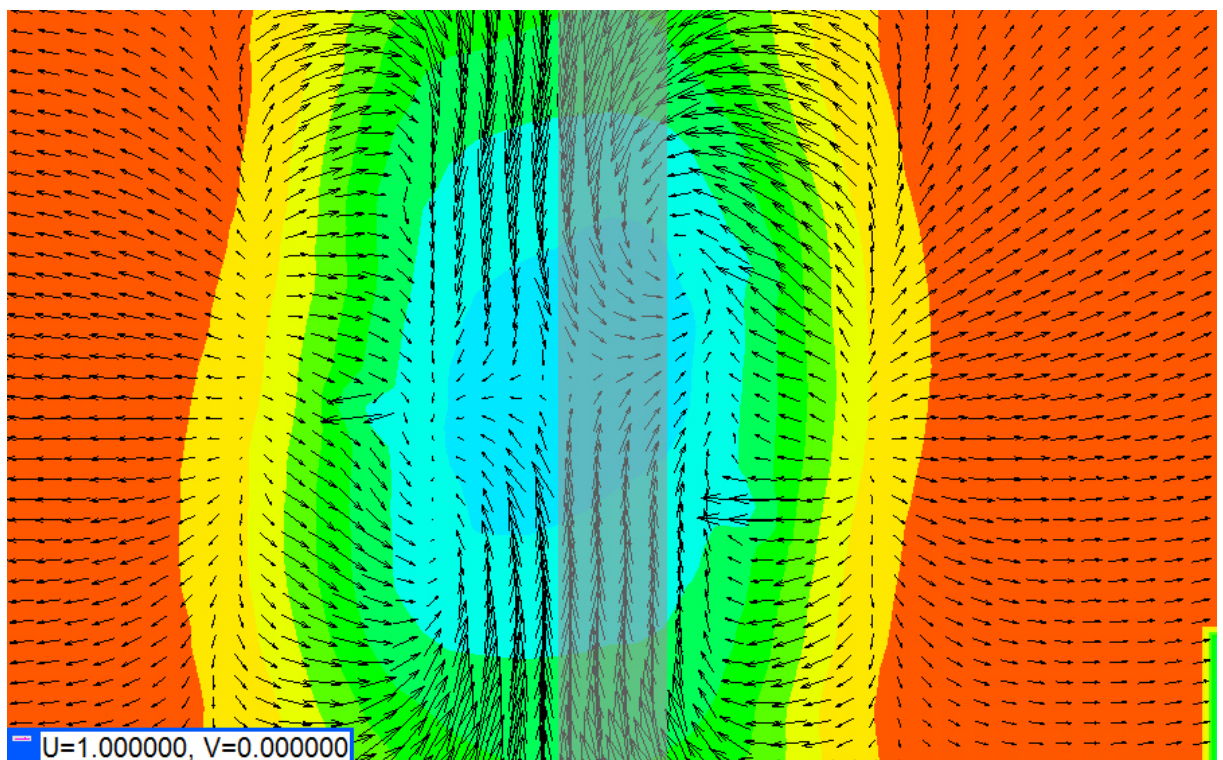
Obrázek 40 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 40 mm za překážkou



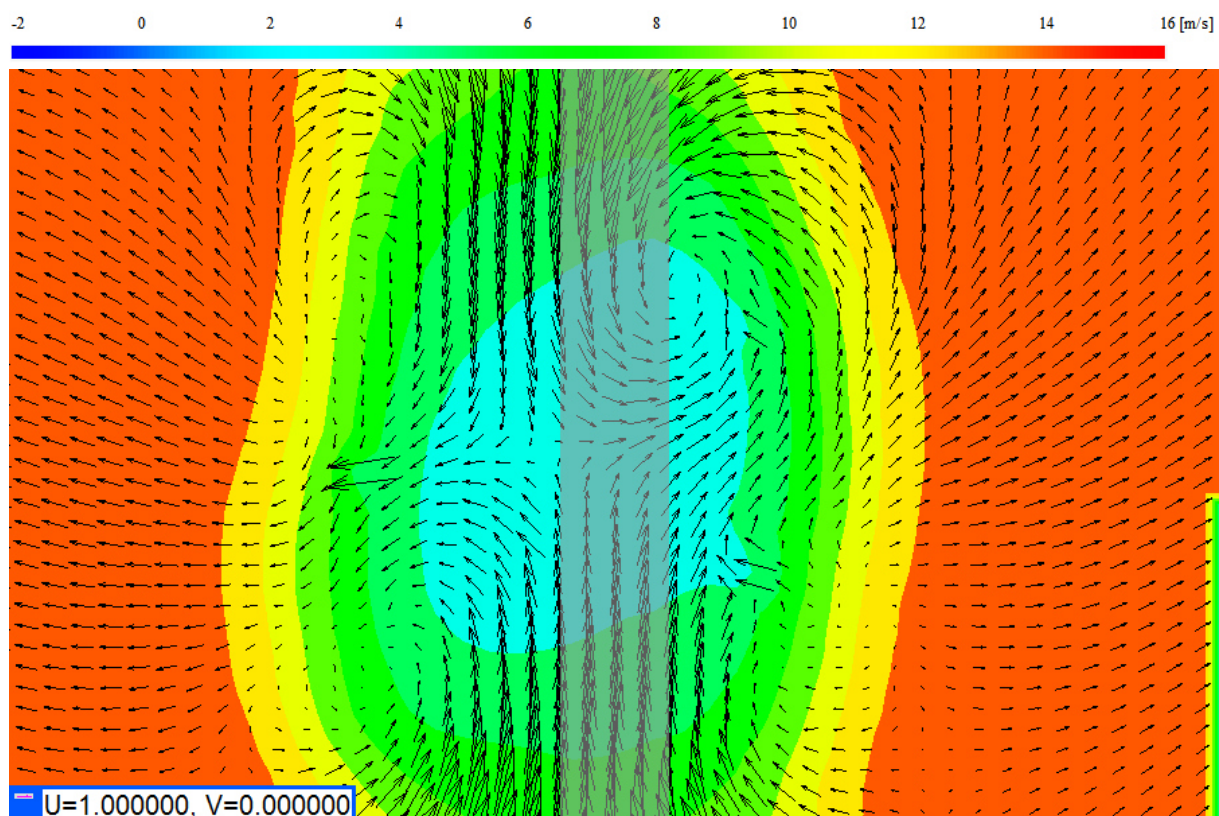
Obrázek 41 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 50 mm za překážkou



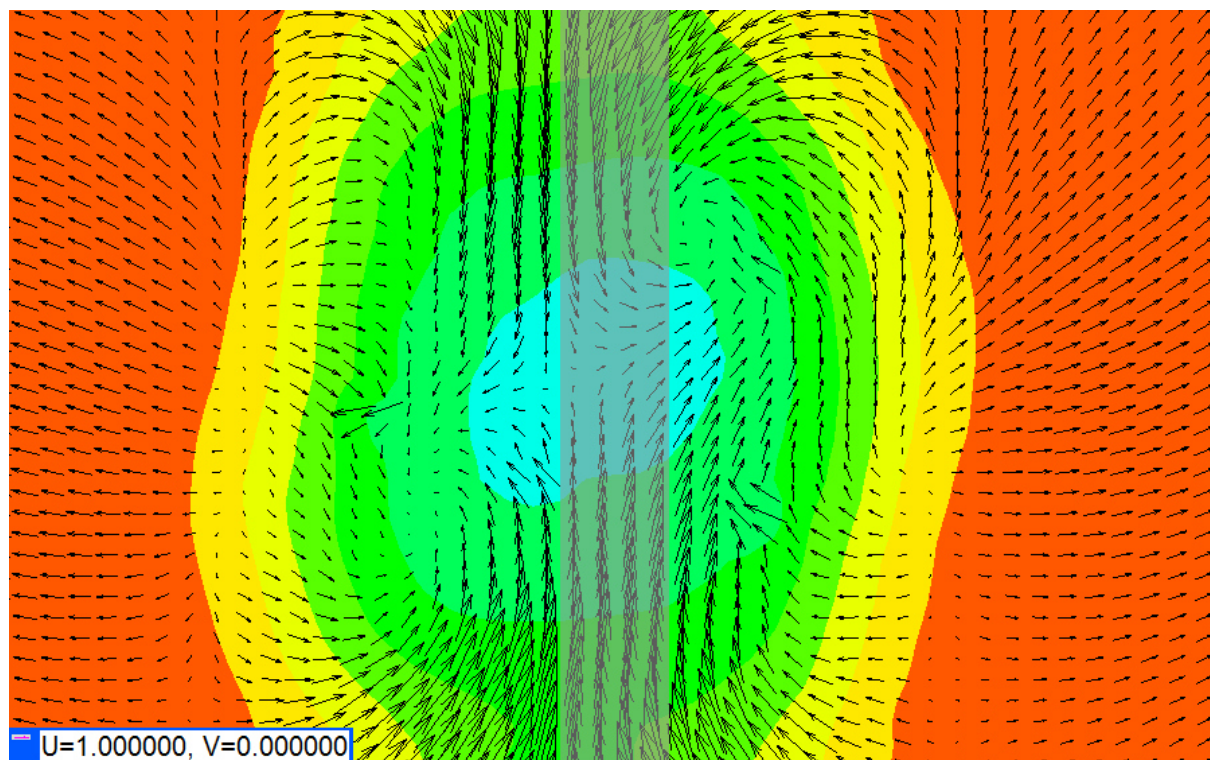
Obrázek 42 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 60 mm za překážkou



Obrázek 43 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 70 mm za překážkou



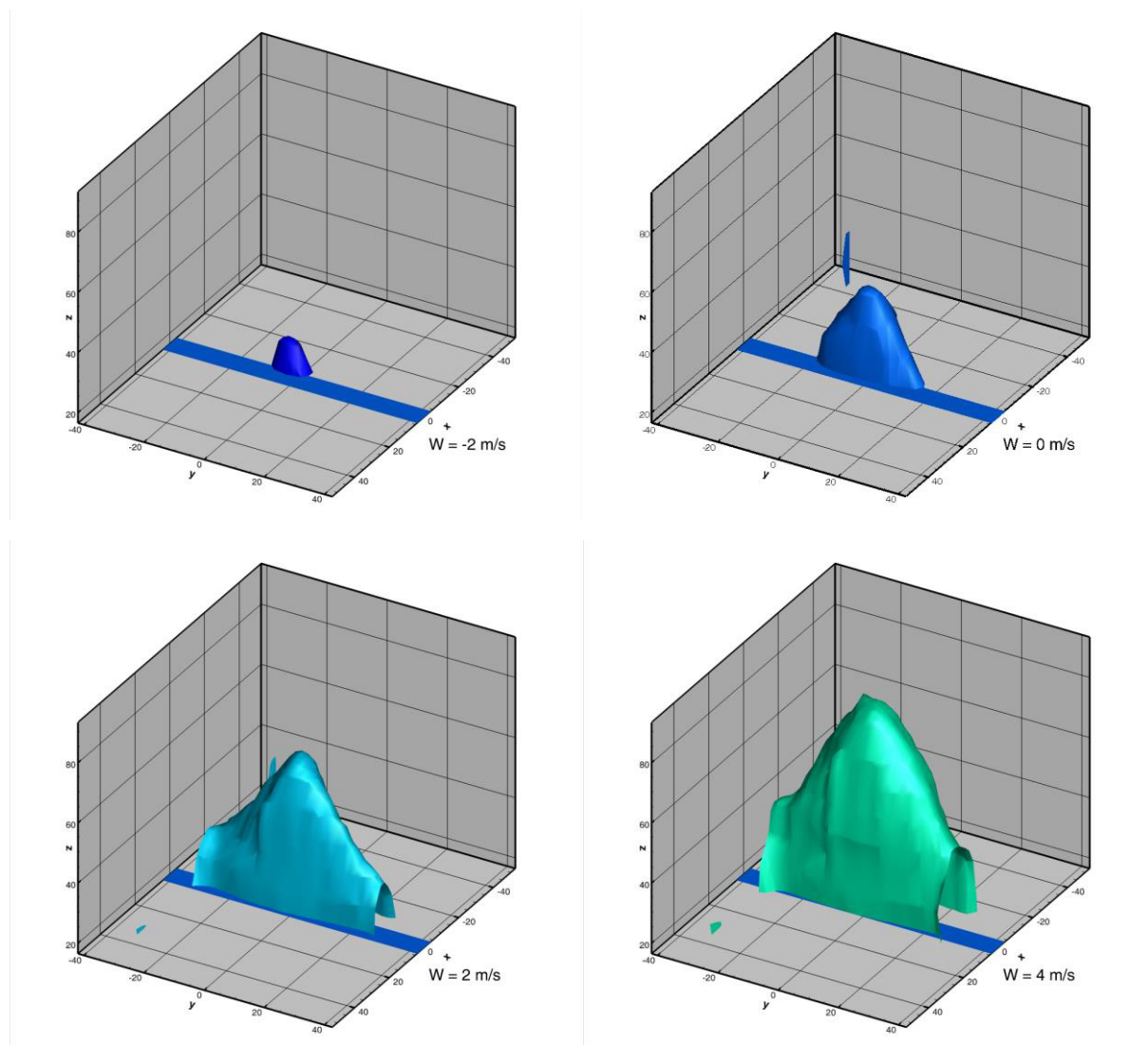
Obrázek 44 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 80 mm za překážkou



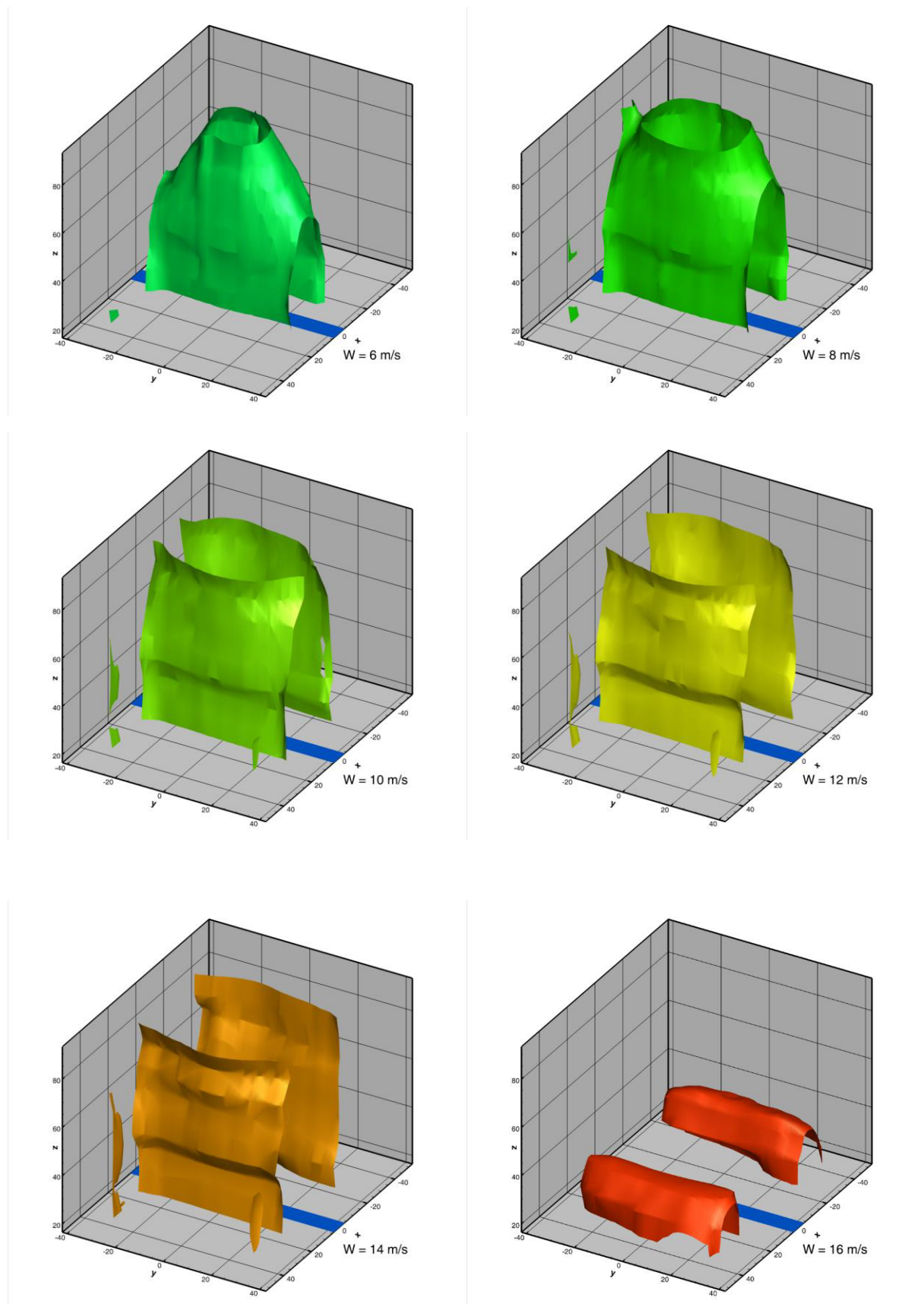
Obrázek 45 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 90 mm za překážkou

6.3.1.1 Izoplochy rychlostí

Na následujících 3D modelech jsou z výstupů měření, pomocí softwaru Tecplot, vytvořeny izoplochy odpovídající určitým hodnotám rychlostí. Z výstupů je dobře patrná izoplocha rychlosti $w = -2$ m/s v oblasti zpětného proudění, nebo například izoplocha $w = 0$ m/s, tedy oblast zabrzděného vzduchu.

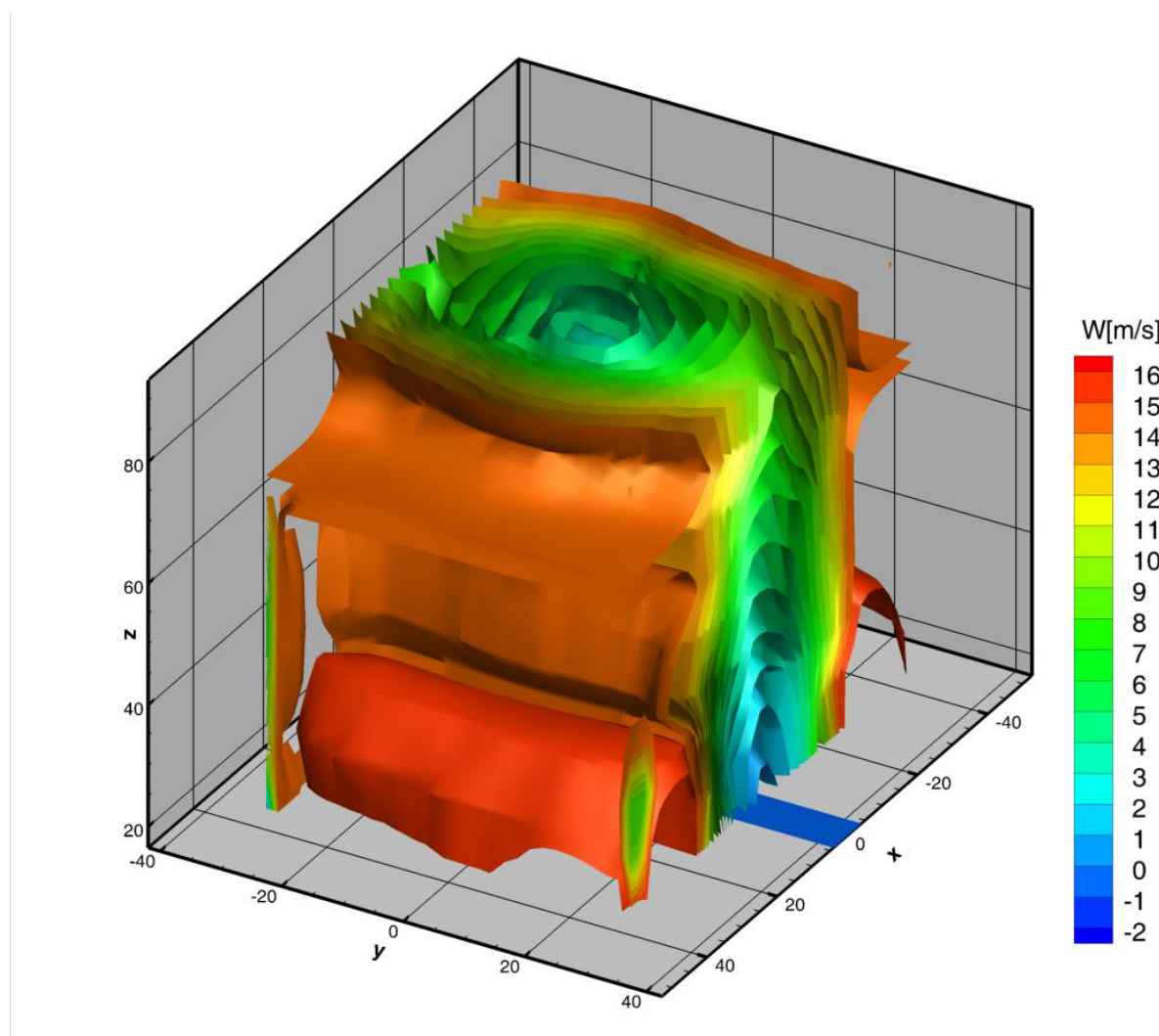


Obrázek 46 - Izoplochy rychlostí za obtékanou překážkou pro rychlosti: -2, 0, 2, 4 m/s



Obrázek 47 - Izoplochy rychlostí za obtékanou překážkou pro rychlosti: 6, 8, 10, 12, 14, 16 m/s

Na následujícím modelu jsou všechny výše uvedené izoplochy složeny do jednoho společného výstupu.



Obrázek 48 - Izoplochy rychlostí za obtékanou překážkou

6.3.2 Stanovení Reynoldsova čísla

V tomto odstavci je vypočteno Reynoldsovo číslo. Obtékaná překážka má rozměry 8x8 mm. Rychlost proudění v neovlivněné části proudu je zhruba 16 m/s. Kinematická teplota je závislá na teplotě proudícího vzduchu a její hodnota byla z tabulek stanovena na $1,514 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Příčný rozměr obtékané překážky... $d = 0,008 \text{ m}$

Rychlost proudění vzduchu... $w = 16 \text{ m/s}$

Kinematická vazkost vzduchu při 20°C... $\nu = 1,514 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

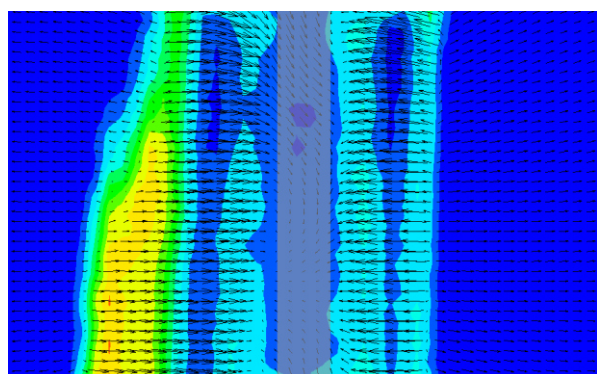
$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{16 \cdot 0,008}{1,514 \cdot 10^{-5}} \doteq \mathbf{8450}$$

Reynoldsovo číslo má hodnotu zhruba 8450.

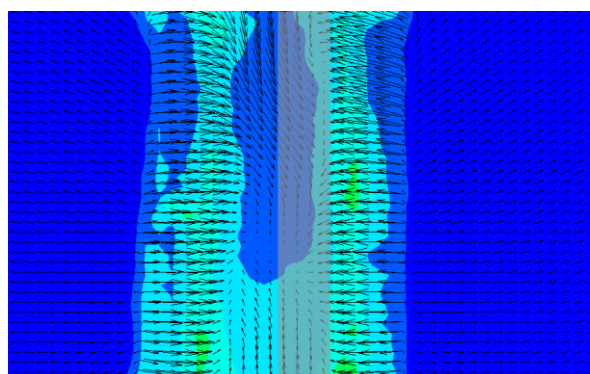
6.3.3 Suma variancí

Variance, nebo také rozptyl je definována jako hodnota aritmetického průměru kvadrátů odchylek – fluktuací konkrétních hodnot od střední hodnoty. Suma variancí je jejich součtem přes všechny směry. Její hodnota odpovídá dvojnásobku hodnoty turbulentní kinetické energie. TKE je v dynamice tekutin střední kinetickou energií vztaženou na jednotku hmotnosti spojenou s turbulentním tokem. [10]

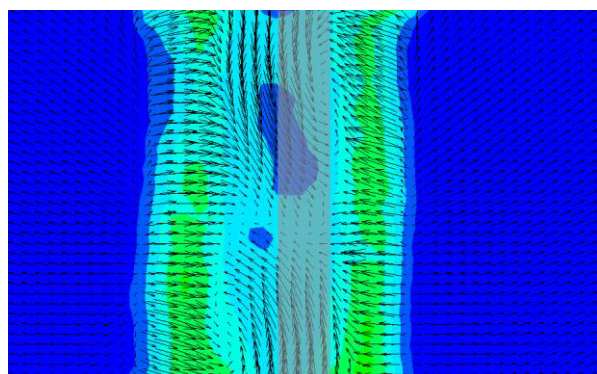
Vysoké hodnoty variance jsou důsledkem velkých fluktuací v těchto oblastech, nic však nevypovídají o jejich frekvenci. Určitá nesymetričnost výsledků je s ohledem na symetričnost měření způsobena nesymetrií proudu. Z následujících výstupů je patrné postupné rozšiřování úplavu a postupně větší a větší mísení s okolním vzduchem. Na krajích ve smykových oblastech je nejvíce fluktuací. Z důvodu omezení proudu ve svislém směru na výstupu z tunelu není proud po výšce stejný a vzniká potenciální jádro. To je patrné ve vizualizacích i dalších vyhodnocovaných veličin.



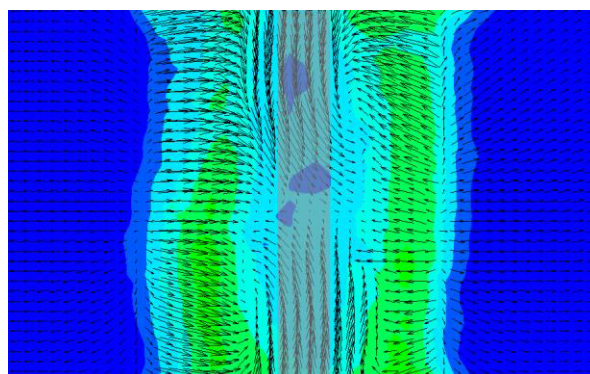
Obrázek 50 - Suma variancí 20 mm za překážkou



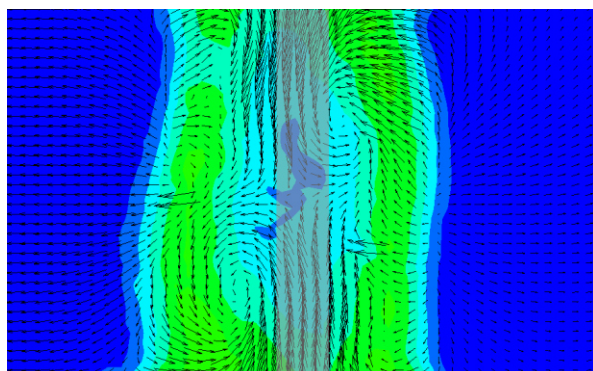
Obrázek 49 - Suma variancí 30 mm za překážkou



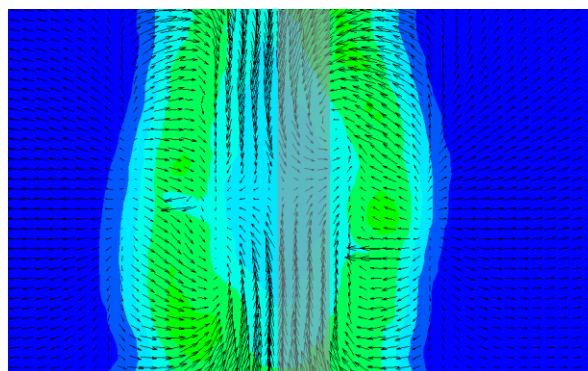
Obrázek 50 - Suma variancí 40 mm za překážkou



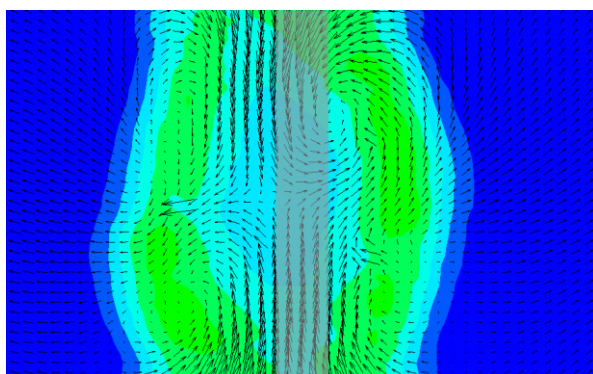
Obrázek 51 - Suma variancí 50 mm za překážkou



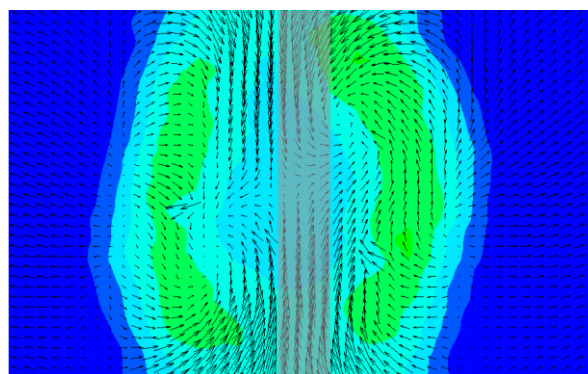
Obrázek 52 - Suma variancí 60 mm za překážkou



Obrázek 53 - Suma variancí 70 mm za překážkou



Obrázek 54 - Suma variancí 80 mm za překážkou



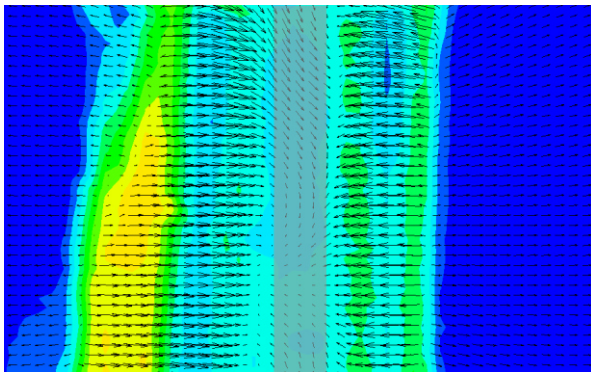
Obrázek 55 - Suma variancí 90 mm za překážkou

6.3.4 Směrodatná odchylka

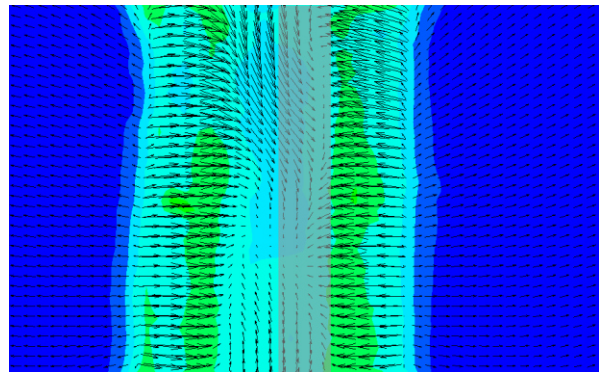
Na následujících výstupech je na podkladu pole rychlostí, barevnou škálou zobrazena směrodatná odchylka rychlosti ve směru kolmém k měřicí rovině. Směrodatná odchylka je charakterizována jako kvadratický průměr odchylek určité hodnoty od aritmetického průměru těchto odchylek. [10]

Výsledné hodnoty vyplývající z měření v jednotlivých řezech nabývají hodnot od nuly do zhruba 4,9 m/s. V oblasti mimo úplav je směrodatná odchylka rovna nule. V oblasti úplavu se převážně udržuje v hodnotách od 1,5 m/s do 2,5 m/s. Svého maxima dosahuje ve většině řezů zhruba ve vzdálenosti 10-20 mm od osy překážky na obě strany. Určitá nesymetričnost je způsobena nesymetrií proudu. Ve větších oblastech proudu dosahuje směrodatná odchylka hodnot maximálně kolem 3,5 m/s. Nejvyšších hodnot je dosaženo pouze v izolovaných malých oblastech.

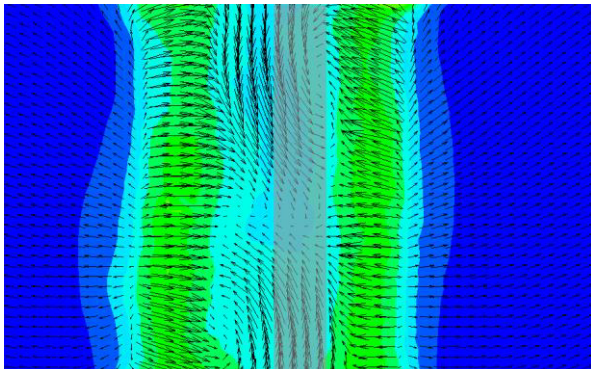
0 0,5 1 1,5 2 2,5 3 3,5 4 4,5 5 [m/s]



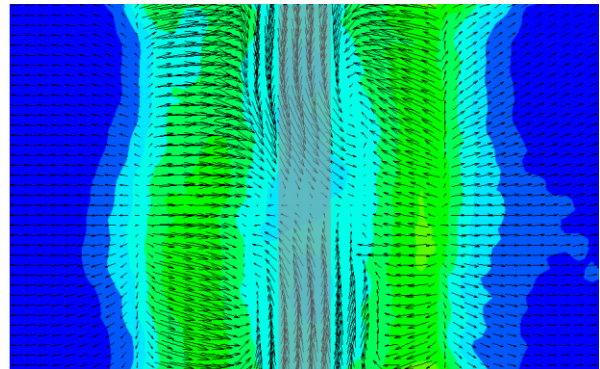
Obrázek 56 - Směrodatná odchylka 20 mm za překážkou



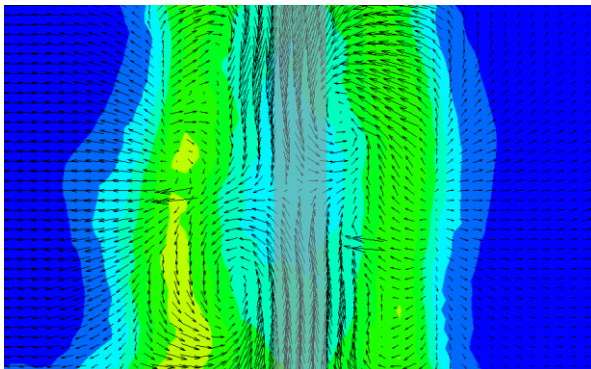
Obrázek 57 - Směrodatná odchylka 30 mm za překážkou



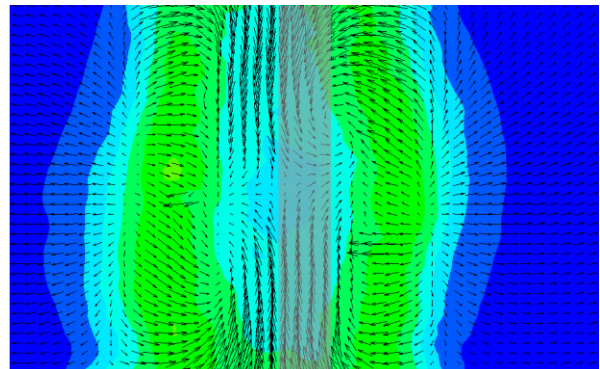
Obrázek 60 - Směrodatná odchylka 40 mm za překážkou



Obrázek 58 - Směrodatná odchylka 50 mm za překážkou

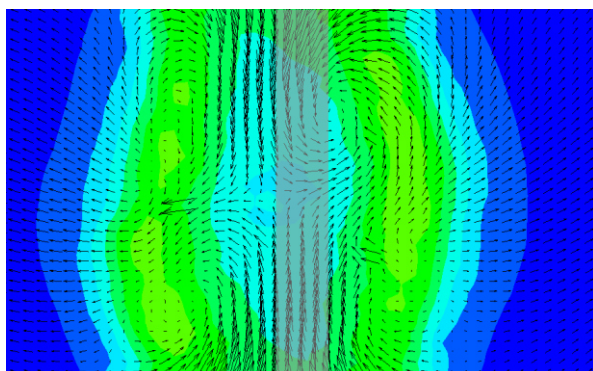


Obrázek 59 - Směrodatná odchylka 60 mm za překážkou

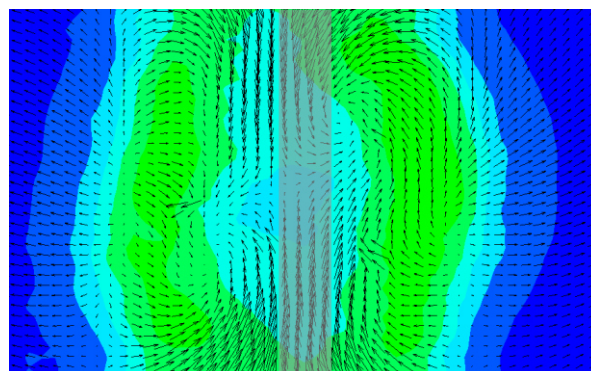


Obrázek 60 - Směrodatná odchylka 70 mm za překážkou

0 0,5 1 1,5 2 2,5 3 3,5 4 4,5 5 [m/s]



Obrázek 61 - Směrodatná odchylka 80 mm za překážkou



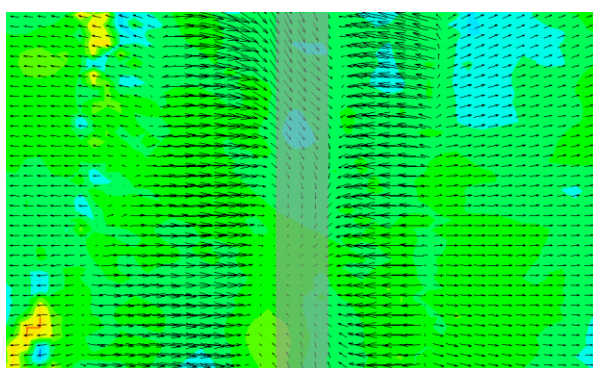
Obrázek 62 - Směrodatná odchylka 90 mm za překážkou

6.3.5 Korelační koeficient

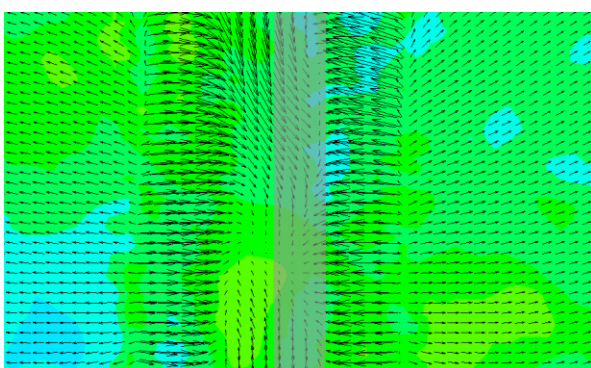
Korelace je definována jako vztah mezi dvěma veličinami. Když se jedna z veličin mění, korelativně se mění i druhá a naopak. Korelační koeficient vyjadřuje závislost takových veličin na sobě – míru korelace, může nabývat hodnot od -1 do 1. [11]

Na dalších výstupech je zobrazena míra korelace rychlostí ve směrech u a v roviny měření v jednotlivých řezech. Jsou zde patrné především plochy odpovídající korelačnímu koeficientu nabývajícím hodnot kolem nuly. Pokud je korelační koeficient roven nule, znamená to nutnou, ne však dostačující podmínku pro tvrzení, že veličiny jsou vzájemně nezávislé. Od řezu ve vzdálenosti 60 milimetrů za překážkou a dále se postupně začínají definovat oblasti s hodnotami korelačního koeficientu blízkými se hodnotě -1 respektive hodnotě 1. Tato skutečnost bude mít pravděpodobně souvislost s produkcí turbulence v těchto oblastech.

-1 -0,75 -0,5 -0,25 0 0,25 0,5 0,75 1 [-]

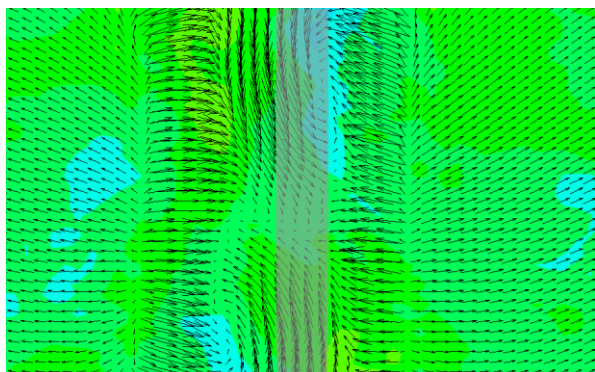


Obrázek 63 - Korelační koeficient 20 mm za překážkou

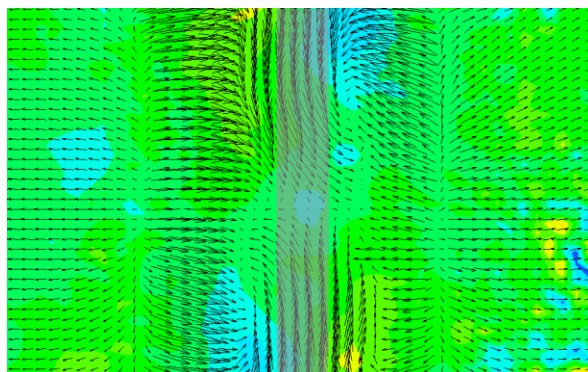


Obrázek 64 - Korelační koeficient 30 mm za překážkou

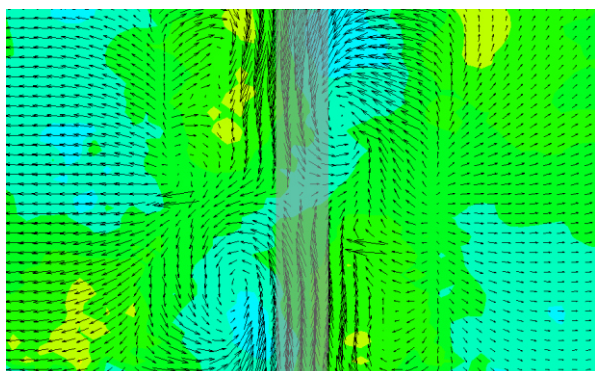
-1 -0,75 -0,5 -0,25 0 0,25 0,5 0,75 1 [-]



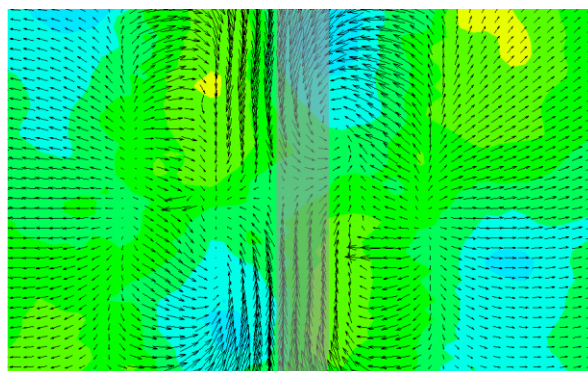
Obrázek 65 - Korelační koeficient 40 mm za překážkou



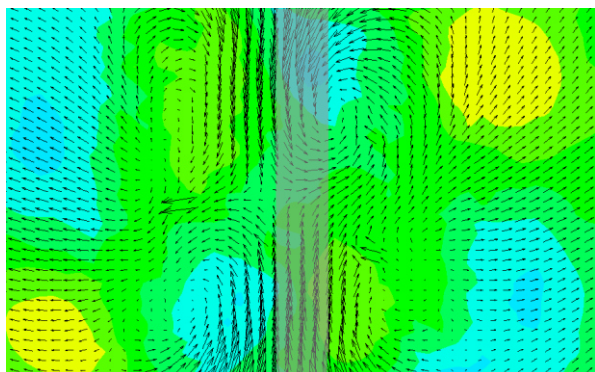
Obrázek 66 - Korelační koeficient 50 mm za překážkou



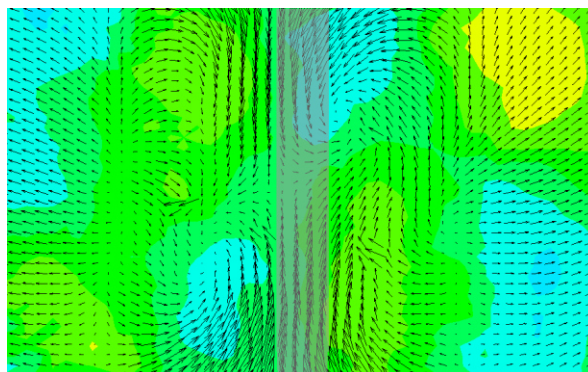
Obrázek 70 - Korelační koeficient 60 mm za překážkou



Obrázek 67 - Korelační koeficient 70 mm za překážkou



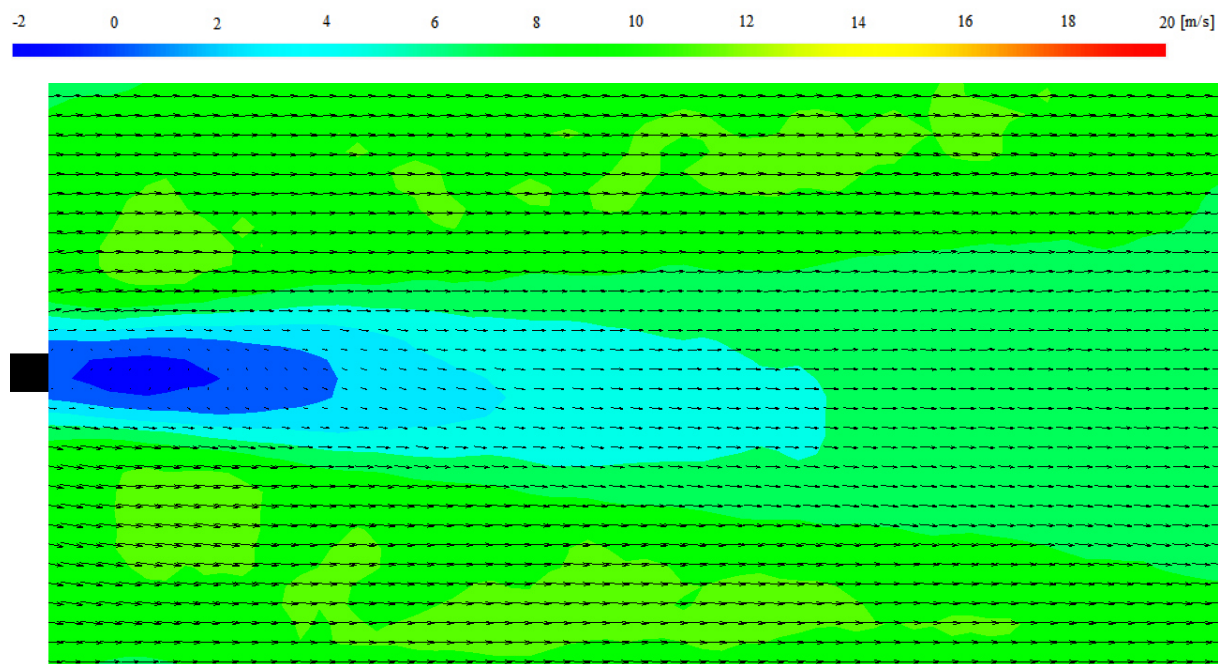
Obrázek 68 - Korelační koeficient 80 mm za překážkou



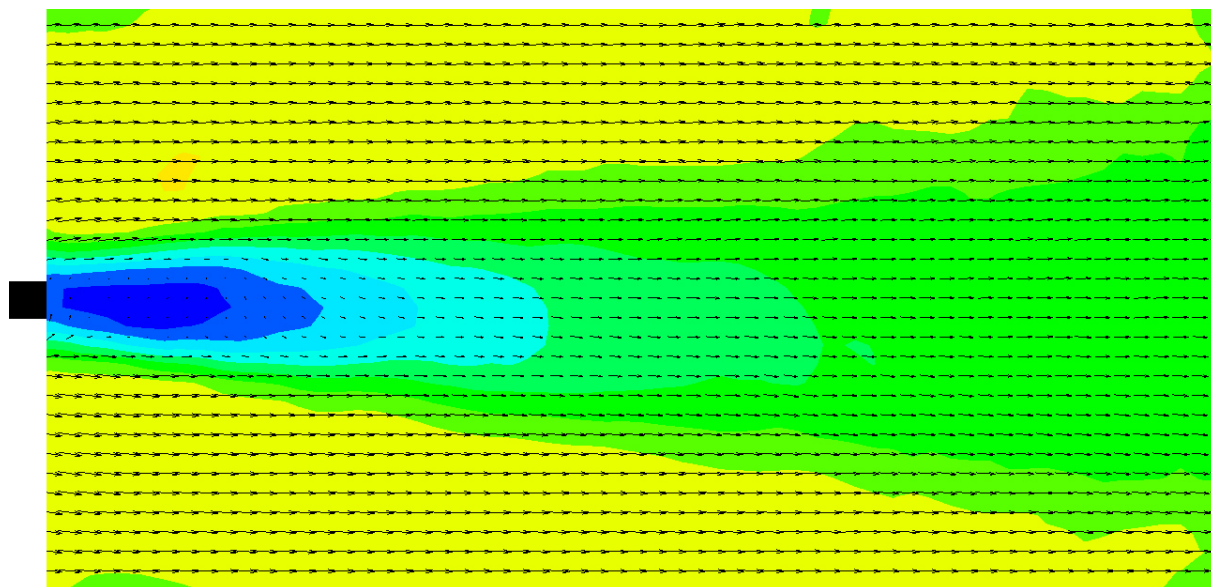
Obrázek 69 - Korelační koeficient 90 mm za překážkou

6.4 Rozbor výsledků měření ve vodorovné rovině procházející osou tunelu

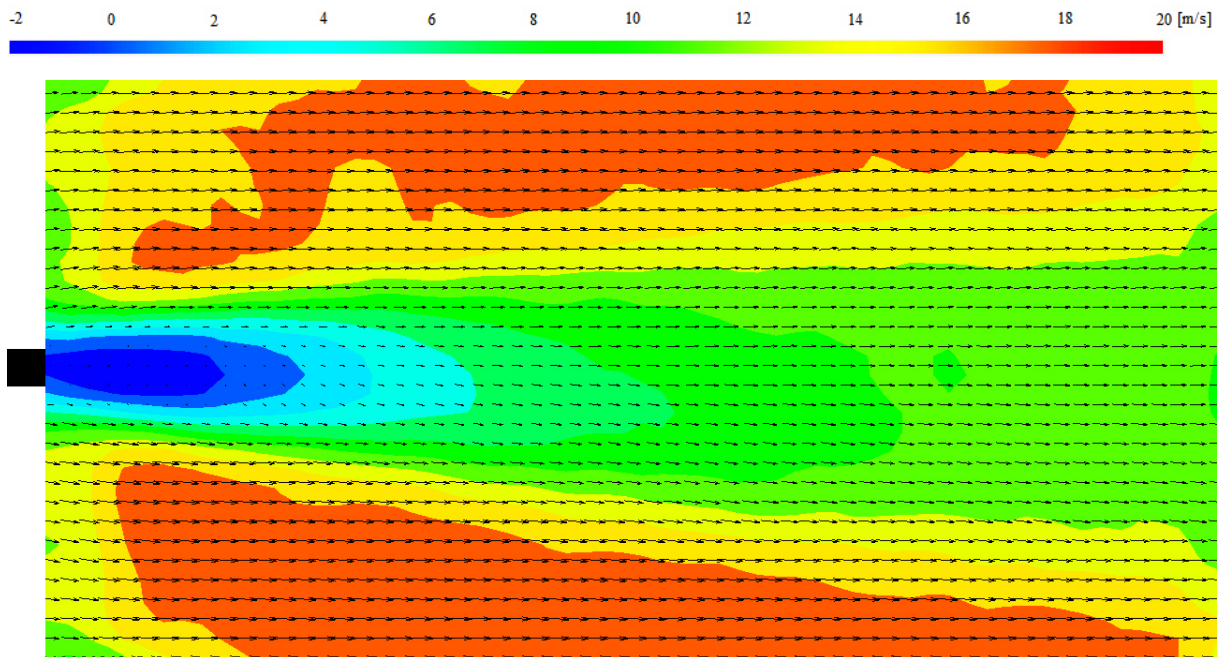
Na následujících snímcích jsou zobrazeny rychlosti změřené metodou 2D PIV ve vodorovné rovině procházející osou tunelu. Průběh rychlostí je zaznamenán pro tři různé rychlostní režimy. Výsledky odpovídají výsledkům zjištěným při měření metodou stereo PIV ve směru kolmém k ose tunelu. Za překážkou je patrné zpětné proudění, které postupně přechází přes oblast nulové rychlosti.



Obrázek 70 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu za překážkou v 1. rychlostním režimu



Obrázek 71 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu za překážkou ve 2. rychlostním režimu



Obrázek 72 - Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu za překážkou ve 3. rychlostním režimu

Dále byly při měření vyhodnoceny i ostatní veličiny, uváděné v předchozí kapitole měření v rovinách kolmých k ose tunelu. Výsledné hodnoty z obou měření si do velké míry odpovídají.

6.5 Traverzovací zařízení

Po dohodě s vedoucím práce bylo s ohledem na konečný charakter měření využito a upraveno již existující traverzovací zařízení.

Závěr

Cílem práce bylo provedení měření metodou stereo PIV k vyšetření úplavu za špatně obtékaným tělesem. V úvodních kapitolách DP je největší důraz kladen na teoretický popis samotné metody a některých důležitých souvislostí. V dalších částech se zaměřuji na průběh vlastního měření, především v rovinách kolmých k ose tunelu, včetně kalibrace a konečného vyhodnocení výsledků. V průběhu práce jsem pochopil, jak složitá může v konečném důsledku být na první pohled jednoduchá úloha. Popisované výsledky jsou pouze pomyslnou „třešničkou na dortu“, k jejich získání bylo nutné vyřešit řadu praktických problémů. Tyto komplikace na začátku práce lze jen těžko odhadnout a po úspěšném dokončení experimentu jsou rychle zapomenuty. Uvědomění si této nepředvídatelnosti průběhu a složitosti měření je pro mě osobně jedním z největších přínosů diplomové práce. Původní představy ohledně měřící sestavy musely být průběžně upravovány. Nad rámec zadání bylo provedeno měření ve vodorovné rovině procházející osou tunelu. K němu bylo sestavu nutné přestavět, ale byla by škoda jej v dané situaci neprovést.

Závěrečný rozbor potvrzuje, že výsledky odpovídají zažitým představám o obtékání vzduchu kolem podobných těles. Použitím popsanych vyhodnocovacích metod jsem se snažil co možná nejvíce eliminovat v textu zmiňované chyby při měření metodou stereo PIV.

Práce slouží především k prokázání účinnosti metod PIV při měření úplavu a prohloubení znalostí metodiky měření metodou stereo PIV. Jsem rád, že práce měla alespoň do určité míry reálný základ. Další studenti mohou na moji práci navázat a podle popsaného postupu provádět měření za jinak definovaných podmínek a okolností. Během svého studia jsem se zúčastnil tříměsíční stáže na elektrárně Margam, kde je použit stejný typ turbíny jako je předloha k tomuto experimentu. S ohledem na zpracovávanou diplomovou práci jsem se zajímal o konkrétní detaily v proudové části turbíny. Díky specialistům, kteří byli na stavbě přítomni, jsem tak měl výbornou možnost hlouběji proniknout do problematiky studovaného oboru.

Seznam použité literatury a podkladů

- [1] In.: *What is Zero Waste Dunbar?* [online]. Zero Waste Scotland. (2017). [vid. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://zerowastetown.org.uk/about/whatiszerowastedunbar/>
- [2] RAFFEL, Markus, WILLERT, E. Christian, WERELEY, T. Steve, KOMPENHANS, Jürgen., *Particle Image Velocimetry*. Second Edition, Springer Berlin Heidelberg New York, 448 s., ISBN 978-3-540-72307-3
- [3] KOPECKÝ, Václav. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Tribun EU, 2008, 205 s., ISBN: 978-80-7399-357-3 (bro.)
- [4] CCD – základní princip. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. Jaroslav Reichl, Martin Všetička (2006 – 2017). [vid. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>
- [5] Charge-couple device. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Wikimedia Foundation, 2003. Stránka naposledy editována 3. 2. 2017 v 14:49. [vid. 25.4.2017]. Česká verze. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
- [6] DANTEC. *DynamicStudio User's Guide*. Denmark. Dantec Dynamics A/S, 2013. ISRC 904OU1856
- [7] BLÁHA, Václav. *Měření v jaderné energetice*. [PDF]. Podklady ke studiu pro předmět Měření v jaderné energetice KKE ZČU
- [8] Chyba měření. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Wikimedia Foundation, 2003. Stránka naposledy editována 9. 3. 2017 v 23:01. [vid. 25.4.2017]. Česká verze. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Chyba_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD
- [9] Fotoelektrický jev. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. Jaroslav Reichl, Martin Všetička (2006 – 2017). [vid. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/722-fotoelektricky-jev>
- [10] NEUBAUER, Jiří; SEDLAČÍK Marek; KŘÍŽ, Oldřich. *Základy statistiky – Aplikace v technických a ekonomických oborech*. Praha: Grada Publishing, a.s. 2012. ISBN 978-80-247-4273-1

- [11] ANDĚL, Jiří. *Základy matematické statistiky*. Praha: MATFYZPRESS, vydavatelství Matematicko-fyzikální fakulty University Karlovy v Praze. 2005. ISBN 80-86732-40-1

Seznam obrázků

- Obrázek 1 - *Turbína Dunbar*. Autor. [fotografie]. Plzeň:Doosan Škoda Power, 2016
- Obrázek 2 - *Pohled na zadní ložisko turbíny Dunbar*. Autor. [fotografie] Plzeň:Doosan Škoda Power, 2016
- Obrázek 3 - *Počítačový model zadního ložiska*. Autor. [snímek obrazovky PC] Plzeň:Doosan Škoda Power, 2017
- Obrázek 4 - *Schéma uspořádání PIV metody*. [obrázek]. Převzato ze zdroje [3] ze seznamu použité literatury a podkladů, strana 124
- Obrázek 5 - *Schéma dvoukomorového laseru*. [obrázek]. Převzato ze zdroje [3] ze seznamu použité literatury a podkladů, strana 165
- Obrázek 6 - *Konstrukce CCD senzoru*. [obrázek]. Zdroj: In.: fyzika.jreichl.com. 2006 – 2017 [vid. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>
- Obrázek 7 - *Schéma CCD senzoru s paměťovými buňkami*. [obrázek]. Převzato ze zdroje [3] ze seznamu použité literatury a podkladů, strana 169
- Obrázek 8 - *Výsledek analýzy vzájemnou korelací*. [obrázek]. Převzato ze zdroje [3] ze seznamu použité literatury a podkladů, strana 132
- Obrázek 9 - *Výsledek analýzy autokorelací*. [obrázek]. Převzato ze zdroje [3] ze seznamu použité literatury a podkladů, strana 133
- Obrázek 10 - *Prostorová geometrie záznamu splňující Scheimpflugovu podmínku*. [obrázek]. Převzato ze zdroje [3] ze seznamu použité literatury a podkladů, strana 177
- Obrázek 11 - *Překrývání zorných polí dvojice kamer*. [obrázek]. Převzato ze zdroje [3] ze seznamu použité literatury a podkladů, strana 180
- Obrázek 12 - *Schéma zobrazující roviny měření*. Vlastní schéma autora
- Obrázek 13 - *Sestava pro měření*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 14 - *Aerodynamický tunel LSWT-OC-014-50*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 15 - *Laser Solo 200XT x 200 mJ*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 16 - *Kamera FlowSence 4M*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 17 - *Generátor částic SAFEX*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 18 - *Sestava komponent pro kalibraci*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017

- Obrázek 19 - *Záznamy kalibračních terčů*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 20 - *Zadání souřadnice roviny ve směru osy "z"*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 21 - *Snímek obrazovky při aplikaci funkce min/max*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 22 - *Snímek obrazovky při aplikaci série filtrů*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 23 - *Snímek obrazovky - nastavení uzavíracího filtru*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 24 - *Snímek obrazovky - nastavení filtru průměru*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 25 - *Snímek obrazovky - výsledek úprav*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 26 - *Nastavení funkce obrazové aritmetiky*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 27 - *Snímek obrazovky při aplikaci série filtrů*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 28 - *Snímek obrazovky při nastavování filtru pro odstranění vzdálených hodnot*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 29 - *Princip dírkového zobrazovacího modelu*. [obrázek]. Převzato ze zdroje [6] ze seznamu použité literatury a podkladů, strana 332
- Obrázek 30 - *Snímek obrazovky - výsledek funkce obrazového zkreslení*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 31 - *Umístění překážky*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 32 - *Měření v rovině kolmé k ose tunelu*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 33 - *Měření ve vodorovné rovině procházející osou tunelu*. Autor [fotografie]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 34 - *Snímek obrazovky – nastavení faktoru měřítka*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 35 - *Vizualizace úplavu za překážkou při maximální rychlosti proudícího vzduchu 10 m/s*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 36 - *Vizualizace úplavu za překážkou při maximální rychlosti proudícího vzduchu 15 m/s*. Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017

- Obrázek 37 - *Vizualizace úplavu za překážkou při maximální rychlosti proudícího vzduchu 20 m/s.* Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 38 - *Okamžité rychlostní pole za překážkou při maximální rychlosti proudícího vzduchu 20 m/s.* Autor [snímek obrazovky PC]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 39 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 20 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 40 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 30 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 41 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 40 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 42 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 50 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 43 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 60 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 44 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 70 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 45 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 80 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 46 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu 90 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 47 - *Izoplochy rychlostí za obtékanou překážkou pro rychlosti: -2, 0, 2, 4 m/s.* Vedoucí DP [výstup ze softwaru Tecplot]. Praha: laboratoř AV, 2017
- Obrázek 48 - *Izoplochy rychlostí za obtékanou překážkou pro rychlosti: 6, 8, 10, 12, 14, 16 m/s.* Vedoucí DP [výstup ze softwaru Tecplot]. Praha: laboratoř AV, 2017
- Obrázek 49 - *Izoplochy rychlostí za obtékanou překážkou.* Vedoucí DP [výstup ze softwaru Tecplot]. Praha: laboratoř AV, 2017
- Obrázek 50 - *Suma variancí 20 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 51 - *Suma variancí 30 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 52 - *Suma variancí 40 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 53 - *Suma variancí 50 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017

- Obrázek 54 - *Suma variancí 60 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 55 - *Suma variancí 70 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 56 - *Suma variancí 80 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 57 - *Suma variancí 90 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 58 - *Směrodatná odchylka 20 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 59 - *Směrodatná odchylka 30 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 60 - *Směrodatná odchylka 40 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 61 - *Směrodatná odchylka 50 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 62 - *Směrodatná odchylka 60 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 63 - *Směrodatná odchylka 70 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 64 - *Směrodatná odchylka 80 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 65 - *Směrodatná odchylka 90 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 66 - *Korelační koeficient 20 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 67 - *Korelační koeficient 30 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 68 - *Korelační koeficient 40 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 69 - *Korelační koeficient 50 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 70 - *Korelační koeficient 60 mm za překážkou*. Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017

- Obrázek 71 - *Korelační koeficient 70 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 72 - *Korelační koeficient 80 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 73 - *Korelační koeficient 90 mm za překážkou.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 74 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu za překážkou v 1. rychlostním režimu.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 75 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu za překážkou ve 2. rychlostním režimu.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017
- Obrázek 76 - *Vektorová mapa rychlostí proudění vzduchu za překážkou ve 3. rychlostním režimu.* Autor [výstup ze softwaru DynamicStudio]. Plzeň: laboratoř KKE ZČU, 2017