



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# POROVNÁNÍ MĚŘENÍ RYCHLOSTI VODOMĚRNOU VRTULÍ A LASEROVÝM ANEMOMETREM

COMPARISON OF SPEED MEASUREMENT BY HYDROMETRIC PROPELLER AND LASER  
ANEMOMETER

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Kosík

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ZUBÍK, Ph.D.

BRNO 2022



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	NPC-SIV Stavební inženýrství – vodní hospodářství a vodní stavby
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Specializace</b>	bez specializace
<b>Pracoviště</b>	Ústav vodních staveb

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Ondřej Kosík
<b>Název</b>	Porovnání měření rychlosti vodoměrnou vrtulí a laserovým anemometrem
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2021
<b>Datum odevzdání</b>	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby, 1. vydání, SNTL Praha, 1968

Metrologický předpis MP 010, ČMI Brno, 2018

ČSN ISO 3455 Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích (25 9322)

ČSN ISO 2537 Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem (25 9321)

<https://www.dantecdynamics.com/laser-doppler-anemometry>

Firemní literatura Dantec k laserové dopplerovské anemometrii

Zásady bezpečnosti práce s Laserovou měřicí technikou

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Student provede experimentální zjištění míry shody měření rychlosti proudění vody pomocí vodoměrné vrtule a laserovými anemometry, dále zjištění vlivu přítomnosti vodoměrné vrtule na tvar rychlostního pole v jejím okolí v prostoru zkušební tratě. V laboratoři ÚVS-LVV provede detailní měření rychlostního pole v měrném ohraničeném protékaném prostoru s umístěnou vodoměrnou vrtulí a bez ní.

Cíl práce: Poskytnout podrobné informace o vzájemném ovlivnění měřený profil – vodoměrná vrtule.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

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

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se primárně zabývá srovnáním dvou kalibračních přístupů. Zjišťuje míru vzájemné shody a snaží se zodpovědět důvody jejich odchylek. Tato shoda byla měřena prostřednictvím metody LDA. Bylo zjištěno, že kalibrační přístup vycházející z referenčního rámce hodnot předcházející bakalářské práce se liší od kalibrace pomocí kalibračních rovnic získaných z certifikovaných laboratoří systematicky o -2 %. Příčiny této odchylky byly zkoumány pomocí LDA a PIV. Ačkoliv bylo provedeno značné kvantum měření, došlo k vyvrácení všech testovaných hypotéz, a proto nebylo možné určit jejich příčinu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

měření rychlosti, rychlostní pole, kalibrace, hydrometrická vrtule, propeler, LDA, PIV, procentuální odchylka

## ABSTRACT

This final thesis deals primarily with the comparison of two calibration approaches. It determines the degree of mutual agreement and tries to answer the reasons of their deviations. This agreement was measured by the LDA method. It was found that the calibration approach based on the reference framework of values of the previous bachelor thesis differs systematically from the calibration using calibration equations obtained from certified laboratories by -2 %. The causes of this deviation were investigated using LDA and PIV. Although a significant number of measurements were performed, all tested hypotheses were refuted and therefore it was not possible to determine their cause.

## KEYWORDS

speed measurement, velocity field, calibration, hydrometric propeller, propeller, LDA, PIV, percentage deviation

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Ondřej Kosík *Porovnání měření rychlosti vodoměrnou vrtulí a laserovým anemometrem.*  
Brno, 2022. 115 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav  
vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Porovnání měření rychlosti vodoměrnou vrtulí a laserovým anemometrem* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 01. 2022

---

Bc. Ondřej Kosík  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Porovnání měření rychlosti vodoměrnou vrtulí a laserovým anemometrem* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 01. 2022

---

Bc. Ondřej Kosík  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

V první řadě děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Zubíkovi, Ph.D. za cenné rady, které mi vždy rád v průběhu zpracování práce poskytnul. Současně bych mu rád poděkoval i za pomoc s obsluhou komplikované měřicí techniky. Dále bych rád poděkoval subjektům, které byly laboratoři LVV ochotny zapůjčit čerstvě kalibrované hydrometrické vrtule, na nichž byl prováděn výzkum.

# OBSAH

1	Úvod .....	10
2	Teoretická část .....	11
2.1	Účel měření rychlosti .....	11
2.2	Metody měření rychlosti .....	12
2.2.1	Úřední měření.....	12
2.3	Laserová Dopplerovská anemometrie .....	13
2.3.1	Požadavky na laser .....	13
2.3.2	Dopplerův jev .....	15
2.3.3	Princip funkce .....	16
2.3.4	Výhody a nevýhody .....	19
2.4	Rovinná laserová anemometrie .....	20
2.4.1	Princip funkce .....	21
2.4.2	Výhody a nevýhody .....	23
2.5	Hydrometrická vrtule .....	24
2.5.1	Princip funkce .....	25
2.5.2	Výhody a nevýhody .....	27
2.5.3	Podmínky a postup kalibrace .....	27
2.5.3.1	Kalibrační střediska v ČR.....	27
2.5.3.2	Podmínky kalibrace .....	28
2.5.3.3	Průběh kalibrace .....	29
2.5.3.4	Uživatelská kalibrace.....	29
3	Experimentální část .....	31
3.1	Testovací trať .....	31
3.1.1	Prvky testovací trati.....	32
3.1.2	Typ proudění .....	34
3.1.3	Referenční rámec dat.....	34
3.2	LDA.....	35
3.2.1	Použitá LDA aparatura.....	35
3.2.1.1	Laser .....	35



3.2.1.2	Čočka .....	36
3.2.1.3	Optická sonda.....	36
3.2.1.4	Dělič barev .....	36
3.2.1.5	Fotonásobič .....	37
3.2.1.6	Software .....	37
3.2.2	Popis měřicí metody .....	38
3.2.3	Postup měření LDA .....	40
3.3	PIV .....	41
3.3.1	Použitá PIV aparatura .....	41
3.3.2	Popis měřicí metody a postup měření PIV .....	41
3.3.3	Zpracování dat .....	43
3.4	Hydrometrické vrtule .....	44
3.4.1	Použitá aparatura pro hydrometrické vrtule.....	44
3.4.2	Postup měření s hydrometrickými vrtulemi .....	44
4	Výsledky a diskuze.....	46
4.1	Statistické shromáždění různých hydrometrických vrtulí .....	46
4.1.1	Stanovení odchylek měřených rychlostí pro jeden propeler.....	46
4.1.2	Stanovení závislosti rychlosti na otáčkách .....	49
4.1.3	Stanovení odchylek rychlostí dle RR od rychlostí dle KR.....	50
4.2	Proměření rychlostního pole v objemu kolem vrtule s a bez ní.....	53
4.2.1	Srovnání rychlostí s umístěným propelerem a bez něj pomocí LDA.....	53
4.2.1.1	Vyhodnocení rychlostního pole před propelerem .....	55
4.2.1.2	Vyhodnocení rychlostního pole za propelerem .....	56
4.2.1.3	Ověření rovnice kontinuity .....	57
4.2.2	Srovnání měření pomocí PIV a LDA .....	58
4.2.3	Grafické srovnání rychlostí s propelerem a bez něj pomocí PIV .....	61
5	Závěr.....	63
6	Bibliografie.....	64
7	Přílohy .....	67

# 1 ÚVOD

Potřeba měření rychlosti je neodmyslitelně spojena s technickým i vědeckým vývojem jednotlivých odvětví průmyslu a tím i lidské společnosti jako celku. V dnešní době jsme často i při obvyklých každodenních činnostech naprosto běžně konfrontováni měřením rychlosti, což si mnohdy ani neuvědomujeme. Rychlost nás v moderním, uspěchaném světě obklopuje od radarů v silniční dopravě, přes návrhové průtoky při revitalizacích a úpravách vodních toků, až po rychlosti a tvary jednotlivých proudnic vzduchu ve větrném tunelu [1].

Současně se stále rostoucí potřebou měření rychlosti roste ruku v ruce i nutnost čím dál vyšší preciznosti jejího stanovení. Aby však v praxi bylo reálně možné provádět stále přesnější měření, je mimo vývoj nových měřidel rychlosti stejně důležité provádět a zdokonalovat kalibrační postupy a metodologii měřících přístrojů, jelikož v opačném případě by byl vývoj přinejmenším zpomalen.

V současné době funguje kalibrace všech měřidel, mimo uživatelské kalibrace, v akreditovaných kalibračních střediscích. U měřidel rychlosti proudění se však jedná o značně zdoluhavý, nákladný a komplikovaný proces, který je zavedený již několik desítek let. Jistě i v těchto střediscích dochází ke zdokonalování kalibračních procesů, nicméně se jedná o konzervativní způsob pokroku. Co když je však možné kalibraci provádět i jiným, efektivnějším způsobem? A pokud ano, s jakou přesností by bylo možné konfrontovat metodu stávající?

Snahou o zodpovězení těchto otázek je právě tato diplomová práce, jejímž primárním cílem je srovnání dvou kalibračních přístupů. Konkrétněji jde o zjištění míry shody měření rychlosti proudění pomocí hydrometrické vrtule mezi kalibračními rovnicemi vydanými certifikovaným pracovištěm a referenčním rámcem dat získaným dlouhodobým měřením testovací trati ÚVS-LVV pomocí metody LDA.

Dalším, avšak neméně důležitým, cílem je poskytnout podrobné informace o míře vzájemného ovlivnění měrného profilu s hydrometrickou vrtulí. Přesněji jde o změny tvaru rychlostního pole, zjištění příčin tohoto jevu a zhodnocení vlivu přítomností hydrometrické vrtule. To znamená, že pomocí LDA a PIV bude zkoumáno, zda se v trati nachází rotace rychlostního pole (např. šroubovicové proudění), protože by v takovém případě po vložení hydrometrické vrtule mohlo docházet k jejímu roztáčení či brždění, což by mělo podstatný nežádoucí vliv na měřené rychlosti.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Účel měření rychlosti

Pro účely měření rychlosti je nutné nejprve stanovit z jakého důvodu rychlost měříme, a co je pro nás požadovaným výstupem. V případech, kdy popisujeme pohyb objektů a zajímá nás parametr vzdálenosti, času a směru, je totiž možné o rychlosti uvažovat jako o veličině skalární (anglicky „*speed*“) nebo vektorové (anglicky „*velocity*“) [2]. Pokud rychlost popisujeme na základě prvních dvou zmíněných parametrů (tj. vzdálenosti a času), bavíme se o veličině skalární, která nám bude postačovat například pro stanovení rychlosti jedoucího vozidla. V případech, kdy pro nás je podstatný i parametr třetí (tj. směr) se jedná o vektorové vyjádření rychlosti, za jehož pomoci lze určovat typicky rychlost proudění kapalin či plynů v rámci používaného souřadného systému [3].

Rychlostí se pro účely této práce tedy rozumí vektorové vyjádření posunu částice po určité trajektorii vykonaného za jednotku času [3]. Základní jednotkou rychlosti je metr za sekundu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ], nicméně poměrně často se setkáváme s vyjádřením v kilometrech za hodinu [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ] nebo podle geografického umístění i v mílích za hodinu [mph], jelikož pro většinu populace jsou tyto jednotky snadněji představitelné [1].

Nedílnou součástí měření je však i vyhodnocování získaných dat, která lze s ohledem na jejich kvalitu nebo kvantitu zpracovat za pomoci množství odlišných metod. Důležitou roli mohou hrát i obecné podmínky měření jako okolní teplota, vlhkost nebo znečištění měřeného média prostřednictvím cizích příměsí. „Z naměřené rychlosti ve známém profilu je možné stanovit průtok a z něj dále sestavit například limnigrafické křivky vodočetných profilů. Odlišnou metodu vyhodnocování představuje reverzní způsob, kdy naměřené rychlosti na laboratorním modelu můžeme použít k jeho verifikaci či změně návrhových parametrů zkoumaného objektu [1]“.

Další důvod měření rychlosti je dán legislativní úpravou, konkrétně zákonem č. 505/1990, o metrologii, ve znění pozdějších předpisů. Na základě tohoto dokumentu jsou uživatelé provádějící úřední měření povinni v zákonem stanovených intervalech kalibrovat měřidla rychlosti ve střediscích, která byla akreditována Českým metrologickým institutem (zkráceně „*ČMI*“). Uživatel řádně kalibrovaného měřidla obdrží osvědčení ve formě kalibračního listu [4]. Mimo tyto povinné kalibrace v rámci akreditovaných středisek je uživatel oprávněn v mezidobí provádět kalibraci průběžně i sám [1].

## 2.2 Metody měření rychlosti

Existuje mnoho způsobů, jak měřit rychlost. Každá metoda má přirozeně své výhody i nevýhody, ale především míru přesnosti měřených dat. Ta závisí na způsobu a účelu použití měřidel rychlosti. Z tohoto důvodu je důležité nejprve porozumět charakteristikám různých technik měření rychlosti a současně i charakteristikám typu proudění, což ve výsledku může mít vliv na výběr vhodného typu měření a tím i měřidla pro danou aplikaci či vhodnou interpretaci výsledků měření [5].

Měřicí metody je v zásadě možné dělit dle různých kritérií, nicméně zde je nejvhodnější použít obecné členění na metody kontaktní a bezkontaktní, které bývají označovány i jako invazivní a neinvazivní. Při použití kontaktních metod je již ze samotného názvu patrné, že bude třeba měřicím zařízením, byť třeba jen minimálně, fyzicky zasáhnout do proudění měřeného média. Tyto metody jsou příhodné zejména proto, že zpravidla nevyžadují komplikovanou přípravu, a i vyhodnocování dat bývá přímočaré. V některých případech, například při značném znečištění kapaliny, však ani principiálně odlišnou metodu nelze použít. Bezkontaktní metody je vhodné použít naopak ve chvíli, kdy nechceme nijak ovlivňovat měrný prostor a proudění za ním. Případně jsou užitečné i ve chvíli, kdy není možné fyzicky do měřeného profilu zasáhnout [6].

Důležitou proměnnou, kterou není radno brát na lehkou váhu je bezesporu i legislativa. V tomto případě se bavíme zejména o zákoně č. 505/1990 Sb. o metrologii, ve znění pozdějších předpisů. Ten stanovuje základní charakteristiky pro úřední měření, stanovuje i jeho konkrétní postupy a upravuje i způsob, četnost i místa kalibrace používaných měřidel [7].

Dále je pro měření rychlosti důležitá vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 262/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů, kterou se zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření. Nelze zapomínat ani na vyhlášku Ministerstva průmyslu a obchodu č. 264/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů, o základních měřicích jednotkách a jejich označování [7].

### 2.2.1 Úřední měření

Obecně je třeba z vodohospodářského hlediska odlišovat měření průtoku v profilech s volnou hladinou od měření v uzavřených kanálech, neboť úřední měření se dle metrologického předpisu MP 010 provádí právě v profilech s volnou hladinou. Za úřední měření se obecně považuje určitý metrologický výkon, jehož výsledek musí být prokázán dokladem o úředním měření, který má formu veřejné listiny [8]. Grafickou podobou otištěného razítka a obligatorní náležitosti tohoto dokumentu, kde je mimo jiné uveden i předmět autorizace a metody měření, které daná osoba smí používat, upravuje příloha č. 9 k vyhlášce Ministerstva průmyslu a obchodu č. 262/2000 Sb., ve znění pozdějších předpisů a metrologický předpis MP 020 [9].

Dále se z legislativního hlediska úředního měření týká zejména § 13 zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů. Tento zákon prostřednictvím Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví stanovuje každé fyzické i právnické osobě, které mají za cíl provádět úřední měření, povinnost získat nejprve autorizaci v daném oboru. Současně v některých případech předepisuje i konkrétní typ měřidel, která smí být používána [4].

## **2.3 Laserová Dopplerovská anemometrie**

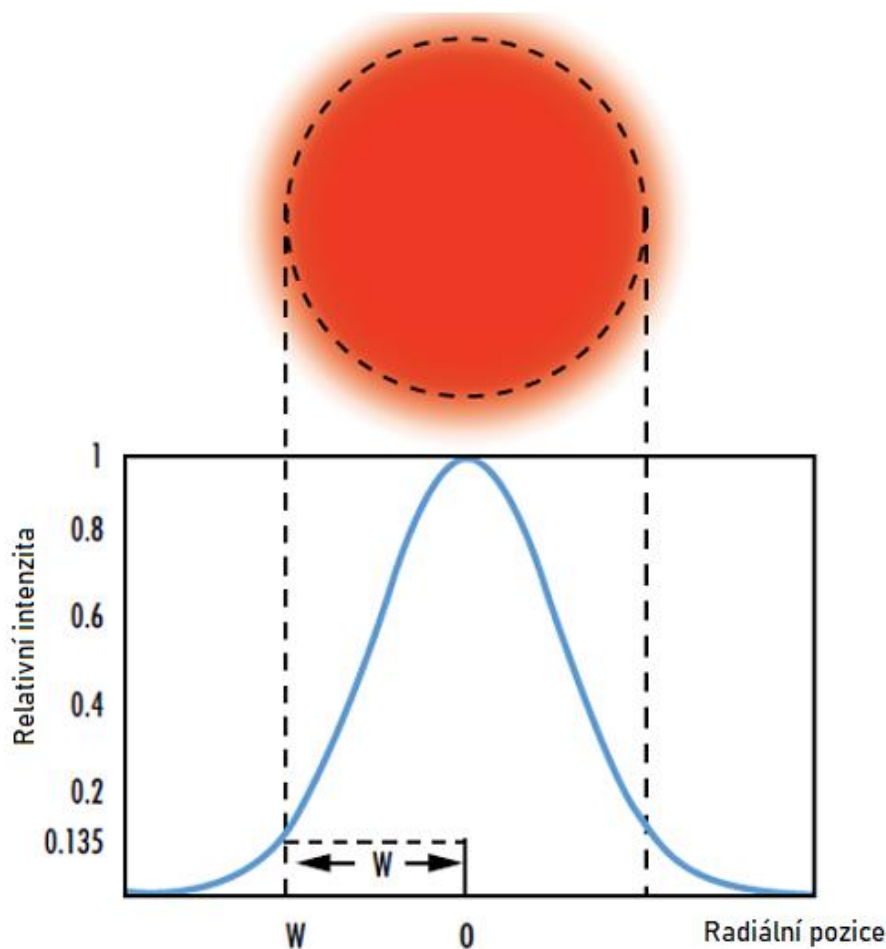
Laserová Dopplerovská anemometrie (z angličtiny „Laser Doppler anemometry, zkráceně „LDA“), známá také jako Laser Doppler velocimetry (zkráceně „LDV“) nebo bodová laserová anemometrie, představuje bezkontaktní metodu měření. Z jejího alternativního názvu je patrné, že principiálním základem, bez kterého by nemohla fungovat je laser (zkratka pro „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“) [1], kde pomocí stimulované emise záření dochází k zesílení světelných vln [10].

Tato optická technika je vhodná pro 1D, 2D i 3D bezkontaktní bodové měření rychlosti a distribuce turbulencí v proudění s volnou hladinou i v uzavřených prostorech [11]. Na poli zkoumání fluidní dynamiky v plynech a kapalinách se jedná o poměrně rozšířený měřicí nástroj používaný již více než třicet let [11].

Zejména díky směrové citlivosti je tato metoda vhodná například u médií dosahujících vysokých teplot nebo u rotačních strojů, kde je použití kontaktních metod obtížné či dokonce nemožné. [12] Nicméně pro funkčnost této měřicí metody je bezpodmínečně nutná přítomnost částic s vhodnými odrazovými vlastnostmi ve zkoumaném médiu [13].

### **2.3.1 Požadavky na laser**

Aby byl laser vhodný k provádění měření pomocí LDA, musí nepřerušovaně emitovat koherentní světlo v příčném módu  $TEM_{00}$  [1]. Koherentním světlem se rozumí lineárně polarizované, monochromatické světlo. [10] Základní režim, neboli  $TEM_{00}$  příčný Gaussův režim, popisuje zamýšlený výkon většiny laserů, protože takový laserový svazek lze zaostřit do nejkonzentrovanejšího bodu. Když je takový svazek znovu zaostřen čočkou, změní se příčná fázová závislost a výsledkem je poté odlišný Gaussův světelný svazek. Profily amplitudy elektrického a magnetického pole podél jakéhokoli takového kruhového Gaussova svazku jsou pro danou vlnovou délku a polarizaci určeny takzvaným „pasem“ neboli poloměrem laserového svazku  $w_0$  [14].



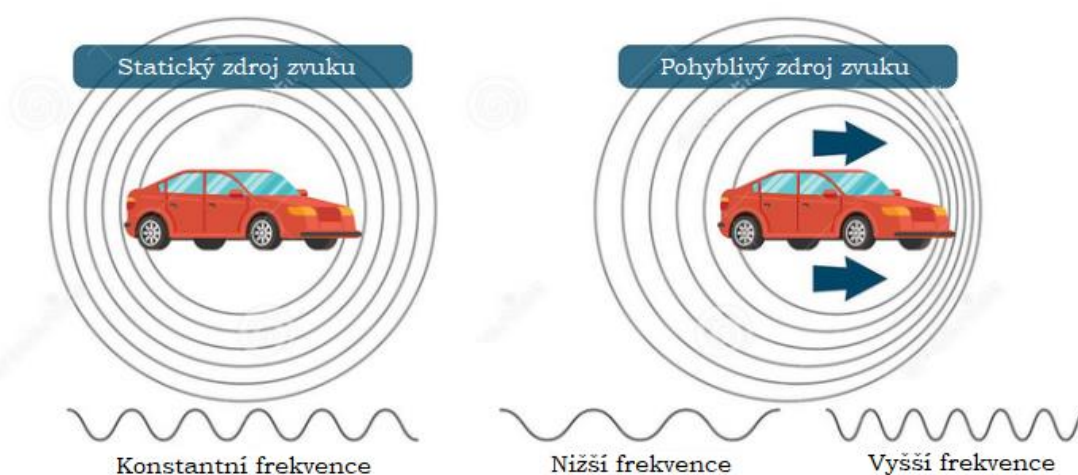
Obrázek č. 1: Profil laserového svazku v příčném módu  $TEM_{00}$  [1]

Příčné rozložení intenzity tedy v podstatě popisuje profil svazku laserového paprsku, který má obdobný průběh jako u Gaussova rozložení pravděpodobnosti [1], jak je patrné z obrázku č. 1. Současně je však nutné dodat, že se jedná o idealizovaný průběh, jelikož všechny skutečné svazky budou mít určitou odchylku od ideálního Gaussova chování [15].

Odchylka reálného stavu od idealizovaného je v tomto případě způsobena difrakcí, kterou popisuje faktor  $M^2$ , známý rovněž jako faktor kvality laserového svazku [15]. Když světlo prochází libovolnou velikostí clony (resp. čočkou), dochází k difrakci. Výsledný difrakční obrazec, který se nazývá Airyho disk, lze interpretovat jako jasnou oblast ve středu, spolu s řadou soustředných prstenců s klesající intenzitou kolem ní. V praxi však dochází změnami zaostření laserového svazku k překryvu jednotlivých prstenců a středu. Z tohoto důvodu se stane Airyho disk díky kontrastu v podstatě nepozorovatelný [16].

### 2.3.2 Dopplerův jev

Dopplerův jev (z angličtiny „Doppler effect“) popisuje změnu frekvence mezi vysílačem a přijímačem [3]. Tyto zákonitosti byly poprvé popsány rakouským vědcem Christianem Dopplerem roku 1842. Změna ve frekvenci je způsobena vzájemným pohybem vysílače nebo přijímače [1]. Podrobněji by se dalo konstatovat, že Dopplerův efekt dává do souvislosti frekvence harmonických vln generovaných pohybujícím se zdrojem s frekvencí měřenou pozorovatelem, který se pohybuje jinou rychlostí, než je rychlost zdroje [17].

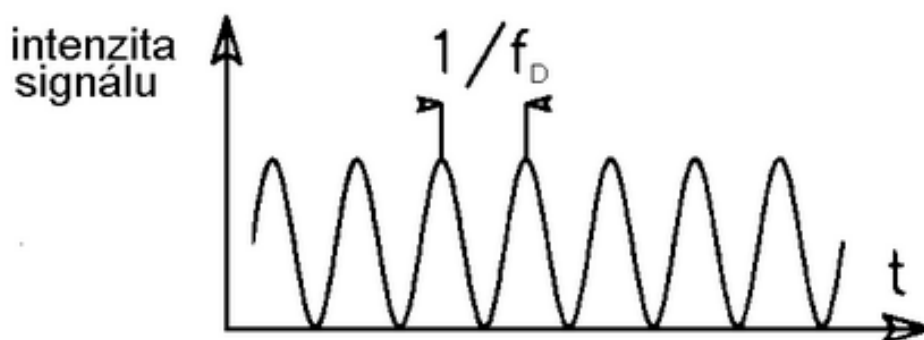


Obrázek č. 2: Grafické znázornění Dopplerova jevu [1]

Aby bylo patrné, jakou roli hraje Dopplerův jev při měření metodou LDA, je potřeba si představit, že laserový svazek emitovaný vysílačem o rychlosti „ $c$ “ a frekvenci „ $f_v$ “ dopadá na měřenou částici. Dopadem dochází k rozptylu světla, čímž se částice v podstatě stává pohyblivým zdrojem světla. Do přijímače je pak právě z důvodu pohybu částice odražena frekvence „ $f_č$ “. [1] Rozdíl mezi původní a změněnou frekvencí označujeme jako Dopplerovu frekvenci  $f_D$  a lze ji vyjádřit jako [10]:

$$f_D = (2 v_x / \lambda) \cdot \sin(\theta / 2) [s^{-1}] \quad (1)$$

kde  $v_x$  značí složku vektoru rychlosti částice kolmou k interferenčním rovinám,  $\lambda$  vlnovou délku emitovaného laserového svazku a  $\theta$  úhel svíraný laserovými svazky [10]. Grafické znázornění Dopplerovy frekvence je patrné rovněž z obrázku č. 3.



Obrázek č. 3: Dopplerova frekvence [10]

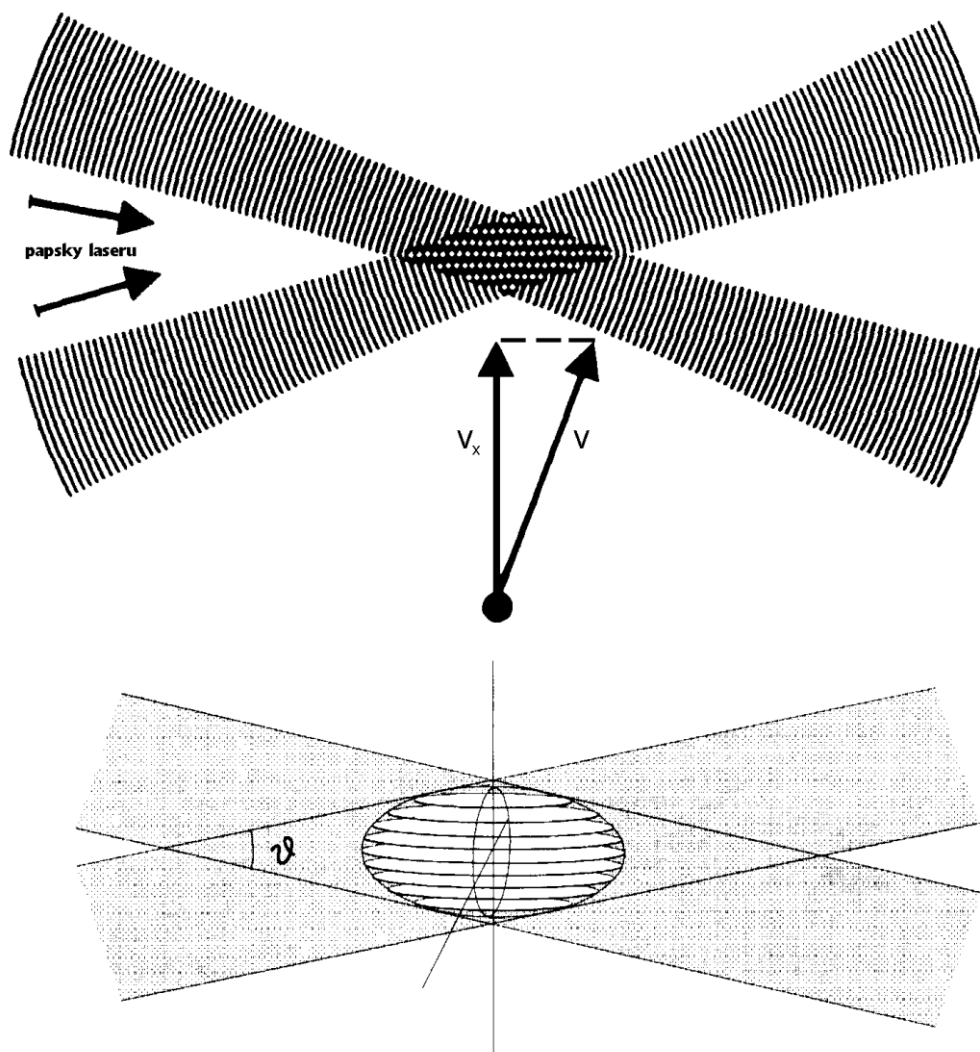
„Lze tedy konstatovat, že pokud se vysílač a přijímač budou vzájemně přibližovat, frekvence se bude zvyšovat a pokud se budou oddalovat, bude se frekvence snižovat. Tento princip funguje při šíření světla i zvuku. Pro lepší znázornění si lze představit například projíždějící sanitku, jejíž houkání má vysokou frekvenci, dokud se přibližuje. Jakmile se však začne vzdalovat, její frekvence se zřetelně sníží [1].“

### 2.3.3 Princip funkce

Základní konfigurace LDA aparatury se skládá z monochromatického laseru, vysílací optiky včetně rozdělovače laserových svazků a spojné čočky, přijímací optiky se spojnou čočkou, interferenčního filtru s fotodetektorem a jednoúčelového počítače pro zpracování dat. [12].

V praxi laser emituje jediný svazek, který putuje do Braggovy cely. Zde se nachází skleněný krystal s připojeným vibračním piezo krystalem, prostřednictvím kterých dojde k rozdělení laserového svazku na dva. Tento postup se používá na úkor emitace dvou laserových svazků z důvodu dosažení koherence vlastností svazků [12]. U jednoho ze svazků je v Braggově cele současně proveden posun frekvence o známou hodnotu [10]. Dostaneme tedy svazky se stejnou intenzitou s frekvencemi  $f_0$  a  $f_{\text{shift}}$ , které jsou pomocí optických vláken paralelně vedeny ke spojné čočce [12].

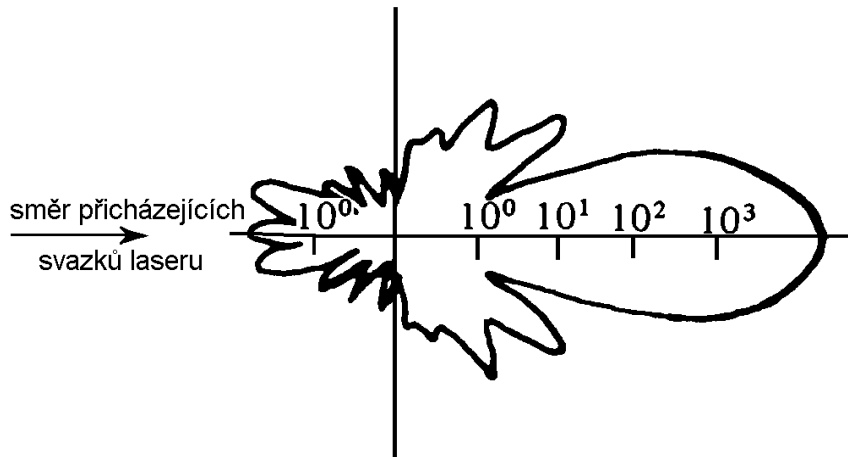




Obrázek č. 4: Interferenční model a tvar optické sondy LDA [1]

Dále za pomoci spojné čočky dojde k lomu svazků. „V horní části obrázku č. 4 lze pozorovat schematické zobrazení sčítání a odečítání rovinných vln dvou interferujících koherentních laserových svazků. Jelikož je tento rastr přičiněním neměnné vlnové délky laserového světla stabilní, lze LDA považovat za absolutní měřidlo, což v praxi znamená, že není nutné provádět pravidelnou kalibraci měřicí aparatury. Vzhledem ke skutečnosti, že laserové svazky mají kruhový průřez a v pásmu  $TEM_{00}$  Gaussův průběh intenzity, má prostor, ve kterém dochází k interferenci, tvar rotačního elipsoidu, jenž je patrný z dolní části obrázku č. 4. Tento prostor můžeme nazvat optickou sondou [1]“. Rozměry optické sondy jsou v řádu desetin až nižších jednotek milimetrů [12].

Informace o rychlosti proudění pochází ze světla rozptýleného drobnými unášenými částicemi v tekutině, když se pohybují objemem optické sondy [13]. Rozptýlené světlo, které je zachycováno čočkou přijímače a dále zaostřeno na fotodetektor, obsahuje Dopplerovu frekvenci  $f_D$ . Ta je úměrná složce rychlosti kolmé k ose dvou laserových svazků, což odpovídá složce  $v_x$  zobrazené v objemu sondy [12]. Před samotným fotodetektozem je navíc umístěn dělič barev, jež předává fotodetektoru pouze požadovanou vlnovou délku. Tím dojde k odstranění šumu z okolního světla a jiných vlnových délek [18].



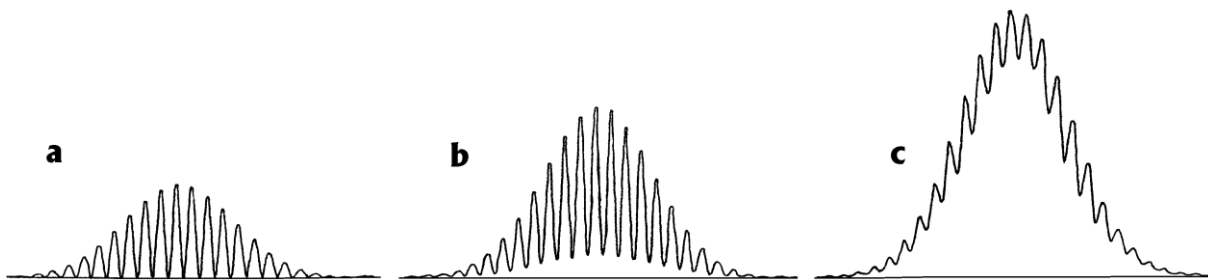
Obrázek č. 5: Polární diagram intenzity odraženého světla [10]

Interference mezi laserovými svazky vytváří rovnoběžné roviny vysoké intenzity světla, které lze nazvat proužky. Vzdálenost proužků  $d_f$  je definována vlnovou délkou laserového světla a úhlem mezi svazky podle rovnice č. 2 [12]:

$$d_f = \lambda/2 \sin(\theta/2)[nm] \quad (2)$$

U intenzity světla je navíc potřebné zohledňovat, zda byla zvolena zpětná či dopředná metoda LDA. U zpětné metody totiž dochází ke značnému úbytku intenzity světla oproti metodě dopředné, což je patrné z obrázku č. 5 [10].

I přes tuto skutečnost je však z praktického hlediska stěžejní použít vhodné odrazové částice, zejména s ohledem na jejich velikost. Částice totiž v případě, kdy je menší než vzdálenost interferenčních rovin, nemá dostatečně silný, byť správný, signál. Pokud je naopak větší, nemá vypovídající hodnotu. Ideální je tedy dosáhnout co největšího množství částic o velikosti limitně se blížící vzdálenosti interferenčních rovin. Tuto skutečnost dobře popisuje obrázek č. 6 [10].



Obrázek č. 6: Dopplerův zákmit v závislosti na částici – zleva malá, vhodná a velká [10]

Na základě informací o vzdálenosti proužků  $d_f$  a Dopplerově frekvenci  $f_D$  z rovnice č. 1 jsme schopni stanovit rychlost proudící částice, která se vypočte podle rovnice č. 3 [12]:

$$v = d_f \cdot f_D [m \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

### 2.3.4 Výhody a nevýhody

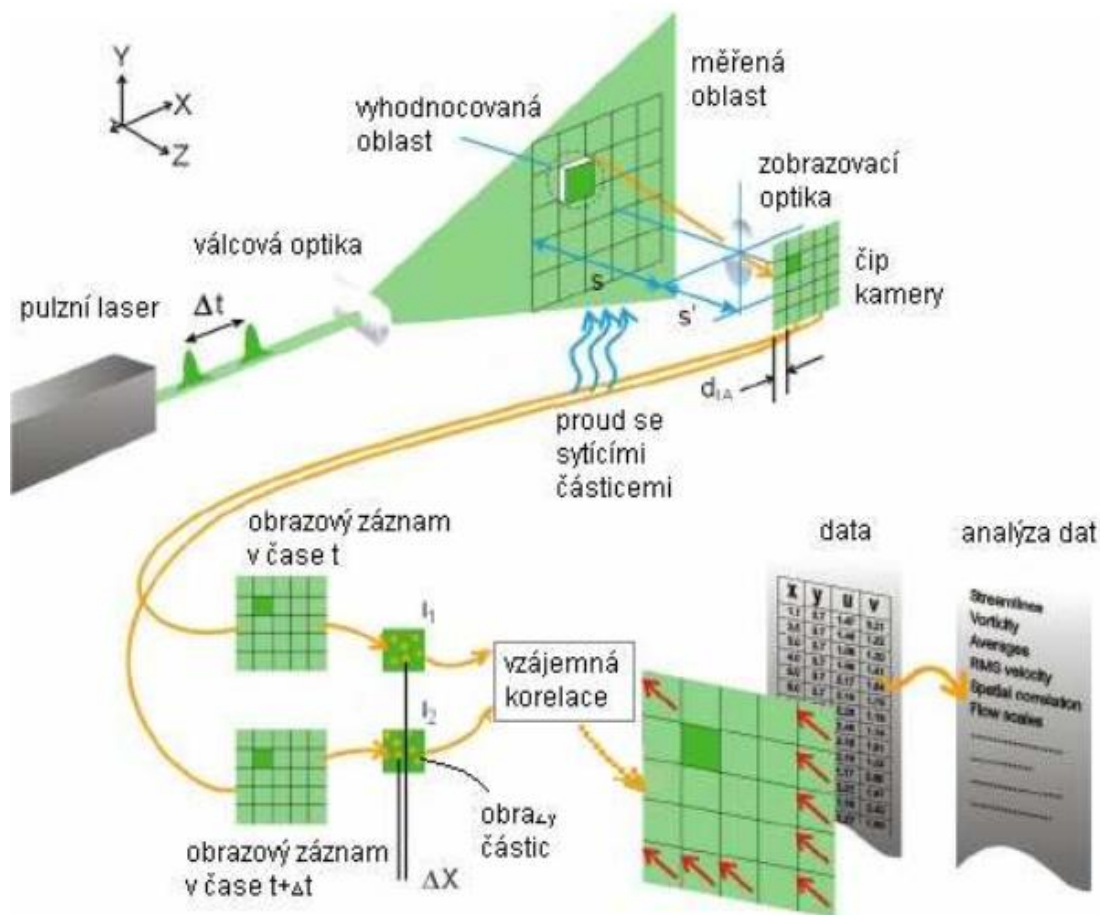
Jednou z největších výhod metody LDA je bezesporu skutečnost, že se jedná o absolutní měřidlo, které není nezbytně nutné kalibrovat. Další výhodou je bezkontaktnost této metody, což znamená, že není nutné fyzicky zasahovat do měřeného média [13]. Další velkou výhodou je možnost skutečně měřit nulové rychlosti díky frekvenčnímu posunu, a ne na ně jen usuzovat, protože měřicí přístroj nevykazuje žádné měřené hodnoty [1]. Další z mnoha výhod je bezesporu možnost měřit i v prostorech s jednostranným optickým přístupem díky možnosti zpětné metody měření a využití vysílací optiky současně i jako přijímací [11], či provádění měření ve formátu 1D, 2D nebo 3D v závislosti na požadovaném výstupu [1].

Nevýhodou metody LDA je především fakt, že není schopna měřit absolutně čisté látky či látky s nevhodnými odrazovými částicemi. Další nevýhodou je značná časová náročnost měření a také nutnost zkušené obsluhy, která je schopna vhodně nastavit softwarové rozhraní k dosažení přesných a správných výsledků [10].

Celkově by se však dalo shrnout, že nevýhody LDA jsou celkově vyváženy velkým množstvím pozitiv, což dělá pro určité aplikace tuto měřicí metodu velmi atraktivní pro osoby, jež jsou ochotny obětovat čas na úkor přesnosti měřených dat.

## 2.4 Rovinná laserová anemometrie

Rovinná laserová anemometrie (z angličtiny „Particle image velocimetry“, zkráceně „PIV“) je optická měřicí metoda spadající do kategorie bezkontaktních metod měření rychlosti proudění [1]. Pomocí této metody je možné zjišťovat informace o aktuálním rozložení vektorů rychlostního pole proudícího média [18].



Obrázek č. 7: Princip funkce a způsob vyhodnocování dat metodou PIV [1]

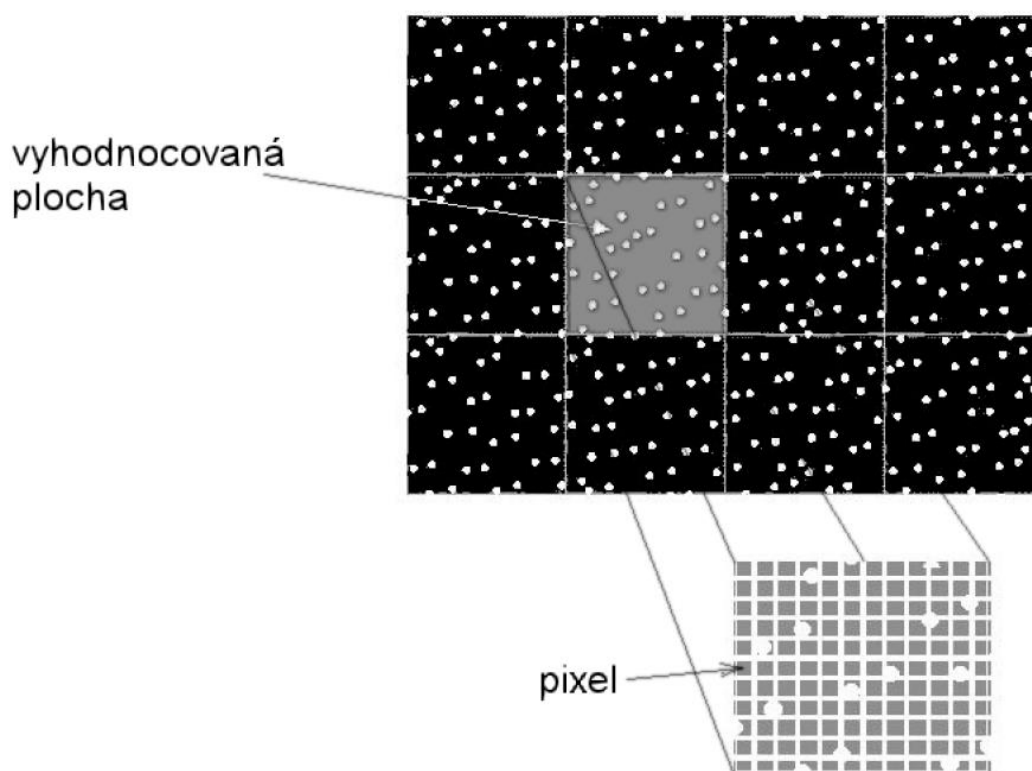
Při použití jediné kamery jsou měřeny dvě složky rychlosti, nicméně použití stereoskopického přístupu umožňuje zaznamenat všechny tři složky rychlosti, což má za následek získání třírozměrných vektorů rychlosti pro celou oblast. Bavíme se tedy o měření v rozměru 2D při měření tří složek 3C, jinými slovy 2D3C [19].

### 2.4.1 Princip funkce

U této měřicí metody jsou vektory rychlosti odvozeny z dílčích úseků v cílové oblasti toku s rozptýlenými částicemi zaznamenáním pohybu částic mezi dvěma světelnými pulzy podle vektorové rovnice rychlosti č. 4 [19]. Jinými slovy jsou rychlosti určovány z naměřené vzdálenosti, kterou částice urazí a času potřebného k vykonání tohoto pohybu. Za tento čas lze velmi příhodně stanovit hodnotu mezi jednotlivými světelnými pulsy [18].

$$\vec{V} = \Delta\vec{X}/\Delta\vec{t} [m \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

Měrný prostor je dvakrát v těsném sledu krátce ozářen světelnou rovinou. Kamera je schopna zachytit každý světelný puls v samostatných obrazových snímcích. Jakmile je zaznamenána sekvence dvou světelných pulsů, obrazy jsou rozděleny do malých subsekcí nazývaných vyhodnocované oblasti (z angličtiny „interrogation areas“, zkráceně „IA“). Vyhodnocované oblasti každého obrazového snímku jsou vzájemně křížově korelovány pixel po pixelu podle obrázku č. 7 [19]. Samotný záznam vypadá jako „světelná zrna“ vyobrazená na tmavém pozadí, jak je patrné z obrázku č. 8 [18].

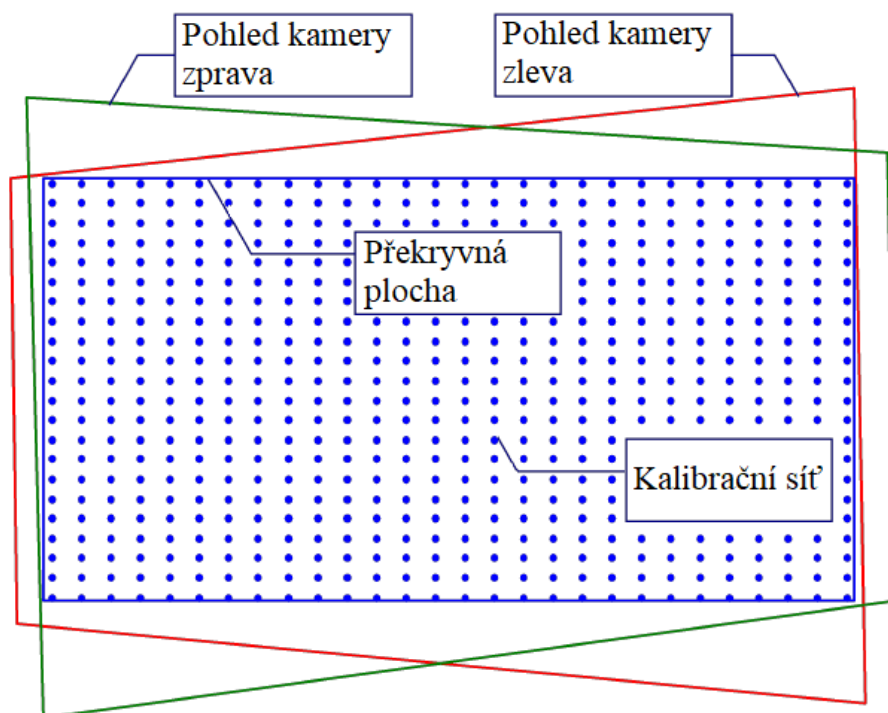


Obrázek č. 8: Jednotlivé vyhodnocované plochy [20]

Korelace vytváří vrchol signálu, který identifikuje společný posun částic  $dx$ . Přesné měření posunu, a tím i rychlosti, je dosaženo za pomoci subpixelové interpolace [18]. Vektorová mapa rychlosti přes celou cílovou oblast se získá opakováním vzájemné korelace pro každou vyhodnocovanou oblast pomocí dvou snímků zachycených kamerou. Sloučení obou zaznamenaných světelných pulsů do stejného snímku pro sledování pohybu částic poskytuje jasný vizuální smysl struktury toku [19].

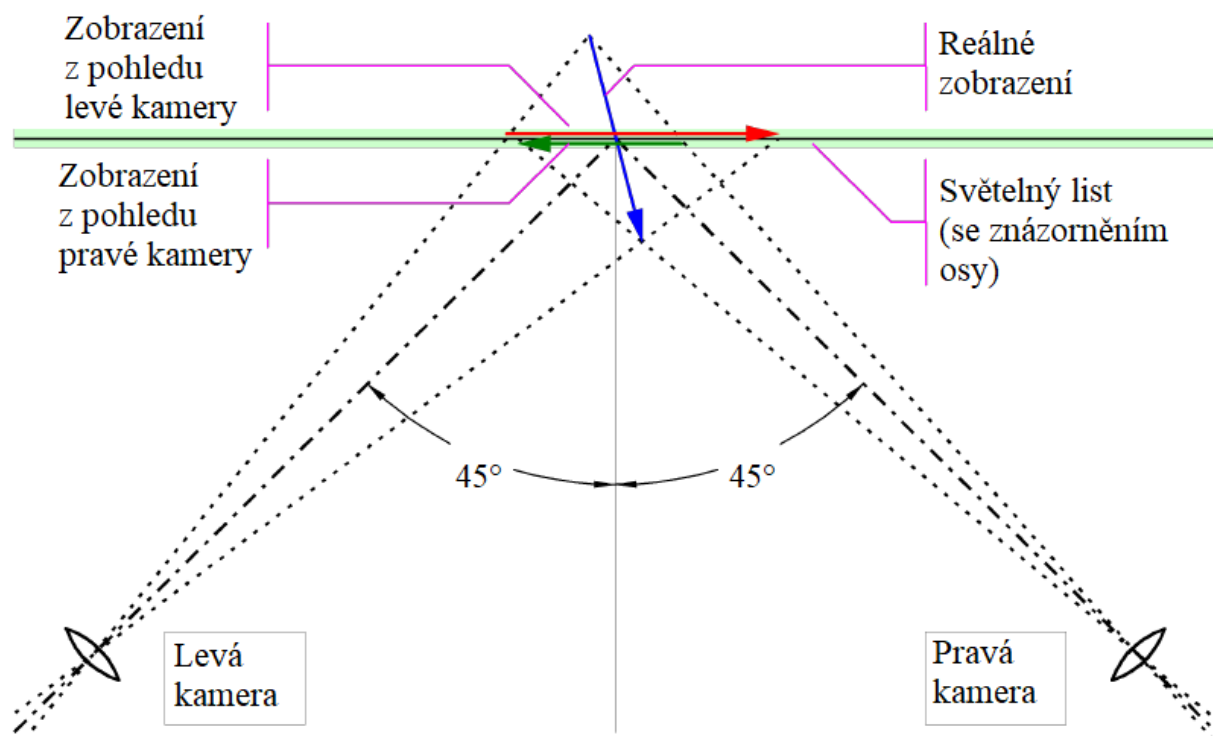
Při proudění vzduchu jsou nejčastěji používány částice ve formě kapek oleje o velikostech od 1  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$ . Pro aplikaci ve vodním prostředí zastupují rozptýlené částice typicky polystyrenové či duté skleněné kuličky o rozměrech od 5  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$  [19]. Obecně však lze použít jakékoliv částice, které uspokojivě kopírují proudění v kapalině a současně rozptyluje dostatek světla k zachycení kamerou [18]. Důležité je současně sledovat i počet částic v kapalině, jelikož souvisí se získáním dobrého signálu. Zpravidla by mělo být v každé jmenovité oblasti 10 až 25 částic [21].

V případě, kdy chceme provádět měření 2D3C, tedy ve všech třech směrech, je třeba použít stereo aparaturu [21]. Tento postup zahrnuje totožný laser s optickými prvky, který je schopen vytvořit světelný list v měřené oblasti [18] a rovněž dvě kamery, kdy každá z jiné strany pod určitým úhlem snímá světelný list v měrném prostoru, do kterého byl dříve vložen kalibrační terč k synchronizaci obou kamer, jak je patrné z obrázku č. 9 [22].



Obrázek č. 9: Kalibrační síť a pohledy jednotlivých kamer při stereo PIV [21]

Uspořádání kamer je možné zvolit různě v závislosti na optické přístupnosti měřeného prostoru, nicméně nejlepších výsledků je dosahováno v okamžiku, kdy kamery svírají úhel  $90^\circ$ , jak je patrné z obrázku č. 10. S větším či menším úhlem dochází k určitým ztrátám přesnosti měření, které však nejsou příliš signifikantní [21].



Obrázek č. 10: Princip umístění kamer při stereo PIV (jedna z variant) [21]

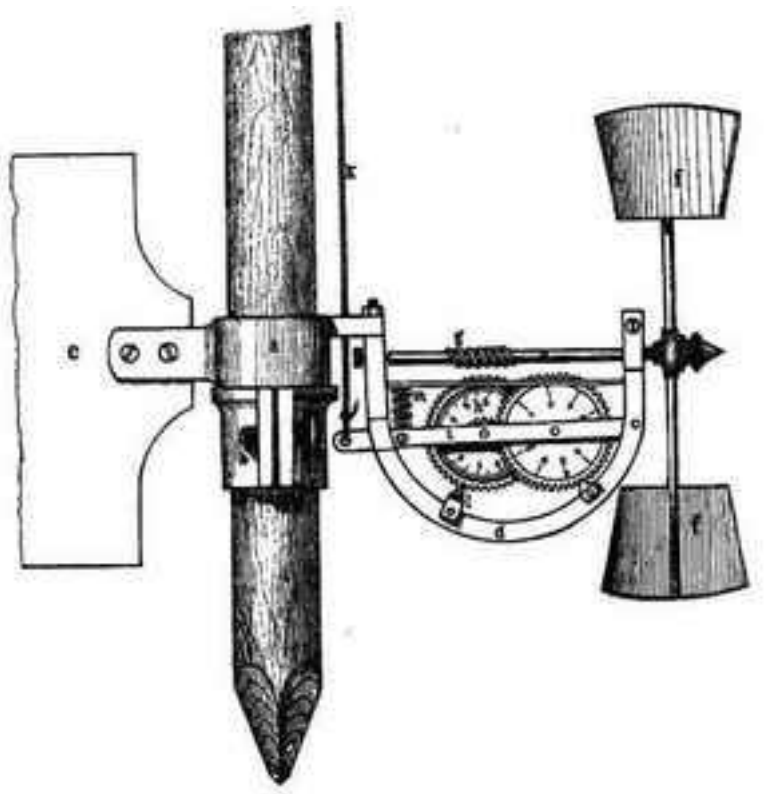
#### 2.4.2 Výhody a nevýhody

Hlavní výhodou této měřicí techniky je její bezkontaktnost. Rozsah měření rychlosti lze nastavit od nuly až po rychlost zvuku. Další výhodou je možnost získu vektorových map okamžité rychlosti proudění ve sledovaném průřezu. Všechny tři složky rychlosti lze získat použitím stereoskopického uspořádání [19].

Nevýhodou, podobně jako u metody LDA, je neschopnost měřit proudící média bez přidaných částic s vhodnými odrazovými vlastnostmi. Další značnou nevýhodou oproti LDA je nemožnost měřit nulové rychlosti. Rovněž je nutné zmínit i časovou náročnost přípravy měřicí aparatury. Je totiž vyžadováno přesné uspořádání jednotlivých komponent, vhodné zaostření a naúhlování kamer či značná citlivost na zatmění okolního prostředí. Samotné měření již probíhá velmi rychle.

## 2.5 Hydrometrická vrtule

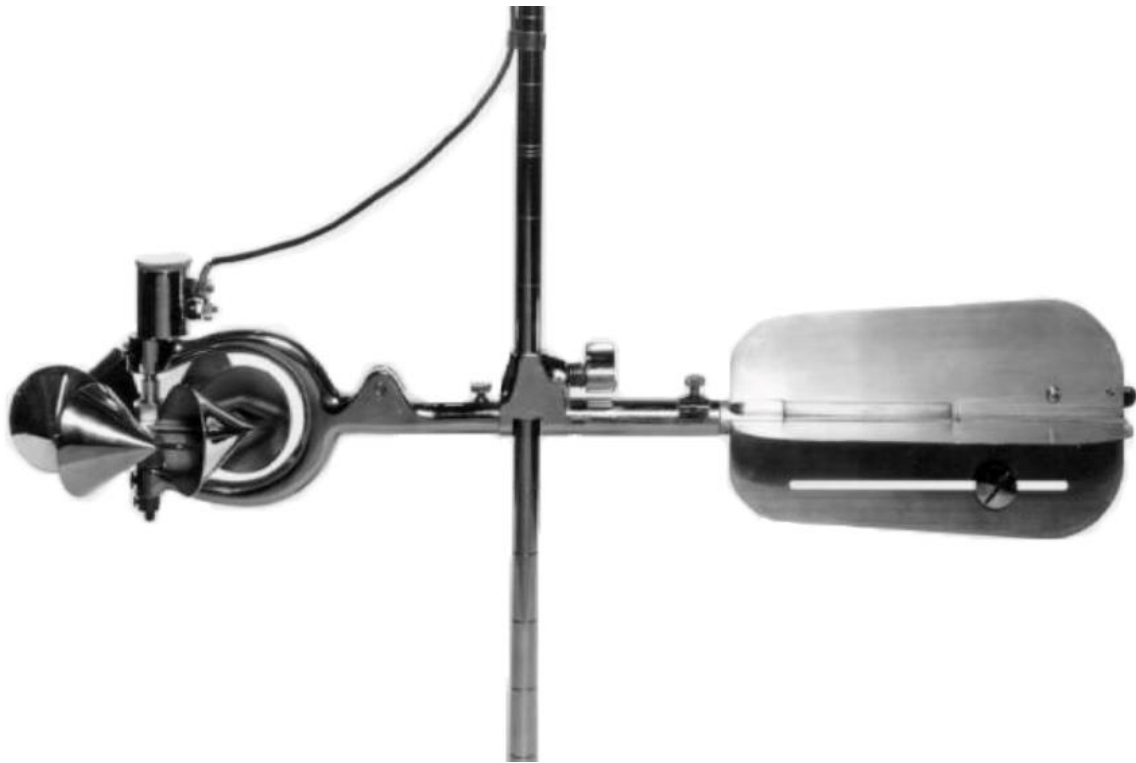
Měření za pomoci hydrometrické vrtule se řadí mezi metody kontaktní, jelikož dochází k přímému fyzickému zásahu snímacího zařízení do měřeného média [1]. Přestože od prvního využití této metody uplynula již dlouhá doba a došlo ke značnému technologickému pokroku, jedná se v současnosti o nejčastější bodovou metodu měření [23]. Podle metrologického předpisu MP 010, který je platný pro úřední měření v oblastech s volnou hladinou [24], se dokonce jedná o jediné povolené měřidlo [1].



Obrázek č. 11: Woltmannova vrtule [25]

Historicky první hydrometrickou vrtuli navrhl Reinhardt Woltmann roku 1787. Jednalo se o propeler s horizontální osou připomínající lopatkové kolo, což je možné pozorovat na obrázku č. 11. Jednalo se však o přístroj se značnými nepřesnostmi, protože byl dále zdokonalován princip funkce, na kterém byl založen. Z tohoto vývoje vyplynul v kontinentální Evropě přesun ke šroubovicovým propelerům přičiněním mnoha osob, ale především pak Alberta Otta, který si založil, dnes známou, stejnojmennou společnost vyrábějící hydrometrické vrtule [25]. Jejich design je patrný z obrázku č. 13. V zámorí jsou používány především vrtule miskové, které mají svislou osu rotace a konstrukčně jsou značně podobné anemometrům [1], jak ukazuje obrázek č. 12.





Obrázek č. 12: Priceova vrtule typu AA [26]

### 2.5.1 Princip funkce

Princip funkce vodoměrné vrtule je založen na snímání počtu vykonaných otáček. U starších typů vrtulí se uskutečňoval přenos informací prostřednictvím akustického signálu, který vždy zazněl po předem stanoveném počtu vykonaných otáček (zpravidla deset, dvacet nebo padesát) [1]. V současnosti se přenos informací zprostředkovává zpravidla mechanicky, magneticky či opticky. Standardní novodobé vrtule vysílají impuls nejčastěji po každé vykonané otáčce, avšak u laboratorních mikro-vrtulí s průměry do 25 mm se může jednat o frekvenci odchodu signálu i častěji než šedesátkrát za otáčku [23].

Vrtule musí být v měrném profilu na tyči umístěna tak, aby její osa a směr proudnic kapaliny byly, pokud možno, rovnoběžné. Žádoucí parametry a informace o kalibraci měřicích zařízení jsou uvedeny v normách ČSN ISO 2537 a ČSN ISO 3455 [1]. Dále se pak k jednomu tělu vrtule dodává zpravidla více propelerů, které jsou všechny kalibrovány zvlášť. Z tohoto důvodu vždy mají i své vlastní kalibrační rovnice. Jednotlivé propelery disponují různým stoupáním šroubovice či odlišnými průměry, čímž je možné dosáhnout postižení širšího spektra rychlostí proudění s menší odchylkou měření [23].

Aby bylo možné určit rychlost tekutiny, umístí se měřič proudu do bodu v proudu a určí se počet otáček propeleru za stanovený časový interval nebo naopak čas potřebný k vykonání daného počtu otáček. Jmenovitá rychlost se pak získá z kalibrační tabulky měřiče proudu nebo z kalibračních rovnic, které byly experimentálně stanoveny během jeho kalibrace. Počet otáček vrtule je zpravidla určen snímáním signálů emitovaných otáčivým pohybem propeleru za pomoci vhodného čítacího zařízení. Rychlost lze pak určit přímým odečtem počtu otáček  $N$  [-] za časový interval  $T$  [s] [27]. Dosazením do kalibrační rovnice č. 6, za pomoci platných kalibračních konstant  $\alpha_i$  a  $\beta_i$  pro uvedený rozsah otáček, pak získáme jmenovitou bodovou rychlost [1].

$$n = N/T [s^{-1}] \quad (5)$$

$$v_i = \alpha_i + \beta_i \cdot n [m \cdot s^{-1}] \quad (6)$$



Obrázek č. 13: Hydrometrická vrtule typu OTT C2 [1]

## 2.5.2 Výhody a nevýhody

Za největší výhodu hydrometrování se v současné době dá považovat finanční dostupnost této metody, která ovšem poskytuje při běžných rychlostech poměrně přesné stanovení rychlosti průtoků. Další výhodou je schopnost měřit i v poměrně značně znečištěných kapalinách. Značnou nevýhodou vodoměrné vrtule je naopak téměř neschopnost měření spekter rychlostí limitně se blížících nule [1]. Zde totiž dochází v důsledku nízkého počtu naměřených dat a nepravidelného rotačního pohybu propeleru ke značným odchylkám měřených hodnot [27], což má významný vliv na hodnotu koeficientu spolehlivosti [1].

*„S ohledem na zachování přesnosti měření je nutné poměrně často provádět kalibraci, neboť plaveniny, které přijdou do kontaktu s propelerem jej po určité době částečně poškodí. Vrtulový set proto musí mít konstrukci dostatečně odolnou, což zvyšuje i jeho hmotnost [1]“.*

## 2.5.3 Podmínky a postup kalibrace

### 2.5.3.1 Kalibrační střediska v ČR

Autorizovanou kalibraci hydrometrických vrtulí i veškerých ostatních pracovních měřidel a etalonů na území České republiky provádí Český metrologický institut (ČMI) [28], který je k této činnosti oprávněn na základě § 14, zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii, ve znění pozdějších předpisů [4].

Veškeré kalibrace ČMI provádí prostřednictvím autorizovaných středisek v souladu s § 16 zákona o metrologii ve znění pozdějších předpisů, a v souladu se zněním normy ČSN EN ISO/IEC 17 025:2018, která stanovuje všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří v akreditačním systému České republiky. Dále je ČMI signatářem ujednání CIPM MRA, o vzájemném uznávání státních etalonů, kalibračních listů a výsledků metrologických institutů [28]. Specifický postup sloužící pro kalibraci hydrometrické vrtule, rozměry zkušební trati, způsob vyhodnocení dat a mnoho dalších parametrů měření je přímo stanoveno normou ČSN ISO 3455:2007 [29].

V registru Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví se na území České republiky ke dni 20. 11. 2021 nachází 461 autorizovaných metrologických středisek, z nichž 257 má k tomuto datu oprávnění aktivní. Dalších 25 středisek má oprávnění pozastavené. Z těchto subjektů se ve zmiňovaném registru nachází pouze jediný, který je oprávněn provádět kalibraci hydrometrických vrtulí [30]. Druhý nejbližší subjekt mimo Českou republiku se nachází na Slovensku.

### 2.5.3.2 Podmínky kalibrace

Rozměry nádrže, počet hydrometrických vrtulí a jejich vzájemná poloha v průřezu nádrže musí být zvoleny tak, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků měření. Jmenovitou délku nádrže lze určit na základě zahrnutí všech jednotlivých úseků kanálu, mezi které patří část urychlovací, stabilizační, měřicí a zpomalovací [31]. Například kalibrační žlab České kalibrační stanice vodoměrných vrtulí má užitečnou délku téměř 140 m, konstantní šířku 2,5 m a průměrnou hloubku 2,1 m se sklonem dna 0,4 ‰ [32].



Obrázek č. 14: Kalibrační kanál a pojezdový vozík vodoměrných vrtulí [15]

Délka akceleračních a deceleračních úseků závisí na konstrukci vozíku, maximálním zrychlení a zpomalení dosažitelném při maximálním užitém zatížení a maximální rychlosti, kterou má být užité zatížení taženo podél nádrže. Při výpočtu délky deceleračního úseku je třeba vzít v úvahu bezpečnostní požadavky vozíku. Délka měřicího úseku musí být taková, aby chyba kalibrace, která se skládá z nepřesností v měření času, ujeté vzdálenosti a rychlosti otáčení, nepřekročila požadovanou toleranci při žádné rychlosti. Požadovaná délka bude proto záviset na typu kalibrované hydrometrické vrtule, typu vozíku a způsobu tvorby a přenosu signálů [31].

Šířka nádrže je důležitá, protože Epperův efekt je výraznější v úzké nádrži [31]. Při tomto efektu hřeben vlny vytvářený dopředným pohybem hydrometrické vrtule a jejího zavěšení způsobuje zvýšení výšky smáčeného průřezu, čímž následně snižuje relativní rychlost [33]. Šířka také omezuje počet nástrojů, které lze kalibrovat současně, a má vliv na charakteristiku uklidnění hladiny. Hloubka nádrže musí být rovněž zvolena s ohledem na obdobná kritéria jako šířka tak, aby vyhovovala velikosti a maximálním rychlostním limitům hydrometrických vrtulí, které mají být kalibrovány. Je třeba dbát na to, aby bylo zajištěno, že buď vyšší kalibrační rychlosti budou dosaženy před narušením měření zmiňovaným efektem, nebo dojde k dostatečnému překročení hranice tak, aby bylo možné stanovit hodnoty v kritické zóně bez pomoci extrapolace [31].

### **2.5.3.3 Průběh kalibrace**

Kalibrací hydrometrické vrtule se rozumí experimentální stanovení vztahu mezi rychlostí kapaliny a rychlostí přímo indikovanou vrtulí. Pro tento účel je vrtule připevněna k tažnému vozíku, jenž je tažen stojatou vodou nacházející se v rovné nádrži jednotného průřezu. Tento proces je opakován při řadě konstantních rychlostí tažného vozíku. Současně se měří rychlost tažného vozíku a rychlost indikovaná hydrometrickou vrtulí, které se při zpracování výsledků vzájemně porovnají. Tímto způsobem je možné zjistit chybu měření hydrometrickou vrtulí [31].

Výsledkem kalibrace je kalibrační list, na kterém musí být dostatečně určitě vymezeny subjekty a objekt. Subjekty se rozumí fyzická osoba (FO) nebo právnická osoba (PO), která kalibraci objednala, a rovněž i FO či PO, která samotnou kalibraci provedla. Objektem je zde myšleno konkrétní evidenční číslo těla vrtule spolu s jednotlivými čísly propelerů. Kalibrační list, jež je patrný z obrázku č. 15, je pak vydán pro každou kombinaci těla a propeleru zvlášť.

### **2.5.3.4 Uživatelská kalibrace**

Jedná se o průběžné kalibrace, kterých jsou uživatelé úředních měřidel rychlosti na základě metrologického předpisu MP 010 oprávněni užívat ke zpřesnění měřených hodnot v mezidobí autorizovaných kalibrací [9]. Jinými slovy lze uživatelskou kalibraci označit rovněž za ověření měřidla uživatelem za dodržení všech metrologických posloupností. Při tomto měření dochází ke stanovení chyb měřidla v měřeném rozsahu, který byl stanoven autorizovaným kalibračním střediskem [34].

Kalibrační list byl vydán ČKSVV, akreditovanou ke kalibraci vodoměrných vrtulí a měřidel. Osvědčení o akreditaci kalibrační laboratoře číslo 2278 vydal Český institut pro akreditaci, o.p.s.

## Kalibrační list číslo 11097

Kalibrováno podle normy ČSN ISO 3455

Výrobce vrtule:	<b>OTT-C-2</b>	Datum kalibrace:	<b>7.11.2011</b>
Číslo těla:	<b>198054</b>	Způsob uchycení:	<b>Na tyči</b>
Číslo propelleru:	<b>6-UVV-01</b>	Teplota vody:	<b>11,6 °C</b>
Majitel vrtule:	<b>Vysoké učení technické v Brně</b>	Nejistota měření:	<b>± 0,8 %</b>
	Veveří 331/95	Úroveň spolehlivosti:	<b>95 %</b>
	602 00 Brno		

### POZNÁMKY:

### VÝSLEDEK KALIBRACE:

$$v = a + bn$$

kde: v.....rychlost v metrech za sekundu  
n.....počet otáček propelleru za sekundu  
a,b.....konstanty

$0,64 \leq n \leq 9,55$	$v = 0,0187 + 0,1023n$
$9,55 \leq n \leq 23,69$	$v = 0,0444 + 0,0997n$

### PROHLÁŠENÍ:

- Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření  $k=2$ , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02.
- Měřidla použitá při kalibraci jsou metrologicky navázána na pracovní etalon ev. č. 9694/1/1, kalibrační list č. 29810/2009. Měřidlo má metrologickou návaznost na národní etalon.
- Kalibrační laboratoř prohlašuje, že výsledky kalibrace se týkají pouze předmětu kalibrace.

V Praze dne 7. 11. 2011

### Jméno odpovědného pracovníka:

Ing. Libuše Ramešová  
vedoucí ČKSVV

Podpis:



Kalibrační list nesmí být bez písemného schválení ČKSVV Praha rozmnožován jinak než celý.  
Nedílnou součástí kalibračního listu je příloha dle ČSN ISO 3455

Obrázek č. 15: Kalibrační list

### **3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Určité pasáže experimentální části této diplomové práce, jako třeba popis použité měřicí aparatury LDA a podobně, se téměř shoduje s bakalářskou prací, na kterou tato diplomová práce přímo navazuje, jelikož se jedná o naprosto totožnou aparaturu. Tato skutečnost je zde uvedena proto, aby nebylo nutné celý popis uvádět kurzívou z důvodu přímé citace. Jedná se samozřejmě pouze o pasáže popisující konkrétní testovací trať, použitou měřicí aparaturu či postup měření.

Mimo to je dále během experimentální části diplomové práce vycházeno z určitého referenčního rámce dat, který byl vytvořen během zpracování bakalářské práce, při které došlo k důkladnému proměření měrného prostoru, a tím tvorby určitého „etalonu rychlosti“, ke kterému je nyní možné s větší vypovídající hodnou vztahovat nově naměřená data pro účely diplomové práce.

#### **3.1 Testovací trať**

Jmenovitou testovací trať nacházející se v Laboratoři vodohospodářského výzkumu na Ústavu vodních staveb spadajícího pod Fakultu stavební Vysokého učení technického v Brně, na které je prováděna experimentální část, lze zahrnout ke způsobům uživatelských kalibrací. Ve srovnání s jinými kalibracemi uživatelského typu jsou však výsledky z tohoto prostředí zpravidla přesnější. Právě srovnáním autorizované a uživatelské kalibrace, prováděné na zmiňované testovací trati se zabývá jeden z oddílů experimentální části této práce.

Testovací trať slouží zpravidla ke zkoumání jednotlivých parametrů proudění kapalin. Tyto charakteristiky jsou stanovovány za pomoci bezkontaktních metod měření, zejména laserové anemometrie. Měření probíhá pro samostatný testovací kanál, aby došlo k získání referenčního datového rámce. Následně jsou data získávána i po umístění rozličných měřidel či jiných objektů do měrného prostoru trati.

Další možností využití zmiňované trati je kalibrace, přičemž zde dochází k porovnání souboru dat získaného hydrometrickou vrtulí, či jiným měřidlem rychlosti, s referenčními údaji testovací trati. Tímto způsobem lze zjistit případné odchylky v měření a upravit kalibrační rovnice příslušného měřidla, tedy získat uživatelskou kalibraci.

### 3.1.1 Prvky testovací trati

Testovací trať se skládá z Polyvinylchloridového (PVC) potrubí se jmenovitou světlostí DN150 mm o celkové délce okolo 7 m. Tvoří ji soustava jednotlivých dílů, které jsou spojeny objímkami.

V části před měrným prostorem je umístěn difuzor na 200 mm, přímý úsek s délkou 200 mm a následně konfuzor zpět na 150 mm, čímž dochází ke zploštění rychlostního pole a dosažení rovnoměrnějšího rozložení vektorů rychlostí v celém průřezu. Ze stejného důvodu jsou v kolenech umístěna usměrňovací žebra.

Prosklený měrný prostor má obdélníkový tvar se šířkou 160 mm a výškou 155 mm. Fyzicky přístupný je z horní strany, která je v průběhu měření zabezpečena plastovým krytem, ve kterém se současně nachází otvor na teploměr. Opticky přístupný je prostor ze tří stran, což umožňuje i měření typu 3D3C.

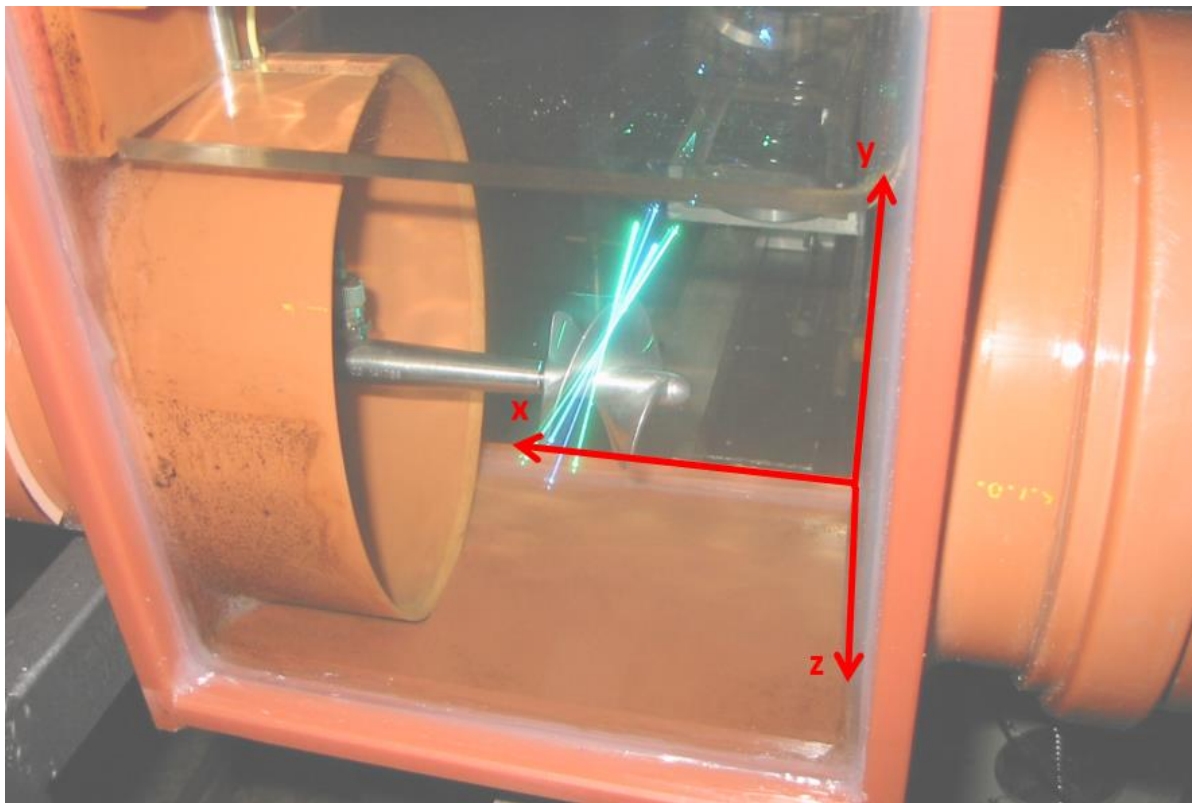


Obrázek č. 16: Testovací okruh

Dále se na testovací trati nachází oběhové čerpadlo s vlastním externím chlazením. Trať je současně opatřena otáčkoměrem čerpadla. Vztah mezi nastavenou frekvencí střídavého proudu napájejícího motor čerpadla a výslednými otáčkami čerpadla by sice měl být konstantní, nicméně drobné změny (například zanesení ucpávky čerpadla drobnými částicemi rzi po delší mimoprovozní době) mohou nepatrně ovlivňovat jeho chod. Z tohoto důvodu je užíváno přesné měření otáček čerpadla, které jsou více vypovídající.



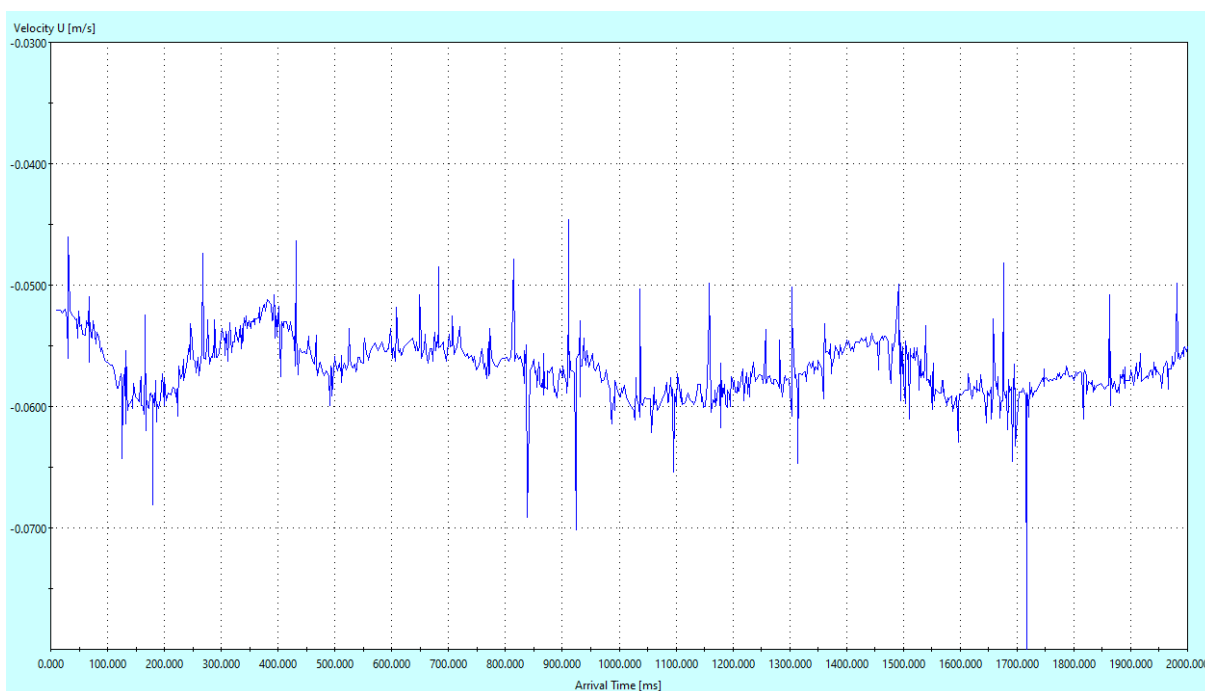
Trat' přirozeně obsahuje i chladicí spirálu s vlastním generátorem a teploměr, jelikož je potřeba dbát na stabilní podmínky měření. K potlačení drobných pulzací je na trati před měrným prostorem osazena i odvětrávací komín. K názornému popisu a stanovení použitého souřadného systému je uveden obrázek č. 17.



*Obrázek č. 17: Axonomický pohled na měrný prostor ke stanovení souřadného systému (osa y ve vertikální rovině, osa z v rovině horizontální, osa x rovněž v horizontální rovině ve směru proudění)*

### 3.1.2 Typ proudění

V testovací trati je plně vyvinuté turbulentní proudění. To znamená, že má charakter velkého množství nerovnoměrně přes sebe namodelovaných vln. Jako každý jiný hydraulický okruh i tento má svou vlastní frekvenci, která se pohybuje okolo 1-2 s, což budí dojem jakoby trať „dýchala“. Jedná se o neovlivnitelnou vlastnost všech hydraulických okruhů, i přes skutečnost, že čerpadlo a vše ostatní pracuje pořád stejně. Abychom byli schopni naměřit časově správnou střední hodnotu rychlosti, musíme měřit dostatečně dlouhou dobu, aby se všechny jevy stačily projevit několikrát [1].



Obrázek č. 18: Turbulentní proudění při frekvenci napájení motoru čerpadla 2 Hz ze dne 13. 06. 2019 zachycené pomocí softwaru BSA Flow v.6.60 v průběhu dvou sekund [1]

### 3.1.3 Referenční rámec dat

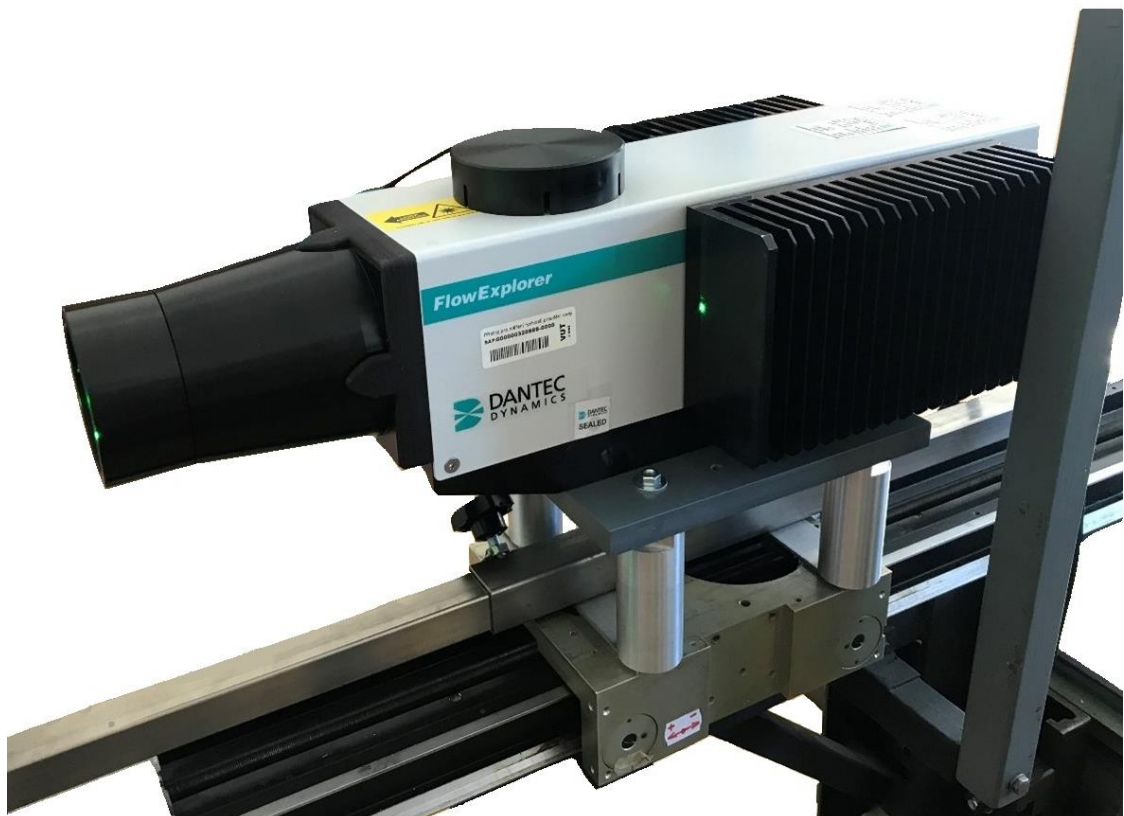
Spolehlivost použité testovací trati byla dovozena z výsledků bakalářské práce, na kterou tato práce přímo navazuje, kdy došlo k jejímu důkladnému proměření laserovou metodou LDA. Opakovaně byly zaznamenávány charakteristiky proudění v průběhu jednoho roku. Za tuto dobu bylo provedeno dvanáct komplexních měření při více než deseti rychlostech. Prostřednictvím této práce byly stanoveny průměrné střední hodnoty rychlosti proudění v kalibrační trati pro jednotlivé referenční otáčky a jejich střední kvadratické odchylky. S ohledem na velké množství naměřených dat lze považovat výsledky za jasně vypovídající a trať tedy za spolehlivou a stabilní. [1]

## 3.2 LDA

### 3.2.1 Použitá LDA aparatura

#### 3.2.1.1 Laser

Uvnitř soupravy Flow Explorer DPSS 300 2D se skrývají dva nezávislé pevnolátkové lasery o výkonu 300 mW. První laser emituje laserové světlo o vlnové délce 532 nm, což odpovídá zelené barvě. Druhý emituje laserové světlo s vlnovou délkou 561 nm, která odpovídá žluté barvě [1].



*Obrázek č. 19: Laserová aparatura připevněná na posuvných kolejnicích*

První optický prvek, kterým svazek prochází, je Braggova cela, kde dojde k rozdělení laserového svazku na dvě části. Jedná se o skleněný krystal s připojeným vibračním piezo-krystalem. Za tímto optickým prvkem následuje další zrcadlo, které odkloněný laserový svazek nasměruje stejným směrem jako svazek původní, neodkloněný, čímž vznikne souběžná dvojice laserových svazků pocházejících z jednoho laseru. Skutečnost, že pochází z jednoho laseru je pro účely měření velmi důležitá, jelikož mají absolutně stejnou vlnovou délku i fázi. Jinými slovy lze říci, že jsou koherentní. Jeden ze svazků po průchodu Braggovou celou má posunutou frekvenci o 80 MHz a druhý si zachovává původní frekvenci. Tím dojde k vytvoření tzv. shiftu [1].

### 3.2.1.2 Čočka

Po průchodu přes Braggovu celu a vytvoření rovnoběžné dvojice svazků přichází na řadu spojná čočka, která způsobuje sbíhavost rovnoběžných laserových svazků. Jedná se o jedinou část optické soustavy Flow Explorer, kterou je uživatelsky možné měnit. Pro účely tohoto měření byla použita čočka s ohniskovou vzdáleností 300 mm. V ohnisku čočky pak dojde k protnutí svazků, čímž získáme optickou sondu, kde dochází k interferenci svazků. Díky posunuté frekvenci jednoho svazku o 80 Hz je možné optickou sondou měřit i nulovou rychlost [1].

### 3.2.1.3 Optická sonda

Velikost a tvar optické sondy je ovlivněn roztečí svazků, ohniskovou vzdáleností čočky a průměrem laserových svazků. Flow Explorer má rozteč svazků 60 mm a tloušťka svazků 1,8 mm. Tvar samotné sondy má proto protáhlý, elipsoidní tvar o rozměrech 0,1135 x 0,1129 x 1,135 mm [1].

Vytvořená optická sonda je zdrojem signálu, který je tvořen okem neviditelnými záblesky světla od unášených mikro částic. Při okrajích sondy je zachycený signál přirozeně slabší. Jelikož je však pro LDA směrodatná frekvence, a nikoliv síla signálu, je tato skutečnost nedůležitá [1].

Zpětně odražený signál z optické sondy je nutné pomocí objektivu zachytit. Na použité měřicí aparatuře je k tomuto účelu použita stejná 300 mm čočka, která „optický kužel dat“ převede na válec a nasměruje jej do skleněného vlákna. Světelný signál putující do skleněného vlákna, jehož zařazení do aparatury bylo zvoleno zejména z důvodu snazší manipulace se soupravou, je nutné přesně zaměřit do jeho osy, jelikož při vhodné optimalizaci má téměř nulové ztráty [1].

### 3.2.1.4 Dělič barev

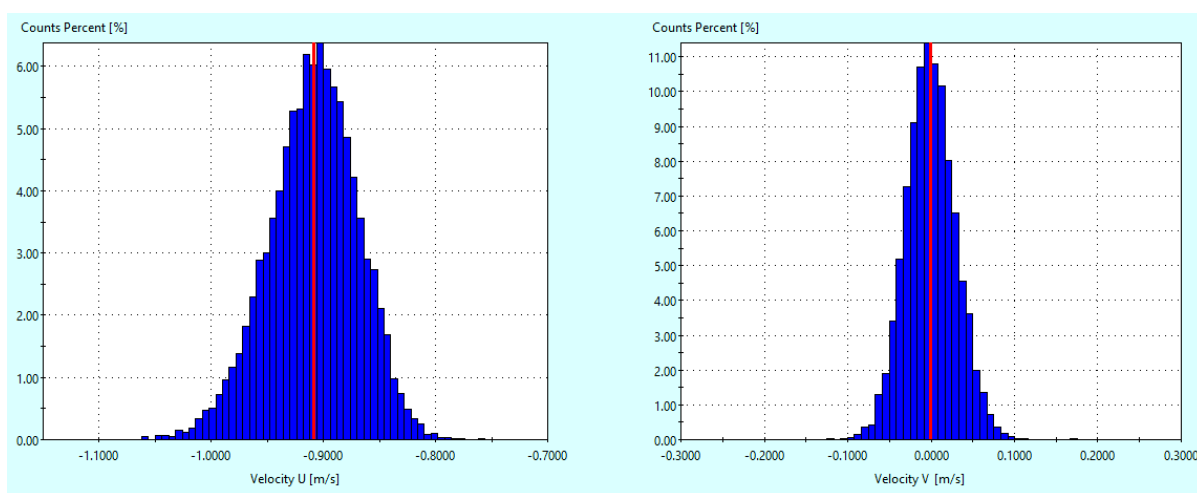
Data dále putují do děliče barev, což jsou polopropustná zrcadla s napařenými kovovými vrstvami. Slouží k oddělení jednotlivých barev – resp. blokují průchod jiných vlnových délek. Protože, že při konkrétním měření byly použity dvě vlnové délky, je nutné dělič barev použít a blokovat tím i přirozené světlo pronikající do laboratoře, jelikož může být chápáno jako vlnění. Rovněž je třeba odstranit naměřený šum, který představují zbytkové okolní vlnové délky. Šum je sice nepatrný, ale pro optiku velmi významný. Výstupní vlnové délky jsou potom totožné s vlnovými délkami vyslanými laserem [1].

### 3.2.1.5 Fotonásobič

Poslední optoelektrickou součástí před vstupem do počítače je fotonásobič, což je zařízení citlivější než lidské oko. Dokáže zachytit optickou informaci odpovídající příslušné vlnové délce. Při měření byl fotonásobič nastaven na hodnotu buzení 1000 V s použitým zesílením 22 dB [1].

### 3.2.1.6 Software

Z fotonásobiče přichází zaznamenaný signál přes jednoúčelový počítač BSA Procesor F 600 2D do softwarového rozhraní BSA flow v.6.60, které slouží jako komplexní ovládací centrum celé měřicí aparatury [1].



Obrázek č. 20: Histogramy podélné a svislé složky rychlosti při frekvenci napájení motoru čerpadla 35 Hz měřené současně v jednom měrném bodě ze softwaru BSA Flow v.6.60

Podle nastavené frekvence pohonu čerpadla je možné přibližně odhadnout rychlost proudění v trati, podle čehož vybereme vhodné nastavení softwaru. K tomu účelu slouží zkušební online měření (z angličtiny „*repetition mode*“), pomocí kterého je program schopný vytvořit histogramy dosahovaných rychlostí pro jednotlivé složky rychlosti. Ty uživateli spolu s dalšími ukazateli napoví, zda je jeho nastavení vhodné [1].

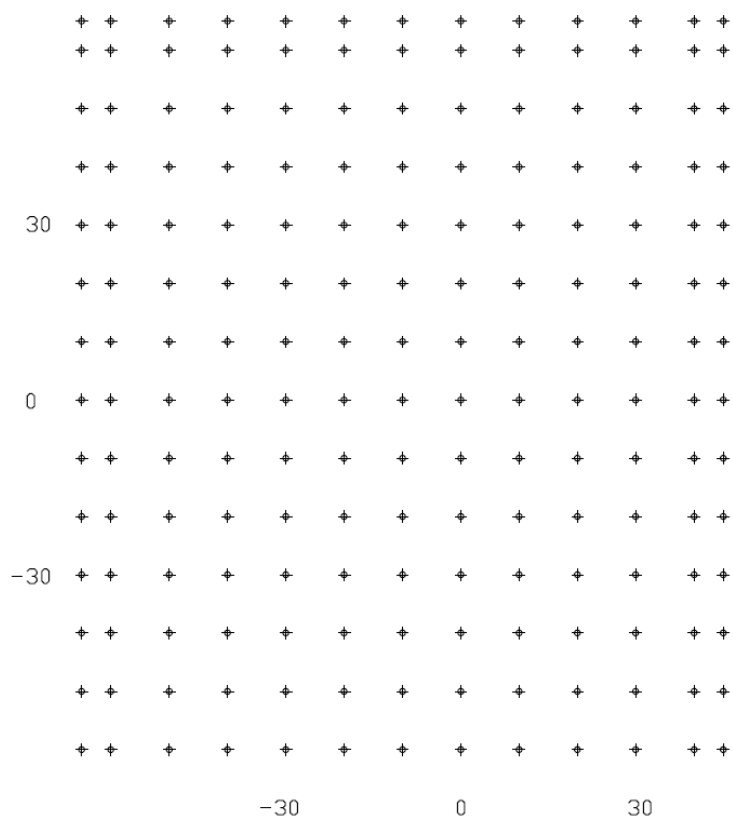
Z histogramů lze vyčíst především četnost dosahovaných rychlostí v daných šířkách pásma, která mají tvar „Gaussova klobouku“. Zkušební měření je možné zastavit, provést korekci vstupních parametrů a spustit jej znova. Cílem je pokrýt „Gaussovým kloboukem“ co největší část zvoleného pásma, čímž dosáhneme nejlepších výsledků. Histogramy však nesmí zasahovat ani kouskem mimo zvolené pásmo, jelikož by došlo ke značnému ovlivnění všech měřených dat, zejména pak střední kvadratické odchylky [1].

### **3.2.2 Popis měřicí metody**

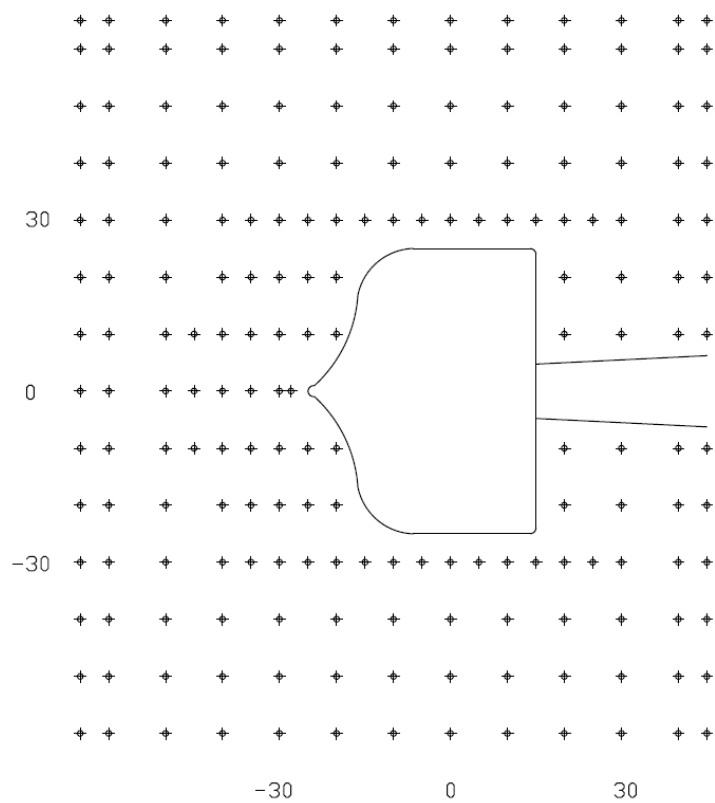
Pro účely měření byla použita zpětná metoda, jejíž vhodnost byla ověřena srovnávacím měřením s metodou dopřednou, vůči které vykazovala proměnlivou odchylku v řádu desetin procent. Zpětná metoda byla zvolena zejména z důvodu větší uživatelské přívětivosti, jelikož vyžaduje pouze jeden optický vstup do měrného prostoru trati. Dalším důvodem bylo snížení nároků na materiální vybavení, protože čočku bylo možné využít ke dvěma účelům současně. Všechny měřené rychlosti byly vykazovány jako záporné z důvodu systémového nastavení optiky v kombinaci se směrem proudění v hydraulickém okruhu. [1].

V další fázi došlo k vytvoření sady všech kompletních voleb pro jednotlivé frekvence pohonu čerpadla, které zůstaly po celou dobu experimentu stejné, především z důvodu opakovatelnosti za stejných podmínek. K tomuto účelu byl použit BSA flow software, kde se za pomoci vhodně zvoleného výkonu laseru v kombinaci s buzením fotonásobiče a šířky pásma provedlo nastavení pro konkrétní podmínky. Počet vzorků, které byly sejmuty a uloženy, byl podle rychlosti proudění zvolen na 20 000 nebo 40 000 [1].

Měrná síť byla vyhotovena ve čtyřech základních variantách, které jsou loženy ve vodorovné i svislé rovině, vždy však rovnoběžně s proudnicemi. První dvě varianty, jsou zvoleny v měrném prostoru bez hydrometrické vrtule a sestávají ze 154 bodů ve vodorovné rovině a 182 bodů ve svislé rovině. Varianty s propelerem byly zvoleny pouze svislé z důvodu přístupnosti optické sondy. U propelerů s průměrem 30 mm se síť skládá ze 190 bodů a u propelerů s průměrem 50 mm 187 bodů. Vyobrazení všech jednotlivých měrných sítí je patrné z příloh č. 1a-1d. Na obrázku č. 21a a 21b jsou uvedeny dva příklady.



Obrázek č. 21a: Měrná síť ve vertikální rovině XY bez propeleru



Obrázek č. 21b: Měrná síť ve vertikální rovině XY s propelerem o průměru 50 mm

### 3.2.3 Postup měření LDA

Před začátkem samotného měření bylo vždy nejprve nutné připravit celou kalibrační trať k chodu, což zahrnuje:

- otevření vyrovnávací komory v horní části měřicího okruhu;
- uzavření měřicího prostoru „kalibračním víkem“;
- zapojení digitálního teploměru v kalibračním prostoru;
- zapnutí frekvenčního měniče a spuštění čerpadla na plný výkon po dobu asi 20 s k uvolnění případně zatuhlých ucpávek a ložisek čerpadla a rozmíchání usazenin;
- zapnutí otáčkoměru čerpadla;
- zapnutí automatického traverzačního systému;
- zapnutí BSA procesoru F 600 2D;
- zapnutí měřicí aparatury Flow Ex;
- uvedení chladicí aparatury do pohotovostního režimu;
- zapnutí softwarového rozhraní BSA flow;
- zapnutí softwarového rozhraní laseru Cobolt monitor [1].

V další fázi byla provedena kontrola všech zapojených komponent. Předně důležité bylo zkontrolovat správnou výchozí pozici měřicí aparatury Flow Ex a tím i optické sondy, což souviselo i s kontrolou správné pozice traverzačního zařízení v souřadném systému [1].

Po provedení fyzické kontroly následovalo nastavení frekvenčního měniče čerpadla na požadovanou hodnotu. Dle tohoto údaje bylo současně vybráno příslušné softwarové nastavení v programu BSA flow, které bylo později ověřeno dle pokynů v bodě 3.1.3 této práce [1].

Po provedení výše zmíněných úkonů bylo možné zahájit samotné měření. Záznam dat o rychlostech proudění probíhal automaticky v průběhu celého měření a v každém bodě trval 15-30 sekund. Manuálně bylo nutné provádět pouze záznam teploty a otáček čerpadla v průběhu měření. V případě, že teplota vody v trati překročila 24 °C, bylo nutné uvést do chodu chladicí zařízení k její redukci. Dále se v průběhu měření porovnával histogram měřených a nastavených rychlostí k zajištění správnosti zaznamenávaných dat [1].

Po skončení jednoho měření byl proveden export naměřených dat do souboru, změněna frekvence čerpadla a provedeno nové měření s příslušným softwarovým nastavením až do vyčerpání všech dvanácti frekvencí [1].



Po naměření a exportování dat bylo nutné všechny prvky trati uvést do původního stavu. Zvláštní pozornost bylo třeba věnovat automatickému systému traverzu, u kterého bylo nutné manuálně „přejít“ do výchozí měřicí pozice, a pak posléze resetovat osy, jelikož po jeho vypnutí se tato akce již nedala provést [1].

### **3.3 PIV**

#### **3.3.1 Použitá PIV aparatura**

Pro měření byl použit dvojitý pulzní laser typu Nd: YAG, což je zkratka pro typ pevnolátkového laseru, kde je aktivním materiálem izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ( $Y_3Al_5O_{12}$ ). Konkrétněji se jedná o typ Gemini PIV s nastavitelnou opakovací frekvencí 0 až 15 Hz, jehož výrobcem je společnost New Wave Research.

Při zvolené metodě stereo PIV byly použity dvě záznamové kamery Hi Sense Zyla. Jedná se o kamery schopné dosáhnout extrémně nízké frekvence šumu a současně velmi vysoké snímkovací frekvence až 50 Hz, nicméně zvolená vzorkovací frekvence byla zvolena 5 Hz. Kamery disponují širokým dynamickým rozsahem a rozlišením 5,5 MP s 2560 x 2160 pixely.

Synchronizace všech prvků v měřicím kompletu byla zajištěna prostřednictvím centrální řídicí jednotky USB Timing Hub a softwaru Dynamic Studio v.6.6 společnosti Dantec Dynamics. K sycení vody, které je pro správné fungování PIV nezbytné, byly použity částice polyamidu PSP-50 o průměru 50  $\mu\text{m}$ .

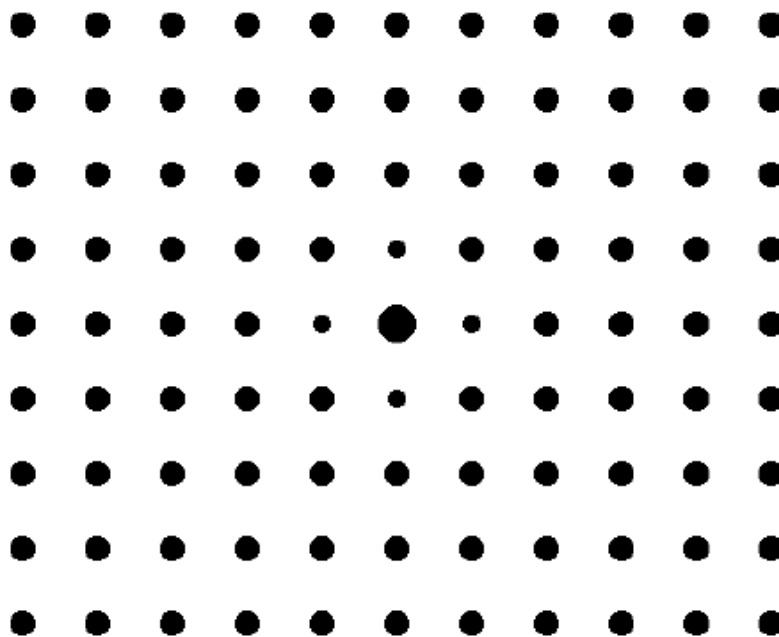
#### **3.3.2 Popis měřicí metody a postup měření PIV**

Fyzické rozmístění hardwarových součástí bylo voleno dle prostorových dispozic okolo testovací trati tak, aby bylo možné sestavit PIV aparaturu stereoskopicky s možností měření 2D3C. Proto byly kamery nainstalovány každá z jedné strany světelného listu s objektivy otočenými proti směru proudění v trati. Kamery mezi sebou svíraly úhel 138 stupňů.

Světelný list z pulzního laseru o předpokládané tloušťce 1-2 mm mířil do měrného prostoru ve svislém řezu v rovině symetrie kanálu. Emitovaný laserový svazek s vlnovou délkou 532 nm byl do této polohy a tvaru přesně umístěn pomocí speciálního optického ramene, skrze které laserový svazek procházel. Až za speciální optickou hlavicí došlo k vytvoření světelného listu.

Dále dle potřeby bylo prováděno měření v rámci měrného prostoru testovací trati s hydrometrickými vrtulemi či bez nich. Při jejich osazení byly na své místo připevněny pomocí zařízení popsaného v kapitole 3.4.1, čímž sice pro světelný list vytvářely překážku v části měrného prostoru, ale díky odrazovým vlastnostem materiálu dna dokázal světelný list v dostatečné míře nasvítit rozptýlené částice i v této oblasti.

Nastavení softwaru bylo pro celé měření PIV klíčové. Šlo o značně náročnou úlohu, kde bylo třeba co nejpřesněji přizpůsobit nastavení situaci v testovací trati. V tomto ohledu jsem se spoléhal zejména na praktické rady vedoucího práce, který s tímto typem měření má již bohaté zkušenosti. V první řadě bylo třeba provést prostorovou orientaci kamer a vytvoření souboru snímků kalibrační terče pro výpočet opravných konstant. Ta byla vytvořena za pomoci oboustranného kalibračního terče složeného z pravidelně rozmístěných teček ve čtvercové mřížce o známé vzdálenosti. Střed terče byl označen tečkou většího průměru, aby bylo při snímání kamerami z posunu bodu na jednotlivých snímcích možné stanovit rychlost zachycených bodů a jejich posun, jak je patrné z obrázku č. 22.

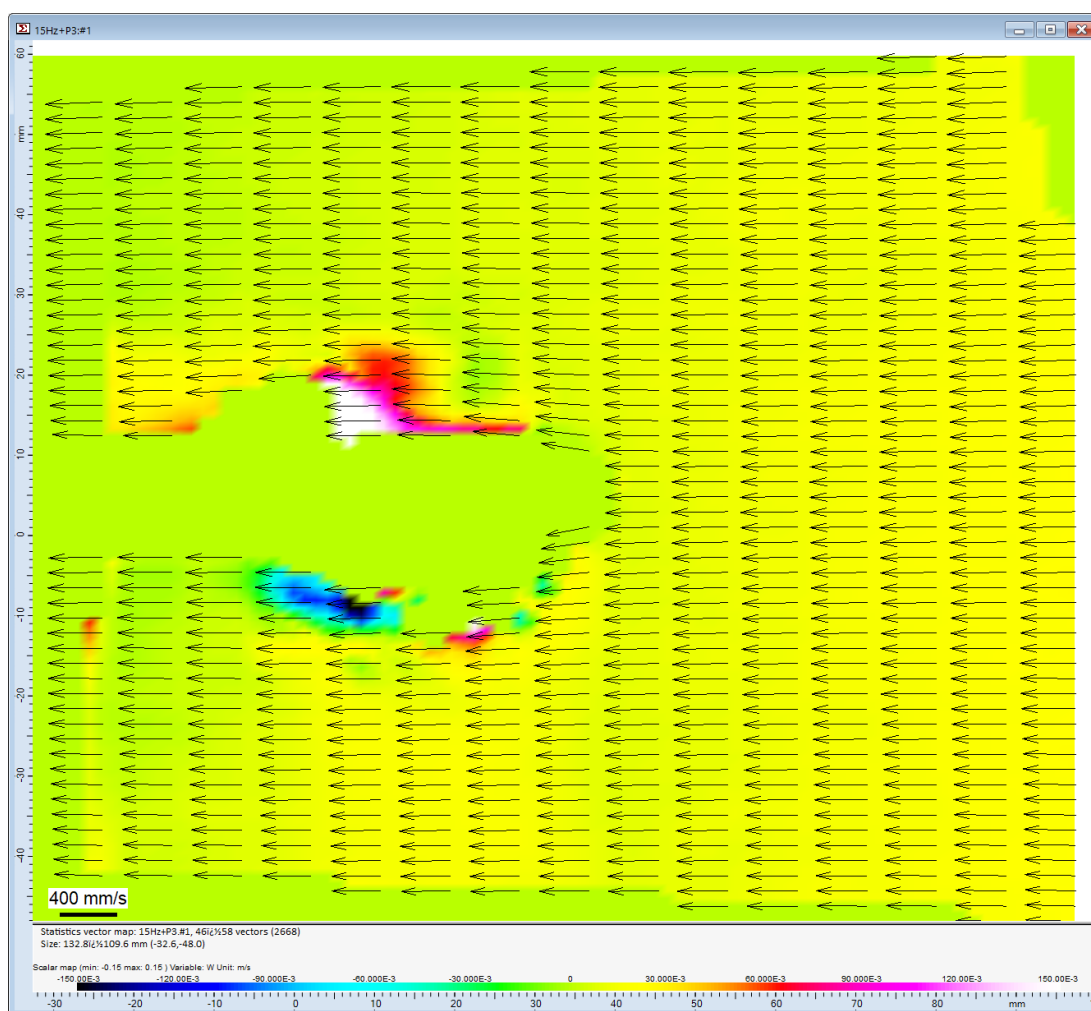


Obrázek č. 22: Kalibrační terč [35]

Nezbytnou součástí kalibrace je zaostření a nastavení úhlu kamer tak, aby viděly v co nejlepší kvalitě kalibrační terč, který byl umístěn do středu světelného listu. Po tomto úkonu, který bylo naštěstí třeba provést jen jednou pro všechna měření, bylo nutné nastavit vhodnou vzorkovací frekvenci a časovou prodlevu mezi jednotlivými světelnými pulzy. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 5 Hz a časová prodleva proměnlivá dle rychlosti proudění v trati. Snahou bylo dosáhnout posun částic o 2-3 násobek svého průměru. Dále bylo třeba co nejvíce eliminovat okolní světlo kvůli delšímu expozičnímu času kamer při snímání druhého světelného pulzu.

### 3.3.3 Zpracování dat

Klíčové bylo nastavit vše tak, abychom dostali dva páry ostrých snímků zaznamenávajících rozložení unášených částic v měrném řezu. Dále se vytvořila maska, kterou se odstranila místa mimo proud, což jsou místa mimo polygon, který byl pro obě kamery často odlišný, jelikož měly různé úhly pohledu z obou stran. Tento jev je patrný například z obrázku č. 9 v kapitole 2.4.1. Dále bylo třeba definovat měřítko jednotlivých snímků a následně provést jejich korelaci, čímž došlo ke sloučení dvou párů snímků z obou kamer. Po samotném vyhodnocení vektorových polí 2D2C z každé kamery přichází poslední nezbytný krok. S pomocí opravných konstant získaných prostřednictvím kalibračního terče vytvořit výsledné 2D3C vektorové pole. Teprve na tomto korelovaném snímku, kterých bylo provedeno pro každé měření dvě stě, bylo možné pozorovat skutečné rozložení rychlostního pole. Grafické znázornění průběhu rychlostí je patrné z obrázku č. 23.



Obrázek č. 23: Vektorové pole s propelerem č. 3 při 15 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti

## **3.4 Hydrometrické vrtule**

### **3.4.1 Použitá aparatura pro hydrometrické vrtule**

Pro jednotlivá měření s hydrometrickými vrtulemi byla použita různá těla a propelery. Vždy se však jednalo o typ OTT C2. Téměř pokaždé se jednalo o čerstvě kalibrované tělo vrtule s jedním či více propelery z certifikované laboratoře, ke kterým přináležely kalibrační listy. Tato měřidla nám byla poskytnuta soukromými subjekty za účelem tohoto výzkumu, který spočíval zejména v porovnání výsledků z certifikované kalibrační laboratoře s hodnotami naměřenými na jmenovité testovací trati.

Mimo standardní hydrometrické vrtule byl použit speciální přípravek, který slouží k přesnému uchycení hydrometrické vrtule rovnoběžně s proudnicemi a jejímu vycentrování do středu měrného prostoru testovací trati. Jinými slovy to znamená, že osa propeleru byla vzdálena přesně 75 mm od dna měrného prostoru testovací trati.

Dále byl použit čítač otáček pro měření v terénu typu REP 01, který slouží současně jako rozhraní a zprostředkovává informace z magnetického relé tak, aby byly informace přenesené přes sériový port čitelné v softwaru počítače. V dalších sériových portech počítače byl pak připojen jeden ze dvou teploměrů, otáčkoměr čerpadla trati a interface, pomocí kterého lze nastavovat měnič frekvence, tedy otáčky čerpadla.

Dále byly použity všechny prvky testovací trati, které byly detailně popsány výše v kapitole 3.1.1.

### **3.4.2 Postup měření s hydrometrickými vrtulemi**

Nejprve bylo vycentrováno tělo vrtule do středu měrného prostoru rovnoběžně s proudnicemi za užití speciálních nástrojů a pevně dotaženo, aby bylo zabráněno nechtěnému vychýlení. Dále byl na takto upevněné tělo nasazen propeler s příslušným číslem a připojeny kabely čítače otáček, kdy byl jeden kontakt umístěn na tělo vrtule a druhý na upevňovací tyč. Upevňovací tyč je dále uchycena na daném místě na testovací trati v měrném prostoru.

Následně před začátkem samotného měření bylo vždy nejprve nutné připravit celou kalibrační trať k chodu, což zahrnuje:

- otevření vyrovnávací komory v horní části měřicího okruhu;
- uzavření měrného prostoru „měřicím víkem“;
- zapojení digitálních teploměrů v kalibračním prostoru;
- zapnutí frekvenčního měniče a spuštění čerpadla na plný výkon po dobu asi 20 s k uvolnění případně zatuhlých ucpávek a ložisek čerpadla a rozmíchání usazenin;
- zapnutí otáčkoměru čerpadla a softwarového programu k záznamu hodnot;
- uvedení chladicí aparatury do pohotovostního režimu [1];
- zapnutí čítače otáček REP01 a softwarového programu k záznamu hodnot.

V další fázi byla provedena kontrola všech zapojených komponent, teploty trati a dalších provozních parametrů. Dále došlo ke spuštění frekvenčního měniče s polohou spínače v poloze nula, protože byl dále řízen softwarem počítače. V softwarovém rozhraní byly inicializovány všechny vstupní rozhraní a nastaveno konkrétní číslo propeleru.

Po provedení výše zmíněných úkonů bylo možné zahájit samotné měření. Záznam dat probíhal automaticky pomocí softwaru vytvořeného speciálně pro tento účel v průběhu celého měření ve všech rychlostech a vždy trval v závislosti na počtu vykonaných otáček vrtule 15-45 sekund. Manuálně bylo nutné provádět pouze regulaci teploty vody testovacího okruhu za pomoci chladicího zařízení, která byla udržována v rozmezí 21-23 °C.

Vzhledem ke skutečnosti, že v rámci této práce byla zvolena řada dvanácti frekvencí čerpadla, při kterých se provádělo měření, bylo nutné jednotlivé sady měření zařadit do vzestupné a sestupné řady frekvencí, čímž došlo k zamezení či minimálně zmírnění vlivu hystereze [1].

Po skončení jednoho měření byl proveden export naměřených dat do souboru. Jejich vyhodnocování probíhalo na základě srovnání referenčního rámce dat dle kapitoly 3.1.3 pro konkrétní rychlost s hodnotami naměřenými pomocí hydrometrické vrtule. Po naměření a exportování dat bylo nutné všechny prvky trati uvést do původního stavu.

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Primárním cílem diplomové práce bylo porovnat dva kalibrační přístupy. Konkrétněji jde o zjištění míry shody měření rychlosti proudění pomocí hydrometrické vrtule mezi kalibračními rovnicemi (KR) vydanými certifikovaným pracovištěm a referenčním rámcem dat (RR) získaným dlouhodobým měřením testovací trati ÚVS-LVV pomocí metody LDA.

Dalším cílem bylo poskytnout podrobné informace o míře vzájemného ovlivnění měrného profilu s hydrometrickou vrtulí. Zejména se pak jednalo o změnu tvaru rychlostního pole, zjištění příčin tohoto jevu a zhodnocení dalších možných důsledků. K tomuto účelu byly použity metody LDA a PIV.

### 4.1 Statistické shromáždění různých hydrometrických vrtulí

V první etapě experimentální části této práce proběhlo porovnání naměřených hodnot dle referenčního rámce, získaného pomocí laserové aparatury LDA při zpracování bakalářské práce, vůči hodnotám dle kalibračních rovnic z certifikovaných laboratoří. Experiment probíhal na testovací trati popsané v kapitole 3.1 se stálým postupem uvedeným v kapitole 3.4.2.

#### 4.1.1 Stanovení odchylek měřených rychlostí pro jeden propeler

Prvotním výstupem byl soubor dat, který byl později upraven do podoby, která je patrná z tabulky č. 1a. Jedná se o data udávající otáčky čerpadla při dané rychlosti, počet otáček propeleru, jeho frekvenci otáčení, teplotu měřeného média.

Frekvence otáček propeleru je v tabulce uvedena dvakrát, jelikož první hodnota je podíl počtu vykonaných otáček vůči době měření. Druhá hodnota pak znázorňuje frekvenci otáčení vrtule zjištěnou čítačem REP 01 v době, kdy se vrtule točila. Rozdíl těchto hodnot tak nabízí první vhled na kvalitu měření, jelikož významný rozdíl těchto hodnot ukazuje na nepravidelný pohyb hydrometrické vrtule. Tato skutečnost je patrná zejména při nejnižších rychlostech.

Hodnoty teplot byly po celou dobu všech měření za pomoci externího chladicího zařízení manuálně regulovány a udržovány v rozmezí 21-23 °C, aby bylo dosaženo dostatečné konzistence měřených dat a došlo tak k eliminaci jednoho z nežádoucích faktorů, který by se mohl negativně ovlivnit výsledky.

Tabulka č. 1a: Upravený výstupní soubor dat pro jeden propeler

otáčky čerpadla	rychlost dle RR (laser)	počet otáček propeleru	čas měření	frekvence otáčení propeleru		rozptyl otáček	teplota
[-]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[N]	[s]	[s <sup>-1</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]	[-]	[°C]
55.83	0.0541	6	45.00	0.1333	0.1570	0.0020	21.30
61.55	0.0598	7	45.00	0.1556	0.1847	0.0037	21.30
67.68	0.0658	8	45.00	0.1778	0.2120	0.0031	21.32
79.93	0.0778	11	45.00	0.2444	0.2643	0.0040	21.38
102.43	0.0999	15	43.14	0.3477	0.3478	0.0045	21.40
149.43	0.1460	23	43.36	0.5305	0.5306	0.0072	21.40
202.55	0.1979	31	42.88	0.7230	0.7231	0.0097	21.40
264.28	0.2582	41	43.15	0.9501	0.9504	0.0157	21.33
346.09	0.3379	56	44.65	1.2541	1.2543	0.0155	21.37
608.84	0.5927	80	36.21	2.2096	2.2100	0.0276	21.40
1 090.42	1.0570	80	20.10	3.9806	3.9814	0.0553	21.40
1 419.46	1.3741	94	18.07	5.2010	5.2019	0.0686	21.45
1 308.93	1.2675	87	18.17	4.7884	4.7892	0.0641	21.57
815.48	0.7921	80	26.97	2.9664	2.9670	0.0407	21.60
441.39	0.4305	71	44.32	1.6019	1.6021	0.0189	21.70
174.06	0.1701	28	44.90	0.6236	0.6237	0.0082	21.70
132.21	0.1291	20	43.03	0.4648	0.4648	0.0056	21.70
116.03	0.1132	17	45.00	0.3778	0.4096	0.0051	21.70
88.83	0.0865	13	43.35	0.2999	0.3000	0.0044	21.70
72.37	0.0704	9	45.00	0.2000	0.2337	0.0031	21.70
64.95	0.0631	8	45.00	0.1778	0.2024	0.0038	21.70
57.94	0.0562	7	45.00	0.1556	0.1718	0.0056	21.70
52.17	0.0505	6	45.00	0.1333	0.1451	0.0031	21.70

Sloupeček v tabulce „rychlost dle RR (laser)“ symbolizuje rychlost naměřenou dle referenčního rámce dat pomocí metody LDA. Co je to referenční rámec dat popisuje kapitola 3.1.3.

K této základní tabulce č. 1a, jak je patrné z tabulky č. 1b, byly dopočteny rychlosti dle kalibračních rovnic pro jednotlivé těla vrtulí s příslušnými propelery a současně i procentuální odchylky těchto rychlostí od hodnot rychlosti, vycházejících z referenčního rámce dat dle kapitoly 3.1.3.

Tabulka č. 1b: Dopočtené rychlosti dle kalibračních rovnic a procentuální odchylky

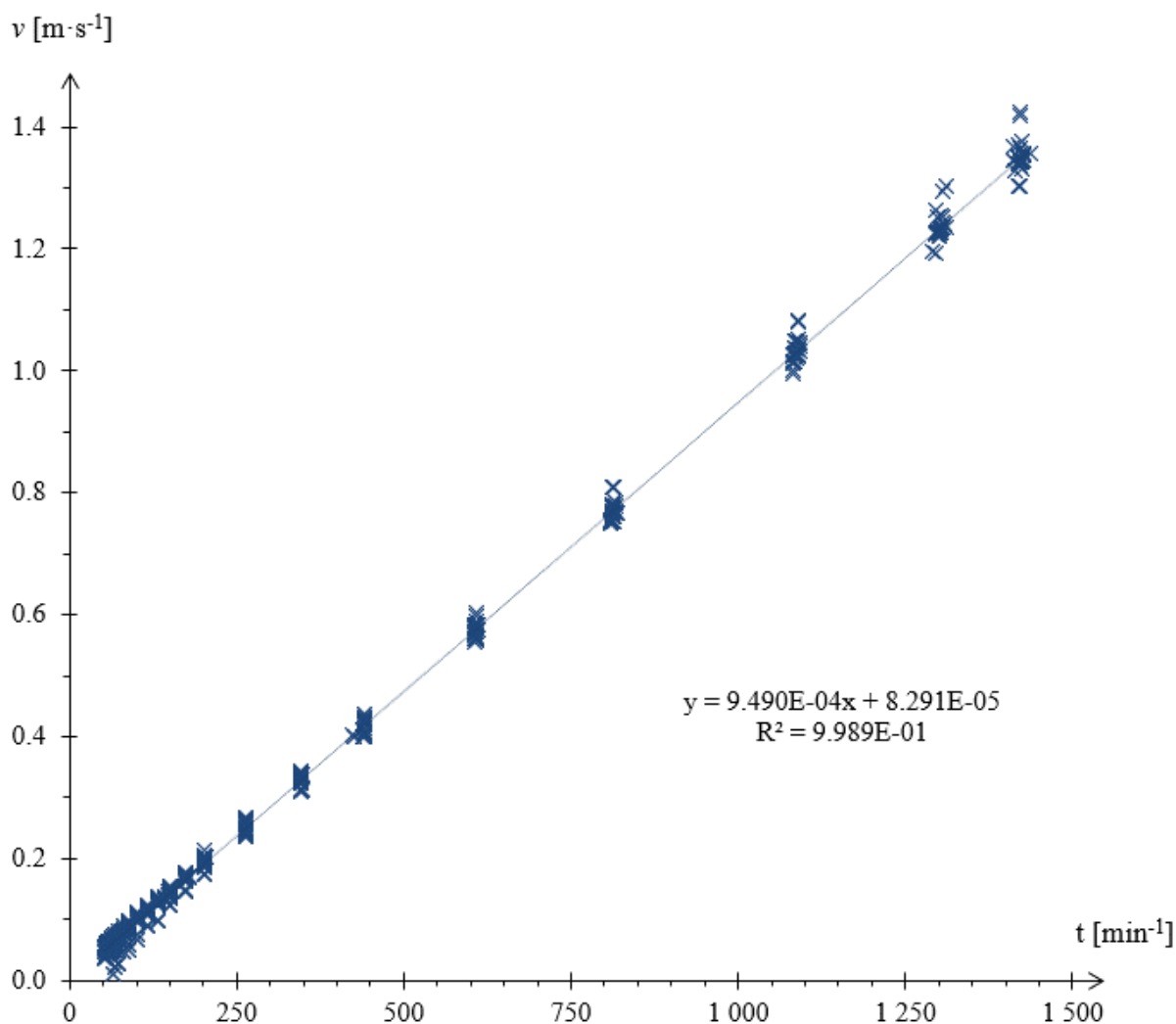
rychlost dle KR (kalibrační list)	rozíl rychlostí RR a KR	n	$\alpha$	$\beta$
$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	[%]	$[\text{s}^{-1}]$	[-]	[-]
0.0465	- 14.15	-	0.01141	0.26297
0.0523	- 12.44	1.50	0.02091	0.25622
0.0582	- 11.58	4.78	- 0.00774	0.25838
0.0757	- 2.72			
0.1029	2.97			
0.1509	3.40			
0.2015	1.83			
0.2613	1.19			
0.3412	0.98			
0.5871	- 0.95			
1.0408	- 1.53			
1.3361	- 2.77			
1.2295	- 3.00			
0.7810	- 1.41			
0.4314	0.20			
0.1754	3.14			
0.1336	3.52			
0.1108	- 2.18			
0.0903	4.32			
0.0640	- 9.07			
0.0582	- 7.83			
0.0523	- 6.92			
0.0465	- 8.03			

Kalibrační rovnice jsou znázorněny v pravé části tabulky, kde „n“ reprezentuje rozsah otáček vrtule, pro které je daná kalibrační rovnice určena a koeficienty  $\alpha$  a  $\beta$  symbolizují kalibrační stanovené hodnoty, jak je popsáno v kapitole 2.5.1.



#### 4.1.2 Stanovení závislosti rychlosti na otáčkách

V grafu č. 1 lze pozorovat téměř lineární závislost rychlosti proudění, stanovené dle kalibračních rovnic, na otáčkách čerpadla. Tuto závislost podtrhuje lineární spojnice trendu s koeficientem spolehlivosti limitně se blížícím jedné.



Graf č. 1: Vztah mezi otáčkami čerpadla a rychlostí stanovenou dle KR

Tento graf byl důležitý zejména k prokázání toho, že odchylky rychlosti dle kalibračních rovnic od hodnot dle referenčního rámce, jak bude patrné z dalšího obsahu, nejsou způsobeny čerpadlem testovací trati. V plné velikosti je dostupný jako příloha č. 2.

### 4.1.3 Stanovení odchylek rychlostí KR od rychlostí dle RR

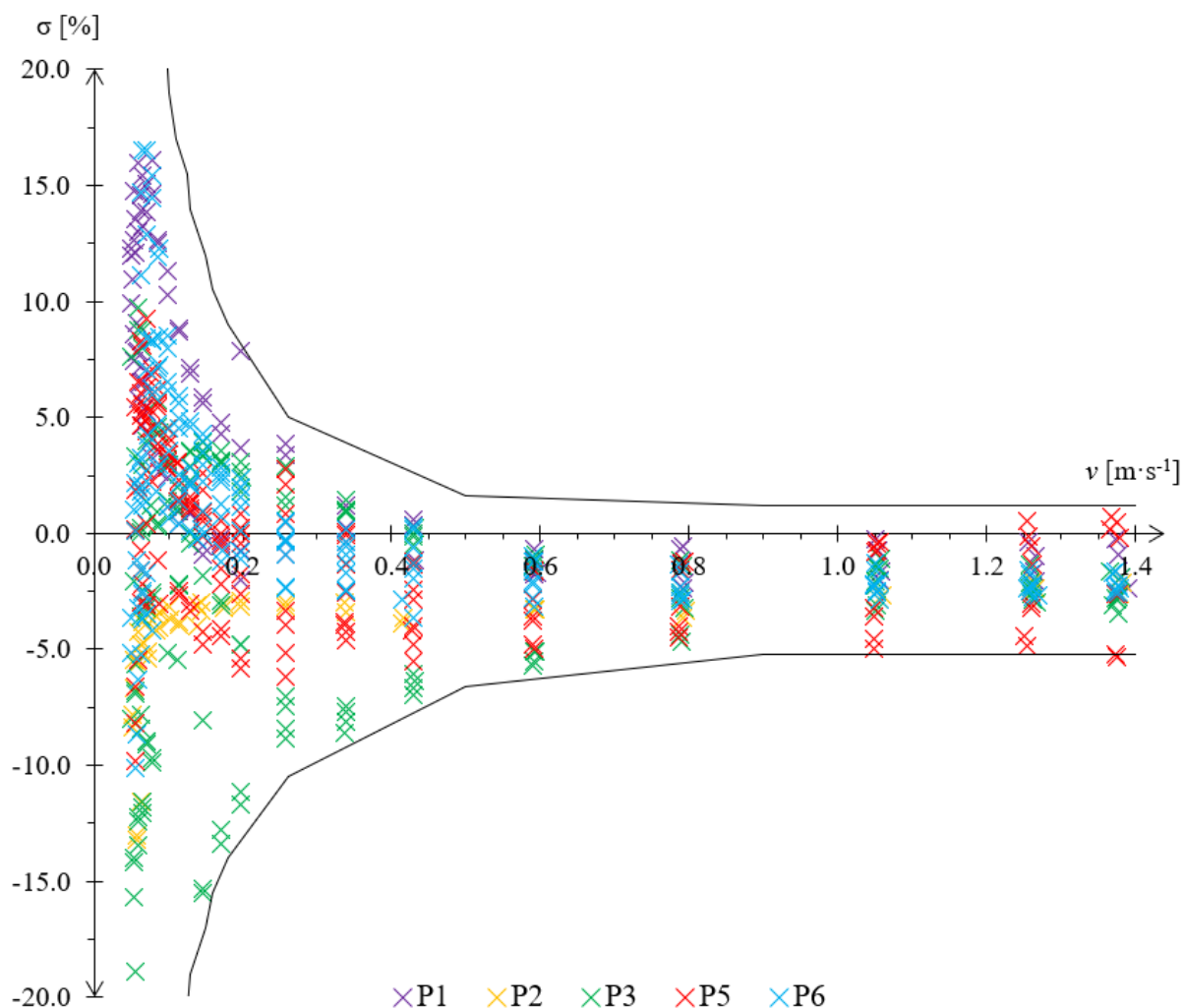
V této části proběhla sumarizace veškerých dat o rychlostech dle referenčního rámce i rychlostech dle kalibračních rovnic. Následně byly vypočteny procentuální odchylky těchto rychlostí.

Veškeré údaje o rychlostech proudění dle referenčního rámce byly uvedeny, jak je patrné z tabulky č. 2 na levé straně v závislosti na typu propeleru. Na pravé straně jsou pak uvedeny příslušné odchylky od rychlostí dle kalibračních rovnic, rovněž rozříděny v závislosti na typu propeleru.

Tabulka č. 2: Odchylky rychlostí KR od rychlostí dle RR v závislosti na typu propeleru

Rychlost dle typu propeleru					Odchylnka dle typu propeleru				
[m·s <sup>-1</sup> ]					[%]				
P1	P2	P3	P5	P6	P1	P2	P3	P5	P6
0.053	0.054	0.054	0.099	0.054	7.42	- 5.47	- 2.09	3.37	1.05
0.059	0.060	0.059	0.146	0.060	5.82	- 4.25	9.75	0.89	3.01
0.065	0.066	0.065	0.197	0.066	4.63	- 3.81	8.74	- 2.61	2.02
0.077	0.084	0.077	0.257	0.084	3.29	- 3.59	0.73	- 3.95	1.82
0.099	0.102	0.099	0.337	0.101	1.12	- 3.18	3.19	- 3.93	0.63
0.146	0.145	0.146	0.589	0.145	- 0.92	- 2.98	- 8.09	- 3.75	0.17
0.198	0.197	0.198	1.050	0.196	- 1.99	- 2.91	- 4.79	- 4.56	- 1.09
0.258	0.258	0.258	1.375	0.258	- 0.93	- 3.00	- 7.01	- 5.34	- 2.30
0.339	0.337	0.339	1.255	0.338	0.21	- 2.99	- 8.10	- 4.87	- 2.48
0.595	0.594	0.592	0.787	0.590	- 1.73	- 3.29	- 5.53	- 3.14	- 2.82
1.058	1.060	1.053	0.429	1.053	- 1.66	- 2.67	- 3.08	- 4.03	- 2.46
1.391	1.382	1.378	0.170	1.376	- 2.38	- 2.12	- 3.49	- 2.22	- 2.23
1.266	1.262	1.260	0.129	1.260	- 2.08	- 2.08	- 2.62	0.95	- 2.33
0.794	0.795	0.791	0.113	0.788	- 2.13	- 3.36	- 4.65	1.40	- 2.89
0.431	0.416	0.430	0.086	0.414	- 1.16	- 3.64	- 6.66	5.63	- 2.87
0.170	0.174	0.170	0.070	0.173	- 0.21	- 3.03	- 3.11	6.30	- 0.75
0.129	0.139	0.129	0.063	0.139	0.87	- 3.08	- 0.41	6.05	- 0.25
0.114	0.114	0.113	0.056	0.113	0.43	- 3.94	1.11	1.88	1.39
0.087	0.087	0.086	0.059	0.086	2.64	- 3.41	5.74	6.55	2.86
0.071	0.072	0.070	0.065	0.072	5.23	- 5.08	- 3.23	8.11	4.24

Výčet hodnot obsažených v tabulce č. 2 je pouze ilustrativní. Její kompletní výčet tvoří přílohy č. 3a-3d této práce.



Graf č. 2: Odchyly rychlostí KR od rychlostí dle RR v závislosti na typu propeleru

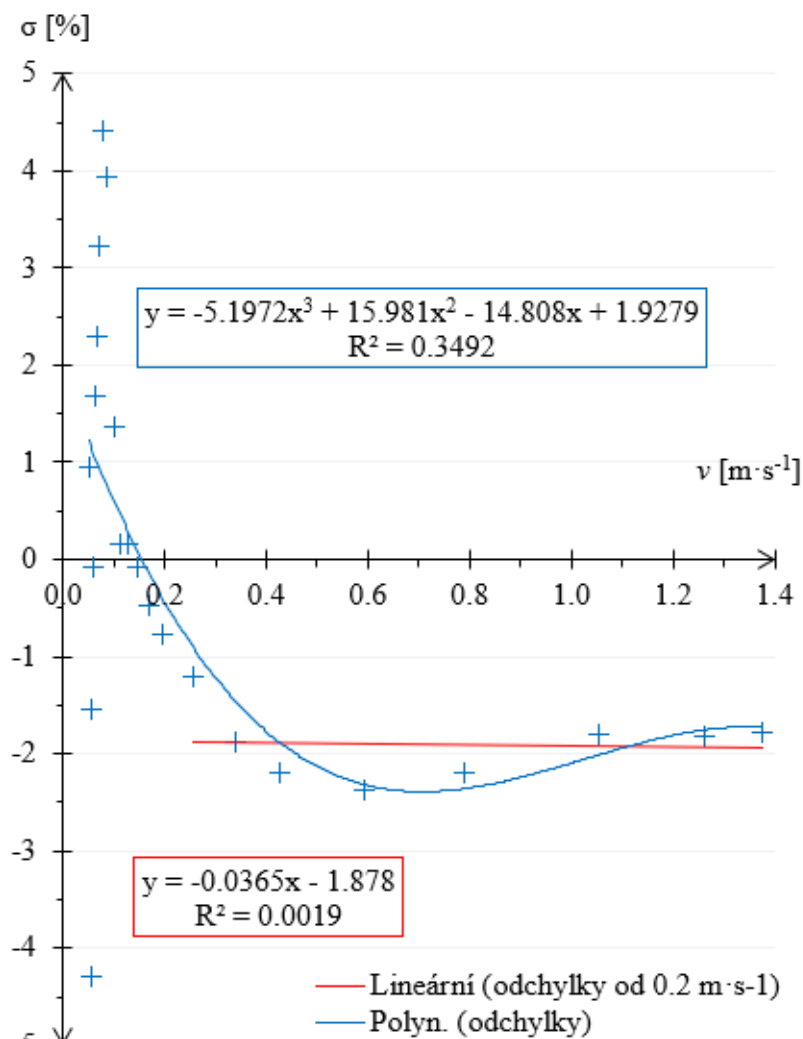
Grafické znázornění dat z tabulky č. 2 je patrné z grafu č. 2, kde jsou jednotlivé propelery pro lepší grafickou přehlednost barevně odlišeny. Lze z něj vyčíst, že při nižších rychlostech, za které autor pro tyto účely považuje rychlosti do hodnoty  $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , se procentuální odchyly pohybují poměrně variabilně. Rychlosti nad výše zmiňovanou hodnotu se systematicky drží okolo  $-2 \%$ .

Při pokusu o podrobnější zjištění průběhu odchylek v závislosti na rychlosti proudění se autor uchýlil k vytvoření průměrných odchylek jednotlivých skupin rychlostí nacházejících se na grafu č. 2 v jednom svislém řezu. Výsledky této metody jsou patrné z tabulky č. 3.

Celý graf č. 2 je dostupný v plné velikosti jako příloha č. 4a. Současně se v přílohách pod č. 4b-4c nachází tento graf i v podobě, kdy je rozdělen na propelery o průměru  $50 \text{ mm}$  a  $30 \text{ mm}$ . Z tohoto rozdělení bylo pozorováno, že velikost odchylek nezávisí na průměru propeleru.

Tabulka č. 3: Průměrné odchylky rychlostí pro jednotlivé skupiny rychlostí

průměr pro skupiny rychlostí	
$\bar{v}$	$\bar{\sigma}$ [%]
0.051	0.96
0.054	4.30
0.056	1.55
0.060	0.07
0.063	1.68
0.066	2.30
0.070	3.23
0.078	4.41
0.086	3.94
0.100	1.37
0.113	0.16
0.129	0.16
0.146	0.07
0.170	0.47
0.198	0.77
0.258	1.21
0.338	1.87
0.428	2.19
0.591	2.38
0.789	2.19
1.053	1.80
1.261	1.83
1.376	1.78



Graf č. 3: Spojnice trendu odchylek mezi rychlostmi KR od RR

Jak již bylo zmíněno, u hodnot rychlosti nad  $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je patrný poměrně stabilní trend odchylky oscilující v blízkém okolí hodnoty  $-2 \%$ . Na tyto hodnoty lze usuzovat se značnou spolehlivostí, což podtrhuje i grafické znázornění v grafu č. 3. Zmíněný graf je v plné velikosti dostupný jako příloha č. 5.

V kontextu výše zmiňovaného grafu je dále patrné, že střední hodnota odchylek v rozmezí  $0.10\text{-}0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  může být s určitou obezřetností rovněž považována za směrodatnou. U rychlostí nižších než  $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  hodnoty odchylek ve většině případů vykazují již významné výkyvy do plusu i mínusu. Skutečnost, že hydrometrické vrtule vykazují při velmi nízkých rychlostech poměrně značné odchylky je bohužel jejich přirozenou vlastností a je při měření třeba tuto skutečnost zohlednit.

## 4.2 Proměření rychlostního pole v objemu kolem vrtule s a bez ní

Jak bylo vidět v kapitole 4.1 této práce, hodnoty rychlostí dle kalibračních rovnic vůči hodnotám rychlosti dle referenčního rámce vykazují při vyšších rychlostech systematickou odchylku -2 %. Při nižších rychlostech jsou pak větší nepřesnosti způsobeny nepravidelným pohybem hydrometrické vrtule.

Cílem této kapitoly bylo proto prokázat, jak moc ovlivňuje přítomnost vrtule okolí v měrném prostoru za pomoci LDA a PIV. Spolehlivost a charakteristiky samotné testovací trati byly stanoveny dlouhodobým měřením bakalářské práce, která této práci předcházela. Nabízí se proto varianta, že podstatné ovlivnění bylo způsobeno právě interakcí hydrometrické vrtule se svým okolím.

### 4.2.1 Srovnání rychlostí s umístěným propelerem a bez něj pomocí LDA

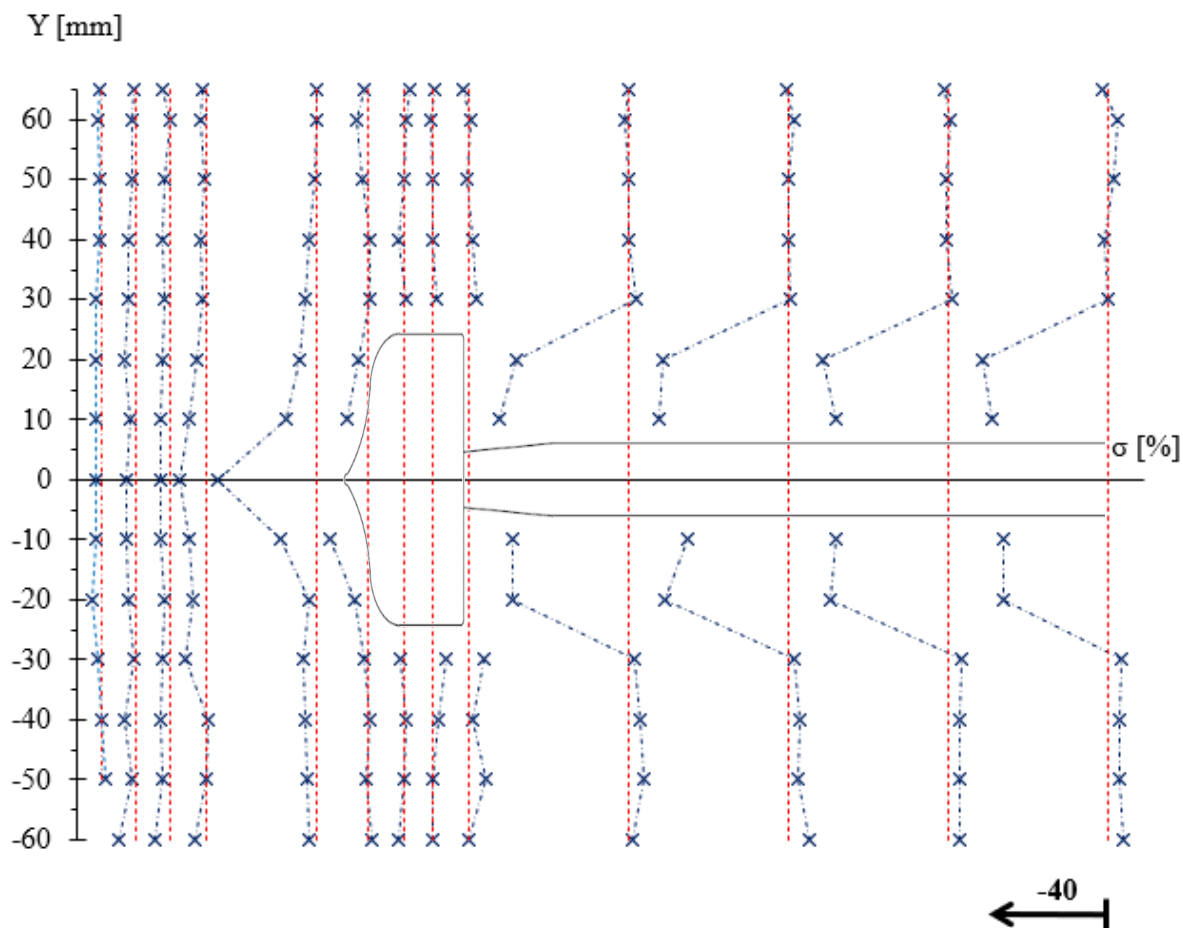
Pro účely tohoto měření byly nejprve naměřeny rychlosti pro prázdný měrný prostor ve třech zvolených rychlostech. To samé pak bylo provedeno i s propelerem. Výsledné hodnoty byly přehledně rozděleny do tabulek ve svislých řezech po ose X, ve směru proudění. Ve vyhodnocení budou názorně uvedeny tabulky a grafy pouze pro propeler P1 při 5 Hz. Další varianty budou pouze popsány.

Tabulka č. 4: Srovnání rychlostí metodou LDA bez propeleru a s propelerem P1 při 5 Hz

Y	X	$v_x$	$v_{x, P1}$	$\sigma$
[mm]	[mm]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[%]
- 50	- 65	0.126	0.128	1.69
- 40	- 65	0.130	0.130	0.13
- 30	- 65	0.137	0.135	-1.35
- 20	- 65	0.141	0.137	-2.79
- 10	- 65	0.142	0.139	-2.03
0	- 65	0.144	0.141	-2.00
10	- 65	0.144	0.141	-2.00
20	- 65	0.145	0.142	-1.98
30	- 65	0.143	0.140	-2.01
40	- 65	0.144	0.143	-0.57
50	- 65	0.147	0.146	-0.56
60	- 65	0.146	0.144	-1.26
65	- 65	0.141	0.140	-0.59

Z tabulky č. 4 jsou zřejmé rychlosti ve vertikální rovině 40 mm před špičkou propeleru (špička je v X -25 mm) při 5 Hz a umístění jednotlivých měřených bodů v souřadném systému. Ve sloupcích je  $v_x$ , která symbolizuje rychlost bez umístěného propeleru a  $v_{x, P1}$ , která popisuje stav s umístěným propelerem. Tyto rychlosti byly přepočteny na stejné otáčky čerpadla, jelikož při každém měření byly zaznamenány otáčky nepatrně odlišné.

V pravé části jsou pak patrné procentuální odchylky rychlostí v jednotlivých bodech. Tato tabulka je zde uvedena pouze ilustrativně, jelikož obdobných tabulek je propeler P1 při 5 Hz dalších dvanáct. Následující graf je vlastně souhrnným grafickým znázorněním výše zmiňovaných tabulek pro jednu rychlost a jeden propeler v jednotlivých řezech. Pro ostatní rychlosti a propelery je dostupný v přílohách č. 6a-6l.

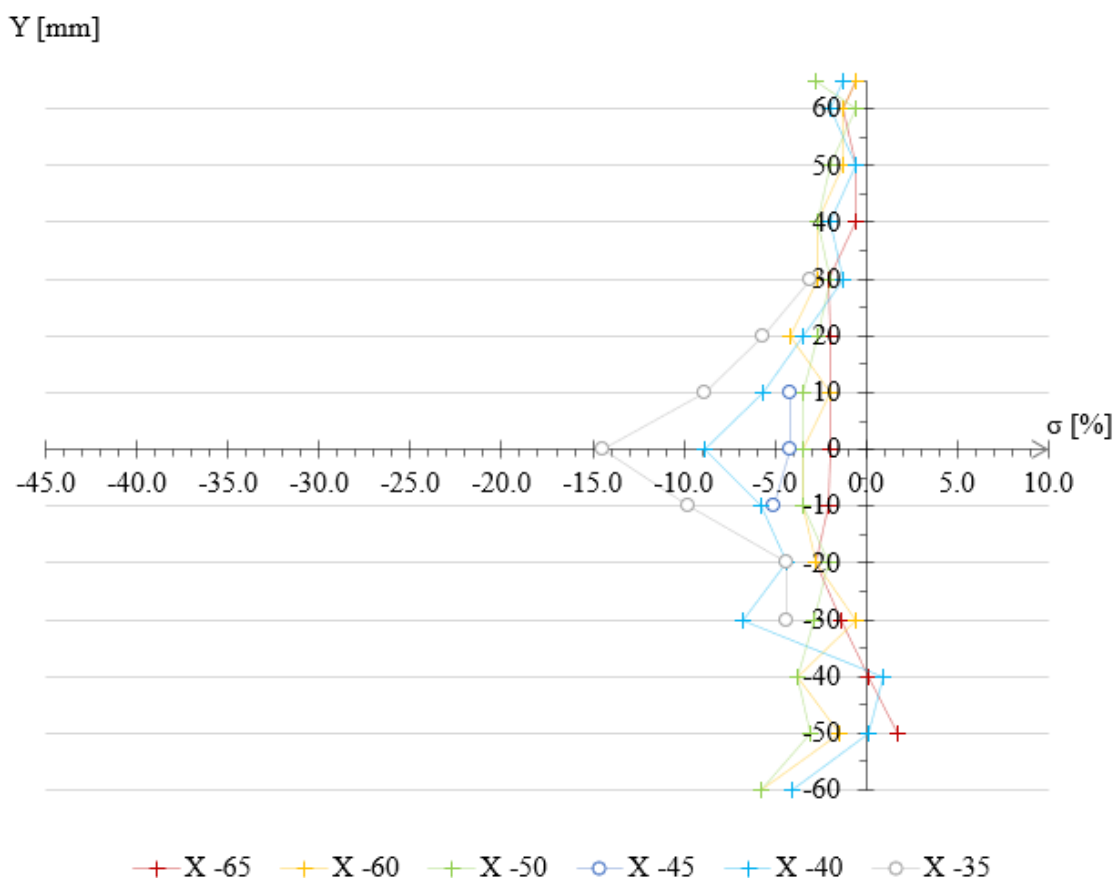


Graf č. 4: Odchylky rychlosti proudění (vyjádřené vzdáleností modré značky od příslušné červené čáry) v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P1 při 5 Hz

Graf č. 4 znázorňuje hodnoty odchylek rychlosti proudění v jednotlivých řezech. Měřítka grafu je uvedeno v pravém spodním rohu. Vyobrazen je současně i propeler, který je vzhledem k nesymetričnosti grafu neproporční. V levé části grafu se nachází oblast protiproudě. S postupem doprava se řezy přibližují hrotu propeleru, což je patrné ze zvětšující se záporné odchylky. Nárůst záporné odchylky znamená zpomalení rychlosti proudění před propelerem, což je běžný fyzikální jev. U řezů nacházejících se v oblasti propeleru je v okrajových částech naopak ztelný kladný nárůst odchylky, který značí naopak nárůst rychlosti tak, aby byla zachována kontinuita proudící kapaliny. V pravé části grafu, tedy za propelerem, je patrný značný úplav. Tento jev je kompenzován opět kladnými odchylkami v okrajových částech, zejména tedy pak ve spodní části kanálu, jelikož v horní části se nachází upevňovací tyč propeleru, která stejně jako propeler samotný zmenšuje průtočný profil.

#### 4.2.1.1 Vyhodnocení rychlostního pole před propelerem

Z grafu č. 5 je detailně patrný stav v řezech, nacházejících se před propelerem. Lze tedy konstatovat, že řezy od X -65 mm po X -45 mm jsou přítomností propeleru téměř neovlivněny. Špička propeleru je umístěna na souřadnici X -25 mm. S přibližující se špičkou se pak rychlost proudění snižuje. Pokud bychom měřili rychlost přímo na špičce propeleru, musela by vyjít zákonitě nula. Viditelné snížení rychlosti se propaguje v menší míře i po poloměru propeleru.



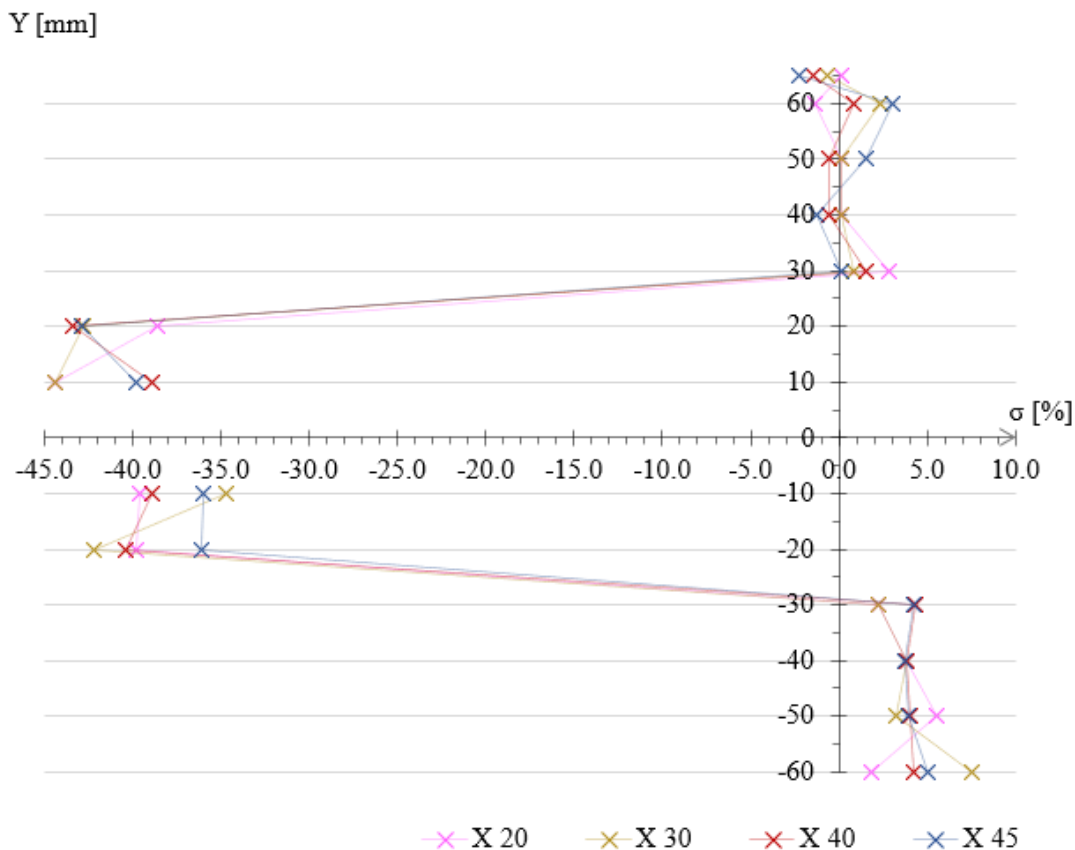
Graf č. 5: Odchylny rychlosti proudění před propelerem P1 při 5 Hz

U ostatních propelerů při 5 Hz byla situace ovlivnění před propelerem téměř totožná, nicméně v případě, kdy byla pozornost soustředěna na bod Y 0 mm v řezu X -35 mm, bylo možné pozorovat u propelerů P5 a P6 nepatrně menší míru ovlivnění. Rozdíl však činil asi 2 %, což není nijak významná hodnota.

Co však bylo možné pozorovat u všech propelerů byl trend snižující se míry ovlivnění u zmiňovaného bodu 10 mm před hrotem propeleru se zvyšující se rychlostí. U všech propelerů byl vždy pozorován rozdíl vůči vyšší rychlosti v daném bodě zhruba o 2 %. Dá se tedy mluvit o určitém trendu, který se však nejeví jako významný. Celkově se jednalo o poklesy rychlosti v rozmezí -7 až -13 %. Grafy pro ostatní propelery ve všech rychlostech jsou dostupné jako přílohy č. 7a-7l.

#### 4.2.1.2 Vyhodnocení rychlostního pole za propelerem

Z grafu č. 6 jsou zřejmé naopak odchylky rychlosti v řezech za propelerem. Obecně se tedy z grafu vyčíst, že v oblasti přímo za propelerem vznikala značný úplav a zpomalení rychlosti proudění bylo poměrně citelné. V krajních oblastech, tedy ve vzdálenosti alespoň 30 mm od osy X, docházelo naopak k nárůstu rychlostí, zejména pak v oblasti pod propelerem, protože se zde nenacházela upevňovací tyč těla vrtule s propelerem.



Graf č. 6: Odchylky rychlosti proudění za propelerem P1 při 5 Hz

Ze získaných dat napříč jednotlivými měřeními rychlostmi a typy propelerů bylo zjištěno, že největší ovlivnění měrného prostoru za propelerem bylo způsobeno při nejnižších rychlostech propelery s nejmenším stoupáním. Konkrétně se jednalo o propelery P1 a P5 se stoupáním 0.05 m. V obou případech šlo o odchylky v řádu -35 až -60 %. Velikost jejich poloměru nehrála žádnou roli, jen byl úplav logicky širší. S rostoucí rychlostí klesala míra ovlivnění u zmiňovaných propelerů na -15 až -25 %. Propeler P6 se stoupáním 0.10 m vykazoval v nejnižších rychlostech -10 až -20 %, při nejvyšších pak -5 až -8 %. Propeler P3 s největším stoupáním 0.25 m dosahoval při nejnižších rychlostech odchylek v rozmezí -5 až -10 %. Při nejvyšších dokonce jen -2 až -7 %. Je zde tedy patrný jasný trend, že s rostoucí rychlostí proudění a současně rostoucím stoupáním propelery dochází ke značnému snížení ovlivnění proudění za propelerem. Grafy pro další varianty jsou v přílohách č. 8a-8l.



### 4.2.1.3 Ověření rovnice kontinuity

Při zjištění takové variability odchylek bylo snahou zjistit jejich příčinu, protože byly pomocí rovnice kontinuity ověřovány jednotlivé řezy a jejich celkové průměry se všemi propelery při všech rychlostech. Výpočet byl jednoduše proveden rozdělením rychlostního pole v kruhovém profilu na prstence, po 10 mm podle osy Y. V prstenci byla vypočtena plocha a průměrná rychlost z hodnot například Y -30 a Y 30 v řezu X -30 pro jednotlivé propelery. Celkový průměr i hodnoty v jednotlivých řezech jsou patrné z tabulky č. 5.

Tabulka č. 5: Srovnání odchylek průtoku v jednotlivých řezech a jejich celkový průměr při variantě s jednotlivými propelery a bez nich

X [mm]	Srovnání při 5 Hz				Srovnání při 15 Hz				Srovnání při 35 Hz			
	P1	P3	P5	P6	P1	P3	P5	P6	P1	P3	P5	P6
-60	-2.57	-1.56	-2.49	-2.06	-0.67	-0.55	-0.79	-0.26	-0.11	-0.25	-0.07	0.20
-50	-2.76	-2.36	-2.72	-2.44	-0.40	-0.05	-1.09	-0.02	-0.26	-0.23	-0.47	-0.10
-40	-2.07	-0.94	-1.66	-1.98	-0.09	-0.07	-0.42	0.09	-0.09	0.05	-0.14	-0.12
-30	-2.57	-1.34	-2.06	-1.31	-0.34	-0.24	-0.45	0.22	-0.64	-0.15	-0.47	-0.27
-20	-1.58	-1.23	-1.73	-1.51	-0.38	-0.32	-0.26	-0.14	0.17	0.20	-0.01	0.22
-10	-0.21	-0.88	-0.69	-1.46	0.47	0.02	-0.10	0.38	1.13	0.90	0.71	0.41
0	0.51	-0.28	-0.31	-1.00	1.25	0.35	0.12	0.34	1.21	0.64	0.62	0.48
10	1.89	0.12	0.10	-0.37	1.70	0.66	0.27	0.37	1.83	1.18	0.52	0.52
20	-1.37	-0.98	-1.48	-1.31	-0.19	0.25	-0.16	0.52	-0.15	0.82	0.30	0.31
30	-0.25	-0.67	-0.74	-0.67	-0.37	-0.11	0.15	0.07	0.29	0.63	0.31	0.89
40	-0.95	-1.38	-1.40	-0.80	0.01	-0.02	0.21	0.92	-0.28	0.17	-0.04	0.44
45	-0.15	0.01	-0.83	-2.18	-0.30	-0.30	-0.53	-0.29	-0.03	0.82	0.36	0.83
<b>Průměr</b>	<b>-1.01</b>	<b>-0.96</b>	<b>-1.33</b>	<b>-1.42</b>	<b>0.06</b>	<b>-0.03</b>	<b>-0.26</b>	<b>0.18</b>	<b>0.26</b>	<b>0.40</b>	<b>0.14</b>	<b>0.32</b>

Z tabulky č. 5 vyplývá, že při ověřování kontinuity proudění bylo sice zjištěno, že při nižších rychlostech proudění dochází ke zpomalení proudění v trati asi o 1 %, nicméně při rychlostech vyšších bylo naměřeno naopak její nepatrné zrychlení, což by nebylo logické. Při měření totiž bohužel nemohla být použita celá průtočná plocha, ale pouze ta část, kterou pokrývala měrná síť. Okrajové části byly zanedbány a pak se jeví, že zachování konstantního průtoku závisí na rychlosti proudění a nikoliv na typu propelery. Částečně tyto závěry sice korespondují s větším úplavem za propelery při nižších rychlostech proudění, nicméně není možné, aby při vyšších rychlostech docházelo ke zrychlení trati po vložení objektu do měrného profilu. Pro spolehlivější prověření této hypotézy by zřejmě bylo nutné provést podrobné měření v celém měrném prostoru.

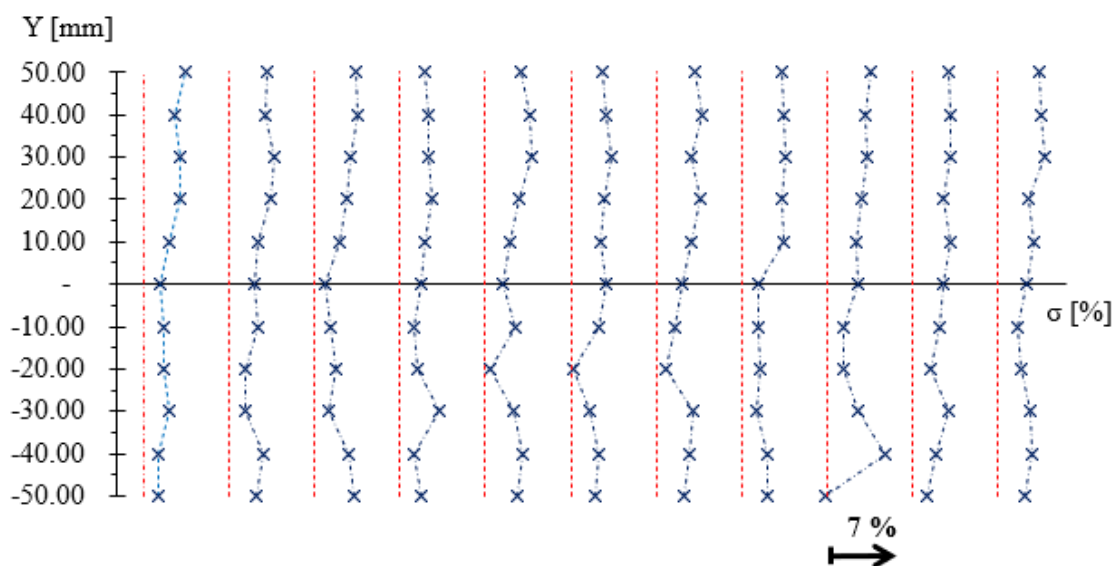
#### 4.2.2 Srovnání měření pomocí PIV a LDA

K dalšímu využití metody PIV bylo nejprve třeba zjistit, s jakou shodou jednotlivé metody vykazují měřené rychlosti. Z tohoto důvodu byl nejprve oběma metodami proměřen prázdný měrný prostor. Konfrontace metod při 5 Hz v řezu X -65 mm je patrná z tabulky č. 6. Vlevo se nachází hodnoty měřené metodou LDA ve směru osy X a Y dle stanoveného souřadného systému. V prostřední části jsou hodnoty naměřené metodou PIV. Hodnoty rychlostí jsou popsány obdobně, jako u LDA. Na pravé straně se pak nachází procentuální odchylky mezi jednotlivými metodami.

Tabulka č. 6: Srovnání odchylek při měření rychlosti proudění metodou LDA a PIV při 5 Hz

Y	X	$v_{x,LDA}$	$v_{y,LDA}$	Y	X	$v_{x,PIV}$	$v_{y,PIV}$	$\sigma v_x$	$\sigma v_y$
[mm]	[mm]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[mm]	[mm]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[%]	[%]
-50.00	-65.00	0.126	0.0058	-50.23	-66.11	0.124	0.0011	1.74	3.74
-40.00	-65.00	0.130	0.0064	-40.79	-66.11	0.128	0.0003	1.78	4.66
-30.00	-65.00	0.137	0.0072	-30.39	-66.11	0.133	0.0002	3.01	5.13
-20.00	-65.00	0.141	0.0072	-20.00	-66.11	0.138	-0.0007	2.47	5.57
-10.00	-65.00	0.142	0.0059	-10.55	-66.11	0.139	-0.0011	2.33	4.93
0.00	-65.00	0.144	0.0062	-0.15	-66.11	0.141	-0.0018	1.99	5.55
10.00	-65.00	0.144	0.0060	10.24	-66.11	0.140	-0.0027	3.08	6.07
20.00	-65.00	0.145	0.0068	19.69	-66.11	0.139	-0.0035	4.43	7.13
30.00	-65.00	0.143	0.0063	30.08	-66.11	0.137	-0.0037	4.23	6.99
40.00	-65.00	0.144	0.0057	40.48	-66.11	0.139	-0.0039	3.63	6.65
50.00	-65.00	0.147	0.0063	49.93	-66.11	0.140	-0.0036	4.96	6.76

Z tabulky je patrné, že metoda PIV vykazuje odchylky v rozmezí 3-6 %, což je hodnota vyšší, než bylo očekáváno. Stejně informace vyplývají i z grafu č. 7, který přehledně zobrazuje rozdíly v jednotlivých řezech.

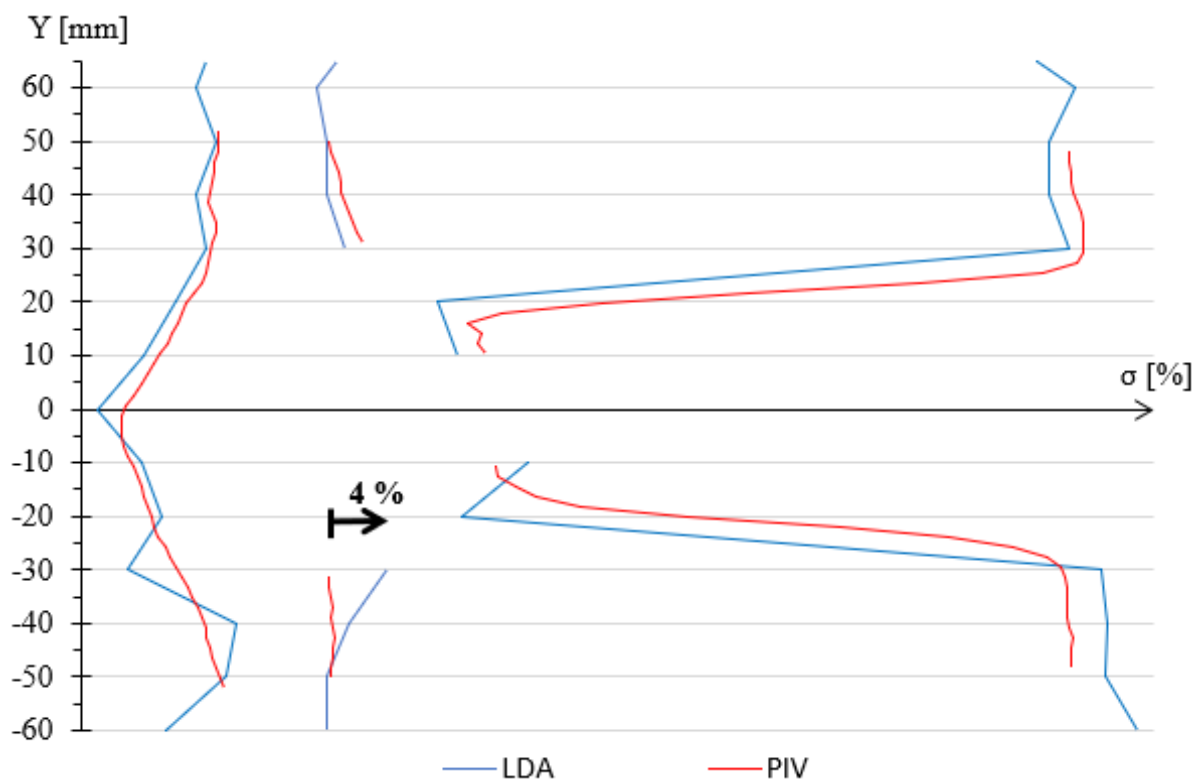


Graf č. 7: Odchylky rychlostí  $v_x$  PIV od LDA (vyjádřené vzdáleností modré značky od příslušné červené čáry) v závislosti na místě řezu při 5 Hz

Graf č. 7 jen potvrzuje data z tabulky č. 6 a dokládá, že stejný průběh odchylek byl pozorován ve všech řezech v měrném prostoru. U rychlostí vyšších byl trend obdobný, jen byla odchylka mezi jednotlivými měřicími metodami ustálenější v rozmezí 2-4 %. Zmiňované grafy při vyšších rychlostech jsou dostupné jako přílohy č. 9a-9c této práce.

Obdobný trend byl pozorován i u složky vertikální rychlosti v ose Y, kde odchylky dosahovaly ještě nepatrně vyšších hodnot, což bylo částečně dáno tím, že jejich absolutní hodnoty byly velmi nízké. Grafy pro tuto složku rychlosti jsou přílohami č. 10a-10c této práce. Dalo by se tedy vyvodit, že metoda PIV není vhodná pro detailní zkoumání podrobných rychlostí, ale spíše prostorových souvislostí.

Pro ověření hypotézy, že PIV není vhodnou metodou pro dané účely bylo provedeno navíc i srovnání získaných odchylek rychlosti v měrném prostoru s propelerem P1 a bez něj při 5 Hz. Jednou se jedná o rozdíl měřený pomocí LDA a podruhé pomocí PIV.

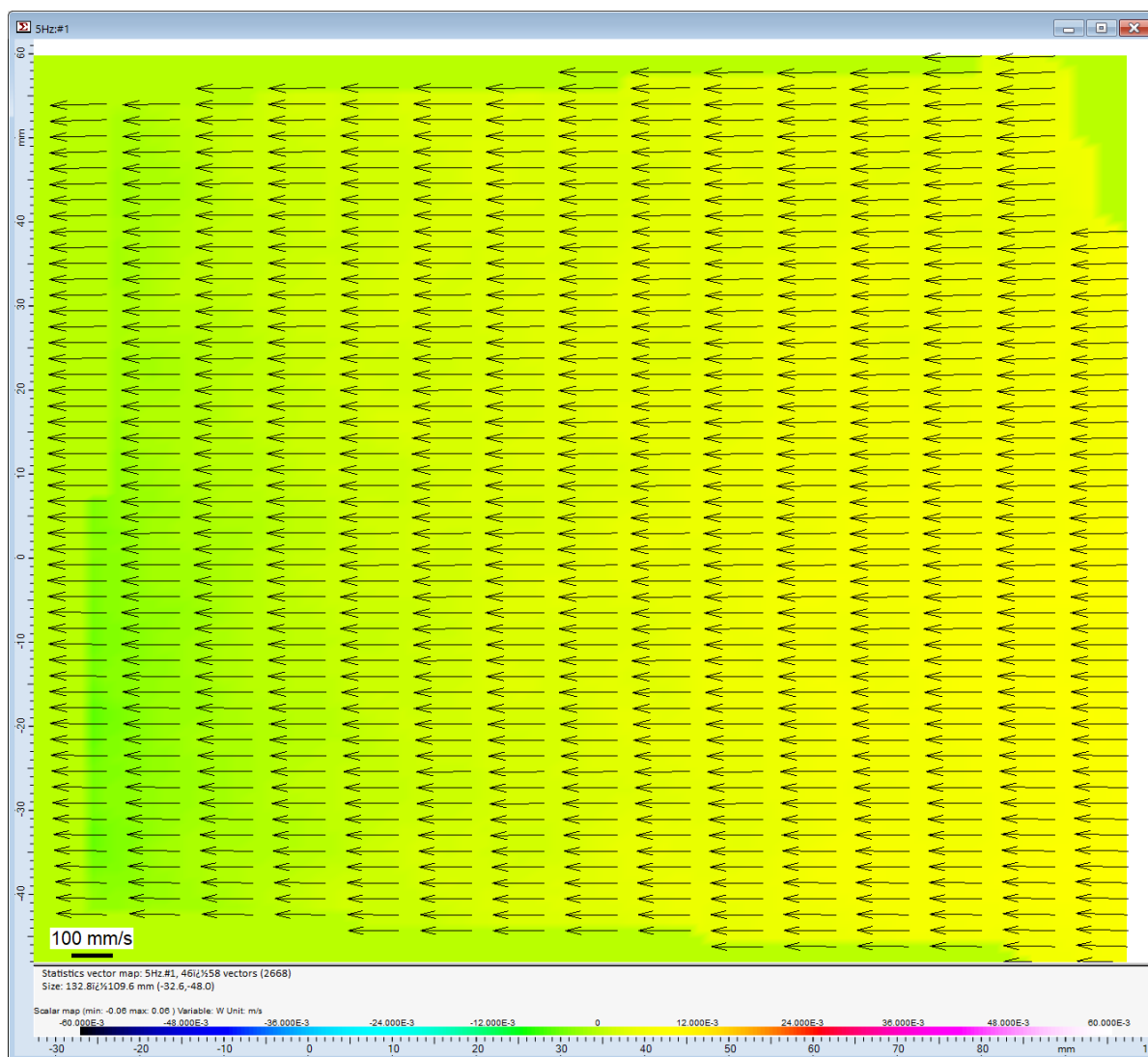


Graf č. 8: Srovnání odchylek rychlosti mezi prázdným měrným prostorem a měrným prostorem s propelerem P1 při 5 Hz ve vybraných řezech pomocí metody LDA a PIV

V grafu č. 8 je vyobrazeno srovnání odchylek získaných při měření LDA s propelerem a bez propeleru a odchylek získaných stejným způsobem metodou PIV. Je zřejmé, že trendy jsou velmi podobné. Při srovnání absolutních hodnot s propelerem P1 při 5 Hz byly sice systematicky naměřeny vyšší absolutní rychlosti metodou PIV, nicméně při srovnání odchylek není patrný žádný významný trend. Je však možné konstatovat, že metodou LDA byly systematicky získány menší odchylky měřených rychlostí s propelerem a bez propeleru.

### 4.2.3 Grafické srovnání rychlostí s propelerem a bez něj pomocí PIV

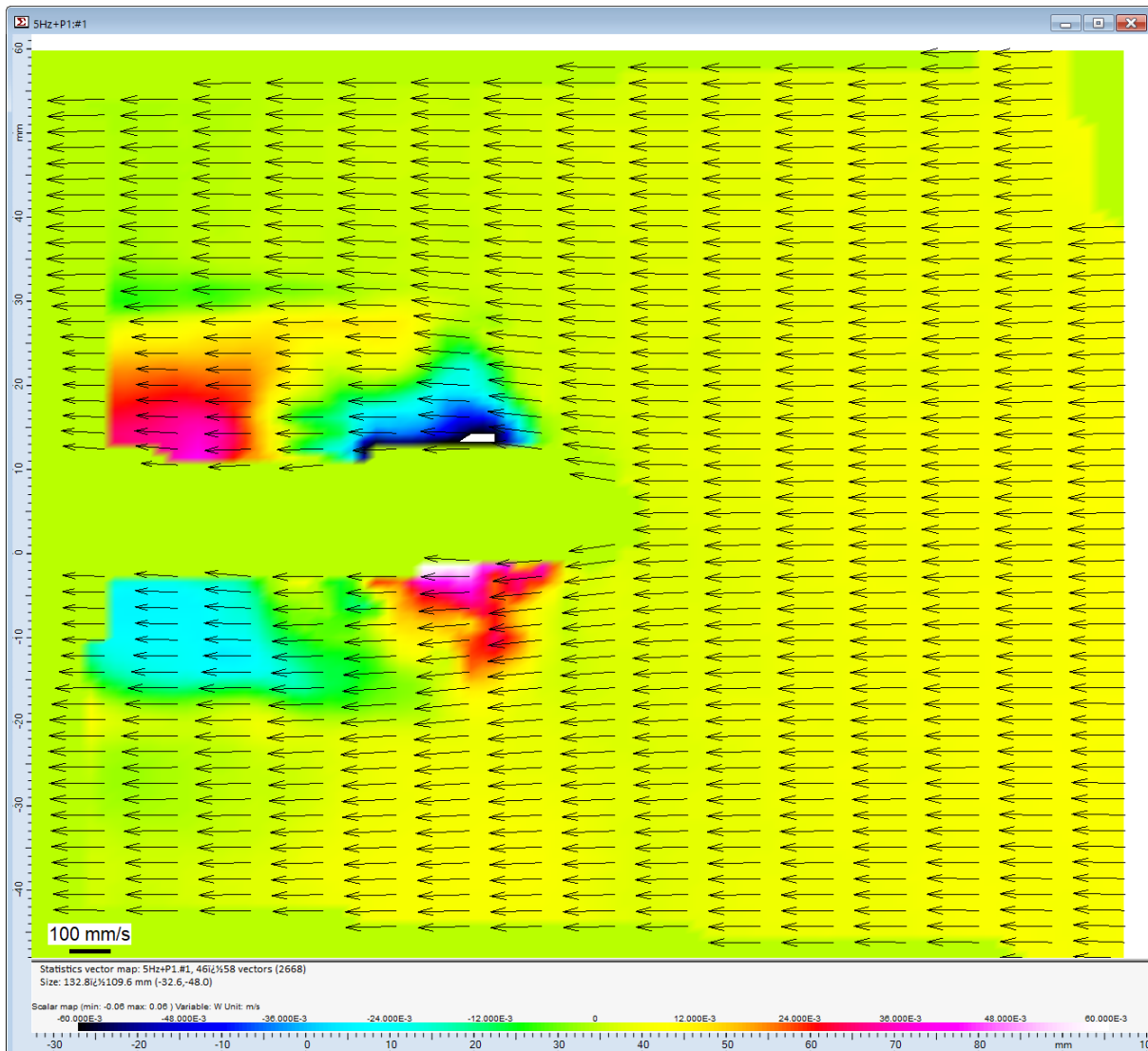
S ohledem na výše zmíněné skutečnosti byla metoda PIV v konečném důsledku použita ke zjištění prostorových souvislostí proudění v měrném profilu s propelerem a bez něj, jelikož oproti LDA byla schopna měřit všechny tři složky rychlosti. Mohlo tak být zjišťováno, zda v trati nenastává významné proudění v příčném směru (ve směru souřadnice Z) – například šroubovicového typu, které by mohlo být důvodem zjištěné dvouprocentní systematické odchylky měření při srovnání kalibračních přístupů.



Graf č. 9: Vektorové pole bez propeleru při 5 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti

Z tohoto grafu je tedy patrné, že bez propeleru v trati žádné příčné složky proudění vznikající ve větší míře nebyly prokázány. Trať se z tohoto pohledu tedy jeví pro daný účel vhodná. Vektorové grafy pro další rychlosti a propelery jsou opět součástí příloh č. 11a-11o této práce.

Pro účely porovnání byl do textové části vložen současně i graf č. 10, kde jsou znázorněny stejné charakteristiky jako v grafu č. 9. Navíc je zde však proudění ovlivněno propelerem P1.



Graf č. 10: Vektorové pole s propelerem P1 při 5 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti

Graf č. 10 jen potvrzuje, co bylo pozorováno v grafu č. 9. Žádné šroubovicové proudění ve snímku není pozorovatelné, avšak hodnoty měřené pod propelerem je třeba brát s určitou rezervou, jelikož je bylo možno měřit jen díky odrazovým vlastnostem měrného prostoru, a tudíž mohou nést určitou chybu. V oblasti propeleru je pak pozorovatelné ovlivnění proudění až po úroveň X -30 mm (v grafu č. 10 není srovnáno měřítko s LDA, tudíž je zmiňované ovlivnění na souřadnici X 41 mm). Ve srovnání s LDA totiž bylo provedeno sjednocení souřadnic k lepšímu vzájemnému srovnání. Graficky je pozorovatelný i úplav za propelerem, který je v případě propeleru P1 při 5 Hz poměrně značný.

## 5 ZÁVĚR

Teoretická část práce pojednávala zejména o účelu měření rychlosti, nutnosti kalibrace měřidel rychlosti a jejím systematickém postupu v certifikovaných laboratořích. Dále byly zmíněny nároky na provádění úředního měření a s tím související legislativní dokumenty a normy.

Experimentální část se skládala ze dvou hlavních částí. První část porovnává dva kalibrační přístupy a zjišťuje jejich míru shody. Druhá část pak poskytuje podrobné informace o míře vzájemného ovlivnění měrného profilu s hydrometrickou vrtulí pomocí metod LDA a PIV ve zvolené měrné síti. Z výsledků první části bylo zjištěno, že rychlosti naměřené a srovnané dle kalibračních rovnic z certifikovaných laboratoří, vykazují systematickou odchylku -2 % vůči rychlostem dle referenčního rámce dat, získaného z dlouhodobého měření předcházející bakalářské práce. Tyto závěry jsou patrné z grafu č. 3 v kapitole 4.1.3.

Pro účely uživatelské kalibrace by proto bylo vhodné spojnicí trendu ze zmíněného grafu rozdělit na dvě části. Pro rychlosti nad  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  by se použil lineární trend s posunem o zmiňovaná 2 % do plusových hodnot. U nižších rychlostí, které jsou vinou přirozených vlastností hydrometrických vrtulí značně rozkolísané, bude postačovat ponechání hodnot bez jakýchkoliv opravných koeficientů.

Rozdíl laboratorních hodnot oproti hodnotám dle referenčního rámce by teoreticky mohl být způsoben Epperovým jevem s ohledem na bodu 5.1.3 normy ČSN ISO 3455. Ze strany kalibrační laboratoře by se pak ale jednalo o systematickou chybu měření. Sice by se jednalo o vysvětlení stále stejné odchylky, nicméně se jedná o neprokazatelnou hypotézu.

Mnohem pravděpodobnější zůstává varianta, že nepřesnosti v měření vznikají v důsledku kalibrační trati LVV, jejichž příčinu se však nepodařilo stanovit. Bylo vyvráceno několik hypotéz od vzniku šroubovicového proudění v trati až po zpomalení trati vlivem vloženého propeleru. Z tohoto důvodu bych doporučil pokračovat ve výzkumu, jelikož se jedná o efektivnější metodu měření oproti standardním postupům v certifikovaných laboratořích. Do doby, než budou zjištěny příčiny této systematické chyby bude vhodné používat opravný koeficient a změnit vždy hodnoty o 2 %.

## 6 BIBLIOGRAFIE

- [1] KOSÍK, Ondřej. *Časový vývoj rozložení rychlosti v měrném prostoru kalibrační tratě* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-10-14]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/128529>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
- [2] ROGERS, Kara. *Encyclopædia Britannica: What's the Difference Between Speed and Velocity?* [online]. Encyclopædia Britannica Inc., 2021 [cit. 2021-10-17]. ISBN 978-1-59339-292-5. Dostupné z: <https://www.britannica.com/story/whats-the-difference-between-speed-and-velocity>
- [3] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [4] Zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů. In: *ASPI [právní informační systém]*. Wolters Kluwer ČR, 2021.
- [5] CZACHORSKI, Robert. *Flow Metering 101: A Guide to Measuring Flow. OHM Advancing Communities* [online]. 2021 [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: <https://www.ohm-advisors.com/insights/flow-metering-101-guide-measuring-flow>
- [6] BOOR, Boris, Jiří KUNŠTÁTSKÝ a Cyril PATOČKA. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 516 s. : il.
- [7] Právní předpisy v oblasti metrologie. *ÚNMZ: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. 2021 [cit. 2021-10-30]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/metrologie/metrologicky-system/pravni-predpisy-v-oblasti-metrologie/>
- [8] Často kladené dotazy - Metrologie: Co je to úřední měření?. *ÚNMZ: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. 2021 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/caste-dotazy/casto-kladene-otazky-metrologie/>
- [9] *Metrologický předpis MP010: Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou*. In: . Brno: Český metrologický institut, 2017.
- [10] ZUBÍK, Pavel. LDA: Základní princip. In: *Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn1.htm>
- [11] Laser Doppler Anemometry (LDA). In: *Dantec Dynamics* [online]. Skovlunde, 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/laser-doppler-anemometry-lda/>
- [12] Measurement principles of LDA. In: *Dantec Dynamics* [online]. Skovlunde, 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/laser-doppler-anemometry-lda/measurement-principles-of-lda/>

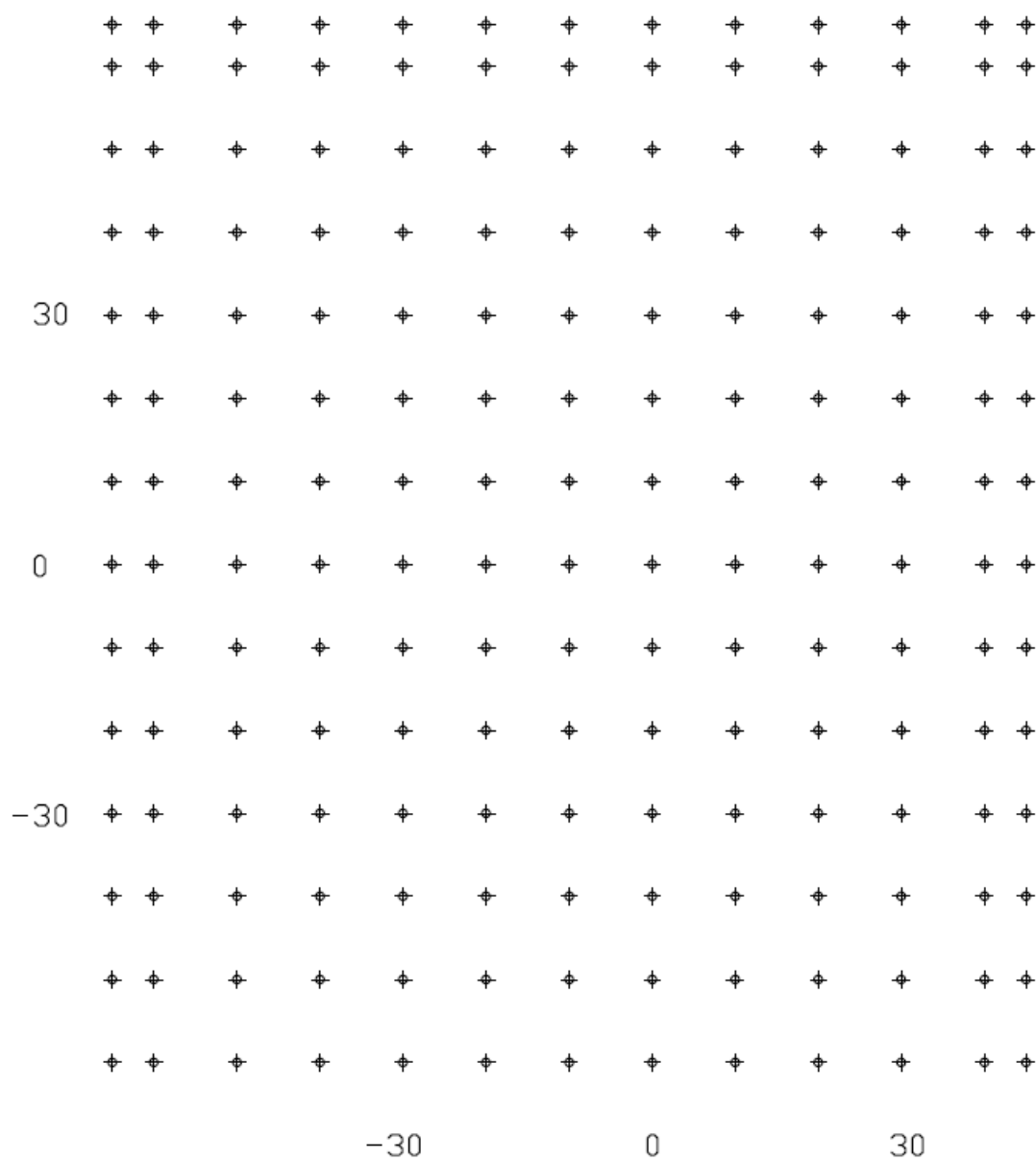


- [13] DANTEC DYNAMICS A/S. *BSA Flow Software: Installation & User's guide*. Eight edition. Skovlunde, 2003.
- [14] SVELTO, Orazio, David C. HANNA. *Principles of Lasers* [online]. 5th edition. London: Springer, 2010 [cit. 2021-11-22]. ISBN 978-1-4419-1301-2. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiFh76L-av0AhXljkQKHbXIDBkQFnoECAYQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.chemistry.uoc.gr%2Fflapkin%2FOrazioSvelto\\_PrinciplesOfLasers\\_5thEd.pdf&usg=AOvVaw3cp0qOExwwkfnsctfL0zD5](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiFh76L-av0AhXljkQKHbXIDBkQFnoECAYQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.chemistry.uoc.gr%2Fflapkin%2FOrazioSvelto_PrinciplesOfLasers_5thEd.pdf&usg=AOvVaw3cp0qOExwwkfnsctfL0zD5)
- [15] Laser Optics Resource Guide: Gaussian Beam Propagation. In: *Edmund optics* [online]. Barrington, USA, 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>
- [16] Imaging resource guide: The Airy disk and diffraction limit. In: *Edmund optics* [online]. Barrington, USA, 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/limitations-on-resolution-and-contrast-the-airy-disk/>
- [17] NEIPP, C., A. HERNÁNDEZ, J. RODES, A. MÁRQUEZ a T. BELÉNDEZ. An analysis of the classical Doppler effect. *European Journal of Physics* [online]. Alicante: Institute of Physics Publishing, 2003, **2003**(24), 8 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: doi:10.1088
- [18] ZUBÍK, Pavel. *Integrální laserová anemometrie*. Brno, 2001, 22 s. ISBN 80-214-1965-2. Dostupné také z: <https://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/thesis.pdf>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [19] Measurement principles of PIV. In: *Dantec Dynamics* [online]. Skovlunde, 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/measurement-principles-of-piv/>
- [20] ZUBÍK, Pavel. Základní princip PIV. In: *Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn2.htm>
- [21] DANTEC DYNAMICS A/S. *Stereo PIV: Reference Manual*. Skovlunde, 2021, 60 s.
- [22] DANTEC DYNAMICS A/S. *Imaging setup assistant*. Skovlunde, 2021, 28 s.
- [23] MATTAS, Daniel. *Praktické cvičení z hydrometrie*. Praha, 2001, 24 s. Dostupné také z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydrology/vyuka/VYZ1/files/prakticke\\_cviceni.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydrology/vyuka/VYZ1/files/prakticke_cviceni.pdf)
- [24] ŽOUŽELA, Michal, Pavel ZUBÍK, Jiří BŘEZINA a Martin VÍTŮ. Metrologické charakteristiky elektromagnetických měřidel bodové rychlosti vodního proudu. *Metrologie*. Praha: Bořivoj Kleník, 2020, **29**(2), 8, 37 s. ISSN 1210-3543.
- [25] Hydrometrické vrtule. In: *ČKSVV: Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí* [online]. Praha, c2009-2021 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://cksvv.vuv.cz/index.php/cz/hydrometricke-vrtule>

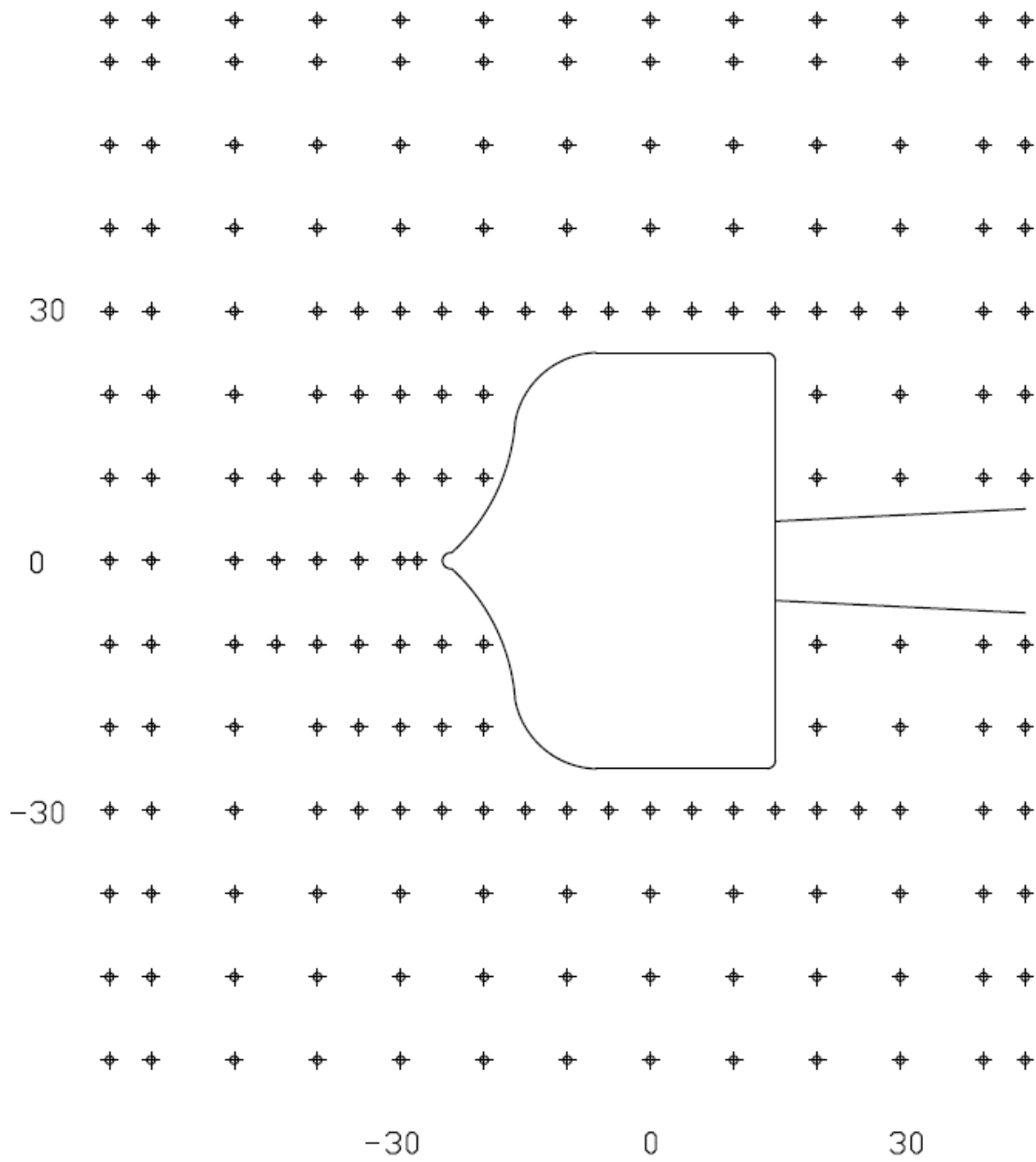
- [26] BŘEZINA, Jiří. *Elektromagnetická indukční měřidla bodových rychlostí*. Brno, 2017, 85 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
- [27] ČSN ISO 2537 (E): *Hydrometry — Rotating-element currentmeters*. 4th edition. Ženeva: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [28] Kalibrace. *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/kalibrace>
- [29] TRÁVNÍČKOVÁ, Adéla. *Kalibrační list číslo 20054*. Praha, 2021.
- [30] Autorizovaná metrologická střediska. *ÚNMZ: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. 2021 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: [https://aplikace.unmz.cz/urad/data\\_ams\\_1.asp?cd=488&typ=r&trideni=&filtrs=&filtr=&oddata=&dodata=&id\\_meridla=0&start=1&datasearch1=&datasearch2=&datasearch3=&datasearch4=&datasearch5=&datasearch6=&datasearch7=&datasearch8=&datasearch9=&datasearch10=&datasearch11=](https://aplikace.unmz.cz/urad/data_ams_1.asp?cd=488&typ=r&trideni=&filtrs=&filtr=&oddata=&dodata=&id_meridla=0&start=1&datasearch1=&datasearch2=&datasearch3=&datasearch4=&datasearch5=&datasearch6=&datasearch7=&datasearch8=&datasearch9=&datasearch10=&datasearch11=)
- [31] ČSN ISO 3455: *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích*. In: . Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [32] Zařízení ČKSVV: Kalibrační žlab. *Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí* [online]. Praha, c2009-2021 [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://cksvv.vuv.cz/index.php/cz/zarizeni-cksvv>
- [33] HERSHEY, Reginald W. *Streamflow Measurement* [online]. 2nd. Hong Kong: Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 2007 [cit. 2022-01-12]. ISBN 0-419-19490-8. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=W0VZDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
- [34] Často kladené dotazy - Metrologie: Je rozdíl mezi kalibrací a ověřením měřidla?. *ÚNMZ: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. 2021 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/caste-dotazy/casto-kladene-otazky-metrologie/>
- [35] DANTEC DYNAMICS A/S. *Dynamic Studio: User's Guide*. Skovlunde, 2021, 1089 s.

## 7 PŘÍLOHY

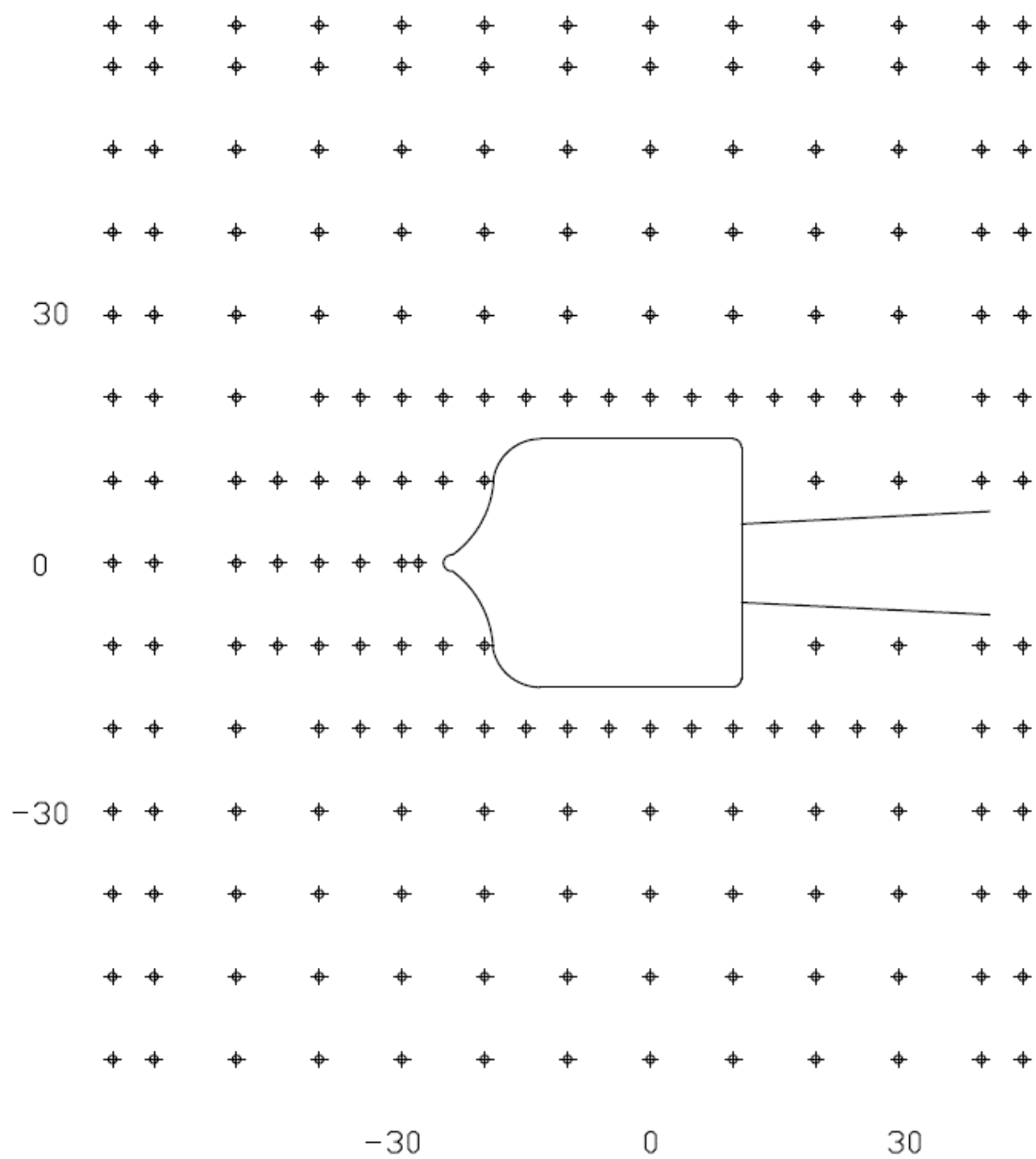
*Příloha č. 1a: Měrná síť ve vertikální rovině XY bez propeleru*



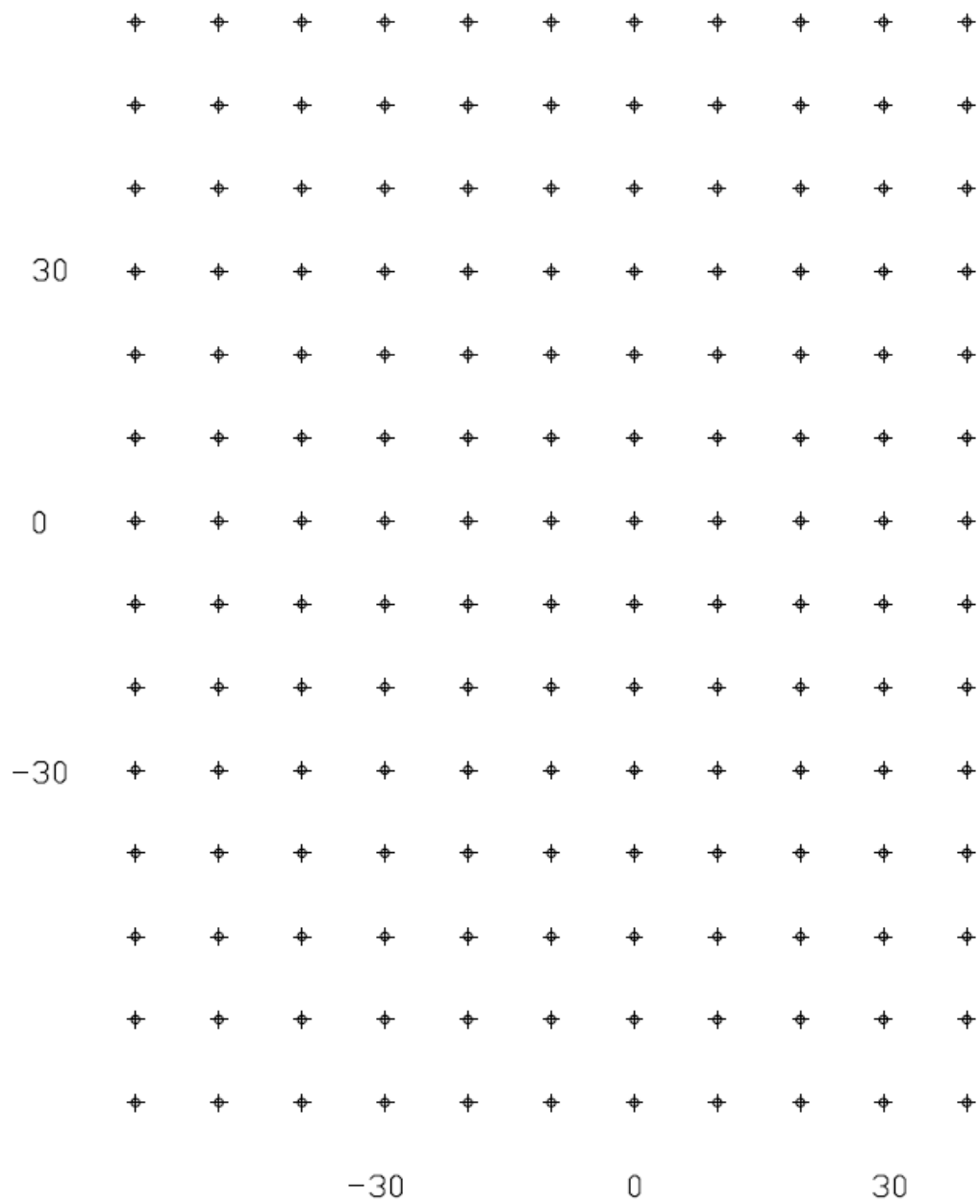
Příloha č. 1b: Měrná síť ve vertikální rovině XY s propelerem o průměru 50 mm



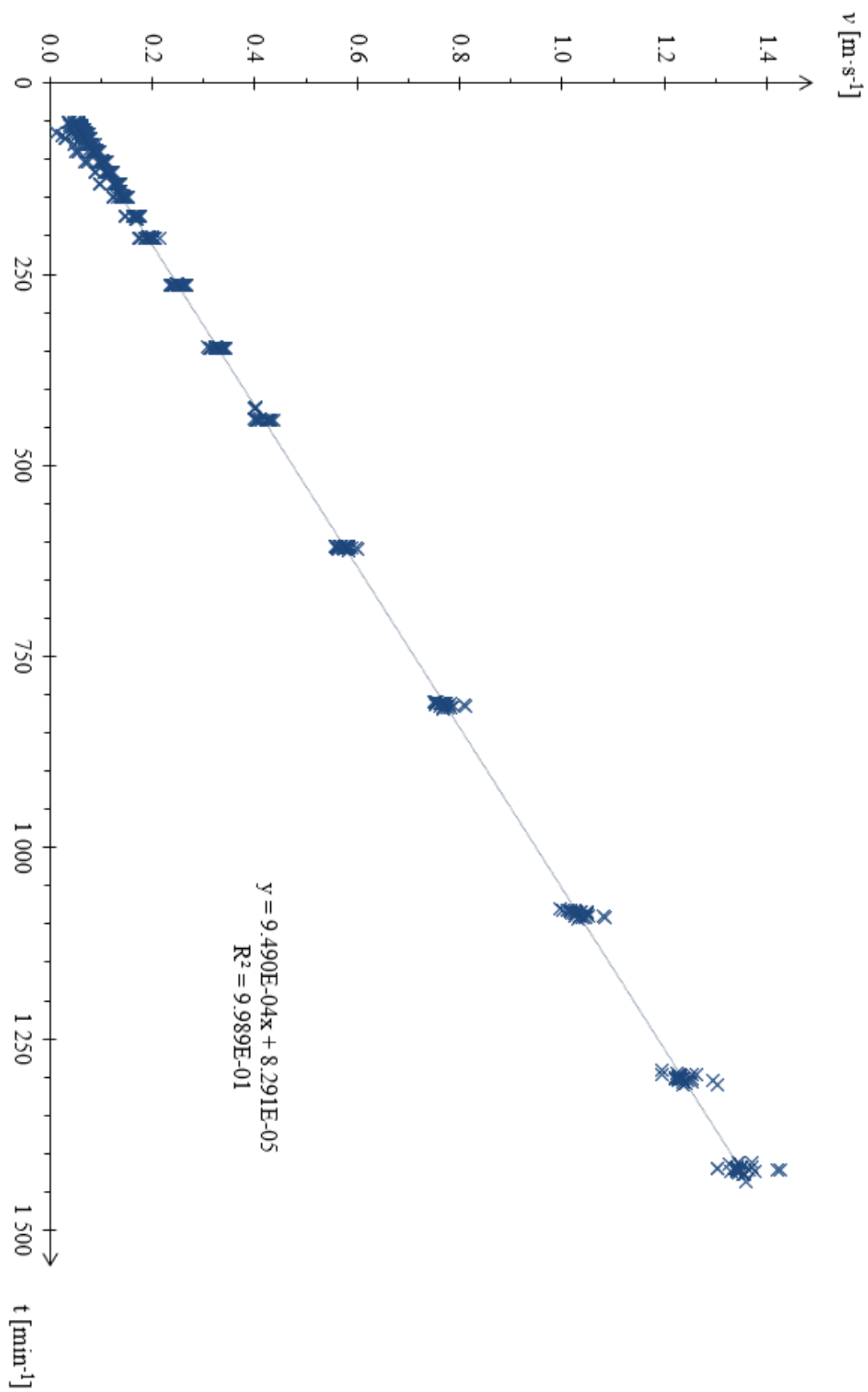
Příloha č. 1c: Měrná síť ve vertikální rovině XY s propelerem o průměru 30 mm



*Příloha č. 1d: Měrná síť v horizontální rovině XZ bez propeleru*



Příloha č. 2: Grafické znázornění vztahu mezi otáčkami čerpadla a rychlostí dle KR



Příloha č. 3a: Odchyly rychlostí KR od rychlostí dle RR v závislosti na typu propeleru

Rychlost dle typu propeleru [m·s <sup>-1</sup> ]					Odchylnka dle typu propeleru [%]				
1	2	3	5	6	1	2	3	5	6
0.053	0.054	0.054	0.099	0.054	7.42	- 5.47	- 2.09	3.37	1.05
0.059	0.060	0.059	0.146	0.060	5.82	- 4.25	9.75	0.89	3.01
0.065	0.066	0.065	0.197	0.066	4.63	- 3.81	8.74	- 2.61	2.02
0.077	0.084	0.077	0.257	0.084	3.29	- 3.59	0.73	- 3.95	1.82
0.099	0.102	0.099	0.337	0.101	1.12	- 3.18	3.19	- 3.93	0.63
0.146	0.145	0.146	0.589	0.145	- 0.92	- 2.98	- 8.09	- 3.75	0.17
0.198	0.197	0.198	1.050	0.196	- 1.99	- 2.91	- 4.79	- 4.56	- 1.09
0.258	0.258	0.258	1.375	0.258	- 0.93	- 3.00	- 7.01	- 5.34	- 2.30
0.339	0.337	0.339	1.255	0.338	0.21	- 2.99	- 8.10	- 4.87	- 2.48
0.595	0.594	0.592	0.787	0.590	- 1.73	- 3.29	- 5.53	- 3.14	- 2.82
1.058	1.060	1.053	0.429	1.053	- 1.66	- 2.67	- 3.08	- 4.03	- 2.46
1.391	1.382	1.378	0.170	1.376	- 2.38	- 2.12	- 3.49	- 2.22	- 2.23
1.266	1.262	1.260	0.129	1.260	- 2.08	- 2.08	- 2.62	0.95	- 2.33
0.794	0.795	0.791	0.113	0.788	- 2.13	- 3.36	- 4.65	1.40	- 2.89
0.431	0.416	0.430	0.086	0.414	- 1.16	- 3.64	- 6.66	5.63	- 2.87
0.170	0.174	0.170	0.070	0.173	- 0.21	- 3.03	- 3.11	6.30	- 0.75
0.129	0.139	0.129	0.063	0.139	0.87	- 3.08	- 0.41	6.05	- 0.25
0.114	0.114	0.113	0.056	0.113	0.43	- 3.94	1.11	1.88	1.39
0.087	0.087	0.086	0.059	0.086	2.64	- 3.41	5.74	6.55	2.86
0.071	0.072	0.070	0.065	0.072	5.23	- 5.08	- 3.23	8.11	4.24
0.063	0.063	0.063	0.077	0.063	7.17	- 4.80	0.06	5.29	2.46
0.056	0.057	0.056	0.099	0.056	9.10	- 13.03	3.34	3.07	0.12
0.051	0.051	0.050	0.146	0.050	10.92	- 7.85	7.65	- 0.10	- 5.15
0.054	0.054	0.059	0.197	0.059	8.58	- 6.68	8.75	- 1.76	- 6.31
0.060	0.060	0.065	0.257	0.065	7.87	- 5.55	8.01	- 3.32	- 3.71
0.066	0.066	0.077	0.337	0.077	6.51	- 4.73	1.17	- 3.82	- 4.18
0.078	0.084	0.099	0.589	0.099	4.11	- 4.20	2.95	- 3.60	1.11
0.100	0.102	0.146	1.048	0.146	2.40	- 3.68	- 1.86	- 4.95	- 0.07
0.146	0.145	0.197	1.374	0.197	- 0.58	- 3.36	- 4.79	- 5.24	- 0.83
0.198	0.197	0.257	1.250	0.257	- 0.76	- 3.18	- 7.47	- 4.43	- 2.36
0.258	0.258	0.338	0.786	0.339	- 0.38	- 3.18	- 8.60	- 3.99	- 2.43
0.339	0.339	0.590	0.428	0.592	- 0.38	- 3.38	- 5.70	- 4.16	- 3.13
0.591	0.592	1.051	0.170	1.056	- 1.74	- 3.27	- 3.33	- 0.32	- 2.07
1.057	1.056	1.369	0.129	1.373	- 2.00	- 2.86	- 3.07	1.39	- 1.62
1.381	1.380	1.263	0.113	1.269	- 1.91	- 2.59	- 2.83	3.00	- 2.69
1.264	1.265	0.787	0.086	0.793	- 1.63	- 2.40	- 4.37	6.20	- 2.83
0.792	0.791	0.429	0.070	0.430	- 2.38	- 3.66	- 6.98	9.23	- 3.65
0.430	0.415	0.170	0.063	0.170	- 1.28	- 3.87	- 2.90	8.31	- 1.22
0.170	0.174	0.129	0.056	0.129	- 0.44	- 3.24	- 0.04	5.46	0.14
0.129	0.139	0.113	0.066	0.113	0.87	- 4.03	0.95	5.54	0.43
0.114	0.114	0.086	0.078	0.087	0.98	- 3.82	4.57	4.51	2.98
0.087	0.087	0.070	0.100	0.071	3.52	- 4.06	- 3.05	3.85	3.79
0.071	0.072	0.063	0.146	0.063	5.50	- 5.39	0.25	0.70	3.26
0.063	0.064	0.056	0.198	0.056	6.55	- 11.59	- 5.65	- 0.42	2.18
0.056	0.057	0.054	0.258	0.050	7.78	- 13.19	- 14.15	0.47	- 3.64



Příloha č. 3b: Odchyly rychlostí KR od rychlostí dle RR v závislosti na typu propeleru

Rychlost dle typu propeleru [m·s <sup>-1</sup> ]					Odchylnka dle typu propeleru [%]				
1	2	3	5	6	1	2	3	5	6
0.051	0.051	0.060	0.338	0.078	9.93	- 8.35	- 12.44	- 2.55	6.22
0.054		0.066	0.590	0.100	14.74		- 11.58	- 2.86	6.16
0.060		0.078	1.050	0.146	15.98		- 2.72	- 0.82	2.97
0.066		0.100	1.367	0.198	15.41		2.97	0.69	2.01
0.078		0.146	1.263	0.258	16.07		3.40	- 1.35	- 0.93
0.100		0.198	0.789	0.338	11.32		1.83	- 1.59	- 0.89
0.146		0.258	0.429	0.590	5.85		1.19	- 2.41	- 2.19
0.198		0.338	0.170	1.055	3.66		0.98	- 0.53	- 2.88
0.258		0.593	0.129	1.379	3.86		- 0.95	2.13	- 2.37
0.338		1.057	0.113	1.262	1.19		- 1.53	2.29	- 2.21
0.592		1.374	0.087	0.789	- 0.70		- 2.77	5.60	- 2.58
1.055		1.267	0.070	0.429	- 0.72		- 3.00	4.38	- 1.55
1.373		0.792	0.063	0.170	- 0.27		- 1.41	4.65	2.20
1.265		0.430	0.056	0.129	- 0.97		0.20	0.16	4.60
0.792		0.170	0.078	0.114	- 0.52		3.14	7.06	5.90
0.430		0.129	0.100	0.087	0.59		3.52	4.55	8.47
0.170		0.113	0.146	0.071	4.28		- 2.18	1.85	8.41
0.129		0.087	0.198	0.063	7.16		4.32	- 0.01	1.79
0.113		0.070	0.258	0.056	8.70		- 9.07	0.86	- 10.09
0.087		0.063	0.338	0.059	12.66		- 7.83	- 1.33	- 3.22
0.070		0.056	0.590	0.066	13.86		- 6.92	- 1.64	1.20
0.064		0.051	1.052	0.078	14.59		- 8.03	- 0.71	8.27
0.056		0.054	1.375	0.100	13.56		- 14.01	0.50	6.54
0.051		0.060	1.256	0.146	12.30		- 12.21	- 0.14	4.02
0.054		0.066	0.789	0.198	12.61		2.94	- 1.56	1.99
0.060		0.078	0.429	0.258	13.01		- 2.52	- 2.88	0.45
0.066		0.100	0.170	0.338	13.26		4.51	- 1.50	- 0.55
0.078		0.146	0.129	0.590	14.64		3.93	1.54	- 2.06
0.100		0.198	0.113	1.049	10.26		2.65	3.10	- 2.21
0.146		0.258	0.086	1.377	5.64		1.59	5.47	- 2.57
0.198		0.339	0.070	1.258	7.84		1.47	4.97	- 2.50
0.258		0.591	0.063	0.788	3.41		- 1.11	5.05	- 2.67
0.339		1.052	0.056	0.429	0.99		- 1.47	0.10	- 1.97
0.591		1.378	0.146	0.170	- 1.19		- 2.72	- 4.24	2.82
1.051		1.259	0.198	0.129	- 0.25		- 1.34	- 5.39	4.81
1.377		0.789	0.258	0.114	- 0.93		- 1.15	- 6.19	5.63
1.257		0.430	0.339	0.087	- 0.37		0.01	- 4.58	7.24
0.787		0.170	0.591	0.071	- 0.68		3.11	- 4.97	7.04
0.429		0.129	1.050	0.063	0.37		3.56	- 3.25	1.58
0.170		0.113	1.378	0.057	4.75		- 2.25	- 2.63	- 1.14
0.129		0.087	1.260	0.066	6.89		4.34	- 3.06	16.54
0.113		0.070	0.787	0.078	8.85		3.96	- 4.25	14.47
0.087		0.064	0.429	0.100	12.50		- 8.42	- 5.52	8.51
0.070		0.056	0.170	0.146	15.05		- 6.81	- 4.42	4.29
0.063			0.129	0.198	13.93		- 3.02		1.57

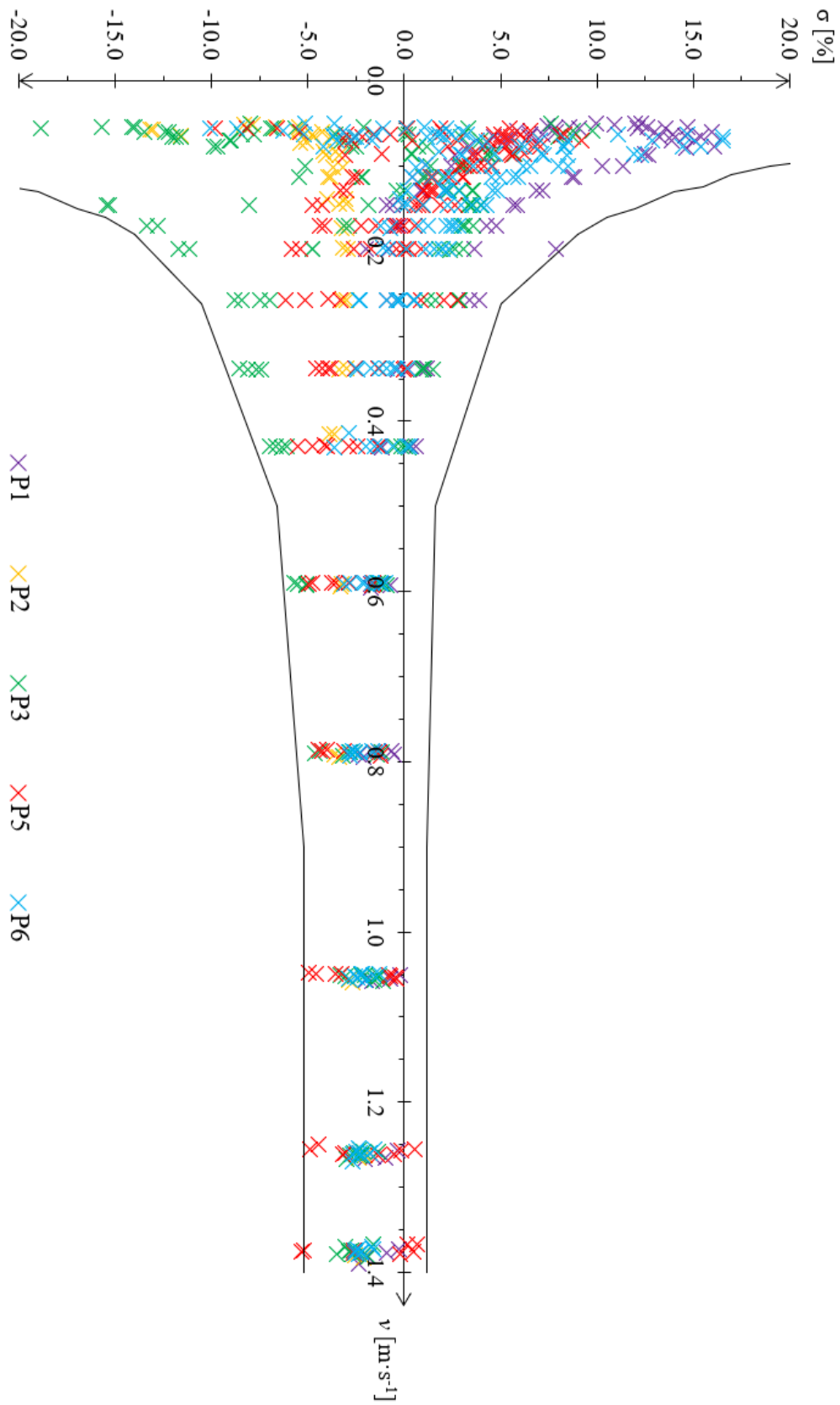
Příloha č. 3c: Odchytky rychlostí KR od rychlostí dle RR v závislosti na typu propeleru

Rychlost dle typu propeleru [m·s <sup>-1</sup> ]					Odchytky dle typu propeleru [%]				
1	2	3	5	6	1	2	3	5	6
0.056		0.146	0.113	0.258	12.12		- 15.49	- 2.49	0.51
0.051		0.198	0.087	0.338	12.00		- 11.71	- 1.16	0.18
		0.258	0.071	0.590			- 8.42	- 3.09	- 1.23
		0.339	0.063	1.050			- 7.71	- 2.99	- 1.28
		0.593	0.056	1.377			- 5.10	- 6.60	- 2.24
		1.058	0.146	1.256			- 1.13	- 4.76	- 1.57
		1.382	0.198	0.788			- 1.89	- 5.84	- 1.63
		1.262	0.258	0.429			- 2.27	- 5.14	- 0.61
		0.793	0.338	0.170			- 3.21	- 4.28	2.58
		0.430	0.589	0.129			- 6.34	- 4.78	2.08
		0.170	1.049	0.113			- 13.39	- 3.57	4.97
		0.146	1.374	0.087			- 15.31	- 2.60	11.93
		0.198	1.261	0.070			- 11.14	- 3.22	16.53
		0.258	0.786	0.063			- 8.84	- 4.49	11.10
		0.339	0.429	0.056			- 7.46	- 4.76	- 8.68
		0.591	0.170	0.078			- 5.08	- 4.14	15.40
		1.052	0.129	0.100			- 1.32	- 3.35	7.99
		1.367	0.113	0.146			- 1.64	- 2.67	3.48
		1.262	0.087	0.198			- 2.36	- 3.04	2.33
		0.789	0.071	0.258			- 2.79	- 2.78	- 0.23
		0.430	0.060	0.338			- 6.08	2.01	- 0.38
		0.170	0.066	0.590			- 12.79	5.26	- 1.67
		0.054	0.078	1.050			- 15.72	6.80	- 1.59
		0.060	0.100	1.370			- 13.47	4.12	- 1.68
		0.066	0.146	1.259			- 12.03	2.60	- 1.79
		0.078	0.198	0.787			- 9.88	0.84	- 1.36
		0.100	0.258	0.429			- 5.16	2.75	- 1.25
		0.146	0.338	0.170			3.55	0.03	2.44
		0.198	0.592	0.129			3.06	- 1.66	2.09
		0.258	1.055	0.113			2.89	- 0.39	4.53
		0.339	1.379	0.087			0.88	- 0.20	12.28
		0.591	1.255	0.070			- 1.56	0.52	12.87
		1.050	0.793	0.063			- 2.08	- 1.21	14.69
		1.374	0.430	0.066			- 2.52	- 1.33	- 2.51
		1.258	0.170	0.078			- 2.14	0.54	8.33
		0.788	0.129	0.100			- 2.54	1.06	4.54
		0.429	0.113	0.146			- 0.49	1.36	2.24
		0.170	0.087	0.198			3.03	3.60	1.13
		0.129	0.070	0.258			2.90	0.41	- 0.29
		0.113	0.063	0.338			- 5.48	- 1.59	- 1.30
		0.086	0.056	0.589			0.32	- 9.81	- 1.00
		0.070	0.060	1.049			- 8.99	- 5.43	- 2.23
		0.066	0.066	1.373			- 11.83	- 2.17	- 2.43
		0.078	0.078	1.254			- 9.68	2.22	- 2.39
		0.100	0.100	0.788			1.35	2.82	- 2.33

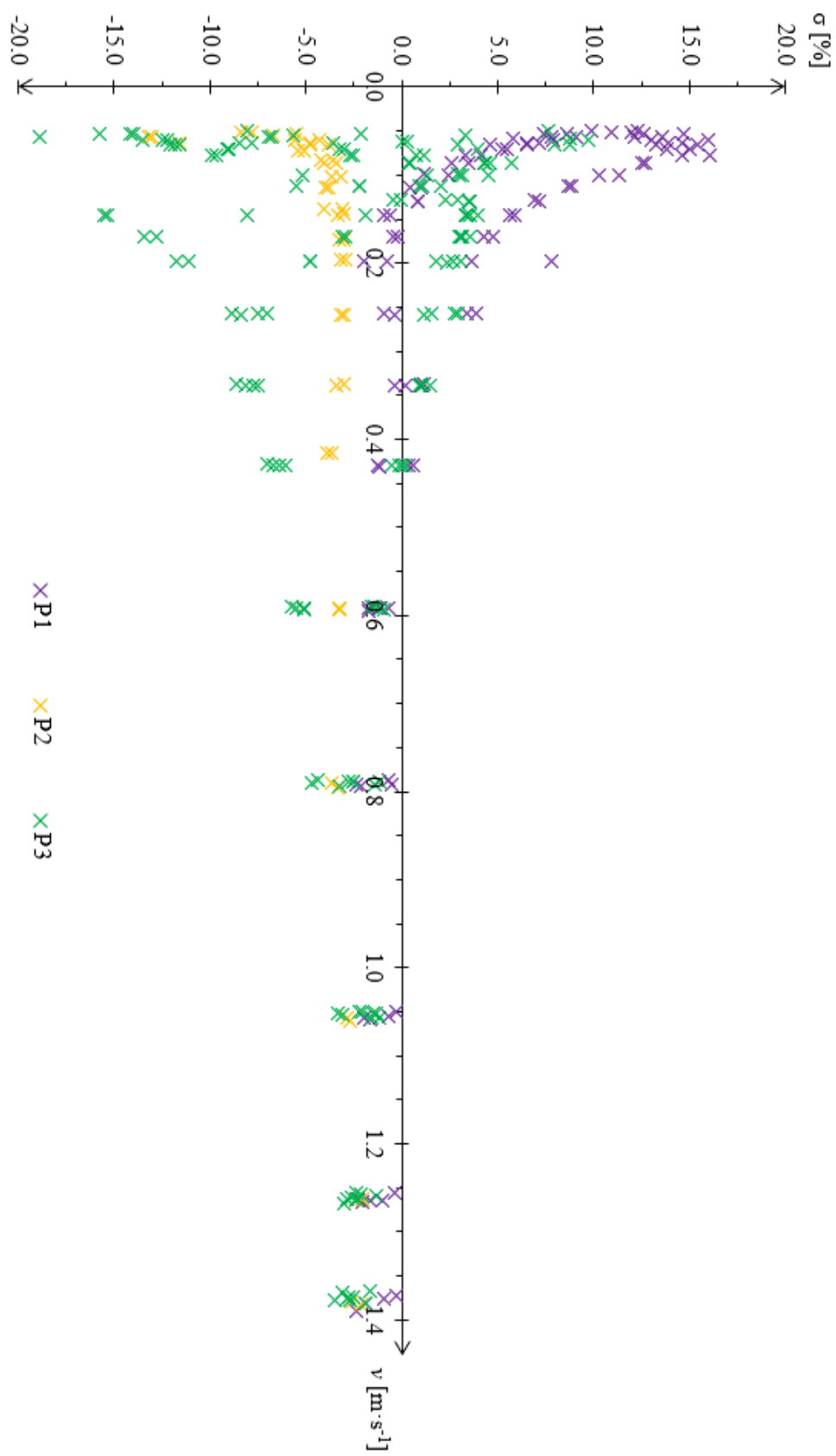
Příloha č. 3d: Odchyly rychlostí KR od rychlostí dle RR v závislosti na typu propeleru

Rychlost dle typu propeleru [m·s <sup>-1</sup> ]					Odchyka dle typu propeleru [%]				
1	2	3	5	6	1	2	3	5	6
		0.146	0.146	0.429			3.33	0.54	0.19
		0.199	0.198	0.170			2.39	0.21	1.24
		0.258	0.258	0.129			2.79	2.09	2.23
		0.338	0.339	0.113			1.04	- 0.06	2.13
		0.590	0.591	0.087			- 1.39	- 1.60	7.11
		1.050	1.053	0.071			- 2.24	- 0.46	- 1.69
		1.375	1.367	0.063			- 2.86	0.15	- 1.58
		1.256	1.261	0.066			- 2.33	- 0.53	- 2.62
		0.789	0.789	0.078			- 2.54	- 1.29	5.99
		0.429	0.429	0.100			- 0.14	- 1.24	3.55
		0.170	0.170	0.146			3.55	- 0.02	0.98
		0.129	0.129	0.198			2.29	1.27	0.12
		0.113	0.113	0.258			2.02	1.50	- 0.40
		0.086	0.087	0.338			0.44	3.84	- 1.73
		0.070	0.070	0.591			- 8.99	2.72	- 1.23
		0.063	0.063	1.053			- 3.60	- 0.75	- 2.56
		0.056	0.056	1.373			- 18.87	- 8.19	- 2.58
				1.262					- 2.71
				0.787					- 1.66
				0.429					0.32
				0.170					0.74
				0.129					2.84
				0.113					2.51
				0.086					4.74
				0.070					- 3.48
				0.063					- 5.20

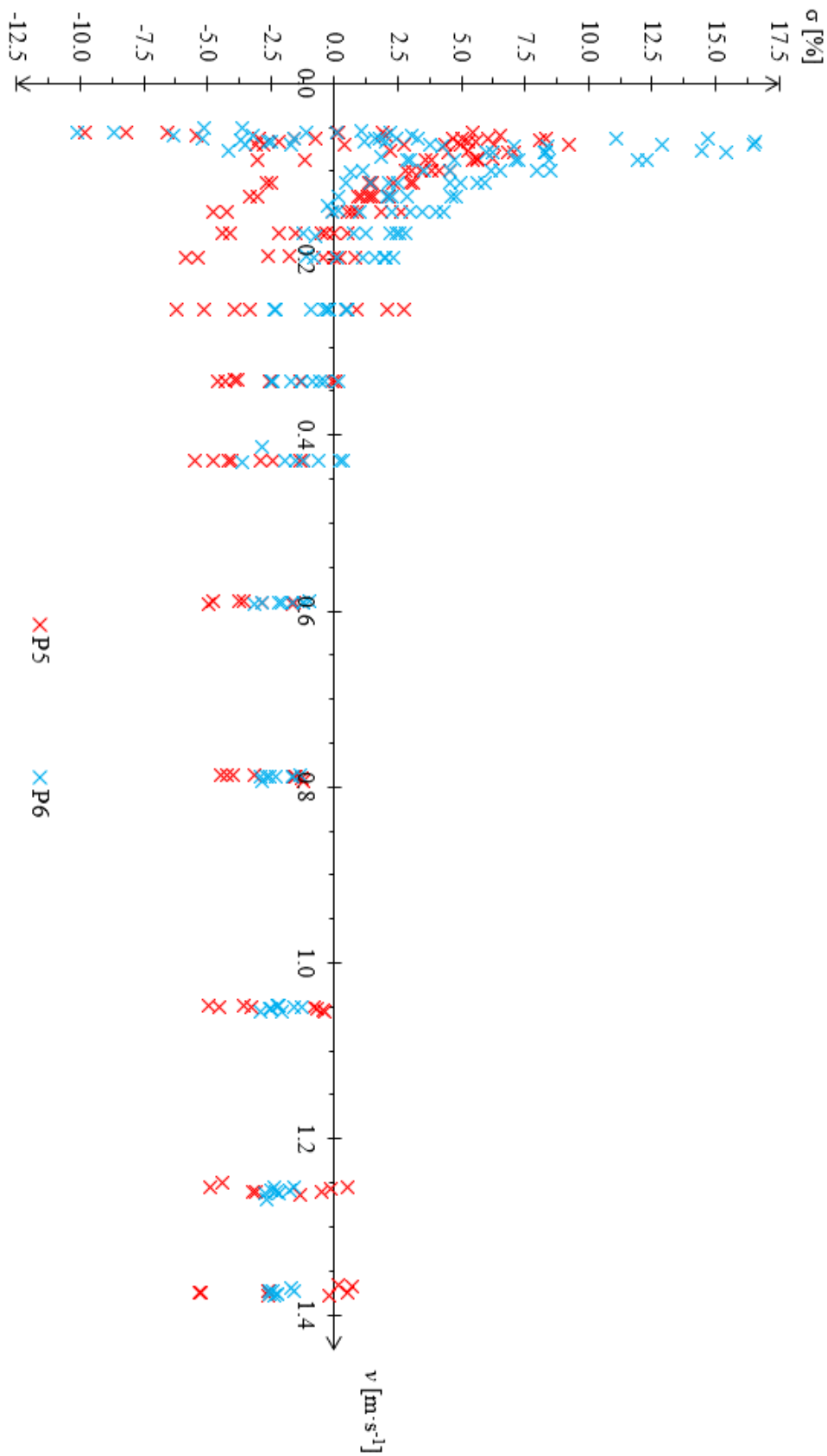
Příloha č. 4a: Graf odchylek rychlostí KR od rychlostí dle RR v závislosti na typu propeleru (všechny propelery)



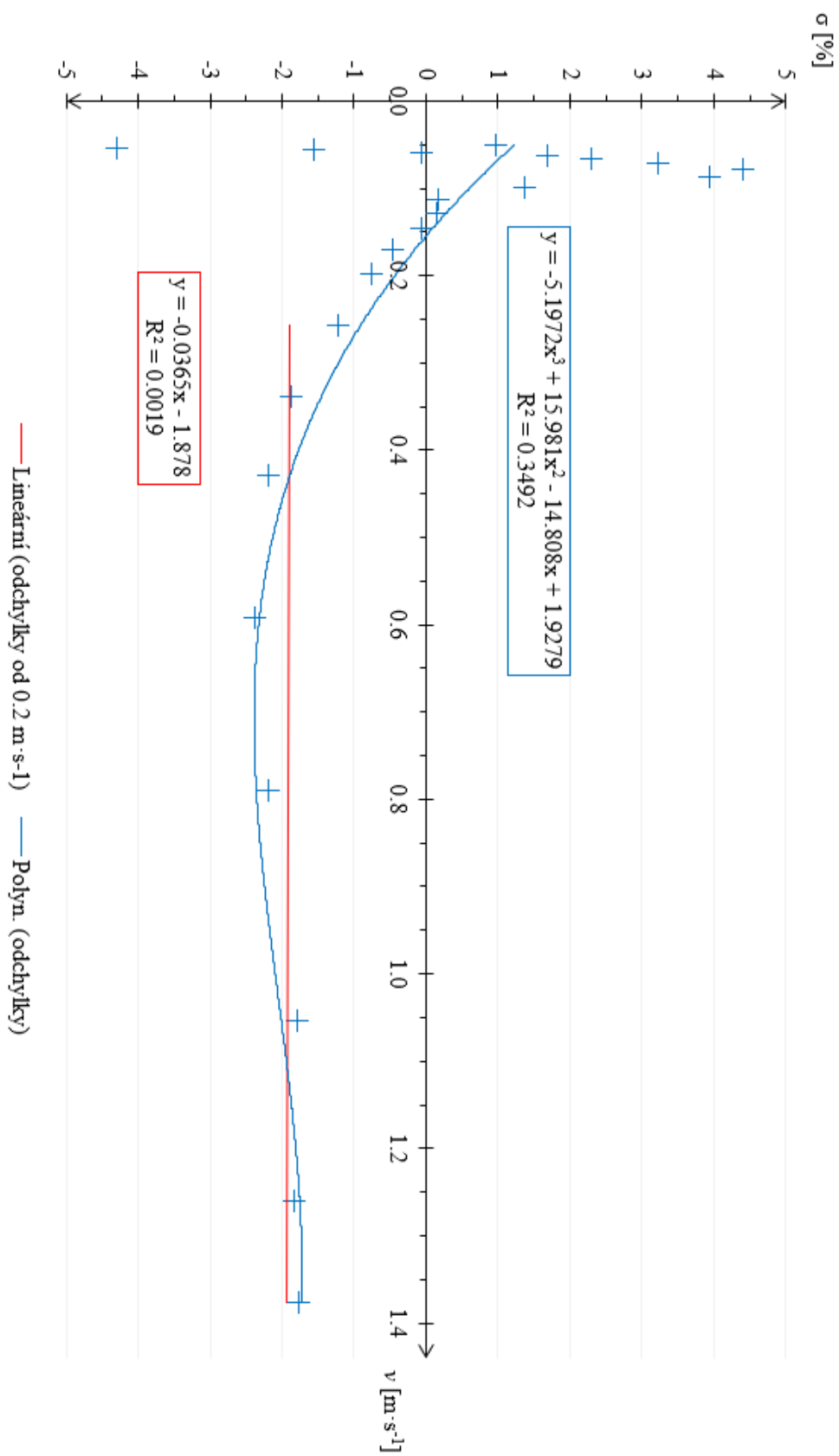
Příloha č. 4b: Graf odchylek rychlosti KR od rychlosti dle RR v závislosti na typu propeleru (propelery o průměru 50 mm)



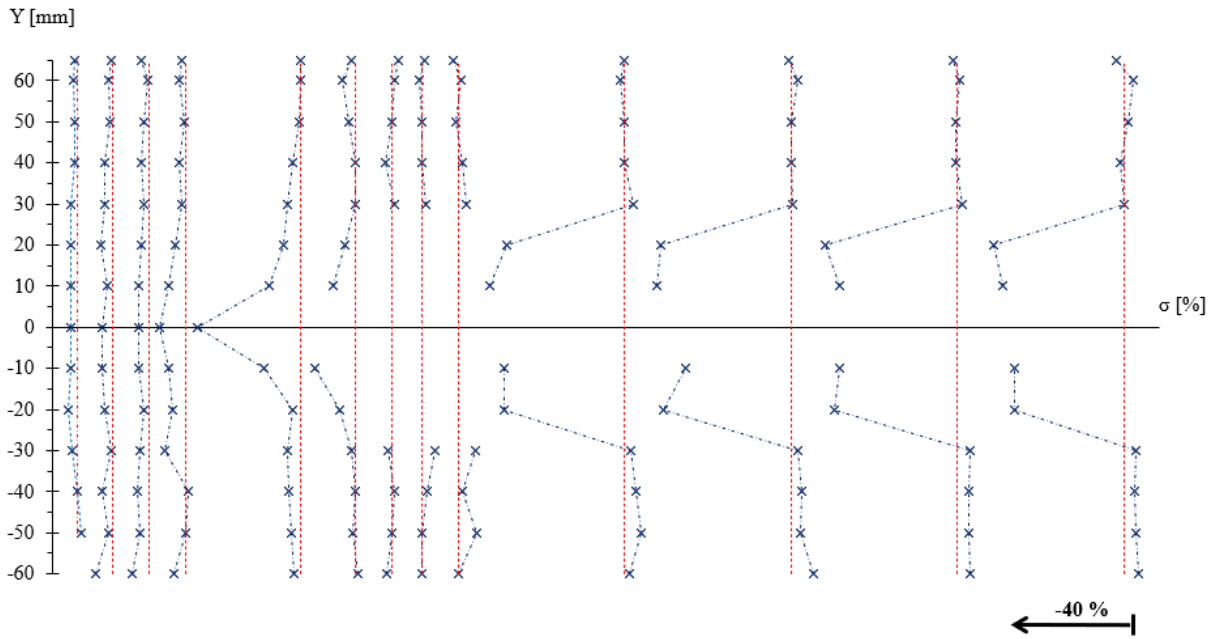
Příloha č. 4c: Graf odchylek rychlostí KR od rychlostí dle RR v závislosti na typu propeleru (propelery o průměru 30 mm)



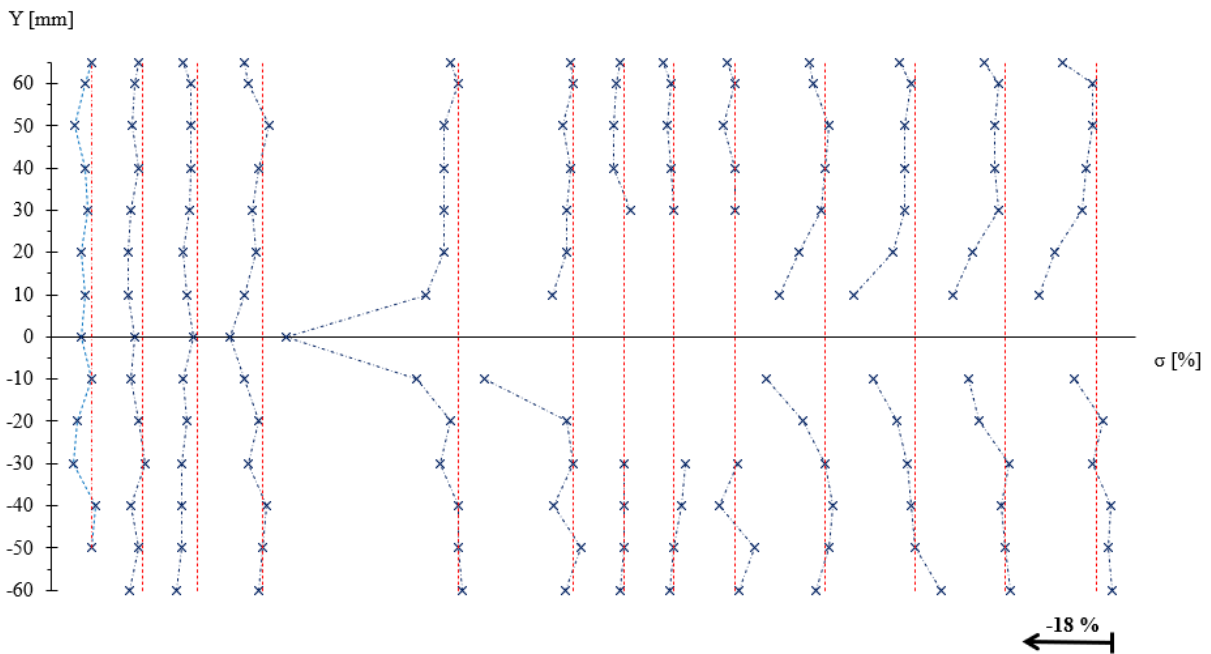
Příloha č. 5c: Graf průměrných hodnot odchylek mezi rychlostmi dle RR a KR pro skupiny rychlostí se spojnicemi trendu



Příloha č. 6a: Odchytky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P1 při 5 Hz

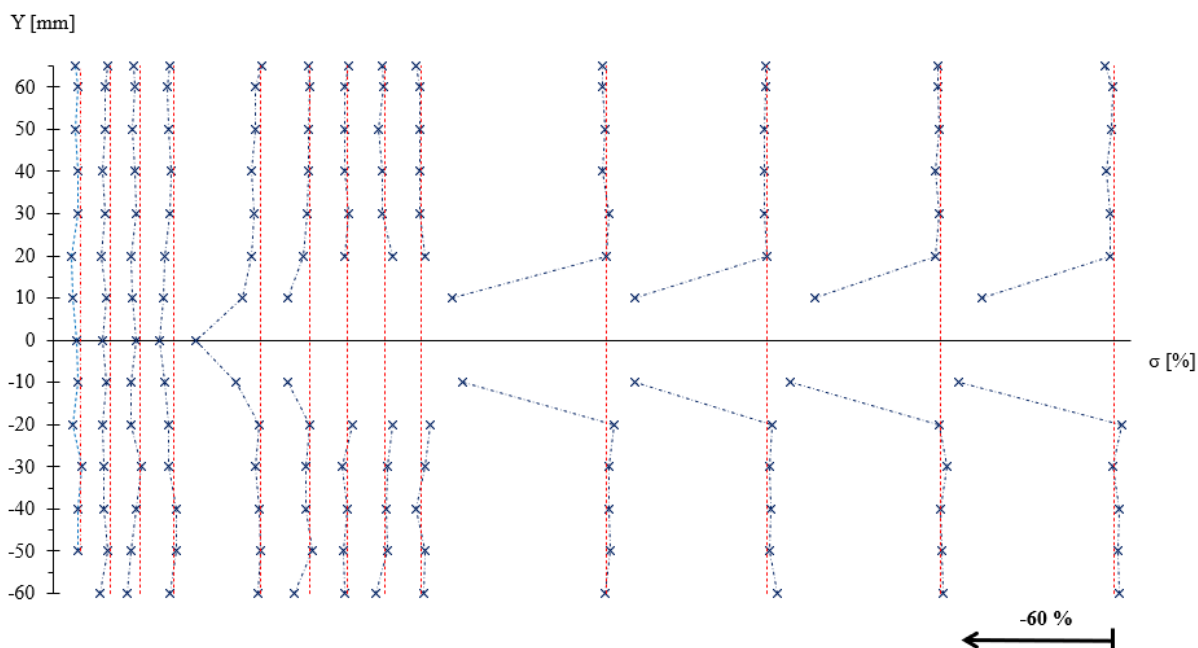


Příloha č. 6b: Odchytky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P3 při 5 Hz

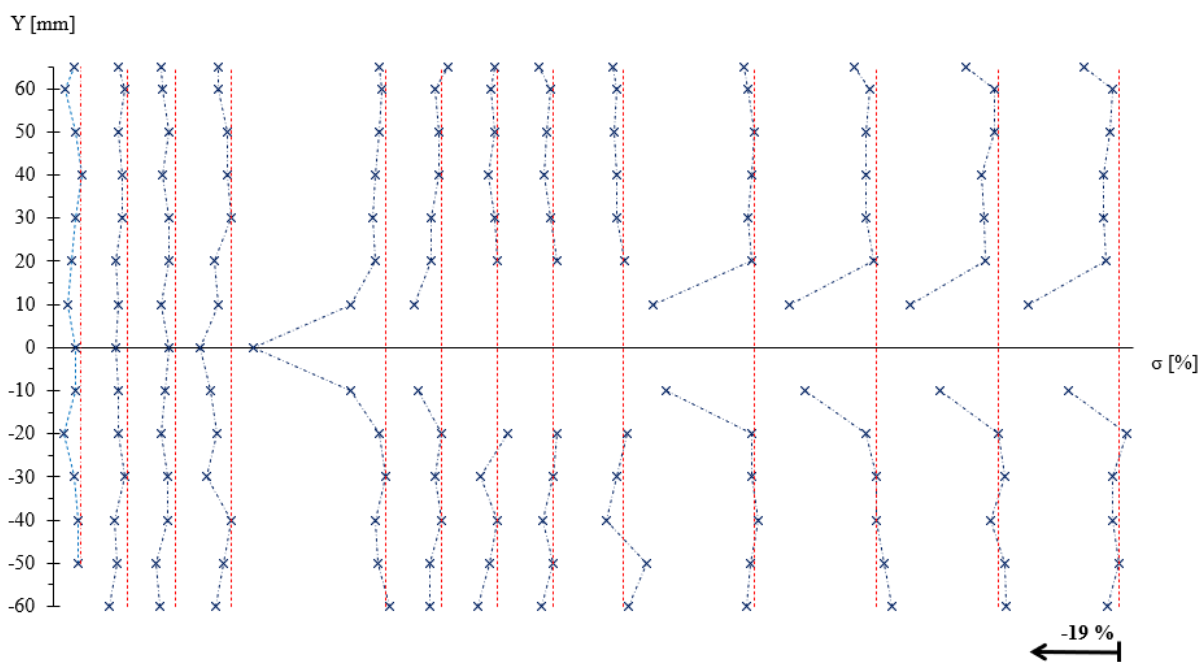




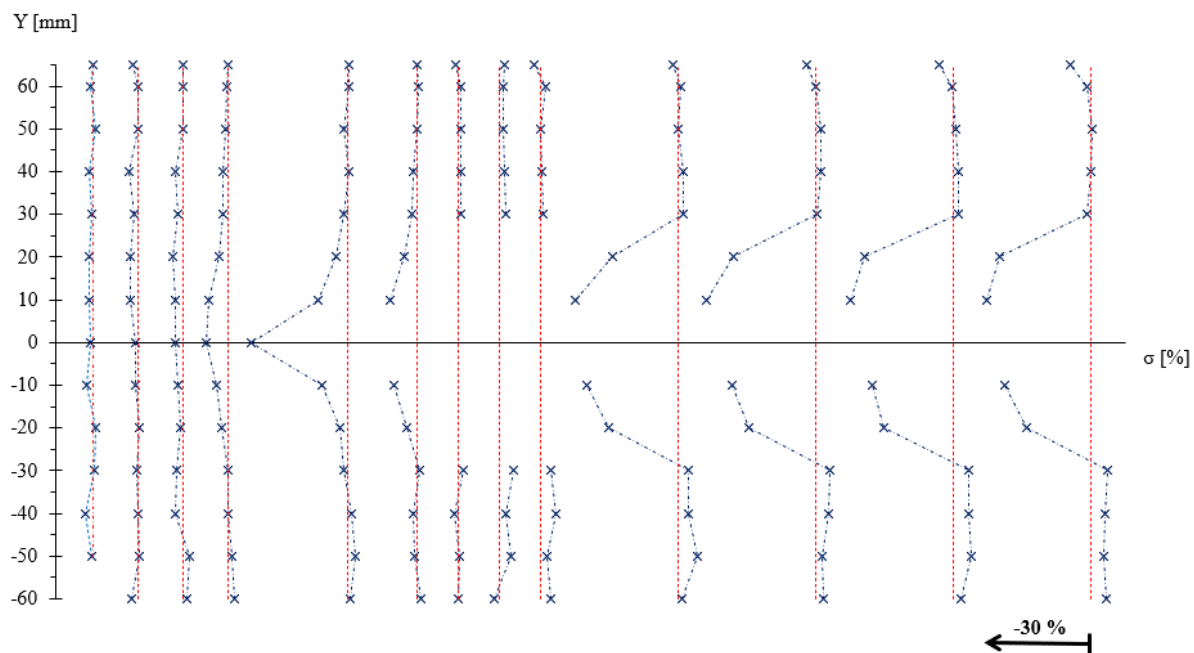
Příloha č. 6c: Odchylky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P5 při 5 Hz



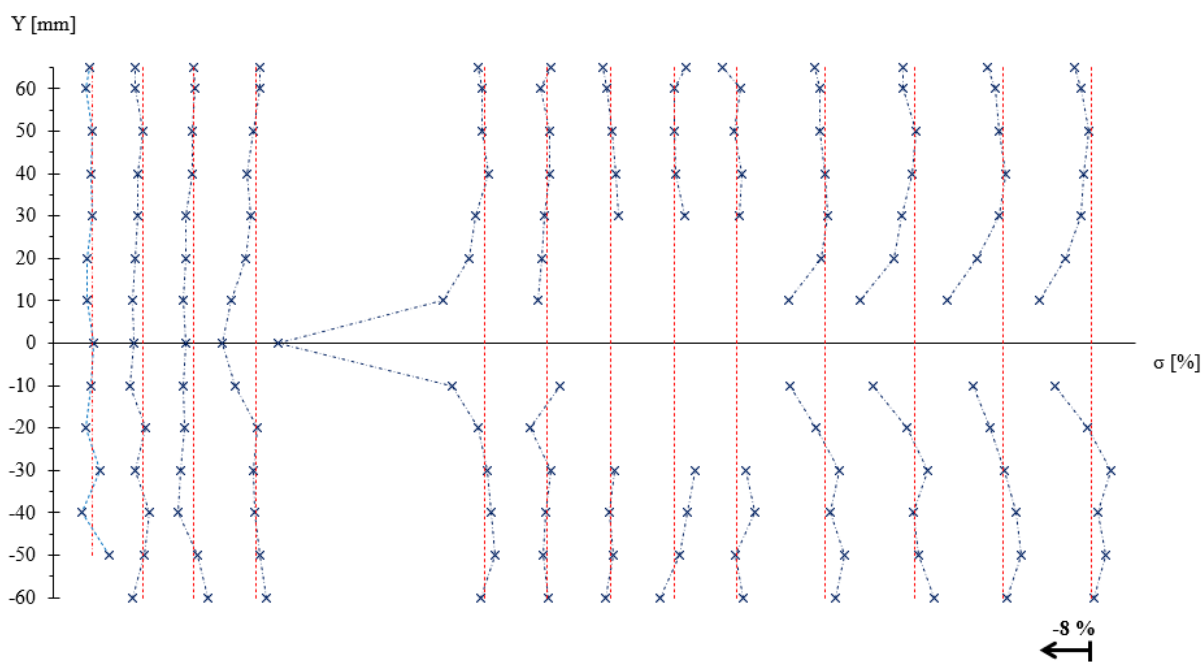
Příloha č. 6d: Odchylky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P6 při 5 Hz



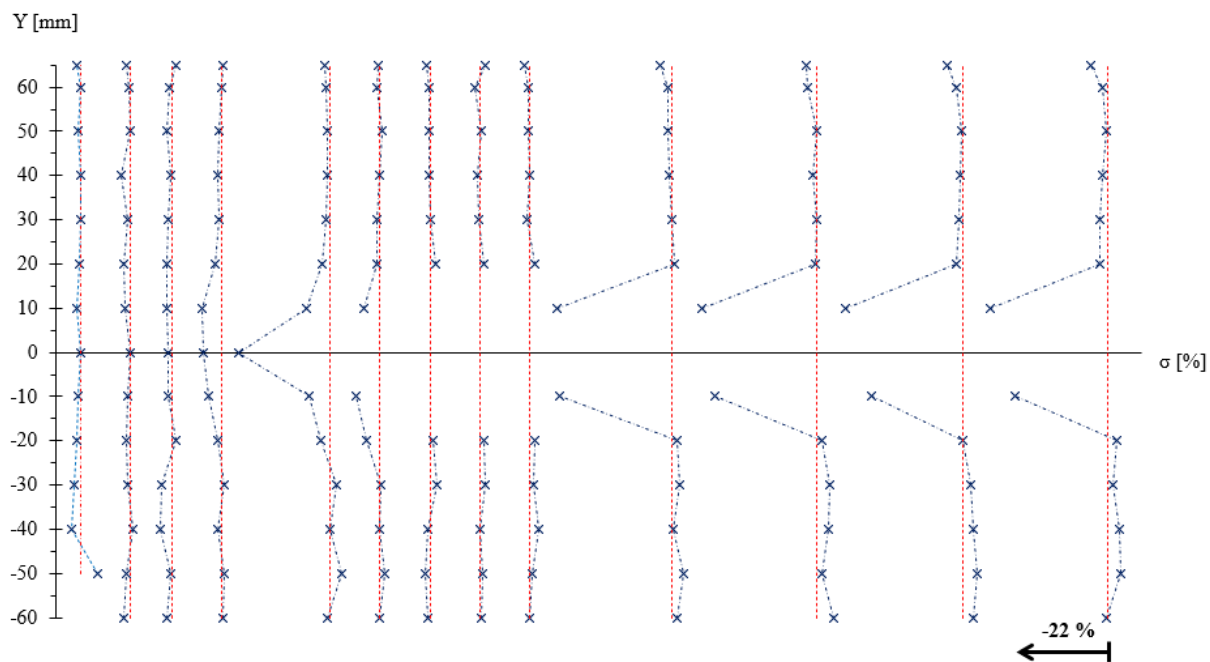
Příloha č. 6e: Odchytky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P1 při 15 Hz



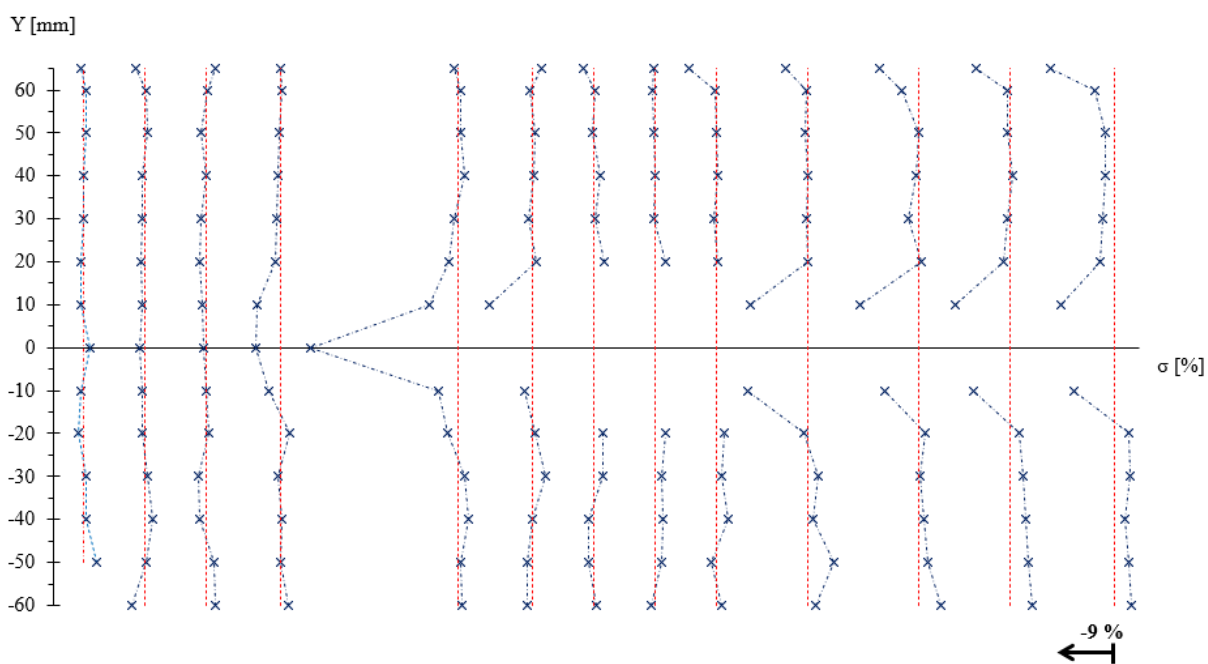
Příloha č. 6f: Odchytky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P3 při 15 Hz



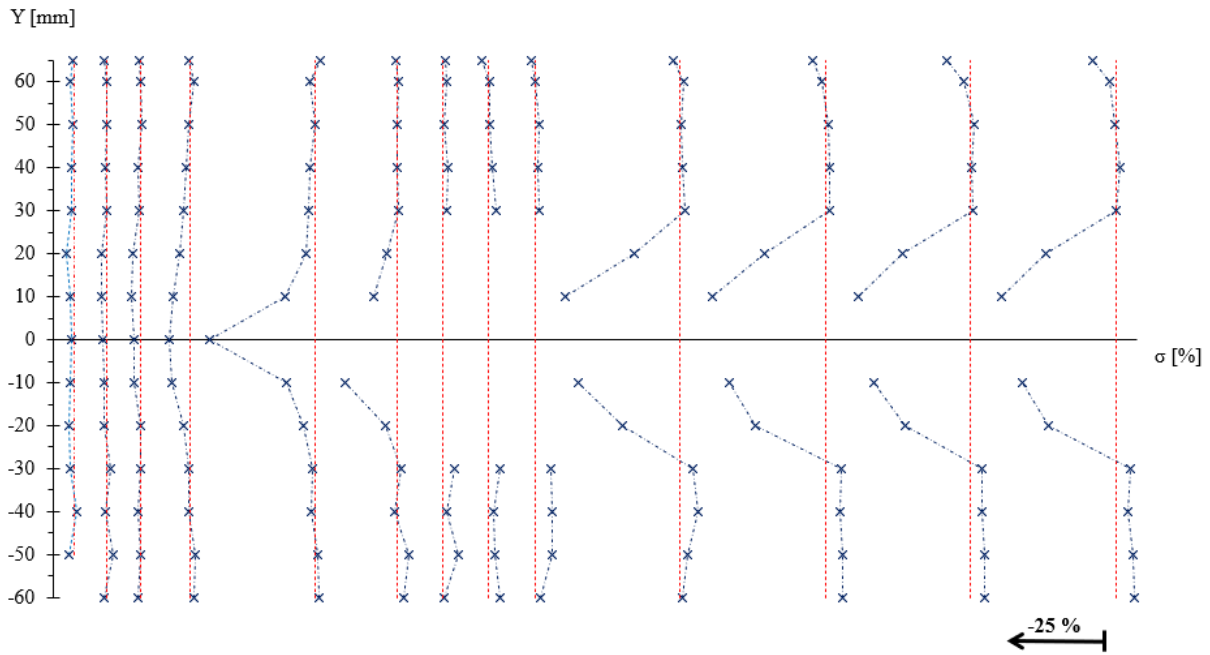
Příloha č. 6g: Odchylky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P5 při 15 Hz



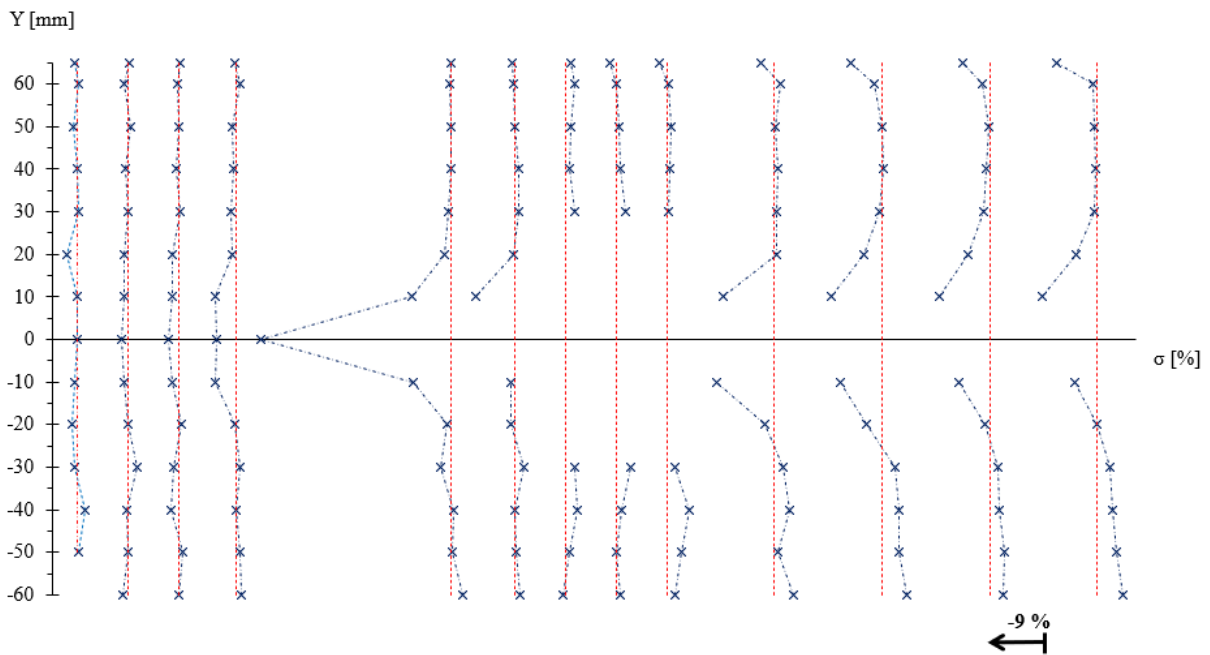
Příloha č. 6h: Odchylky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P6 při 15 Hz



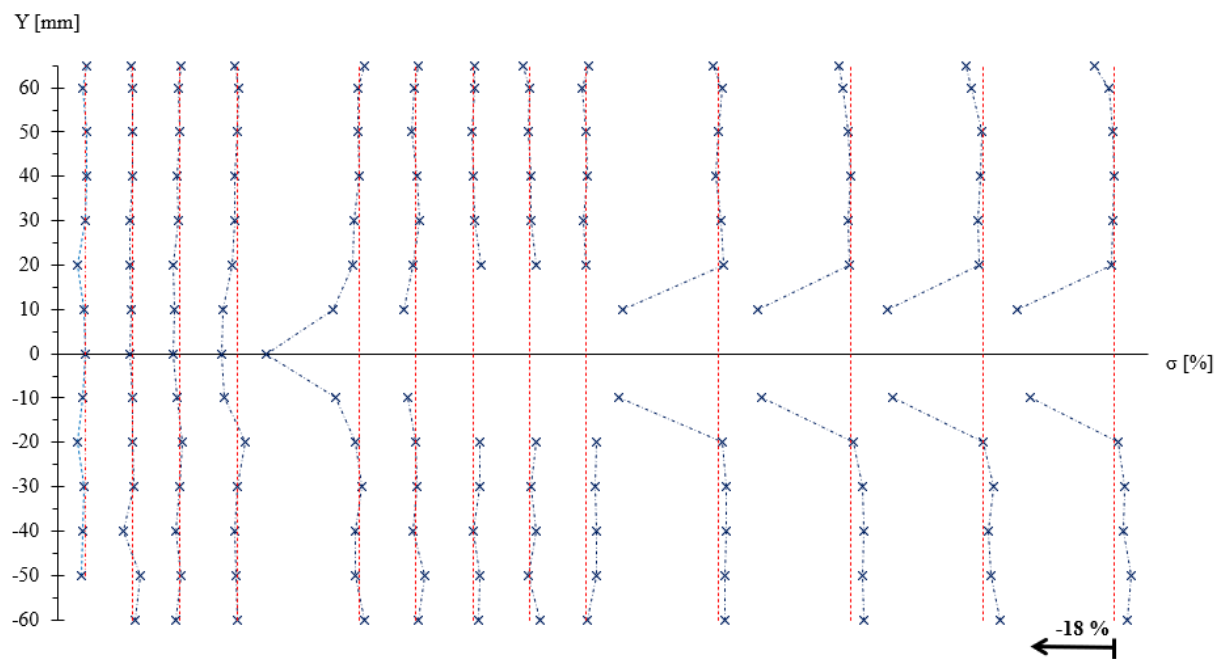
Příloha č. 6i: Odchylny rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P1 při 35 Hz



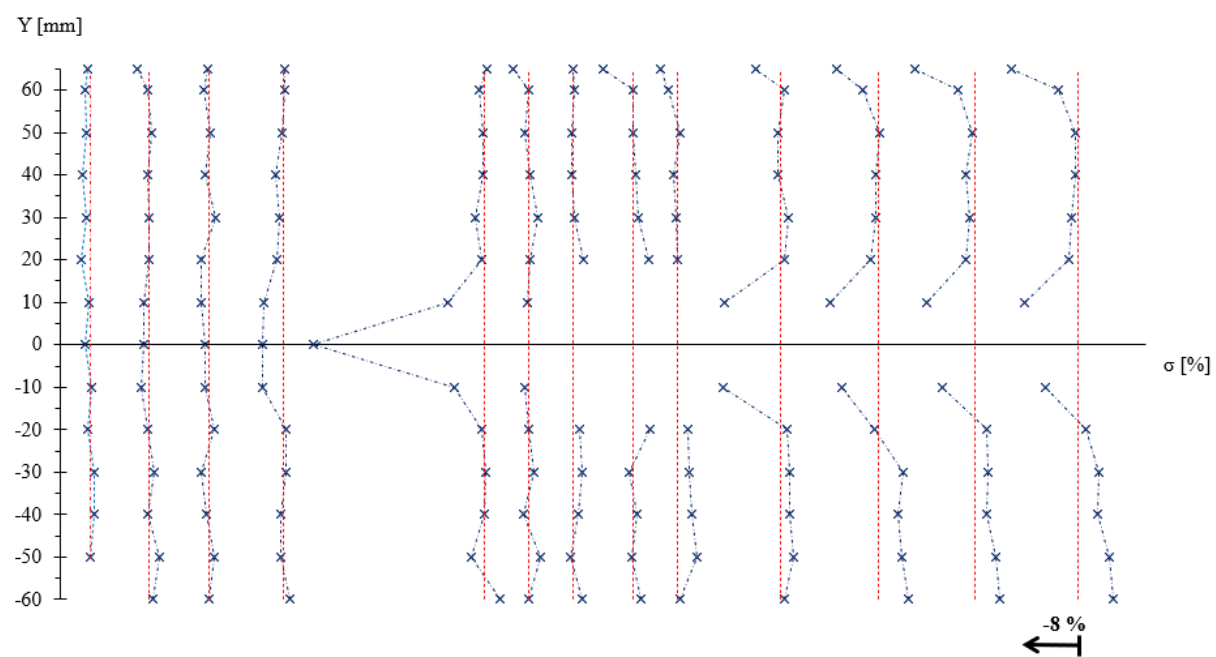
Příloha č. 6j: Odchylny rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P3 při 35 Hz



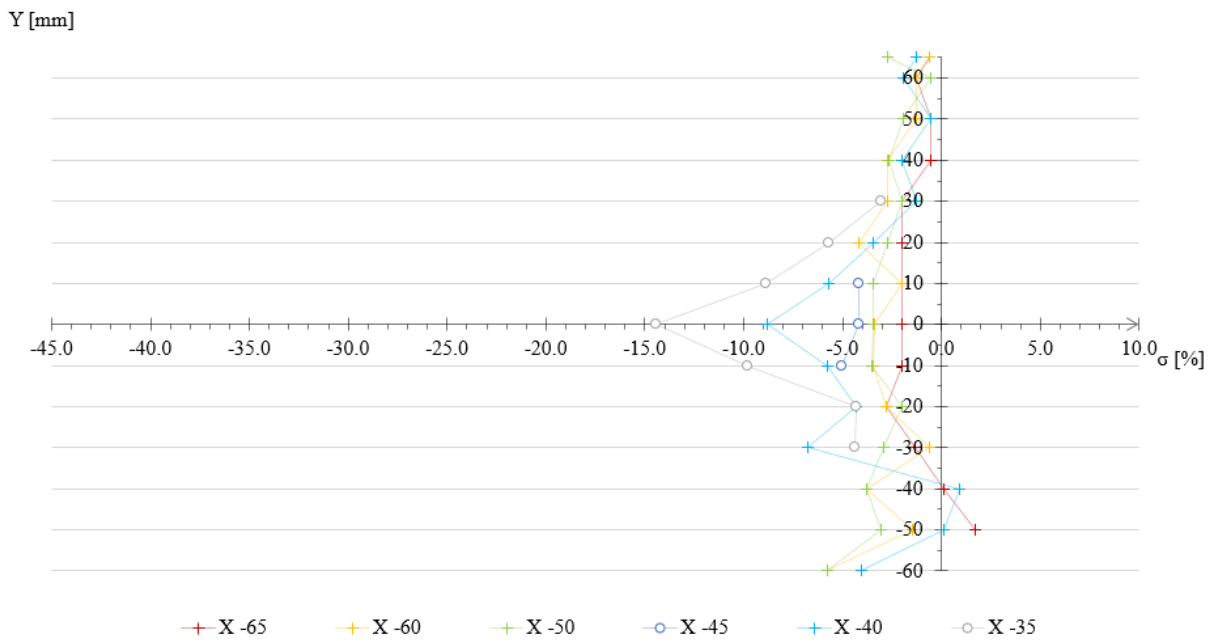
Příloha č. 6k: Odchylky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P5 při 35 Hz



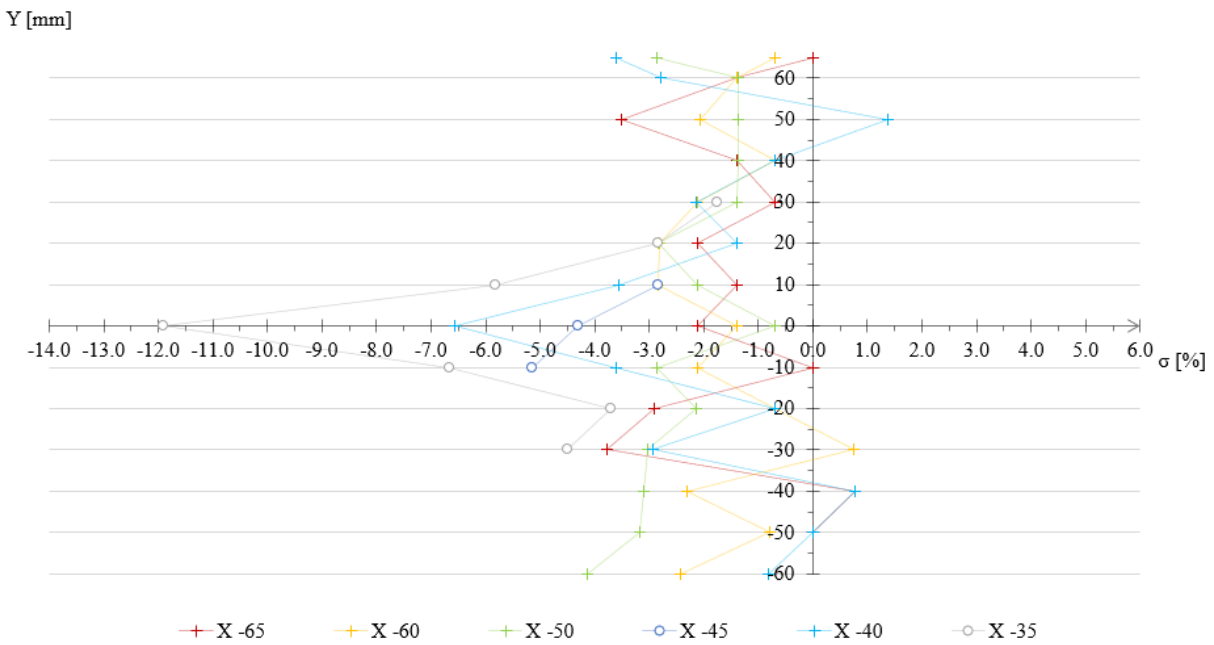
Příloha č. 6l: Odchylky rychlosti proudění v závislosti na místě řezu při ovlivnění propelerem P6 při 35 Hz



Příloha č. 7a: Odchyly rychlosti proudění před propelerem P1 při 5 Hz

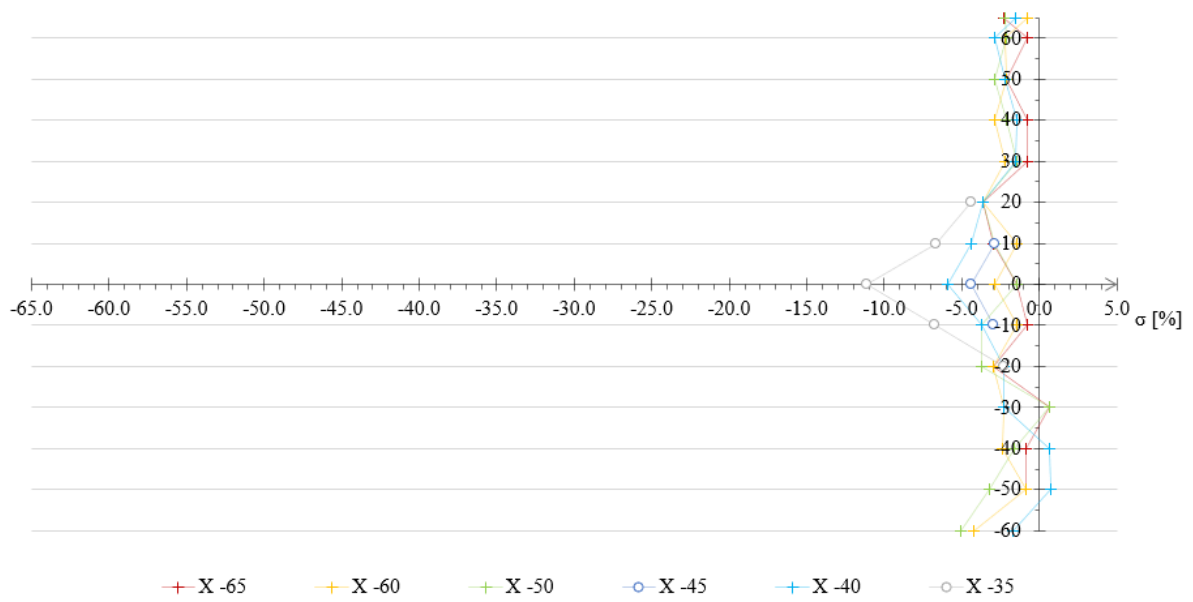


Příloha č. 7b: Odchyly rychlosti proudění před propelerem P3 při 5 Hz



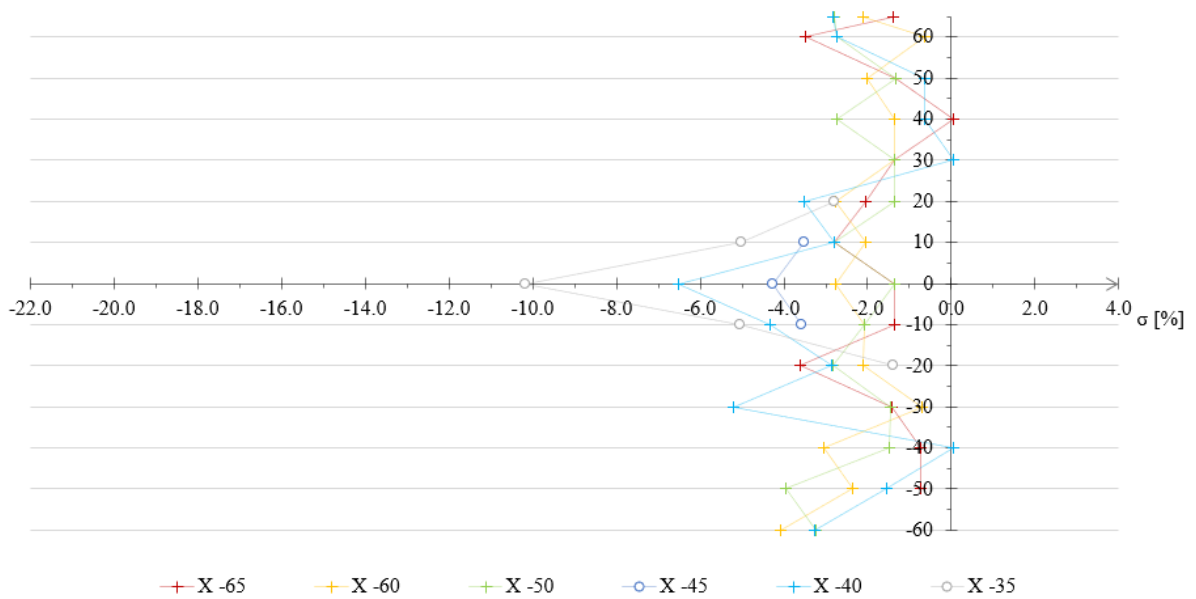
Příloha č. 7c: Odchylky rychlosti proudění před propelerem P5 při 5 Hz

Y [mm]

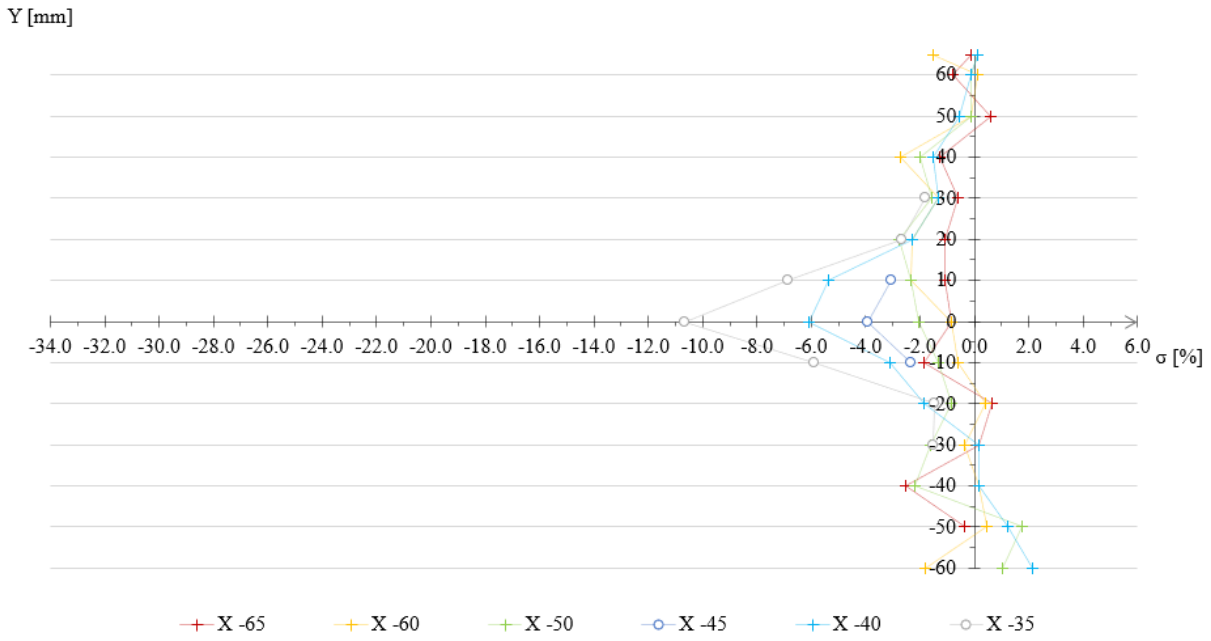


Příloha č. 7d: Odchylky rychlosti proudění před propelerem P6 při 5 Hz

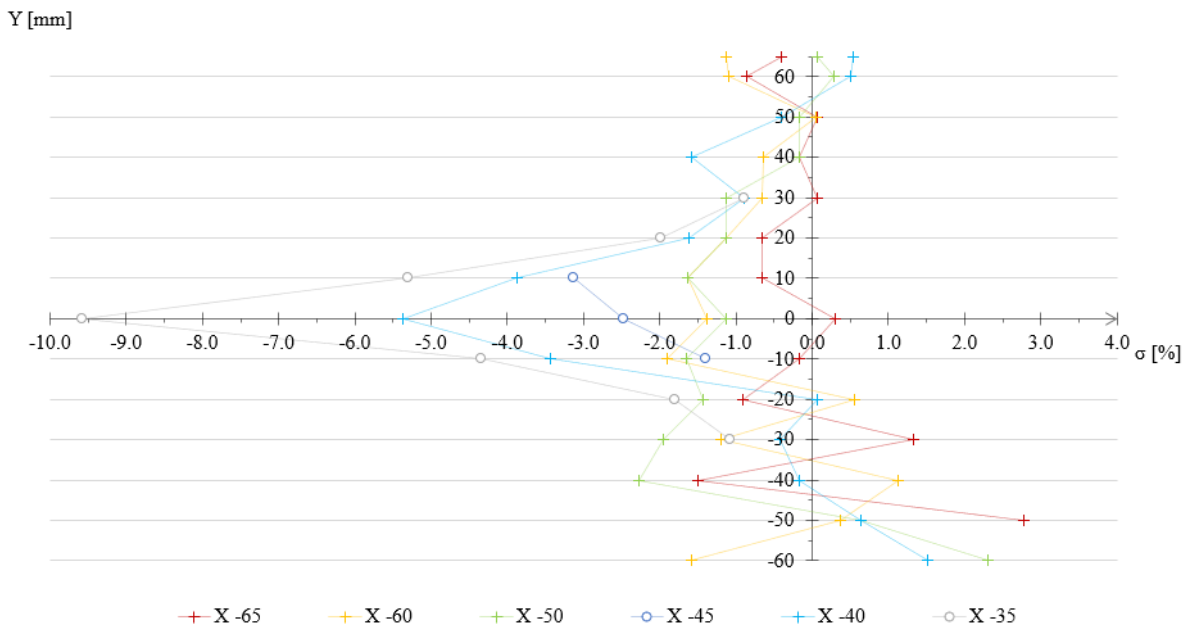
Y [mm]



Příloha č. 7e: Odchytky rychlosti proudění před propelerem P1 při 15 Hz

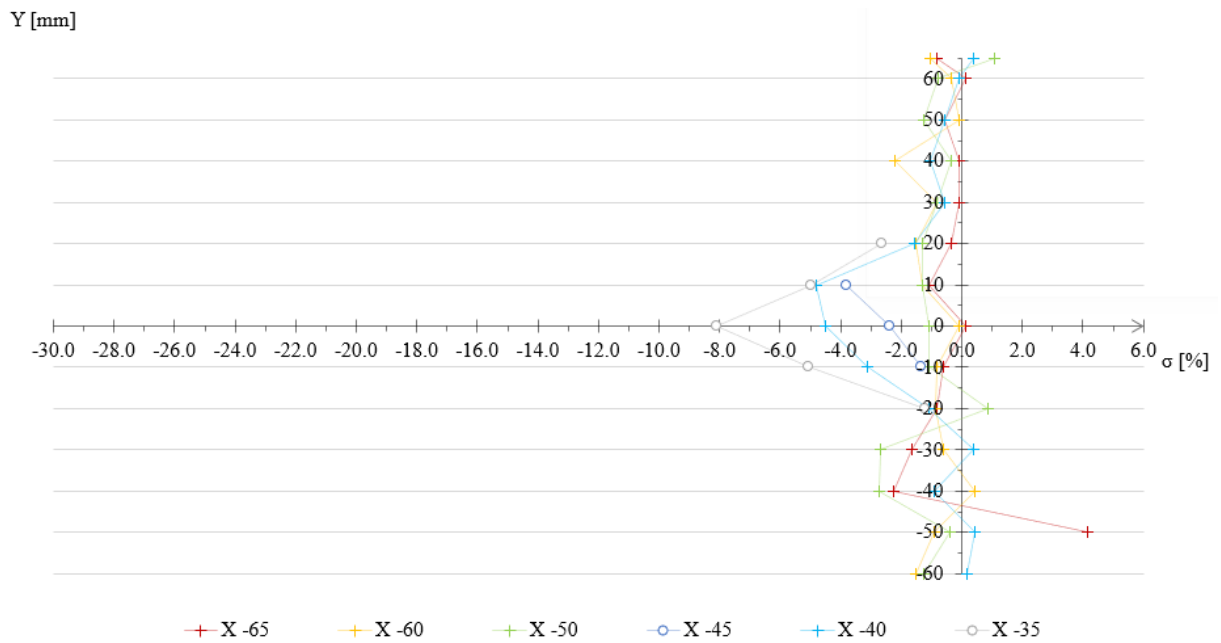


Příloha č. 7f: Odchytky rychlosti proudění před propelerem P3 při 15 Hz

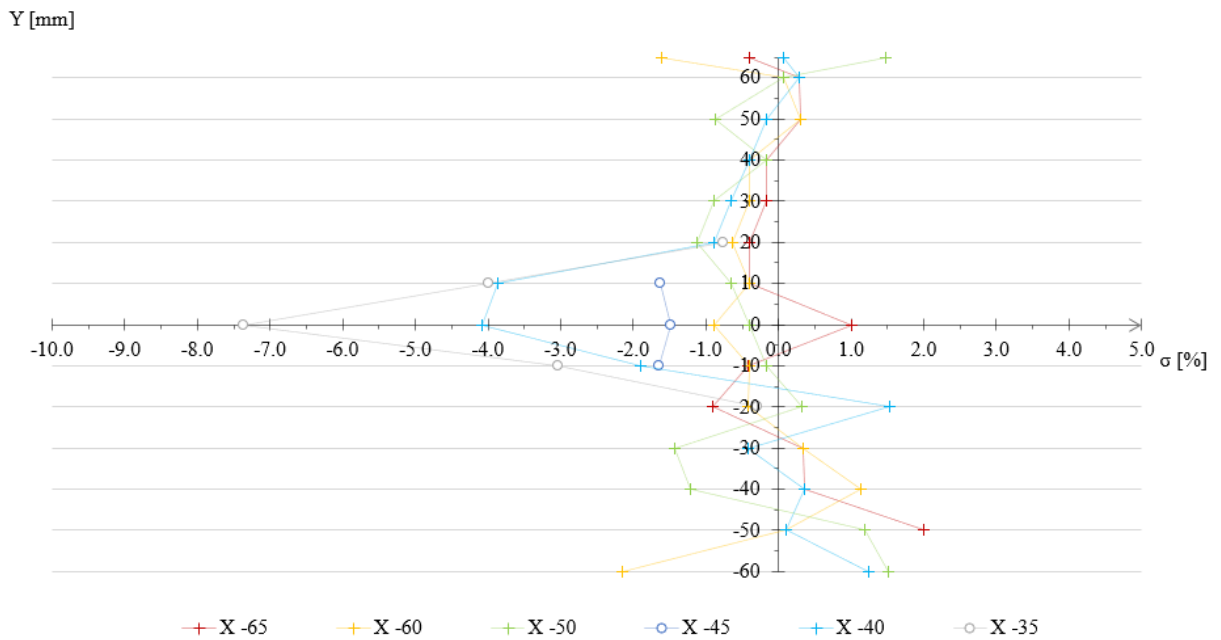




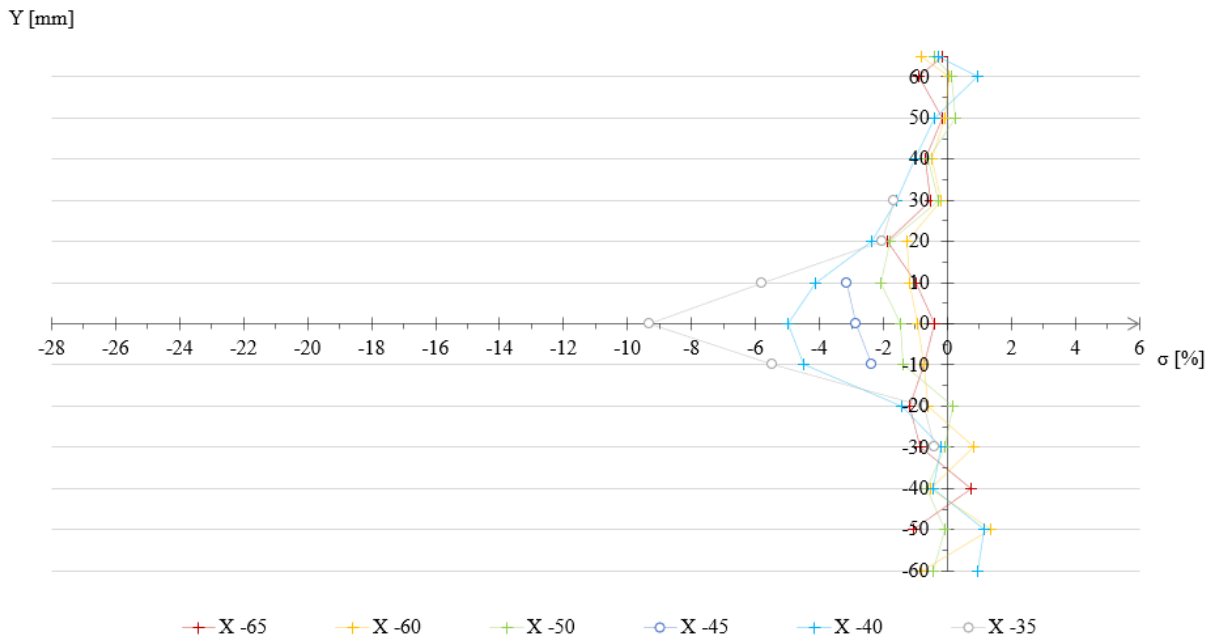
Příloha č. 7g: Odchylky rychlosti proudění před propelerem P5 při 15 Hz



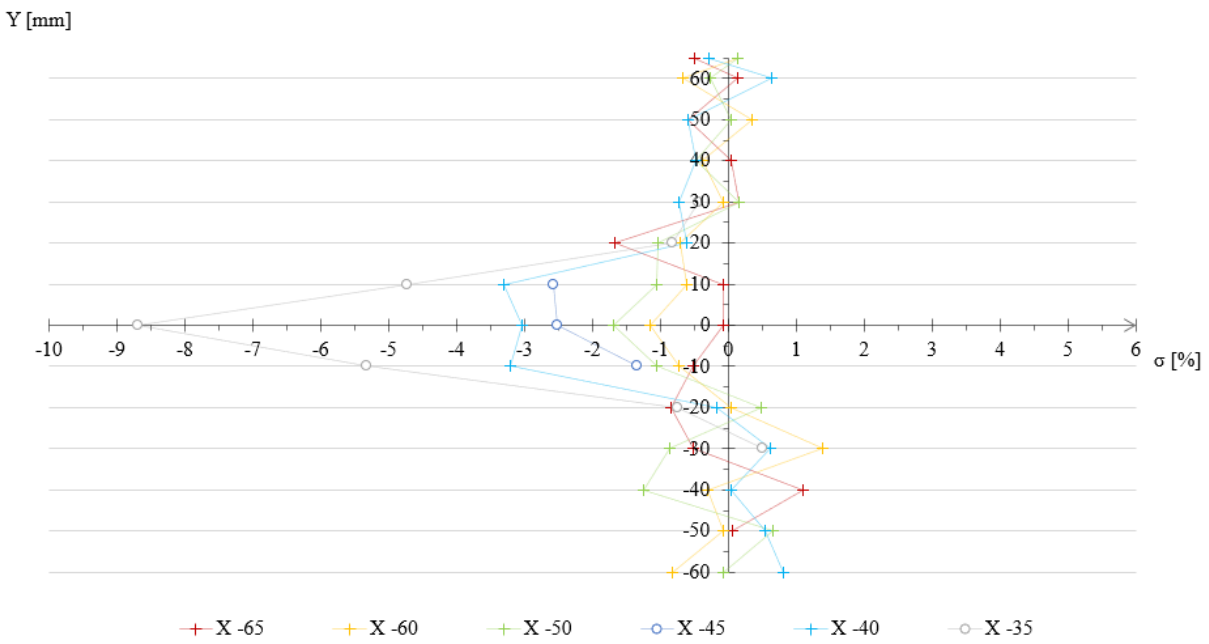
Příloha č. 7h: Odchylky rychlosti proudění před propelerem P6 při 15 Hz



Příloha č. 7i: Odchylky rychlosti proudění před propelerem P1 při 35 Hz

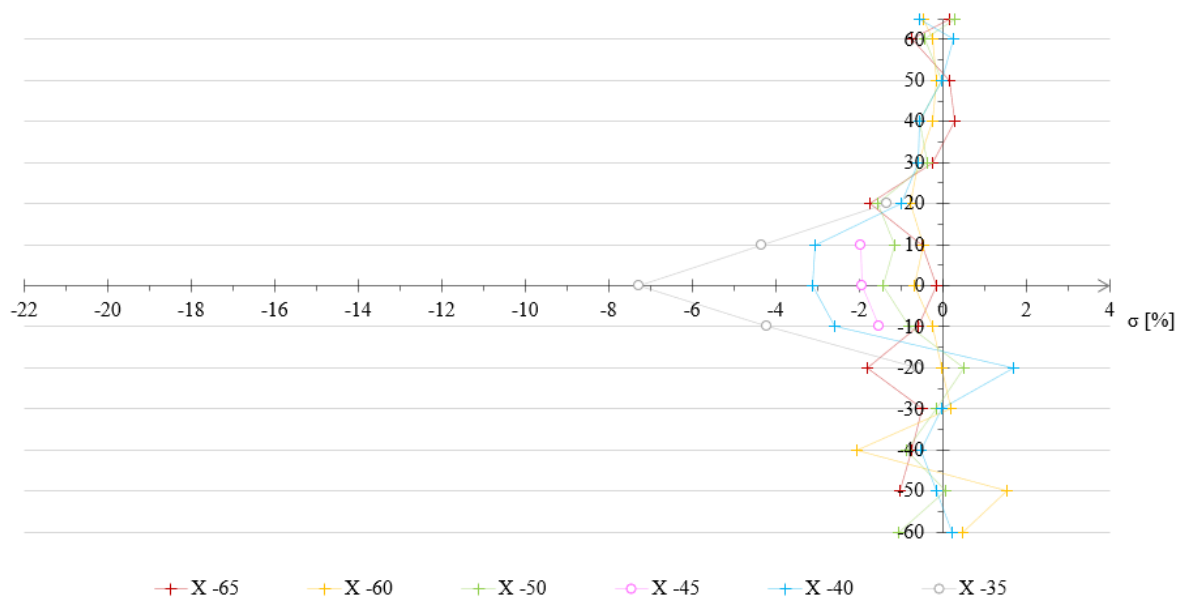


Příloha č. 7j: Odchylky rychlosti proudění před propelerem P3 při 35 Hz



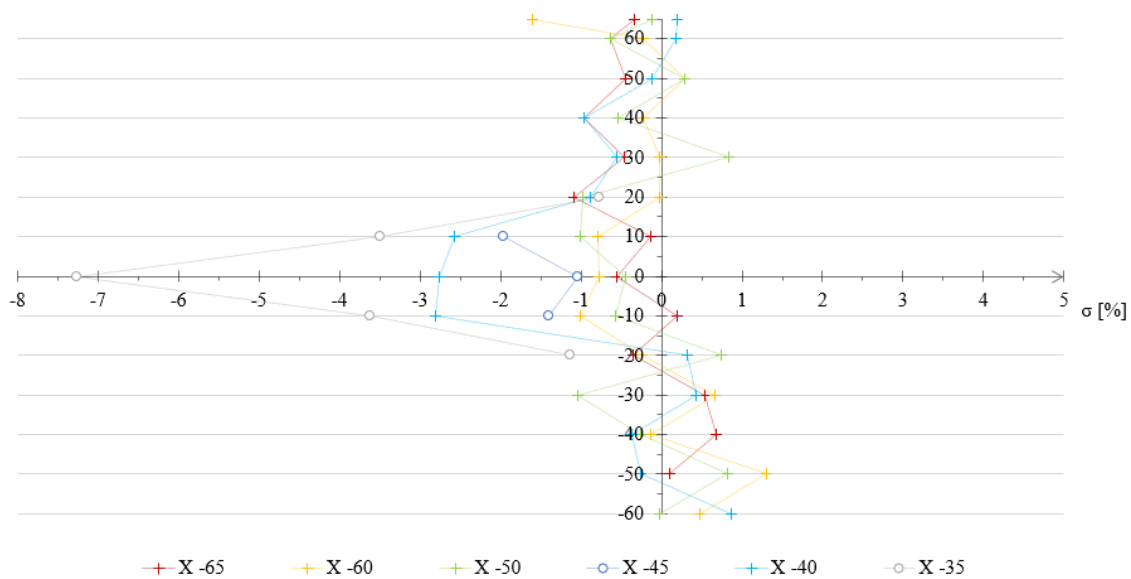
Příloha č. 7k: Odchylky rychlosti proudění před propelerem P5 při 35 Hz

Y [mm]

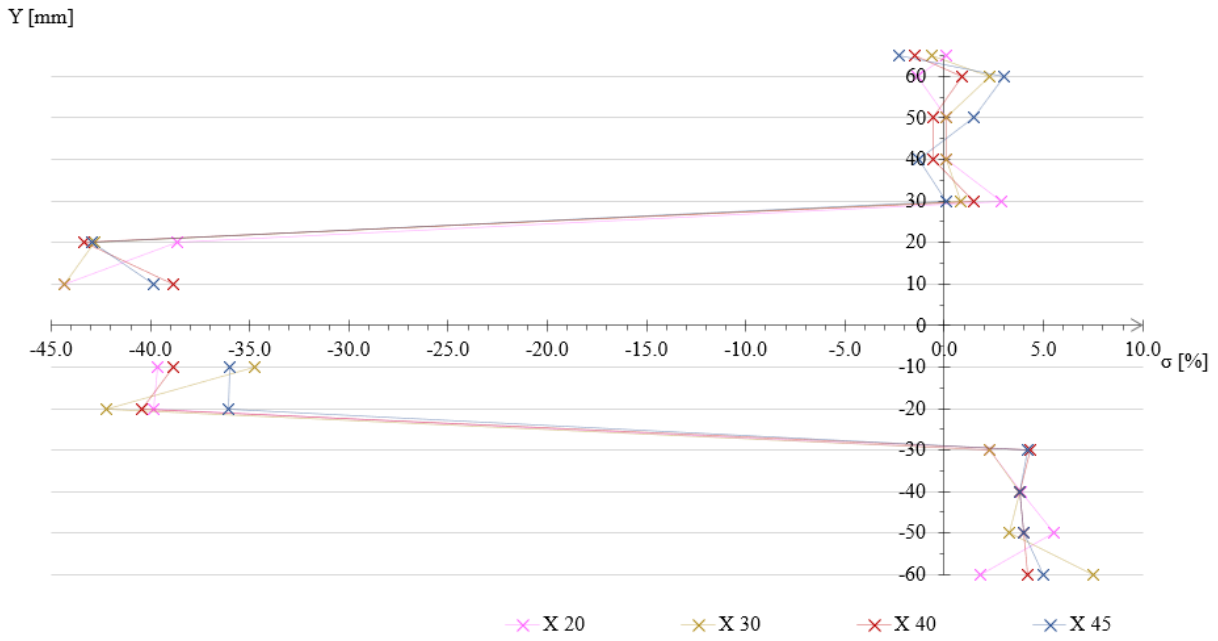


Příloha č. 7l: Odchylky rychlosti proudění před propelerem P6 při 35 Hz

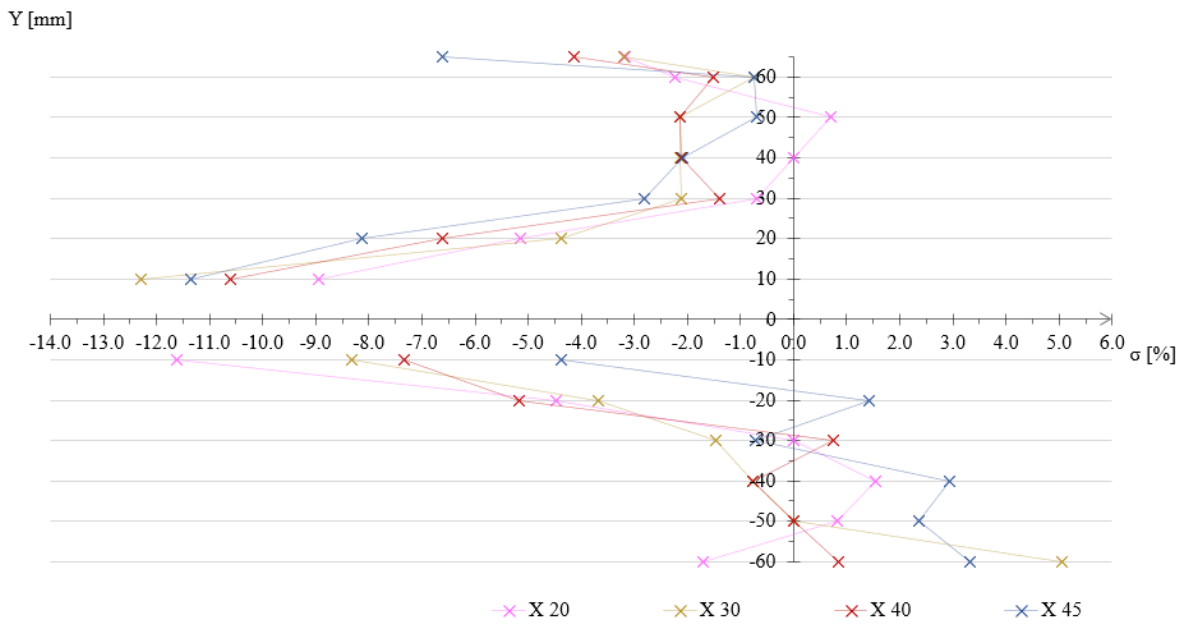
Y [mm]



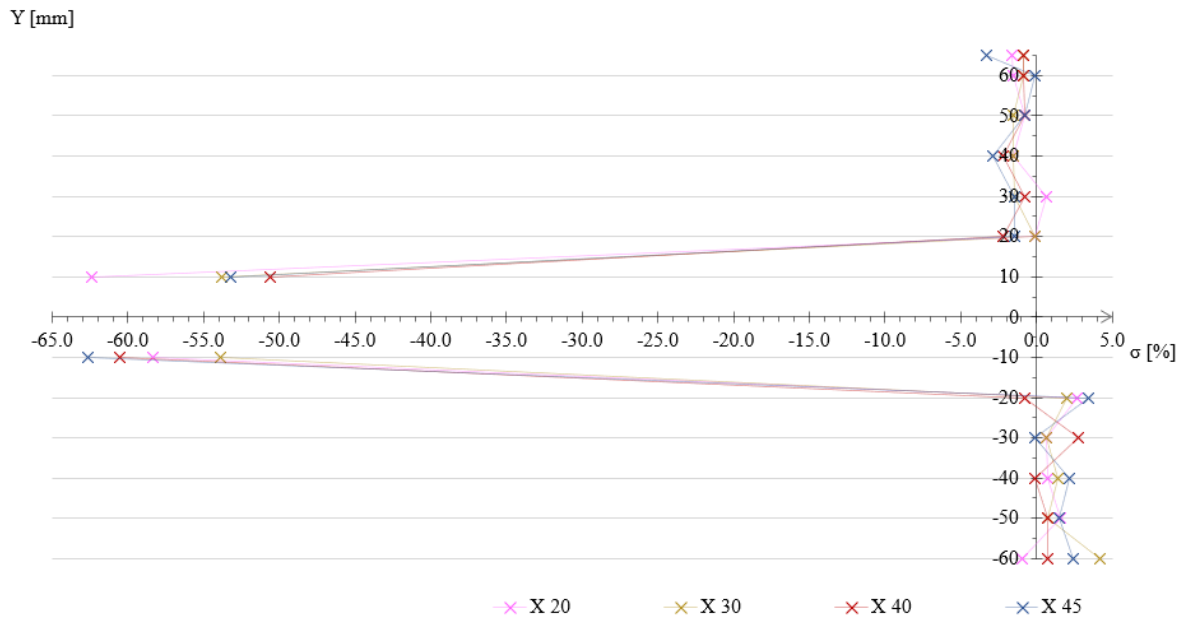
Příloha č. 8a: Odchyly rychlosti proudění za propelerem P1 při 5 Hz



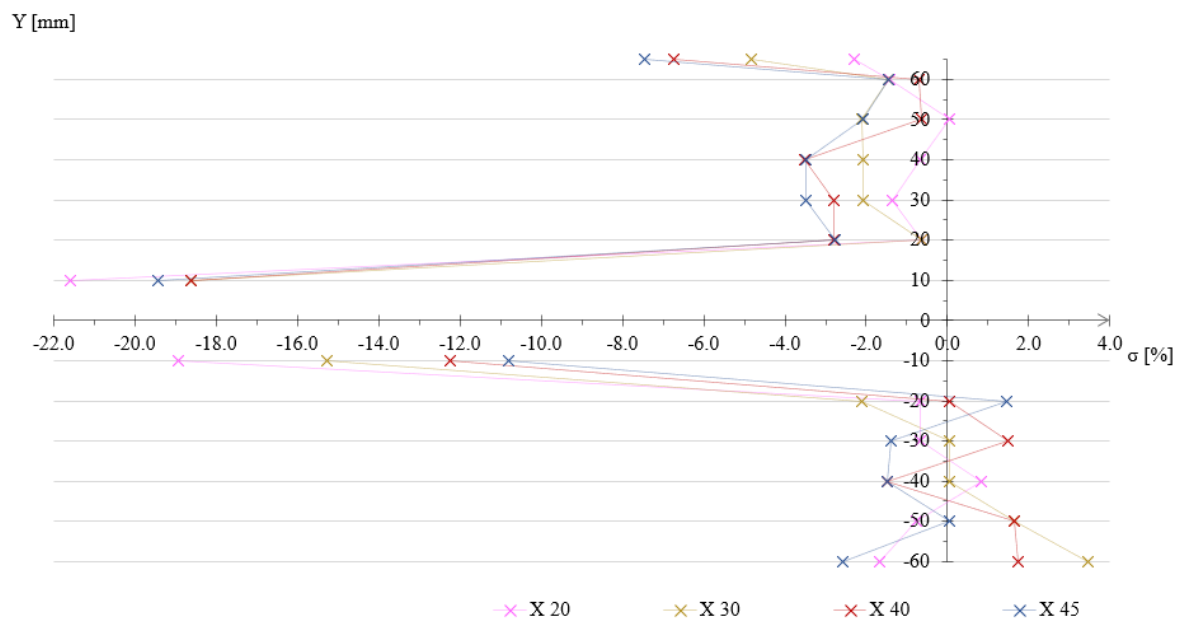
Příloha č. 8b: Odchyly rychlosti proudění za propelerem P3 při 5 Hz



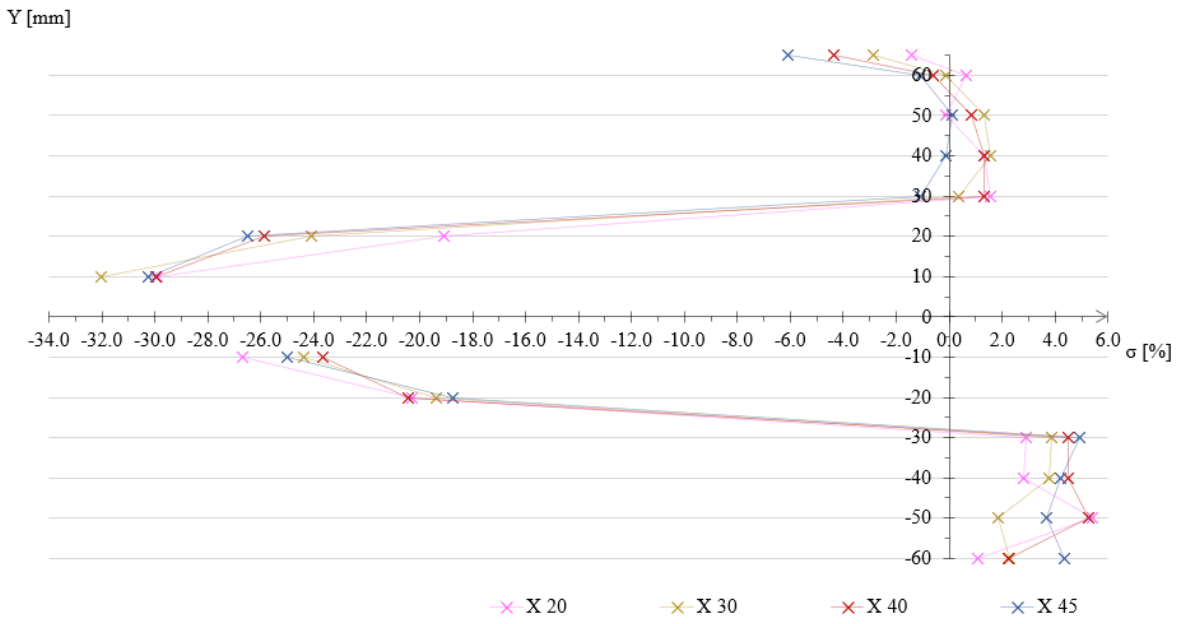
Příloha č. 8c: Odchylky rychlosti proudění za propelerem P5 při 5 Hz



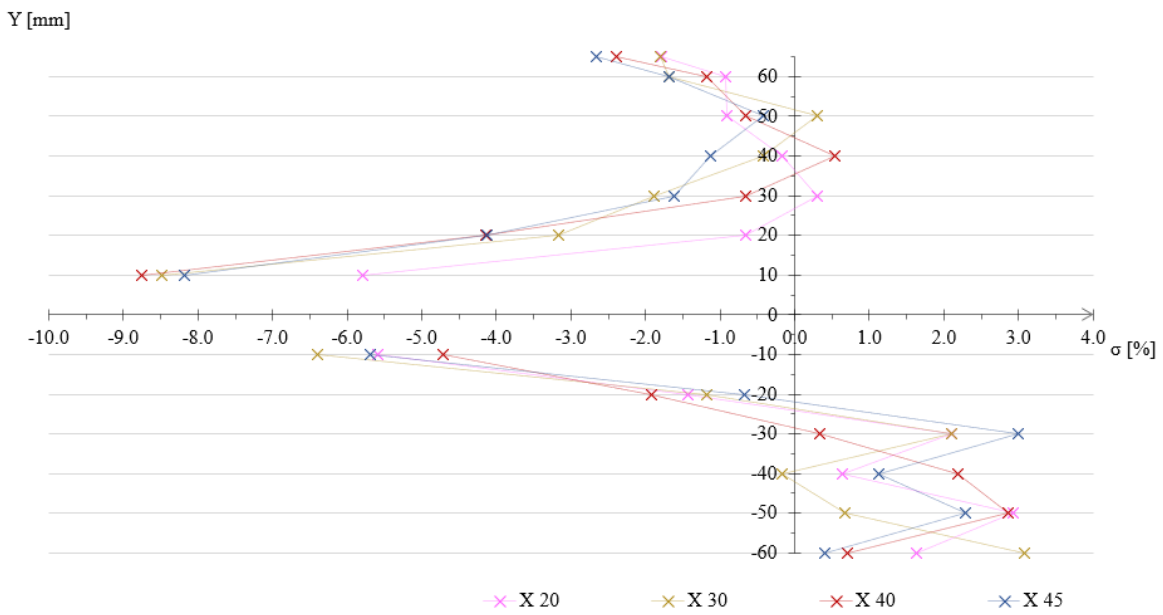
Příloha č. 8d: Odchylky rychlosti proudění za propelerem P6 při 5 Hz



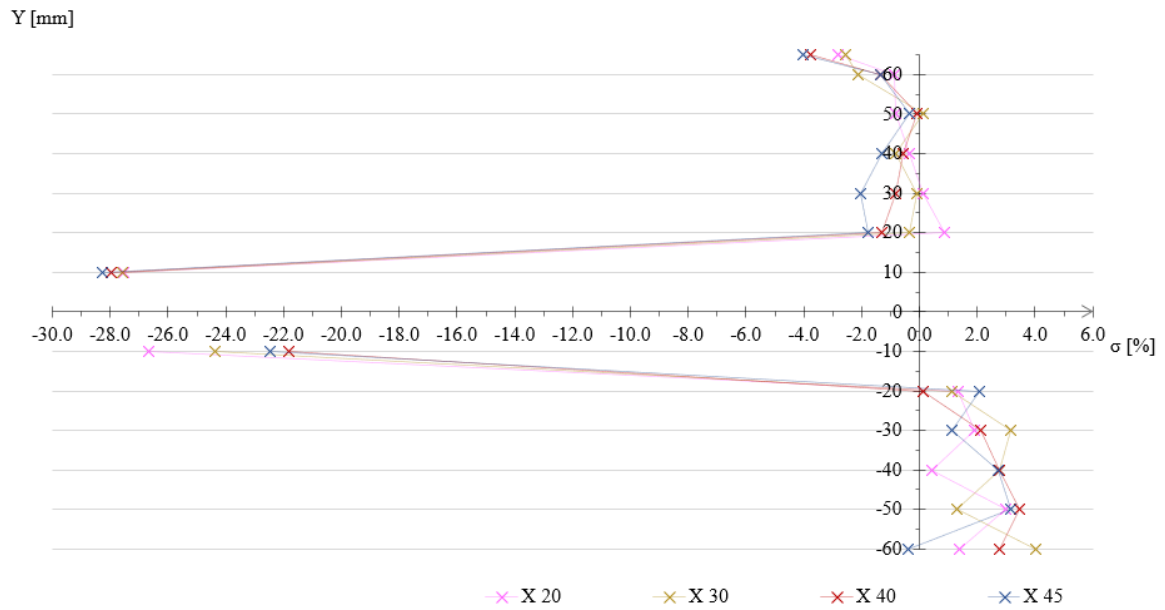
Příloha č. 8e: Odchytky rychlosti proudění za propelerem P1 při 15 Hz



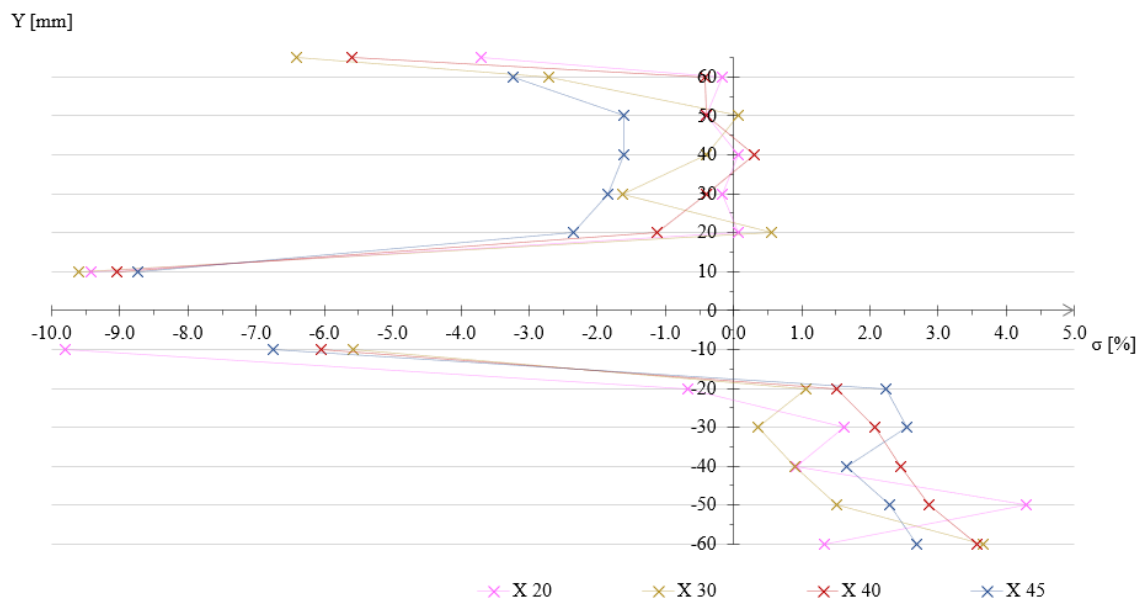
Příloha č. 8f: Odchytky rychlosti proudění za propelerem P3 při 15 Hz



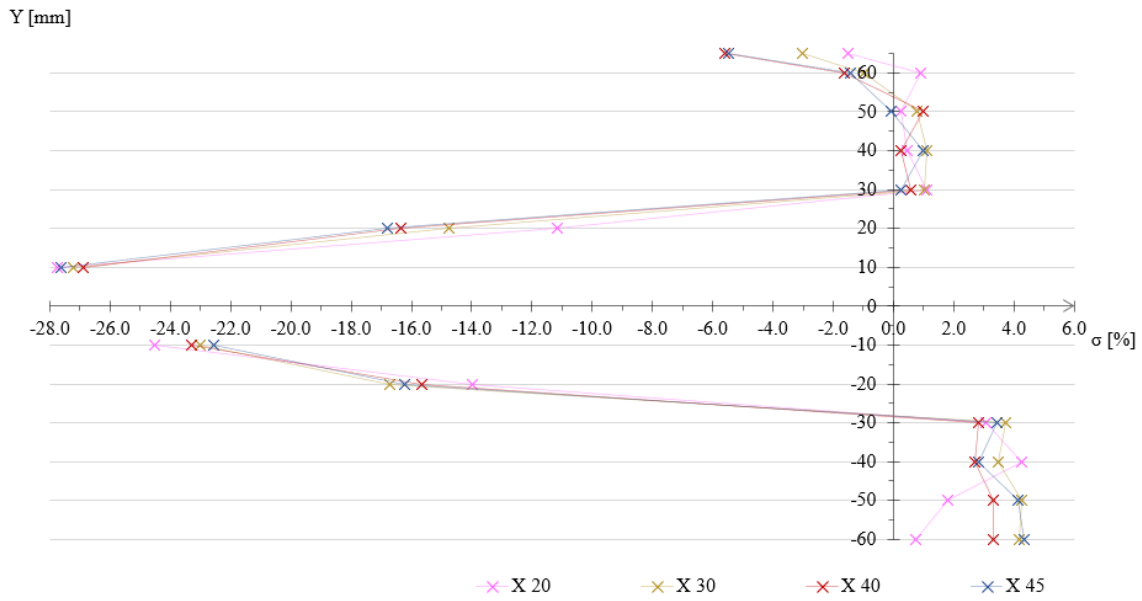
Příloha č. 8g: Odchylky rychlosti proudění za propelerem P5 při 15 Hz



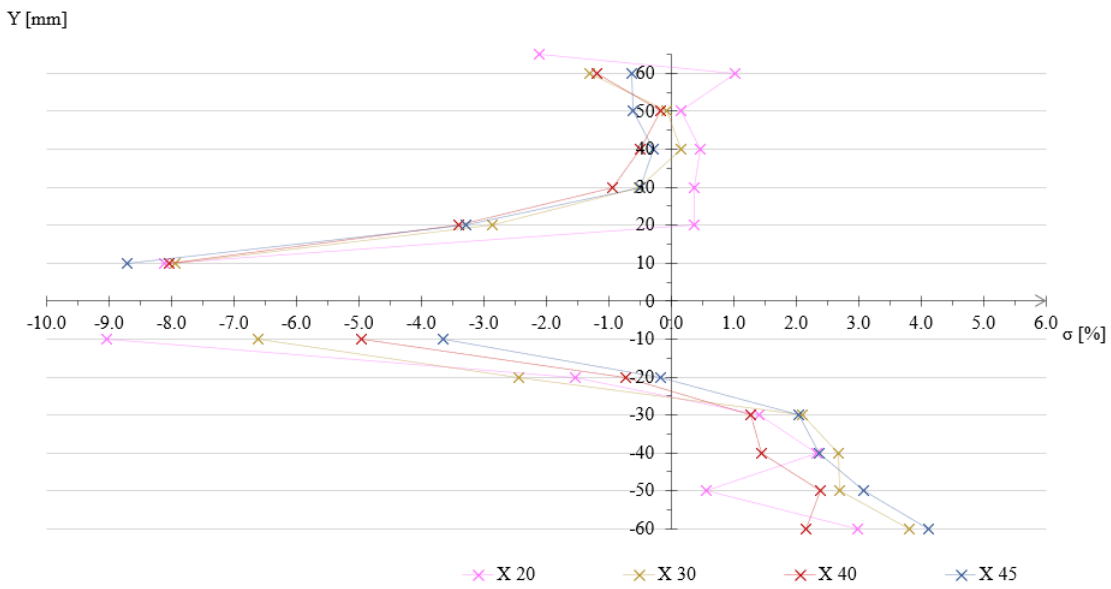
Příloha č. 8h: Odchylky rychlosti proudění za propelerem P6 při 15 Hz



Příloha č. 8i: Odchytky rychlosti proudění za propelerem P1 při 35 Hz

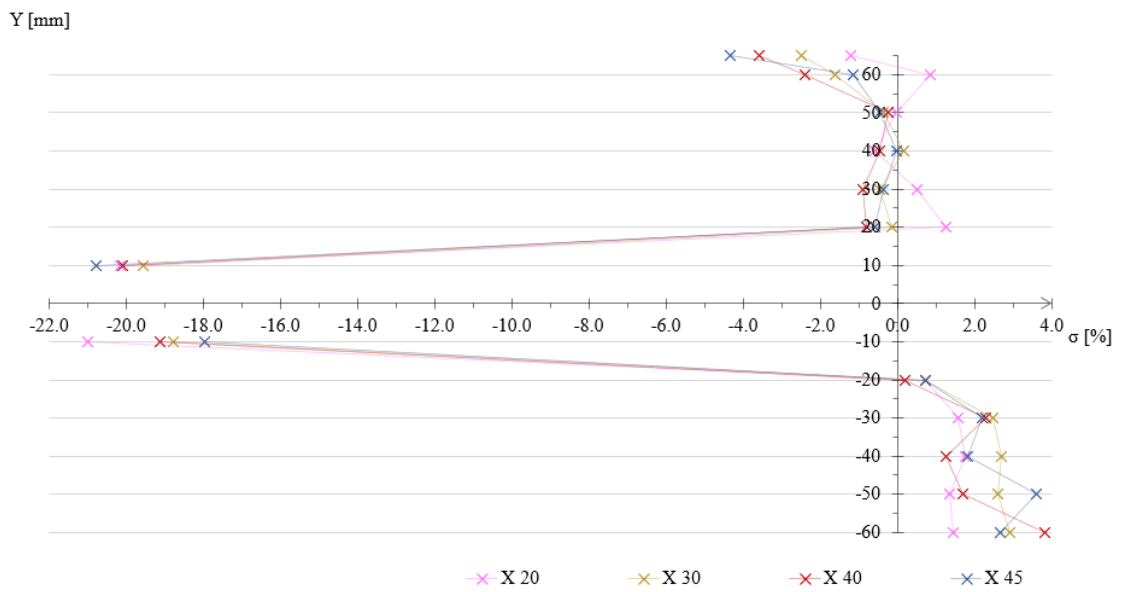


Příloha č. 8j: Odchytky rychlosti proudění za propelerem P3 při 35 Hz

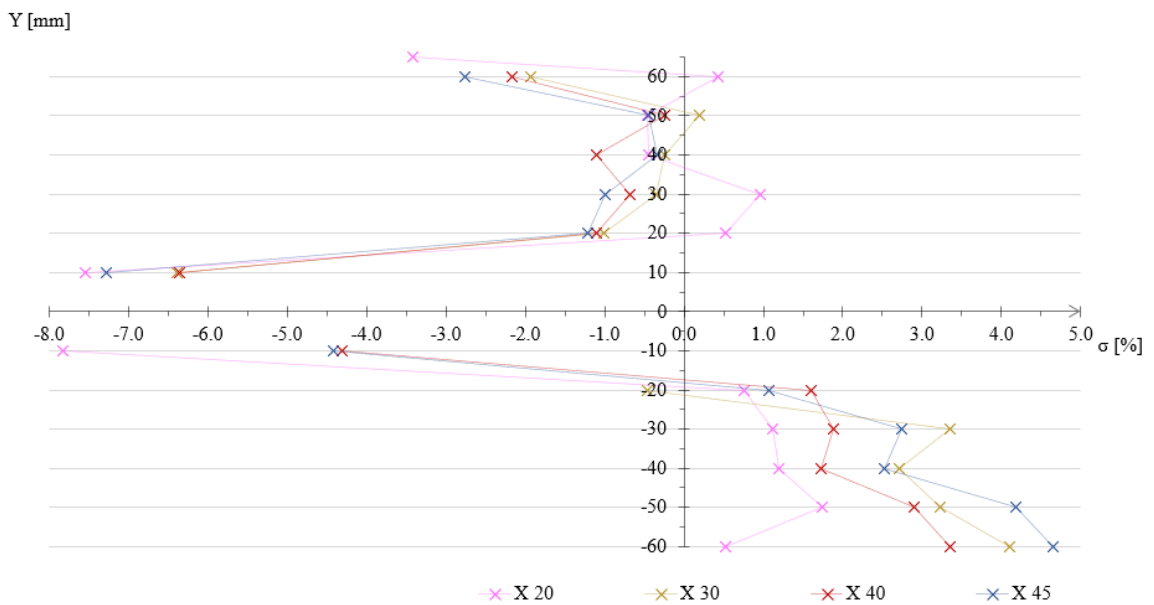




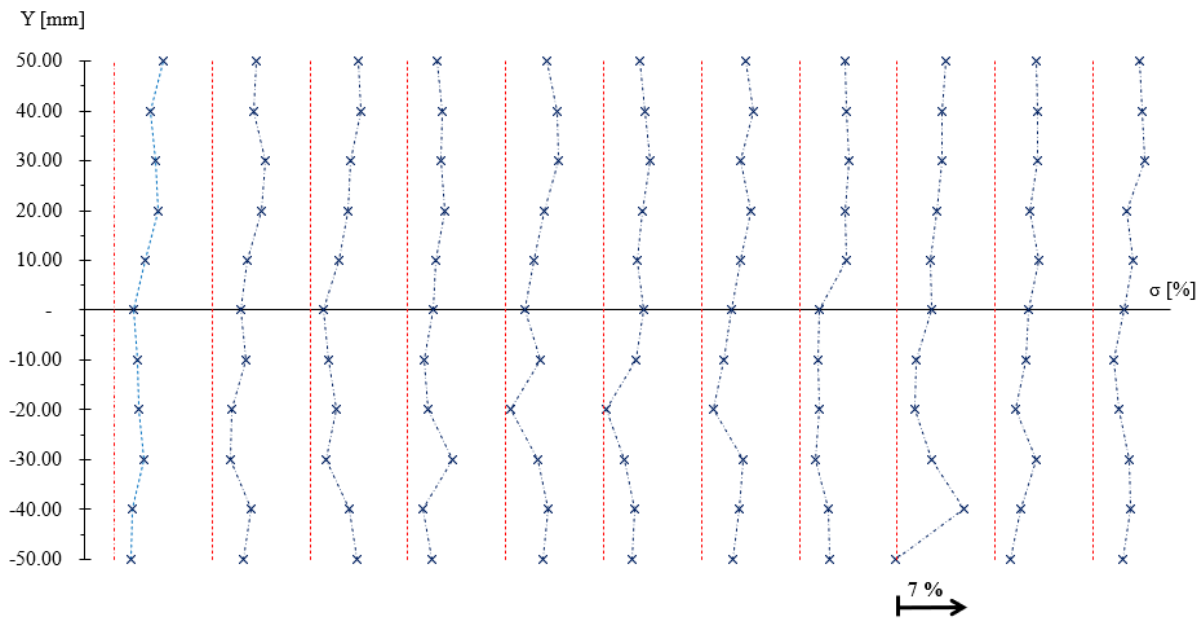
Příloha č. 8k: Odchylky rychlosti proudění za propelerem P5 při 35 Hz



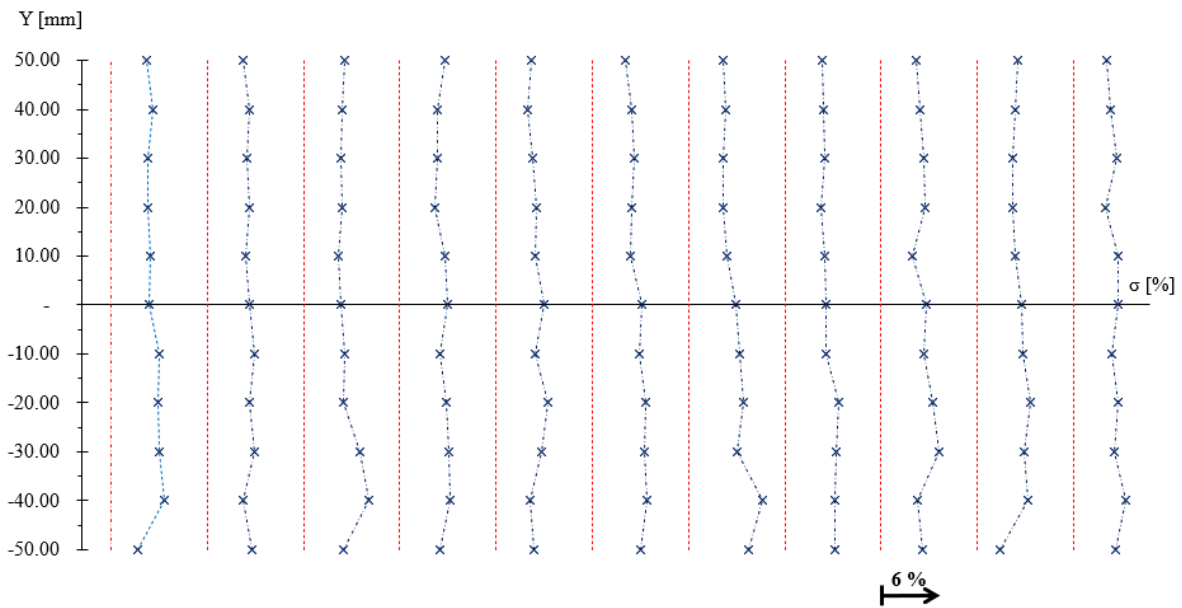
Příloha č. 8l: Odchylky rychlosti proudění za propelerem P6 při 35 Hz



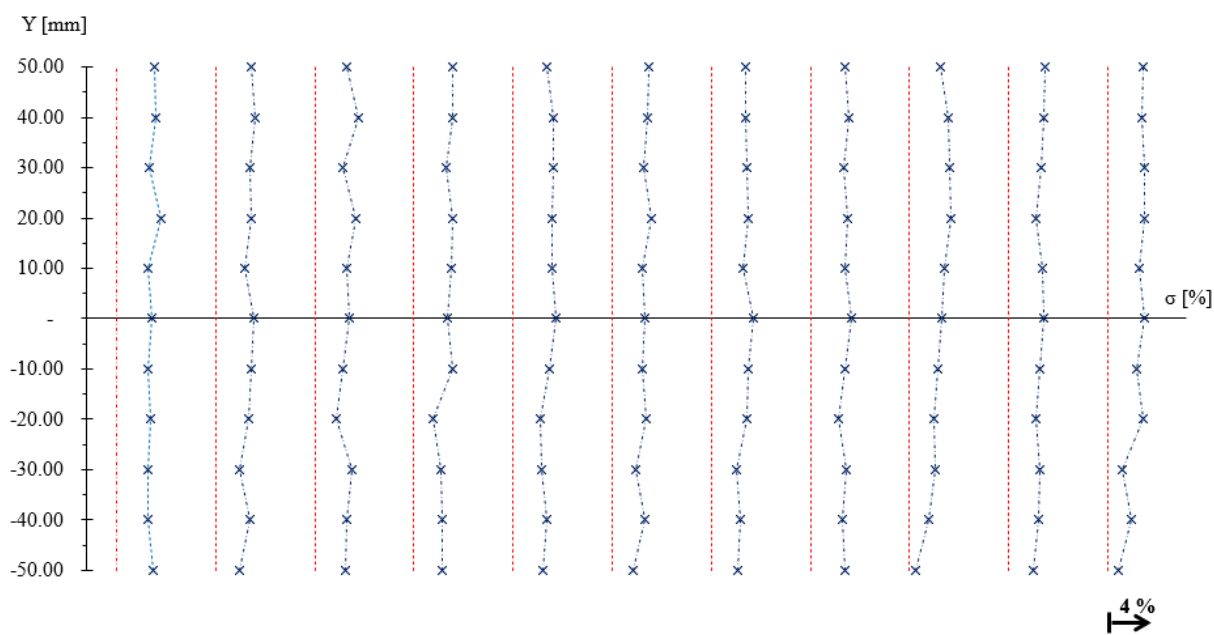
Příloha č. 9a: Odchyly rychlostí  $v_x$  mezi LDA a PIV v závislosti na místě řezu při 5 Hz



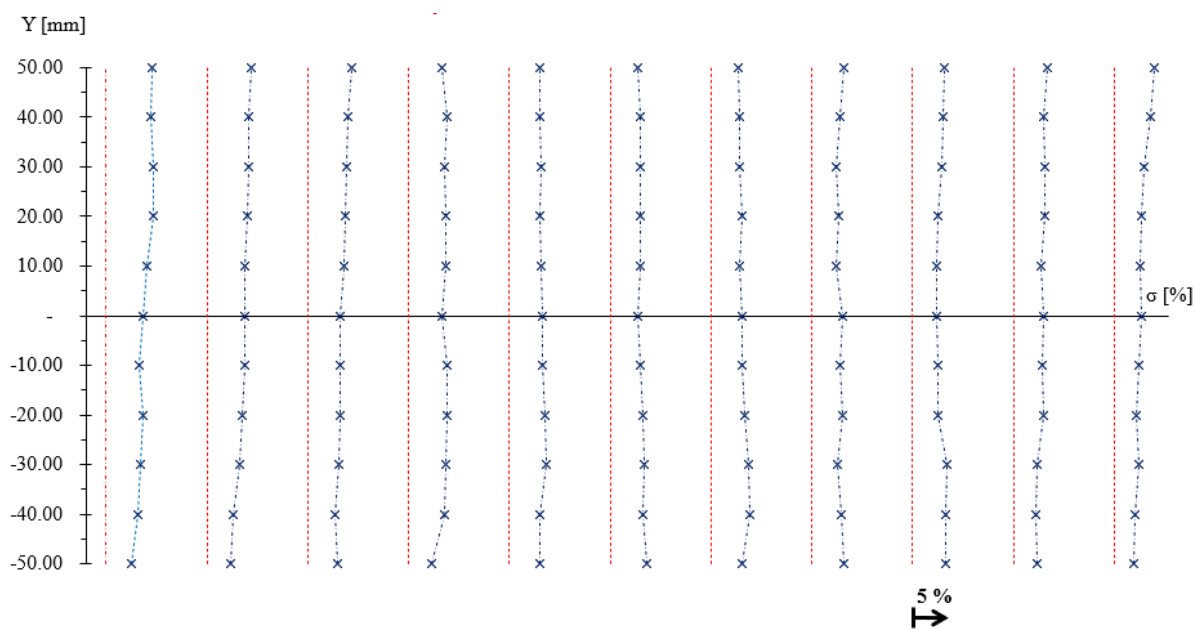
Příloha č. 9b: Odchyly rychlostí  $v_x$  mezi LDA a PIV v závislosti na místě řezu při 15 Hz



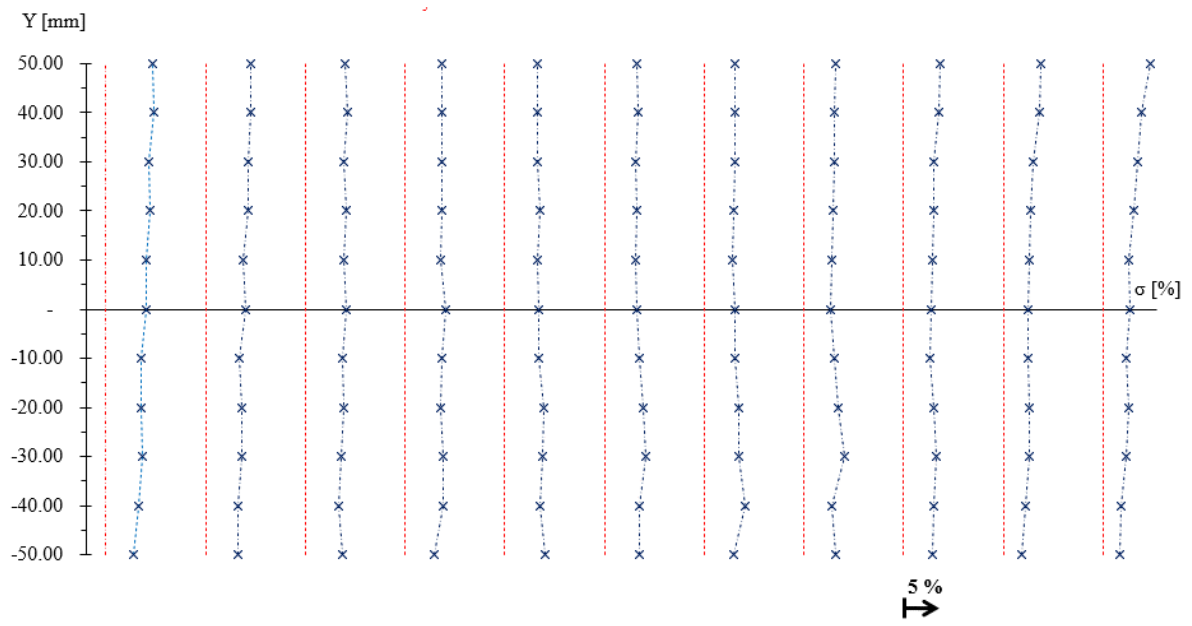
Příloha č. 9c: Odchylky rychlosti  $v_x$  mezi LDA a PIV v závislosti na místě řezu při 35 Hz



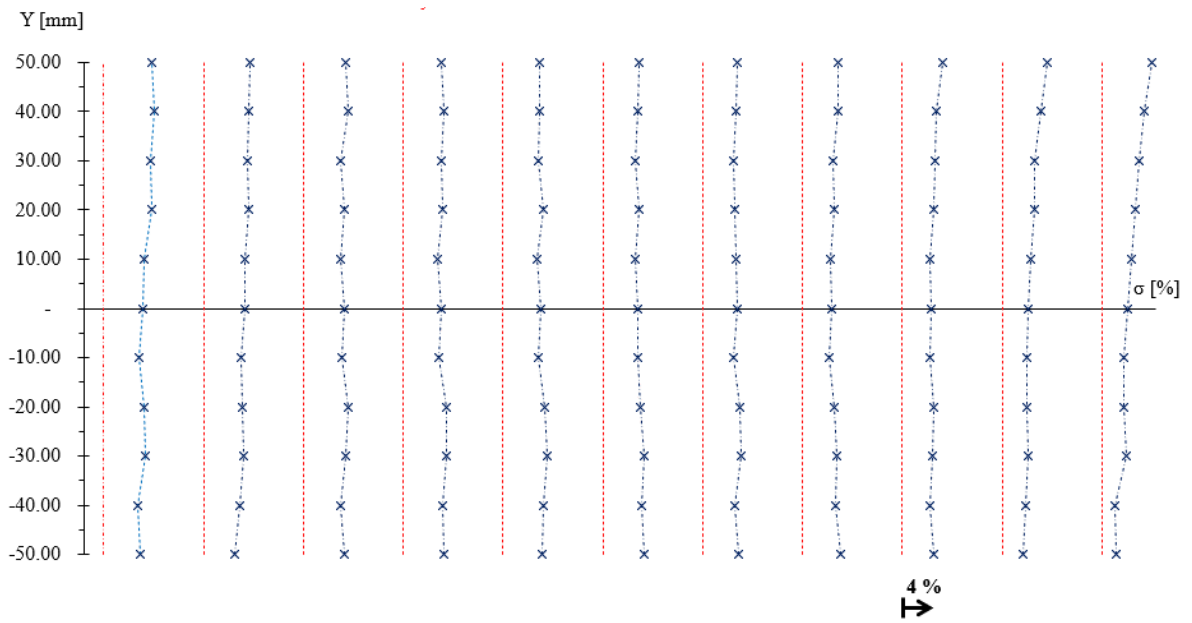
Příloha č. 10a: Odchylky rychlosti  $v_y$  mezi LDA a PIV v závislosti na místě řezu při 5 Hz



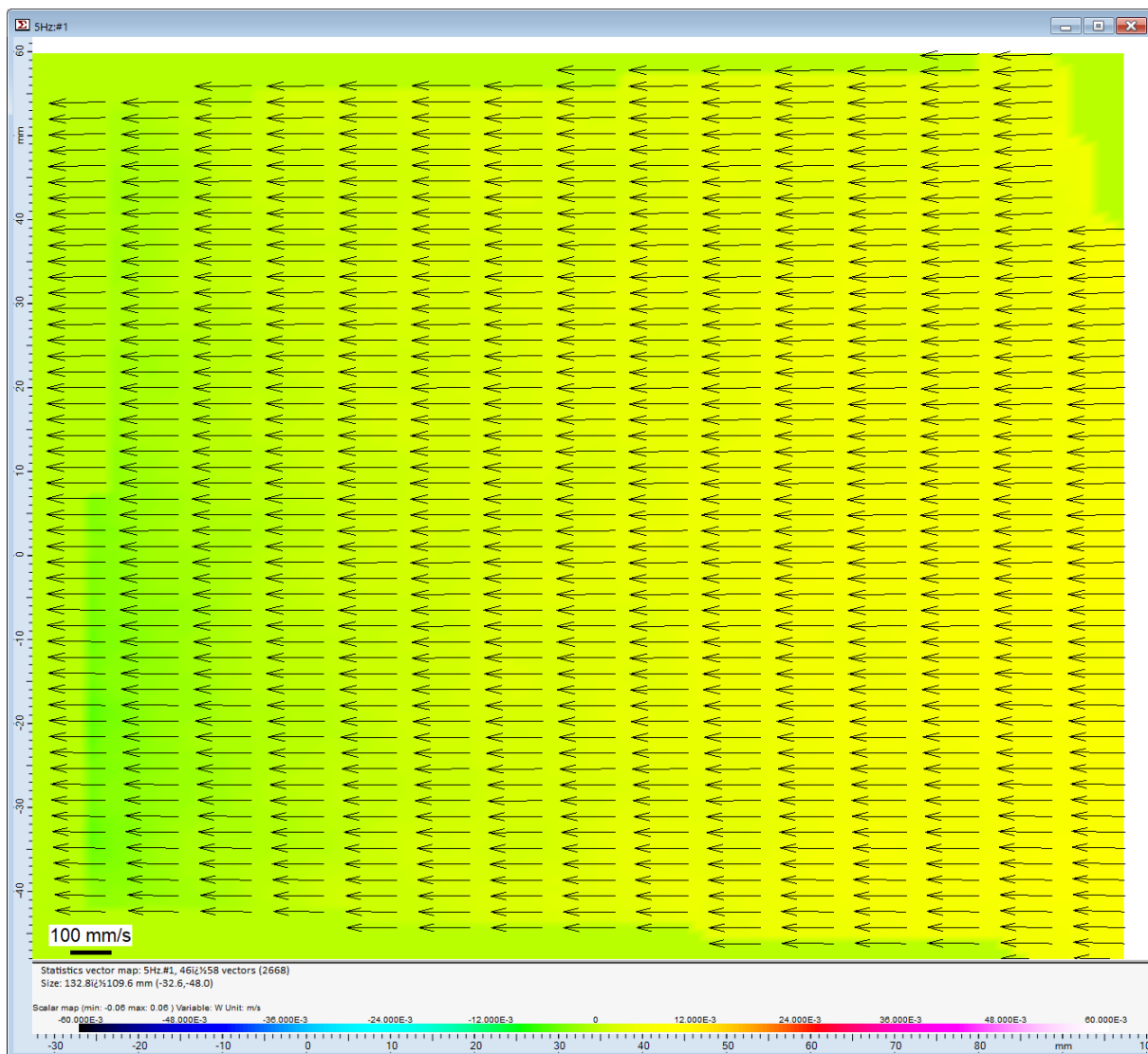
Příloha č. 10b: Odchylky rychlostí  $v_y$  mezi LDA a PIV v závislosti na místě řezu při 15 Hz



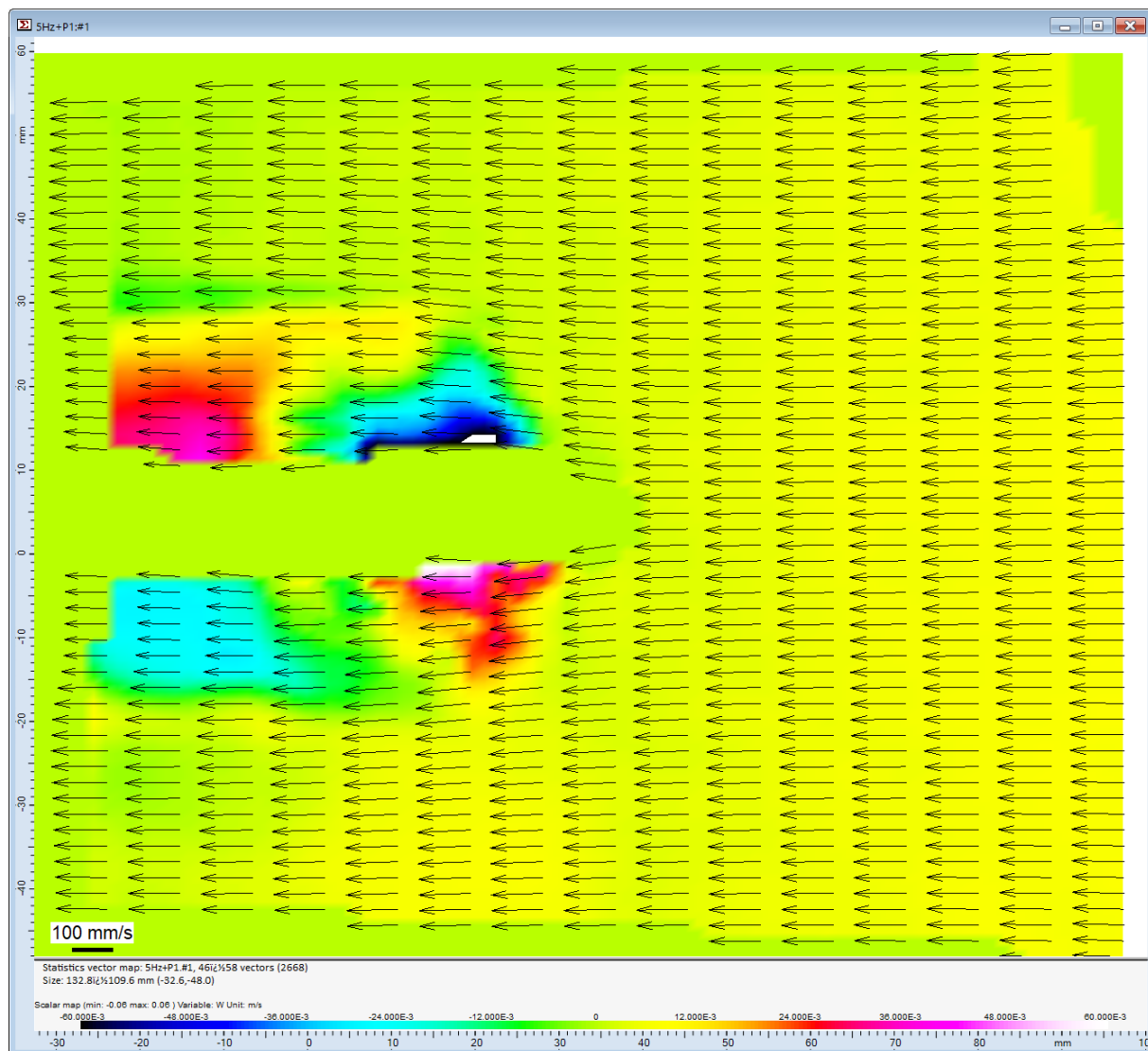
Příloha č. 10c: Odchylky rychlostí  $v_y$  mezi LDA a PIV v závislosti na místě řezu při 35 Hz



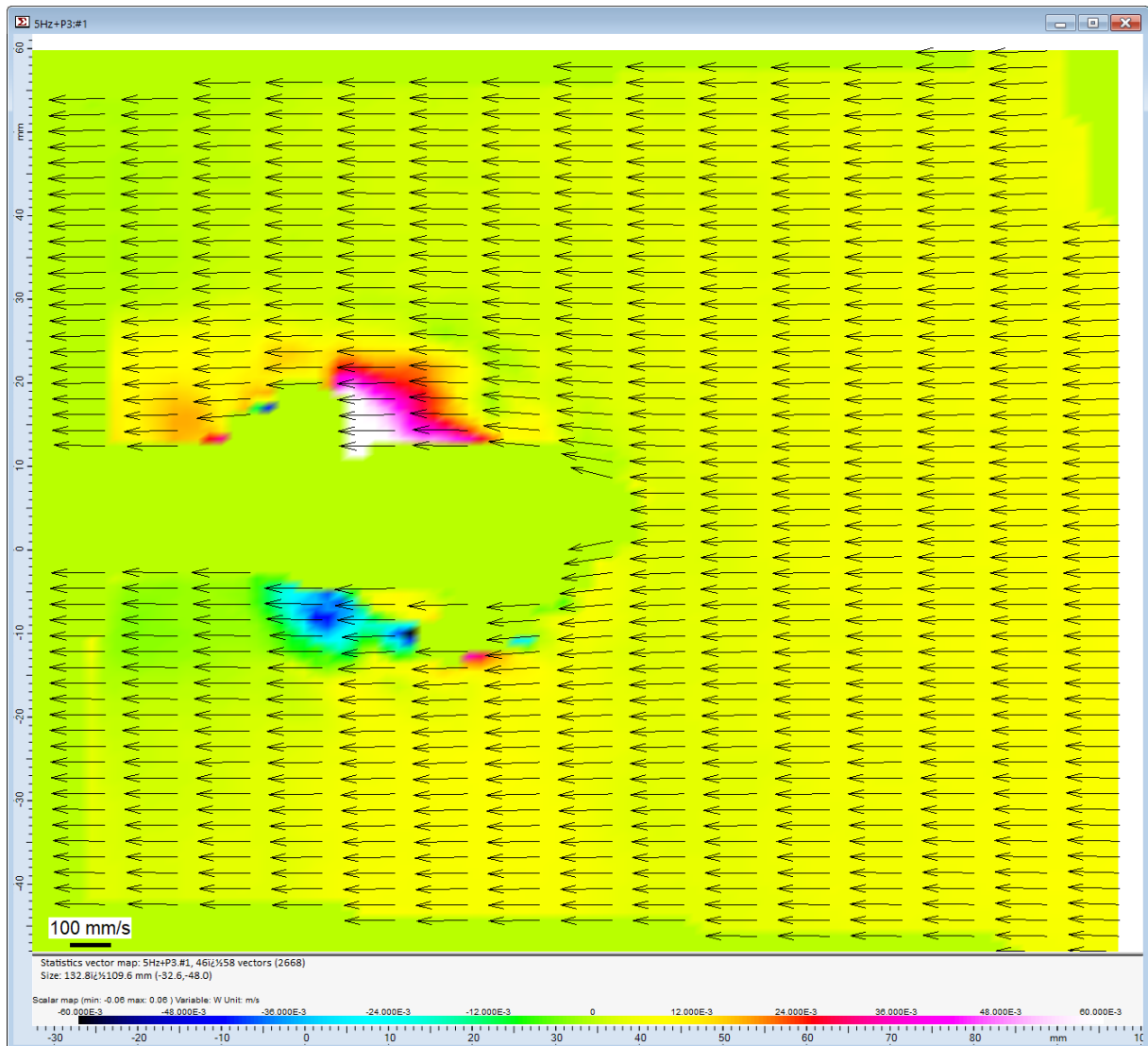
*Príloha č. 11a: Vektorové pole bez propeleru při 5 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti*



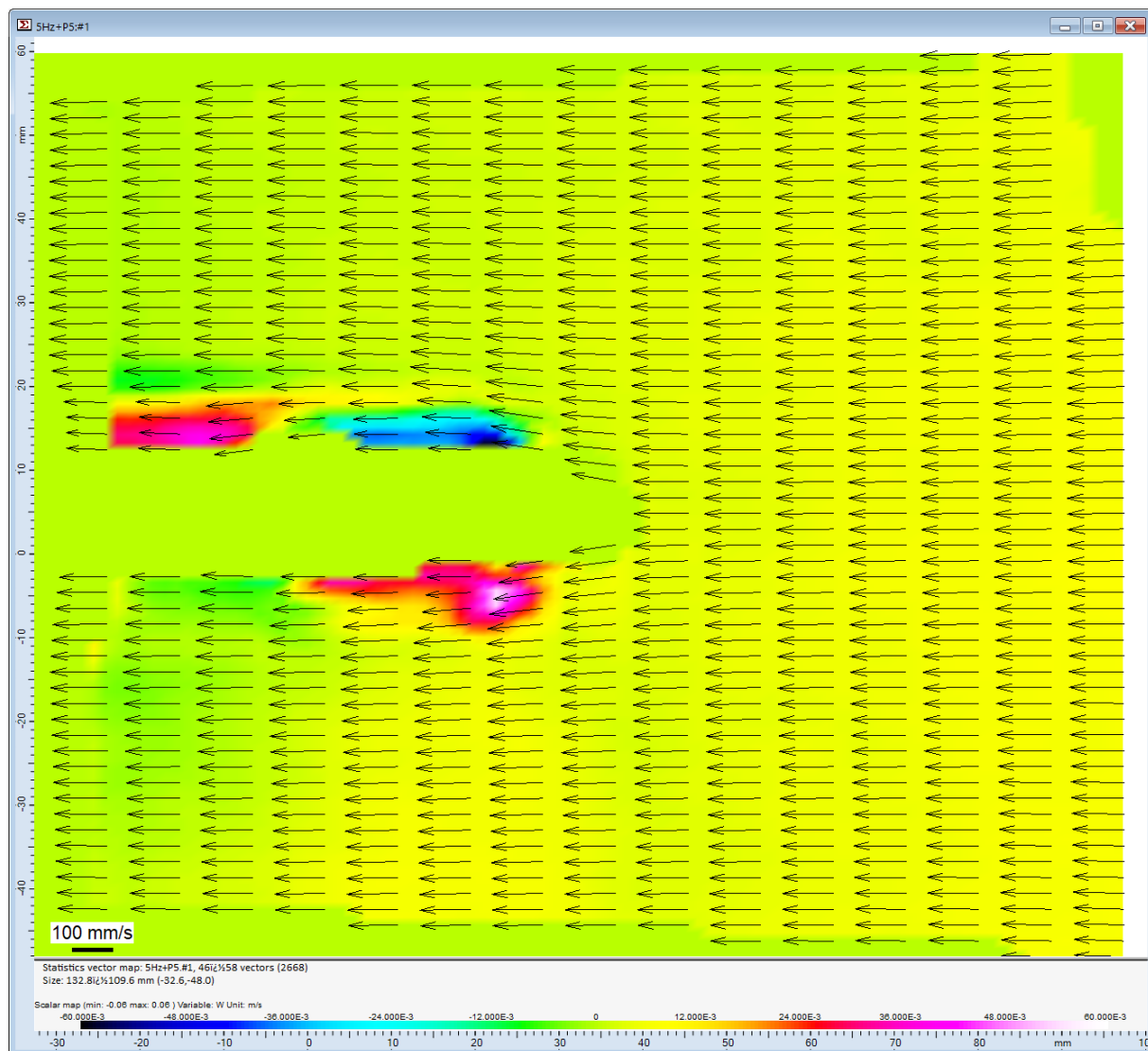
Příloha č. 11b: Vektorové pole s propelerem P1 při 5 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti



*Príloha č. 11c: Vektorové pole s propelerem P3 při 5 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti*

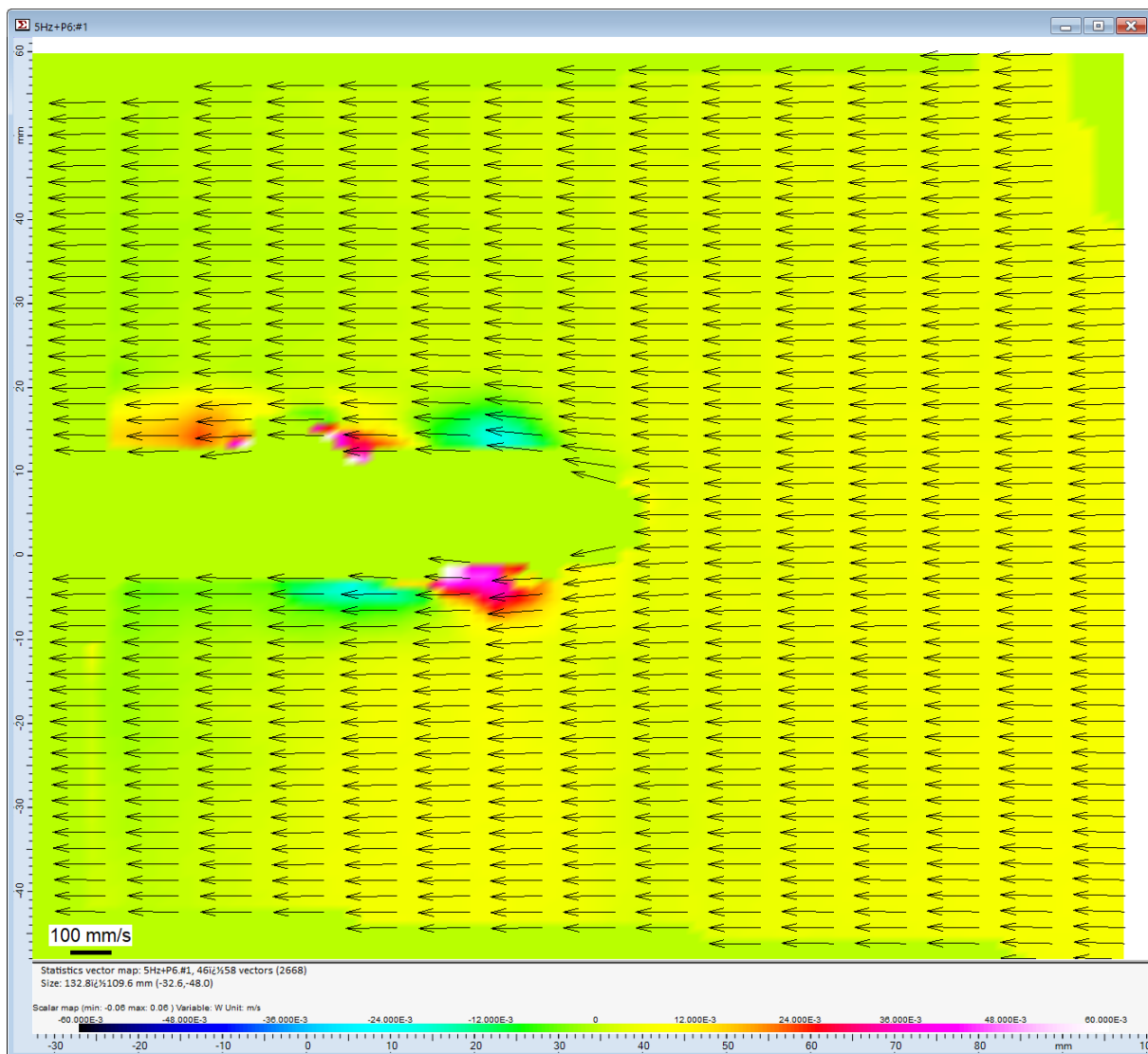


Příloha č. 11d: Vektorové pole s propelerem P5 při 5 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti

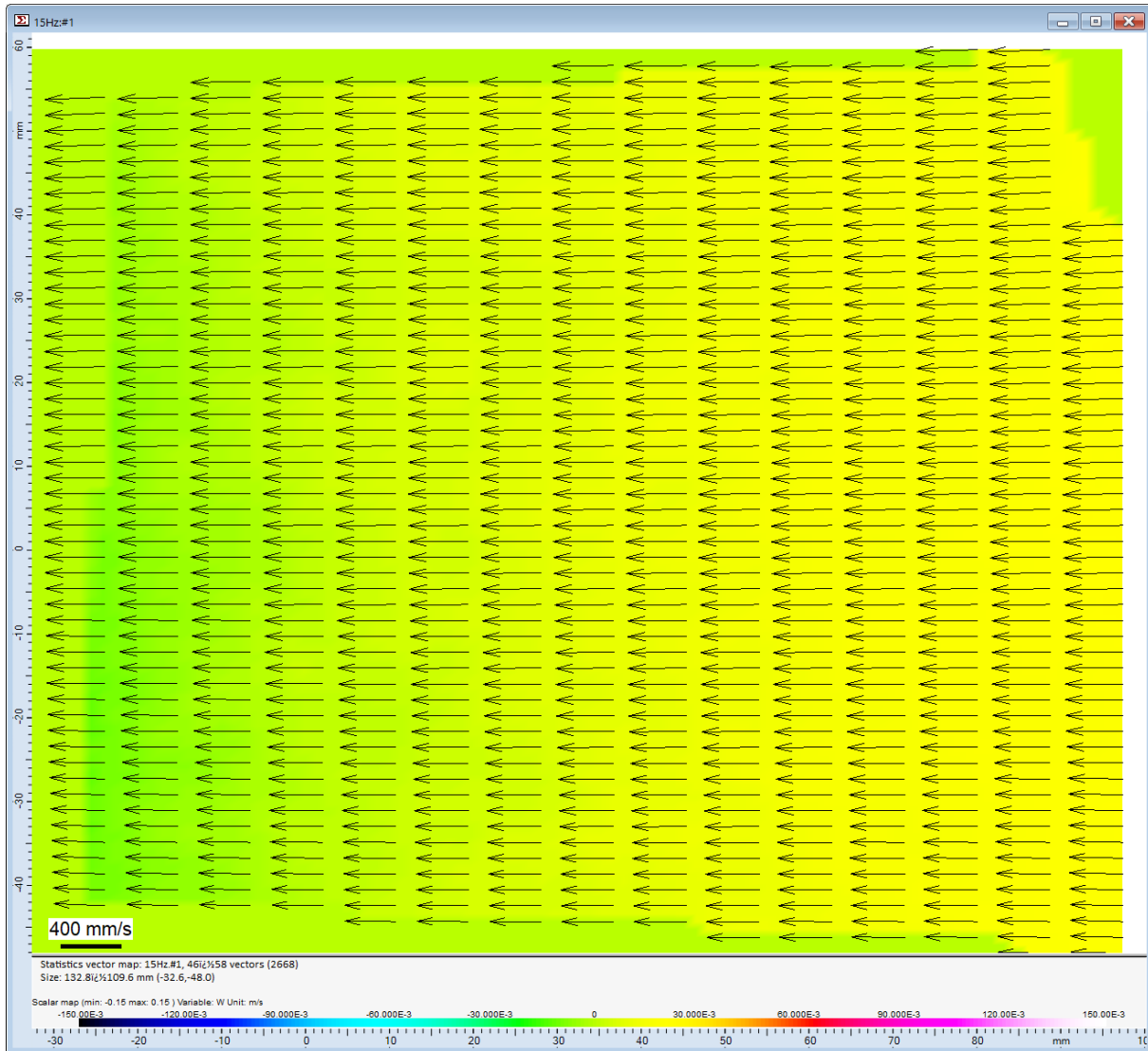




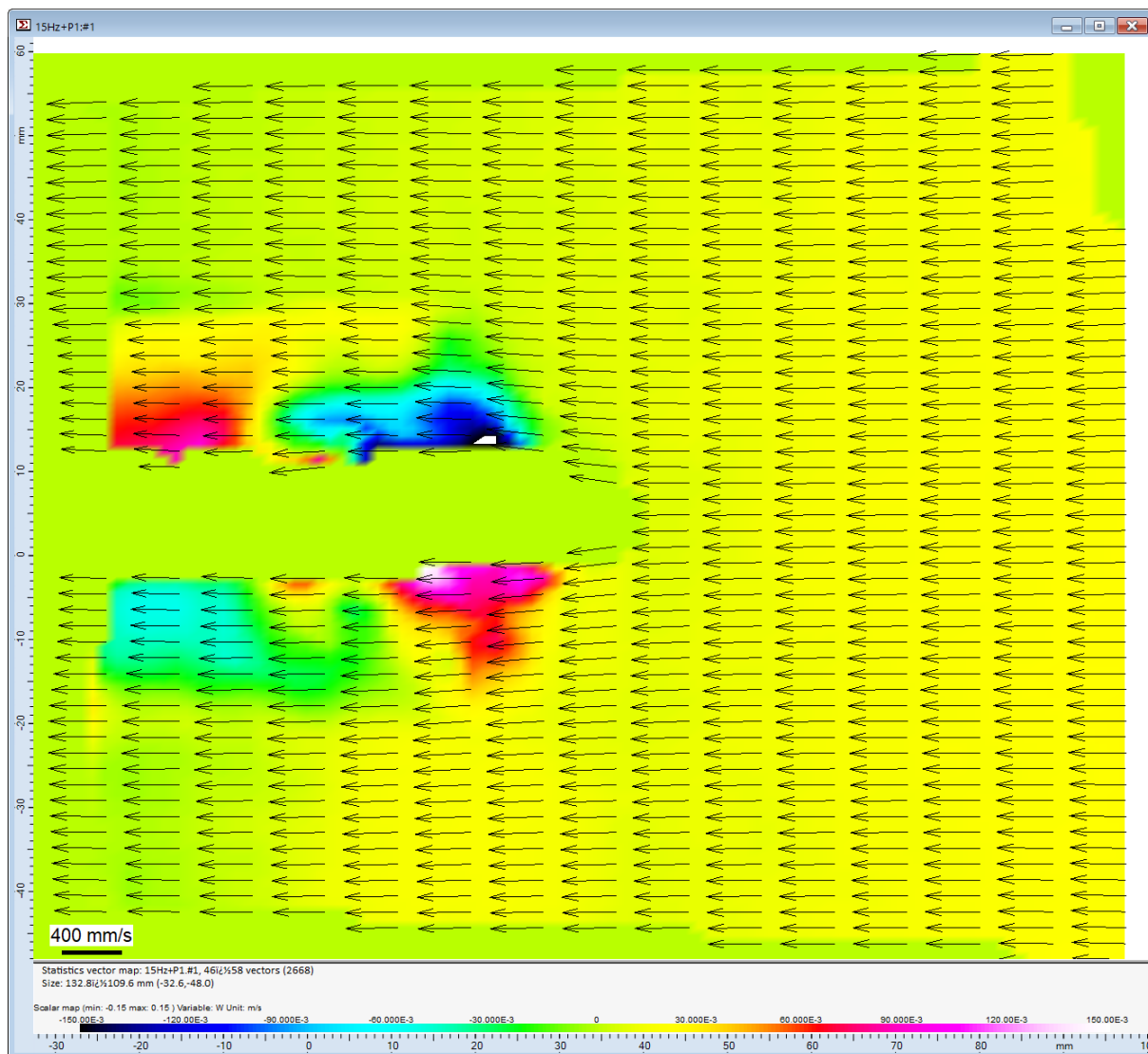
*Príloha č. 11e: Vektorové pole s propelerem P6 při 5 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti*



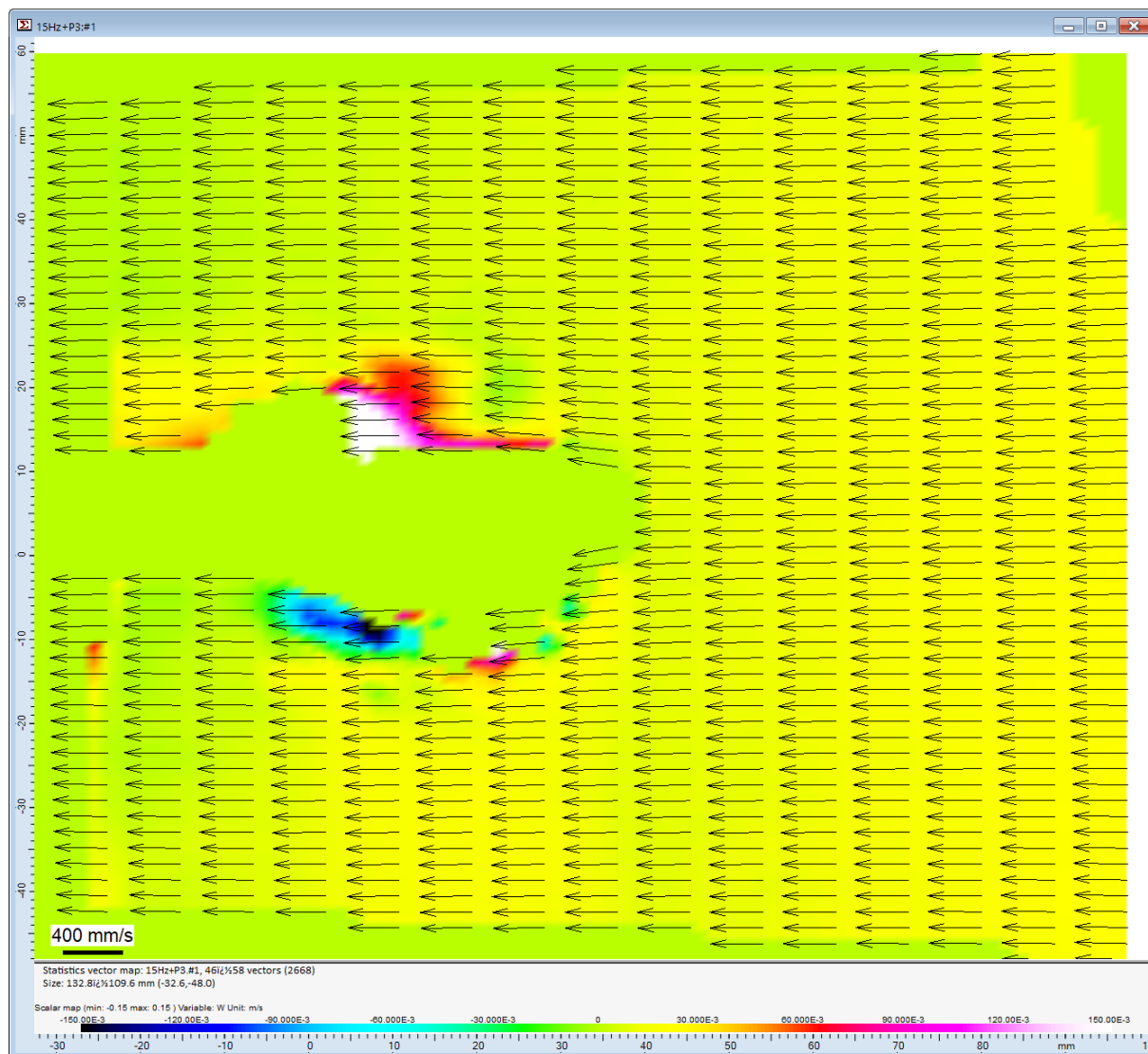
Příloha č. 11f: Vektorové pole bez propeleru při 15 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti



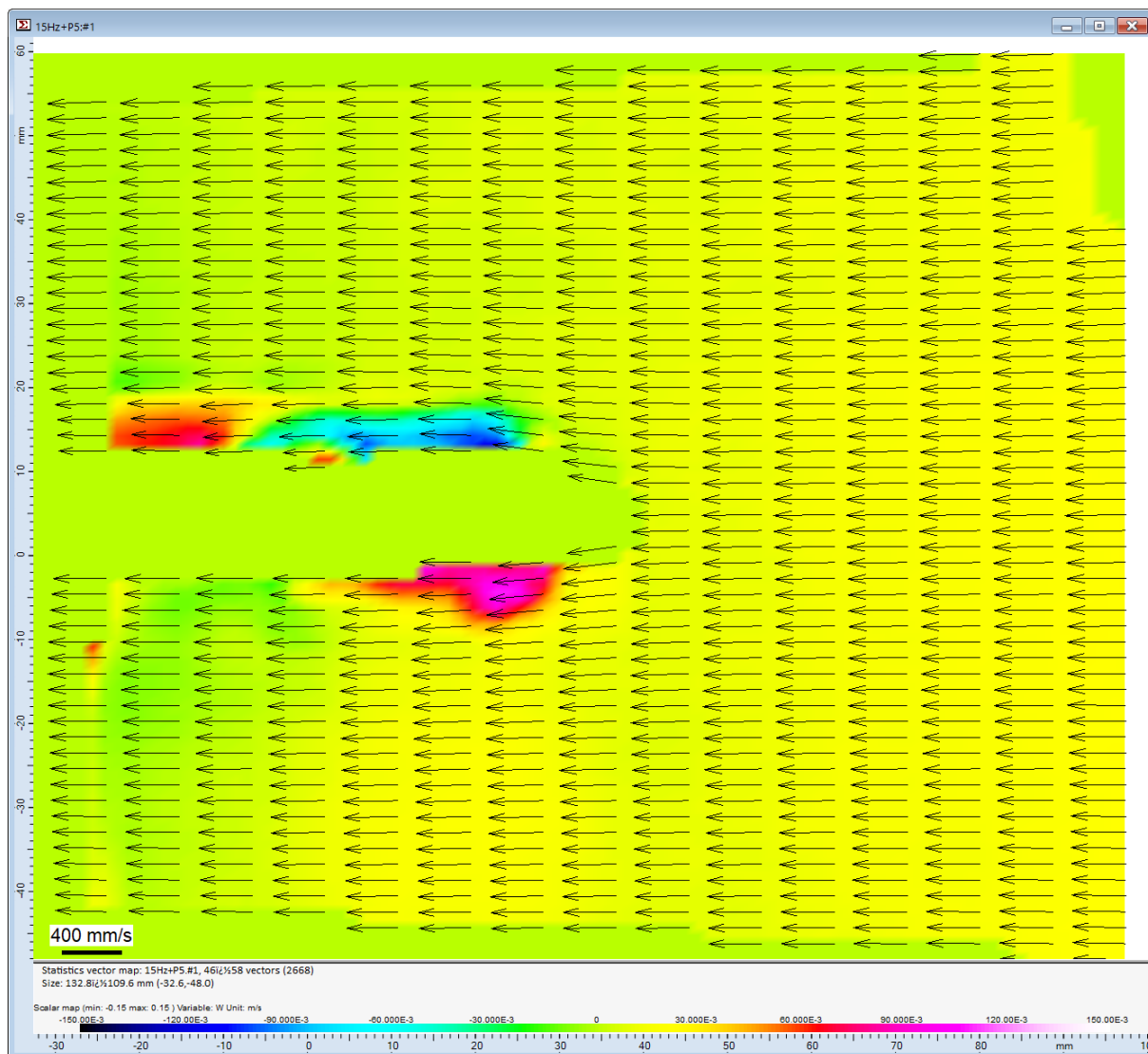
Príloha č. 11g: Vektorové pole s propelerem P1 při 15 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti



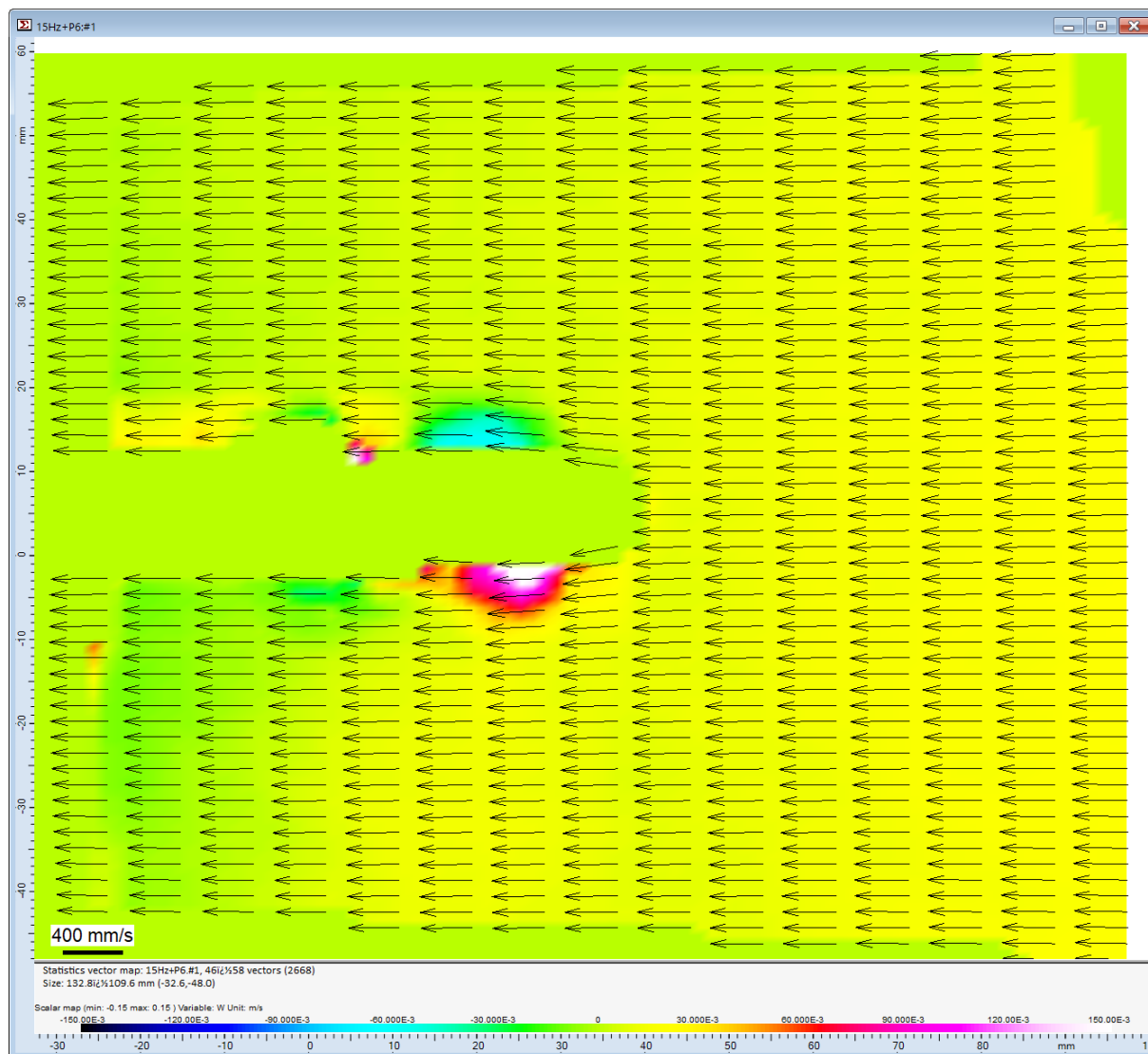
Příloha č. 11h: Vektorové pole s propelerem P3 při 15 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti



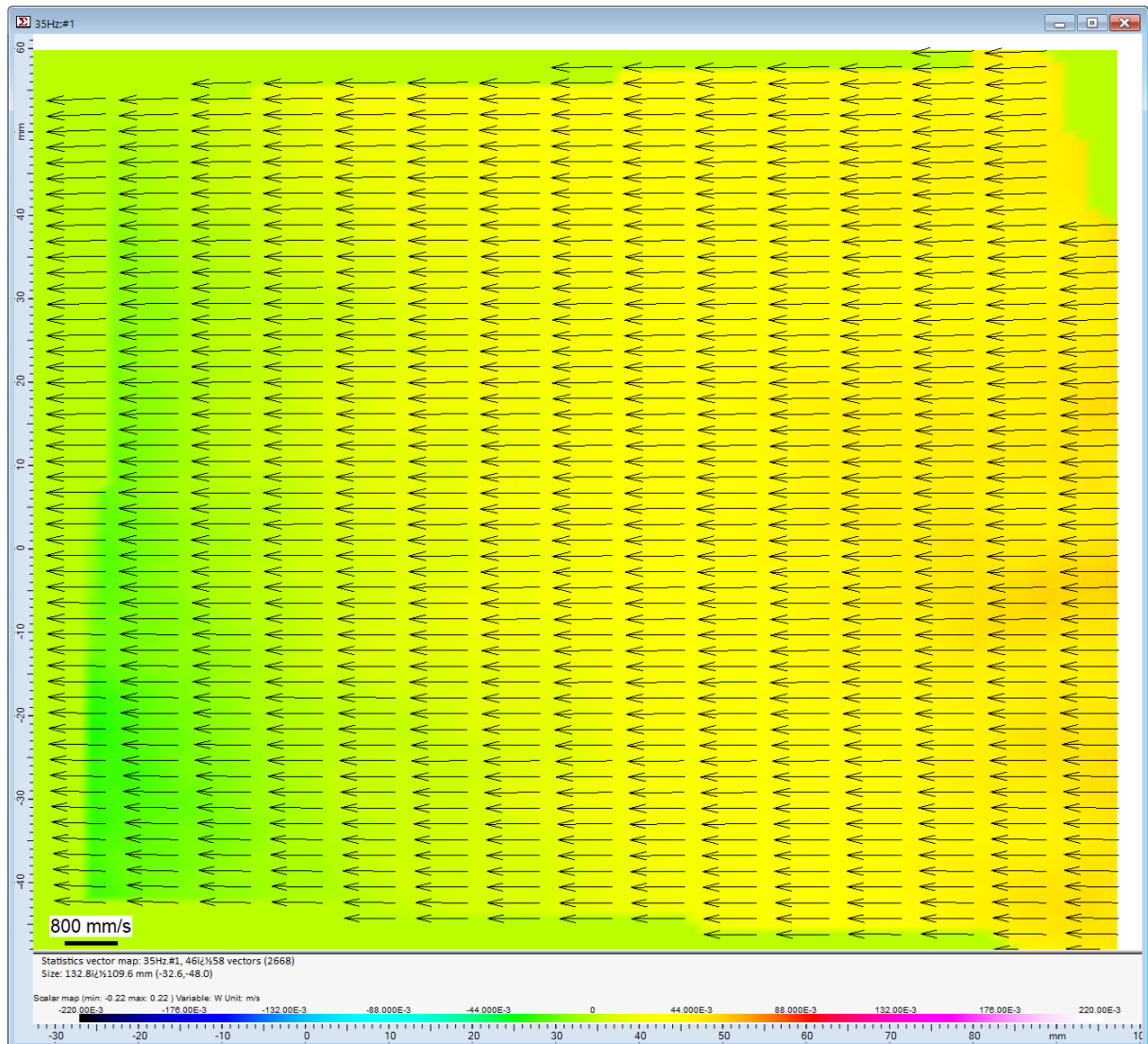
Príloha č. 11i: Vektorové pole s propelerem P5 při 15 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti



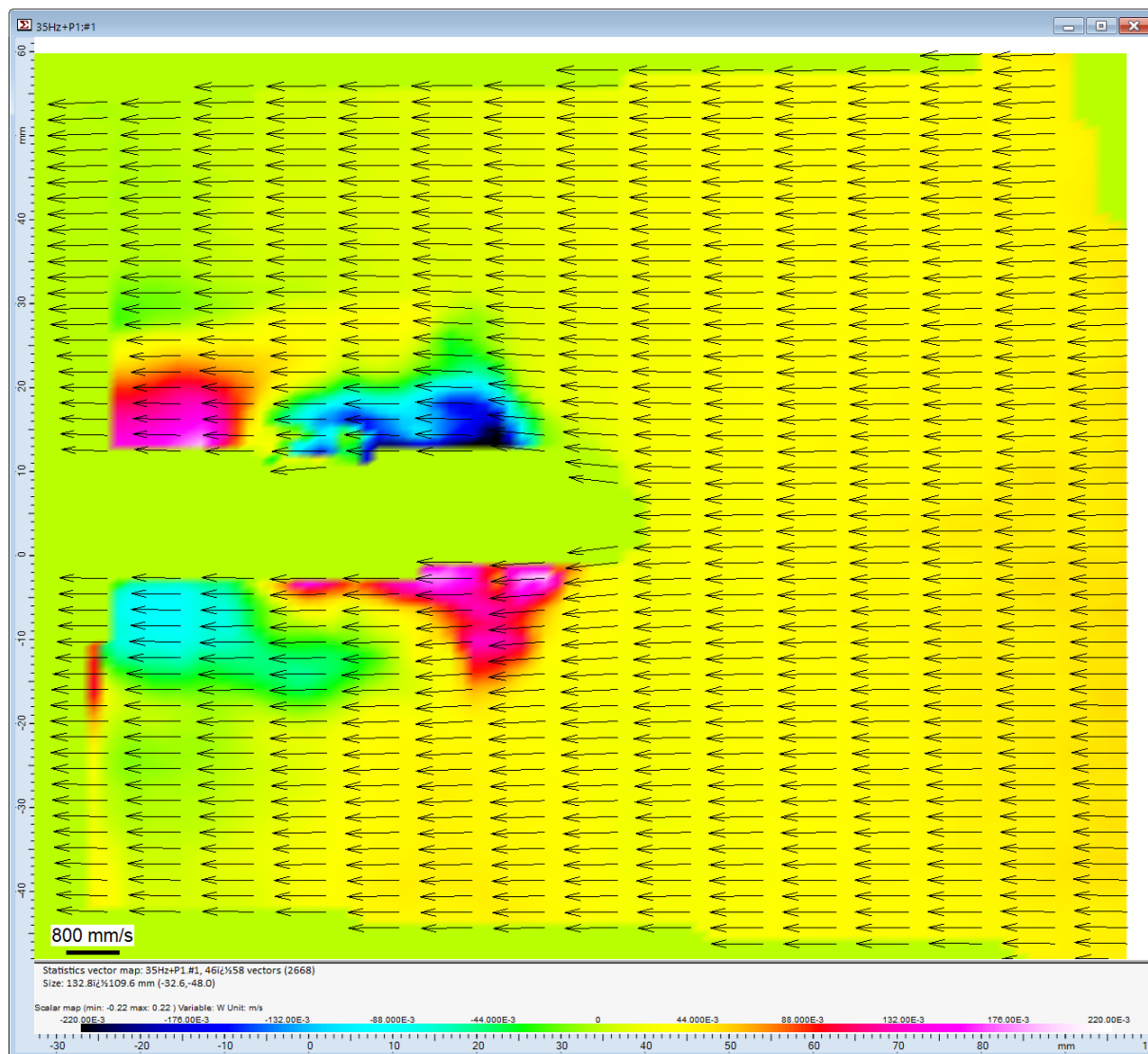
Příloha č. 11j: Vektorové pole s propelerem P6 při 15 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti



*Príloha č. 11k: Vektorové pole bez propeleru při 35 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti*

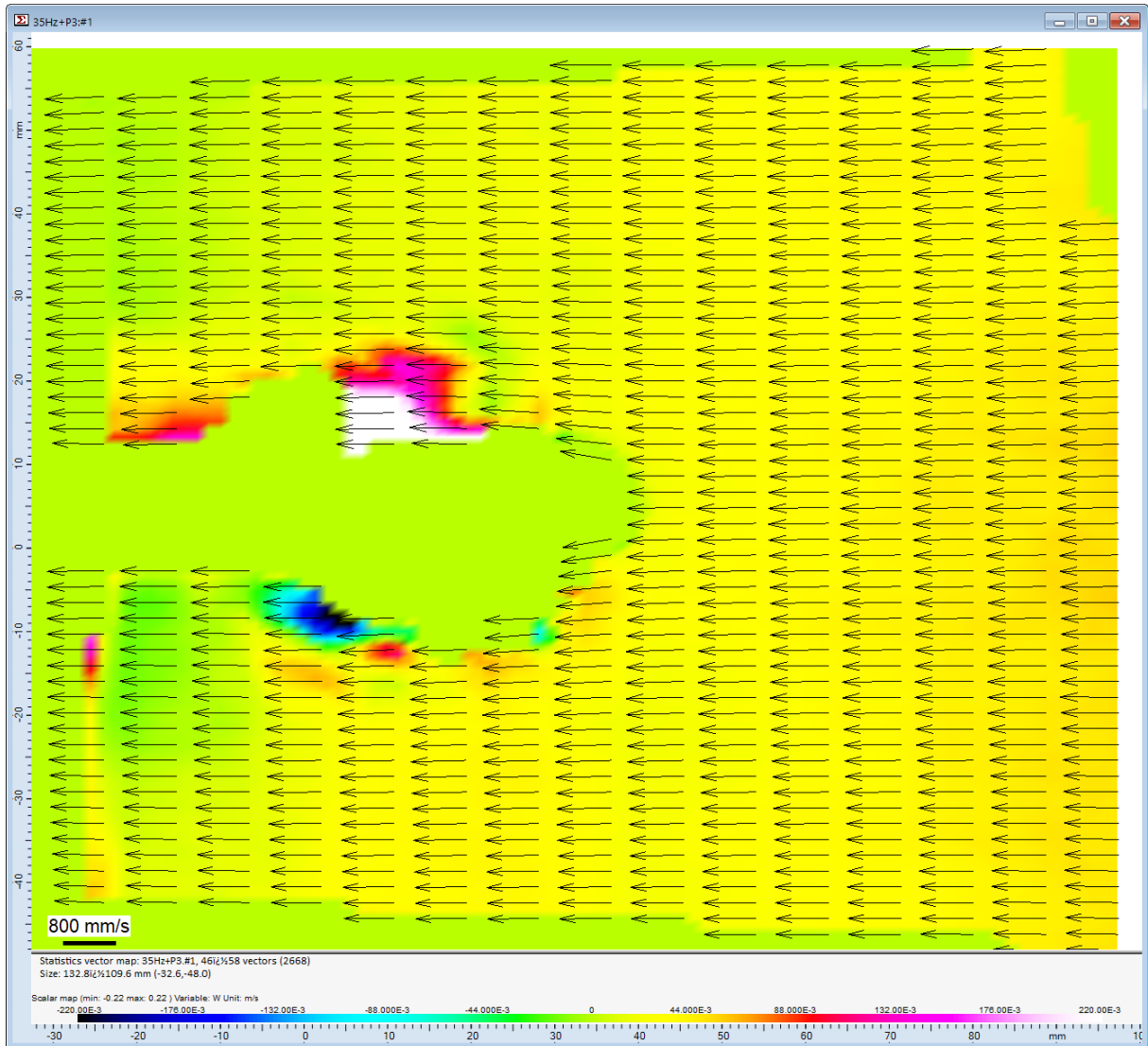


Příloha č. 111: Vektorové pole s propelerem P1 při 35 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti

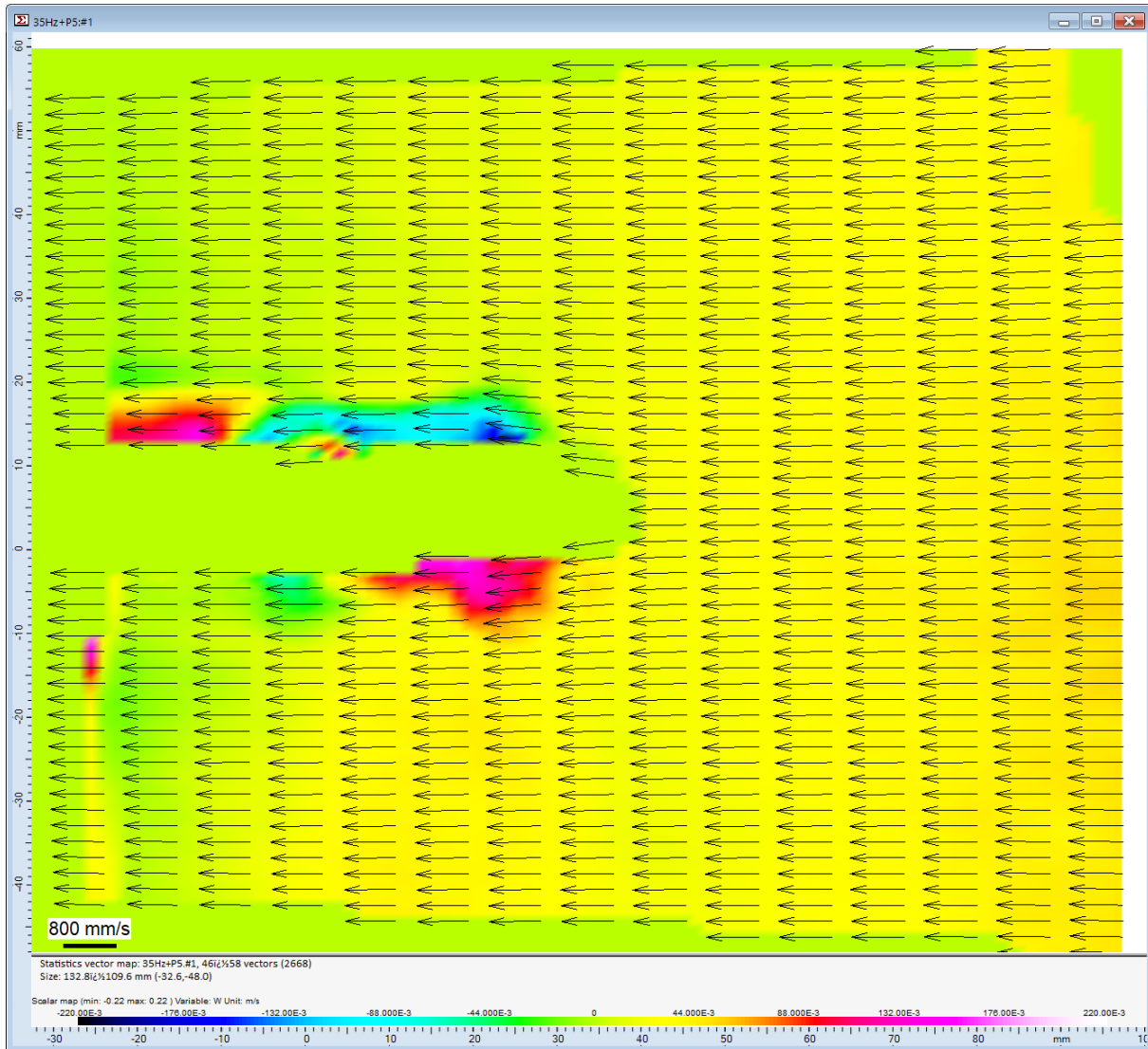




*Príloha č. 11m: Vektorové pole s propelerem P3 při 35 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti*



Příloha č. 11n: Vektorové pole s propelerem P5 při 35 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti



Príloha č. 11o: Vektorové pole s propelerem P6 při 35 Hz – černé šipky vektorů znázorňují svislou a vodorovnou složku vektoru rychlosti, barevná škála značí příčnou složku rychlosti

