



# Experimentální výzkum mezních vrstev metodou 2D PIV

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

*Autor práce:*

*Vedoucí práce:*

B0715A270008 Strojírenství

**Pavel Uhlíř**

Ing. Jaroslav Pulec

Katedra energetických zařízení





## Zadání bakalářské práce

# Experimentální výzkum mezních vrstev metodou 2D PIV

*Jméno a příjmení:* **Pavel Uhlíř**  
*Osobní číslo:* S19000135  
*Studijní program:* B0715A270008 Strojírenství  
*Zadávací katedra:* Katedra energetických zařízení  
*Akademický rok:* **2021/2022**

### Zásady pro vypracování:

Particle Image Velocimetry (PIV) je optická metoda vhodná k měření rychlostních polí v proudících tekutinách. Jelikož je její princip založen na sledování posunutí trasovacích částic, které jsou osvětleny laserovým světlem, je její použití pro měření v blízkosti stěn limitováno nežádoucími odlesky. Cílem práce je sestavit experiment pro měření mezní vrstvy s využitím nátěru na bázi Rhodaminu 6G, který posouvá frekvenci odraženého světla do spektra o delší vlnové délce, než je frekvence světla dopadajícího. Experiment je možné provést ve vodě i na vzduchu. Měla by však být ověřena použitelnost daného nátěru a stanoveny limity pro příslušnou aplikaci.

Hlavní cíle:

1. Rešerše hydrodynamických procesů
2. Popis metody PIV a jejích limitů
3. Návrh a sestavení experimentu
4. Provedení měření na vlastním experimentálním zařízení
5. Analýza výsledků a porovnání s literaturou

*Rozsah grafických prací:* 5  
*Rozsah pracovní zprávy:* 35  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] Kopecký, V., 2005. Laserové anemometrie. TU Liberec
- [2] Citavý, J., 2004. Tenké smykové vrstvy. ČVUT
- [3] Noskiewič, J., 1987. Mechanika tekutin. SNTL

*Vedoucí práce:* Ing. Jaroslav Pulec  
Katedra energetických zařízení

*Datum zadání práce:* 1. listopadu 2021  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. dubna 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2021

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

20. května 2022

Pavel Uhlíř

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Jaroslavu Pulcovi za pomoc s touto prací, cenné rady a vstřícnost poskytnutou během konzultací.

Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří projeví nesmírnou podporu, pomoc a pochopení.

## Abstrakt

V úvodní části této práce je popis základních pojmů a mechanismů mechaniky tekutin, jmenovitě se jedná o viskozitu, Reynoldsovo číslo, laminární, turbulentní proudění a mezní vrstvy. Další kapitola se zabývá vysvětlením základního principu metody PIV a metodikou záznamu obrazu. Také je zde zmíněna problematika PIV měření v blízkosti stěn.

V následující kapitole je popsán postup návrhu experimentu, také je zde bližší obeznámení s experimentálním uspořádáním a s použitou měřicí technikou. Poté je věnována pozornost popisu kalibrace vlastního měření. Dále je vysvětlena metodika vyhodnocení experimentálních dat. Je zde zahrnut i popis vyhodnocovacího programu.

V závěru jsou shrnuty výsledky spolu s hodnocením provedeného experimentu.

**Klíčová slova:** proudění, Particle Image Velocimetry, mezní vrstva, obtékání rovinné desky

## Abstract

In this thesis, a description of certain basic mechanisms of fluid mechanics can be found in the first chapter, namely viscosity, Reynolds number, laminar flow, turbulent flow and boundary layers. In the next chapter there is an explanation of the basic principle of the PIV method and the methodology of image recording. The issue of measurement in close proximity to walls is also mentioned here.

In the following chapter you can find the procedure of experiment design, there is also a closer acquaintance with the measuring track along with the used devices and the basic principle of the camera used. Then attention is paid to calibration. Then, a method of evaluating the data obtained by the experiment is described. A description of the evaluation program is also included.

In the closing part, the evaluation of the results can be found together with the evaluation of the performed experiment.

**Keywords:** flow, Particle Image Velocimetry, boundary layer, flowing around flat plate

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| Seznam zkratk a symbolů .....                          | 8  |
| Úvod.....  | 9  |
| 1 Základní procesy mechaniky tekutin .....             | 10 |
| 1.1 Viskozita .....                                    | 10 |
| 1.2 Stacionární proudění vazké tekutiny potrubím ..... | 11 |
| 1.3 Reynoldsovo číslo.....                             | 11 |
| 1.4 Laminární proudění.....                            | 12 |
| 1.5 Laminární proudění v kruhovém potrubí.....         | 12 |
| 1.6 Turbulentní proudění .....                         | 13 |
| 1.7 Mezní vrstvy .....                                 | 14 |
| 2 PIV .....  | 17 |
| 2.1 Základní principy PIV .....                        | 17 |
| 2.2 Záznam PIV obrazů .....                            | 17 |
| 2.3 Stopovací částice.....                             | 22 |
| 2.4 Problematika měření u stěn.....                    | 22 |
| 3 Uspořádání experimentu a použitá zařízení .....      | 23 |
| 3.1 Měřicí trať .....                                  | 23 |
| 3.2 Kamera a další použitá zařízení .....              | 25 |
| 3.3 Zapojení měřicí aparatury .....                    | 27 |
| 4 Provedení experimentu .....                          | 28 |
| 4.1 Kalibrace .....                                    | 28 |
| 4.2 Záznam dat.....                                    | 28 |
| 5 Vyhodnocení experimentu .....                        | 30 |
| 5.1 Získané výsledky .....                             | 31 |
| 5.2 Tloušťka mezní vrstvy .....                        | 34 |
| Závěr .....  | 36 |
| Seznam literatury .....                                | 37 |
| Seznam příloh .....                                    | 38 |

## Seznam zkratek a symbolů

| symbol                    | jednotka                         | význam                              |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Standardní symboly</b> |                                  |                                     |
| $d$                       | m                                | charakteristický rozměr             |
| $F_p$                     | N                                | tlaková síla                        |
| $F_t$                     | N                                | třecí síla                          |
| $i$                       | $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$  | měrný tlakový spád                  |
| $l$                       | m                                | délka                               |
| $p, \Delta p$             | Pa                               | tlak, tlakový rozdíl                |
| Re                        | 1                                | Reynoldsovo číslo                   |
| $s, \Delta s$             | m                                | dráha, vzdálenost uražená částicemi |
| $t, \delta t$             | s                                | čas, přírůstek času                 |
| $v, \delta v$             | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$   | Rychlost, přírůstek rychlosti       |
| $x, y$                    | m                                | kartézské souřadnice                |
| <b>Řecké symboly</b>      |                                  |                                     |
| $\delta_l$                | m                                | tloušťka mezní vrstvy laminární     |
| $\delta_t$                | m                                | tloušťka mezní vrstvy turbulentní   |
| $\delta_x$                | m                                | tloušťka mezní vrstvy obecná        |
| $\eta$                    | $\text{Pa} \cdot \text{s}$       | dynamická viskozita                 |
| $\theta$                  | °                                | úhel smykové deformace              |
| $\nu$                     | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ | kinematická viskozita               |
| $\rho$                    | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  | hustota                             |
| $\tau$                    | Pa                               | tečné napětí                        |



# Úvod

Při obtékání tělesa vzniká v jeho blízkosti vlivem viskozity tenká oblast, která se nazývá mezní vrstva. Tuto vrstvu lze snadno pozorovat v případě obtékané desky orientované rovnoběžně s proudem tekutiny.

Tato práce se zabývá případem, kdy je obtékaná deska umístěna za vstupem měřicí trati sestavené z potrubí a potrubních prvků. Je zde zkoumána mezní vrstva podél celé desky. K měření byla použita metoda PIV ve 2D uspořádání, jejíž použití je obecně limitováno odlesky na stěnách měřeného objemu. Hlavním cílem této práce minimalizovat vliv odlesků v mezní vrstvě s využitím fluorescenčního nátěru, porovnat naměřená data s teoretickým popisem mezní vrstvy a určit mez relevantnosti získaných dat v těsné blízkosti obtékané desky.

# 1 Základní procesy mechaniky tekutin

## 1.1 Viskozita

Viskozita neboli vazkost je velikost odporu tekutiny proti proudění. Určuje rychlost deformace tekutiny, která byla způsobena tečným napětím na ní aplikovaným.

Mějme případ, kdy je tekutina uzavřená mezi dvěma deskami, z nichž spodní je ve fixní poloze a vrchní se pohybuje rychlostí  $\delta v$  (m), jak ukazuje obr. 1. Úhel smykové deformace  $\delta\theta$  (rad) bude plynule narůstat s časem, dokud bude udržováno tečné napětí  $\tau$  (Pa). Newtonovské tekutiny jako voda, olej nebo vzduch vykazují lineární vztah mezi aplikovaným smykem a výslednou rychlostí deformace:

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad (1)$$

V limitě nekonečně malých změn se tento vztah změní na závislost mezi rychlostí smykové deformace a gradientem rychlosti:

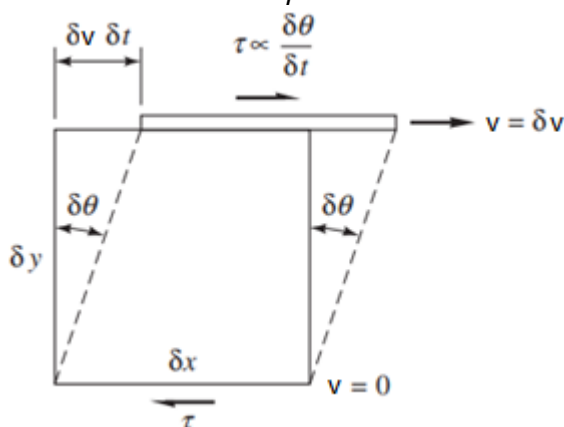
$$\frac{d\theta}{dv} = \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

Z rovnic (1) a (2) je pak aplikovaný smyk také úměrný gradientu rychlosti pro běžné lineární tekutiny. Konstantou úměrnosti je dynamická viskozita  $\eta$  (Pa · s) [1]:

$$\tau = \eta \frac{d\theta}{dv} = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

Často používaná je veličina kinematická viskozita  $\nu$  (m · s<sup>-2</sup>):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$



Obr. 1: Tečné napětí způsobující smykovou deformaci v tekutině mezi deskami s různými rychlostmi [1]

Tekutiny mohou mít široký rozsah viskozit. Tabulka 1 ukazuje viskozitu vybraných tekutin.

Tabulka 1: Dynamické viskozity názorných kapalin při 20°C [2]

| Tekutina               | Chemický vzorec | Dynamická viskozita $\eta_{20} \cdot 10^3 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$ | Kinematická viskozita $\nu_{20} \cdot 10^6 \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ |
|------------------------|-----------------|--|--|
| Ethanol                | $C_2H_6O$       | 1,20   | 1,50   |
| Kyselina dusičná (40%) | $HNO_3$         | 1,56   | 1,25   |
| Toluen                 | $C_7H_8$        | 0,59   | 0,68   |
| Voda                   | $H_2O$          | 1,00   | 1,06   |
| Voda těžká             | $D_2O$          | 1,34   | 1,22   |
| Vzduch                 | /               | 18,20  | 15,11  |
| Kyslík                 | $O_2$           | 20,27  | 15,43  |

Viskozita závisí na teplotě, kdy u plynů se zvyšováním teploty stoupá a u kapalin klesá.

## 1.2 Stacionární proudění vazké tekutiny potrubím

Rozdíl mezi ideální a reálnou (vazkou) tekutinou je v tom, že u ideální tekutiny jsou všechna smyková napětí nulová a díky tomu zde nepůsobí vnitřní tření. [3]

Během výtoky vazké kapaliny z nádoby se změní většina počáteční energie na kinetickou, která je měřitelná a viditelná, a pouze velice malá procentuální část (2÷5 %) se přemění na teplo – disipuje, změní se na kinetickou energii pohybu molekul tekutiny, který není okem viditelný. Při proudění velmi vazké tekutiny potrubím je ovšem poměr energií opačný a převážná část počáteční energie disipuje. [3]

U reálné tekutiny je rychlost v kontaktu se stěnou nulová kvůli jejímu ulpívání na stěně. Z toho vyplývá, že jak normálová, tak tangenciální složka rychlosti je nulová. [3]

## 1.3 Reynoldsovo číslo

Primárním parametrem korelujícím viskózní chování všech newtonských tekutin je bezrozměrné Reynoldsovo číslo:

$$Re = \rho \frac{vd}{\eta} = \frac{vd}{\nu} \quad (5)$$

kde  $\nu \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$  je rychlost a  $d \text{ (m)}$  charakteristický rozměr potrubí nebo obtékaného tělesa.

Reynoldsovo číslo se používá pro určení charakteru toku. Velmi nízké  $Re$  naznačuje viskózní plíživý pohyb, kde jsou zanedbatelné účinky setrvačnosti. Vysoké  $Re$  pravděpodobně znamená turbulentní proudění, které se pomalu mění v čase, ale má překrývající se silné náhodné vysokofrekvenční fluktuace. Střední  $Re$  pak znamená přechodovou oblast. Číselná velikost mezních hodnot se liší podle případu. Pro proudění v potrubí kruhového průřezu se udává kritické Reynoldsovo číslo  $Re_{kr} = 2300$ , při obtékání koule nabývá hodnot  $(1,5 \div 4) \cdot 10^5$ , při obtékání rovinné desky  $5 \cdot 10^5$  a pro obtékání trubky nekruhového průřezu se uvádí  $5 \cdot 10^3 \div 10^5$ . [1]

## 1.4 Laminární proudění

Laminární proudění nastává při Reynoldsových číslech nižších, pro které je charakteristický uspořádaný pohyb částic tekutiny. Je daleko jednodušší pro popis oproti turbulentnímu. Pro jeho analytické řešení se používá Newtonův vztah pro smykové napětí (3). Laminární proudění se v technické praxi objevuje při proudění v malých kanálech, při vyšší viskozitě kapalin a při nízké průtočné rychlosti. Jako příklad lze uvést hydraulické stroje a mechanismy. [4]

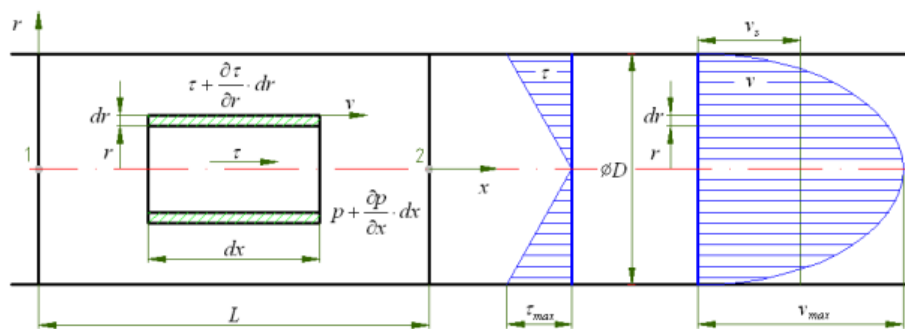
Řešení laminárního proudění probíhá integrací Navierových-Stokesových rovnic. Ovšem ne vždy lze řešit analyticky, proto se u složitějších případů proudění používají numerické metody. U jednodušších případů lze použít řešení exaktní. Tento typ proudění se vyskytuje u proudění s konstantní teplotou kapaliny, díky čemuž je i konstantní viskozita, nebo také u proudění nestlačitelné tekutiny způsobené tlakovým spádem či unášením, případně jejich kombinací. U proudění vyvolaného tlakovým spádem se udává měrný tlakový spád  $i$  ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ ), který je konstantní a je definován jako tlakový rozdíl  $\Delta p$  (Pa) na délce  $l$  (m). [4]

$$i = \frac{\Delta p}{l} = \frac{dp}{dx} = \textit{konst.} \quad (6)$$

## 1.5 Laminární proudění v kruhovém potrubí

Obr. 2 popisuje následující problém. V dostatečně dlouhém vodorovném potrubí kruhového průřezu se pohybuje kapalina v kladném směru osy  $x$ , jež je totožná s osou potrubí. Kvůli osové symetrii potrubí a vnějším podmínkám proudění (tíhové zrychlení na pohyb ve vodorovné rovině se neuplatňuje) bude osová symetrie rovněž platit na proudové pole. Proto lze zvolit elementární částici proudící kapaliny ve tvaru dutého válce. [4]

Na tento element působí tlak  $p + \frac{\partial p}{\partial x} dx$  na pravou základnu a na levou mezikružovou základnu elementu působí tlaková síla vzniklá od tlaku  $p$ . Jak na vnitřním, tak na vnějším plášti elementu působí třecí síla od tečného napětí, jejíž smysl určují účinky částic tekutiny nacházejících se v okolí vnitřního i vnějšího pláště elementu. Na vnitřním plášti působí třecí síla ve směru pohybu kvůli rychlejšímu pohybu částic. Na vnějším plášti způsobují částice zpomalování elementu, tedy tato síla působí proti pohybu. Částice nacházející se ve větší vzdálenosti od povrchu jsou rychlejší kvůli nižšímu účinku tečných sil způsobujících zpomalení. Ve středu potrubí je tedy rychlost maximální, kdežto na stěně nulová. Při ustáleném proudu je nulové zrychlení i setrvačné síly z důvodu nulové velikosti unášivého i místního zrychlení. Rovnováha sil se tedy redukuje pro vodorovný směr proudění na tvar  $F_p + F_t = 0$ , kde  $F_p$  je tlaková síla (N) a  $F_t$  je třecí síla (N) nebo pro elementární částici  $dF_p + dF_t = 0$ . [4]



Obr. 2: Laminární proudění v potrubí [4]

## 1.6 Turbulentní proudění

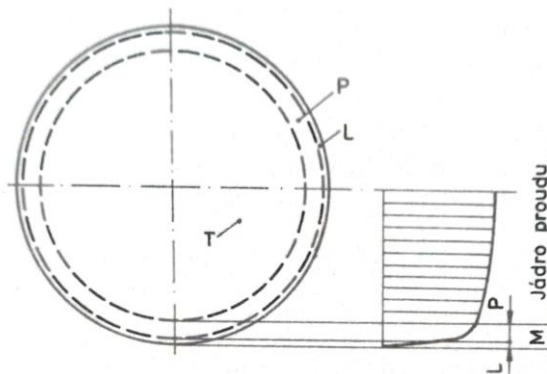
Při vyšších Reynoldsových číslech je částicemi vykonáván pohyb neuspořádaný, který je náhodný, nepravidelný a připomíná tepelný pohyb molekul. V důsledku pohybu částic směrem kolmo ke stěně a díky tomu způsobenému zvýšení toku hybnosti ke stěně je ve směru proudění mnohem větší pokles tlaku než u laminárního proudění (gradient rychlosti na stěně  $dv/dy$  je větší). [4]

Proměnlivost pole rychlosti (spolu s jinými hydrodynamickými veličinami) vede k intenzivnímu míšení prostředí. Nehomogenity vzniklé například šířením tepla ze zdroje umístěného v proudu tekutiny se právě díky intenzivnímu míšení vyhlazuje v blízké vzdálenosti od místa jejich vzniku. V blízkém okolí jejich zdroje se tak ustálí relativně prudký spád hodnot dotyčných vlastností, díky čemuž je jejich intenzita sdílení v turbulentním

proudu velmi vysoká. Proto má také jev turbulence ve spojení z intenzifikací transportních jevů (hmotnost, hybnost, energie) základní technický význam. [4]

Na základě experimentálních měření bylo dosaženo následujícího zjištění: na stěnách potrubí nebo obtékaného tělesa vzniká tzv. laminární podvrstva, tj. vrstva kapaliny, jejíž pohyb se dá klasifikovat jako laminární a která má tloušťku několik desetin milimetru. Tato podvrstva vzniká z důvodu utlumení turbulentní složky rychlosti. Těsně za touto podvrstvou se nachází oblast přechodové vrstvy, na jejíž druhé straně se nachází turbulentní jádro. [4]

Na obr. 3 je zobrazen turbulentní proud v kruhovém potrubí, kde T je jádro turbulentního proudu, M je turbulentní mezní vrstva, L je laminární podvrstva a P je přechodová vrstva.



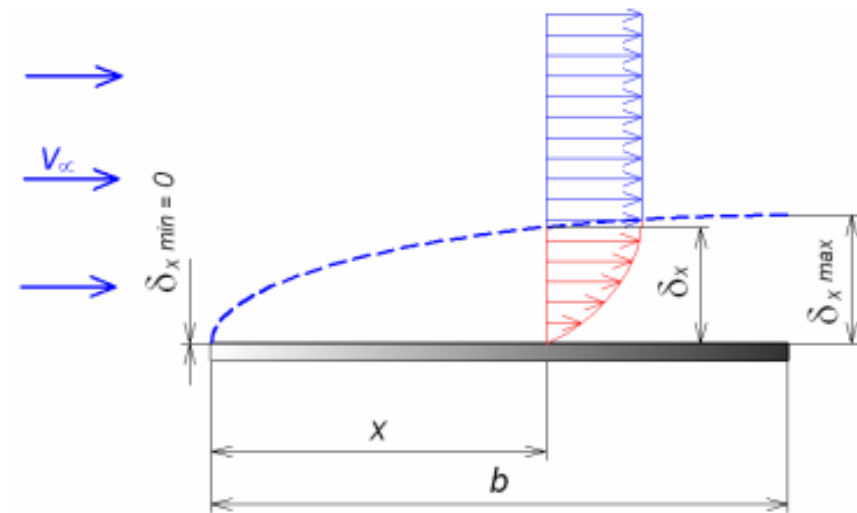
Obr. 3: Turbulentní proud v potrubí [4]

*T – jádro turbulentního proudu, M – turbulentní mezní vrstva, L – laminární podvrstva, P – přechodová vrstva*

## 1.7 Mezní vrstvy

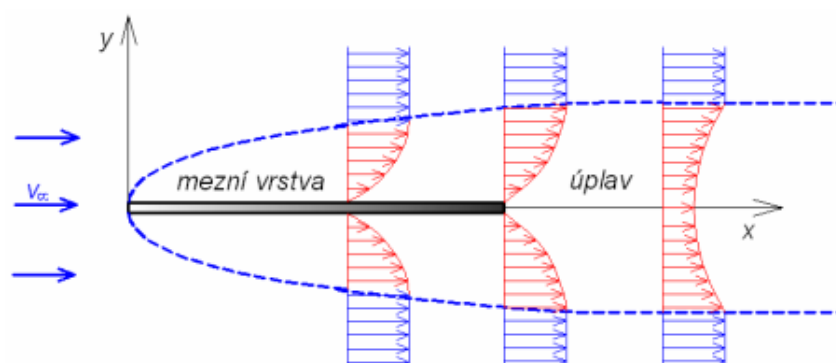
V turbulentním proudění je mezní vrstva tvořena laminární podvrstvou spolu s přechodovou vrstvou. Na povrchu všech těles, které jsou unášeny nebo obtékány tekutinou, vzniká tenká vrstva zpomalené tekutiny, která se nazývá mezní vrstva a je vytvořena vlivem viskozity. Tato vrstva může mít vícero podob, přičemž její nejjednodušší případ vzniká na tenké rovinné desce umístěné paralelně s proudem tekutiny, přičemž v celém objemu této desky se vyskytuje konstantní tlak. Mezní vrstva vzniká tak, že tekutina na stěně ulpí, tj.  $v_0 = 0$ . Vlivem viskozity se zpomalí i další vrstvy tekutiny vzdálenější od povrchu desky. Rychlost narůstá s odlehlostí od stěny až na rychlost nenarušeného

proudu  $v_\infty$ . Tato tloušťka zpomalené tekutiny  $\delta_x$  (m) je u náběžné hrany nulová a na odtokové hraně je maximální, viz obr. 4.



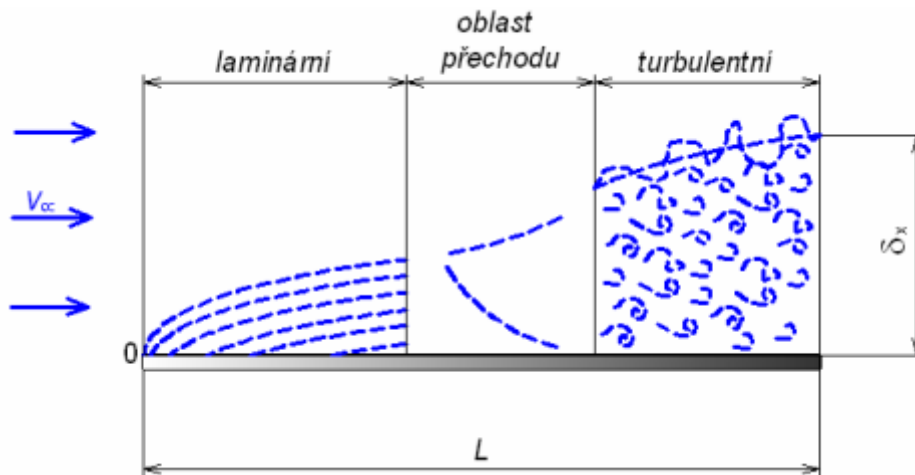
Obr. 4: Schematické zobrazení mezní vrstvy [5]

V oblasti kolem desky, viz obr. 5, nemají hranice mezní vrstvy tvar paralelních přímek, ale asymptoticky se rozbíhají. Rychlost volného proudu  $v$  je mnohonásobně vyšší oproti její složce kolmé k desce a z toho důvodu lze tuto složku zanedbat. Rychlost proudu je mimo mezní vrstvu v každém místě téměř konstantní, tedy  $\frac{\partial v_\infty}{\partial y} = 0$ , a proto i tečné napětí je zde rovno nule, nezáleží tedy na viskozitě tekutiny. Bernoulliho rovnice pro ideální tekutiny, tedy zákon zachování mechanické energie ideální kapaliny používaný pro analytický výpočet (1), je tedy platná pro všechna místa mimo mezní vrstvu a lze ji použít při výpočtech. V mezní vrstvě již ale viskozitu zanedbat nelze. [5]



Obr. 5: Mezní vrstva na desce [5]

Na obr. 6 je schematicky znázorněn rozvoj od laminární po turbulentní mezní vrstvu. Ve přední části z pohledu směru proudění je mezní vrstva laminární, následuje přechodová oblast a v zadní části je mezní vrstva turbulentní. Okamžitá hranice turbulentní mezní vrstvy je proměnlivá v závislosti na čase. Střední tloušťka turbulentní mezní vrstvy je zakreslena čárkovaně, je však zpravidla větší než tloušťka laminární mezní vrstvy. [5]



Obr. 6: Smíšená mezní vrstva na desce [5]

Pro výpočet tloušťky mezní vrstvy je nutné zavést Reynoldsovo číslo  $Re_x$ , kde je charakteristickým rozměrem vzdálenost od náběžné hrany:

$$Re_x = \frac{v_\infty \cdot x}{\nu} \quad (7)$$

Toto Reynoldsovo číslo je následně porovnáno s kritickou hodnotou (v případě obtékání desky  $Re_{kr} = 5 \cdot 10^5$ ) a v případě, že je  $Re_x$  nižší než kritické a jedná se o laminární proud, jedná se o laminární mezní vrstvu, jejíž výpočet lze provést pomocí vztahu:

$$\delta_L = \frac{3,46 \cdot x}{\sqrt{Re_x}} \quad (8)$$

V případě, kdy je Reynoldsovo číslo vyšší než kritické, jedná se o turbulentní mezní vrstvu, jejíž velikost může být určena vztahem:

$$\delta_T = \frac{0,37 \cdot x}{\sqrt[5]{Re_x}} \quad (9)$$

Jedna z metod pro vyhodnocení tloušťky mezních dat z experimentálně naměřených dat se nazývá metoda 99 %. Hranice mezní vrstvy je na 99 % ustálené rychlosti, tj. rychlosti volného proudu.



## 2 PIV

V posledních letech se v experimentální mechanice tekutin používá několik měřících metod využívajících laser, skupinově se označují laserová anemometrie. Jsou jimi *Laser Doppler Anemometry* (LDA), *Phase Doppler Anemometry* (PDA), *Laser Two-Focus Anemometry* (L2F) a *Particle Image Velocimetry* (PIV), která je využita v této práci.

### 2.1 Základní principy PIV

PIV je technika bezkontaktního měření pro získání okamžitého pole rychlosti. Principem měření je záznam posunu malých částic unášených proudem a jeho vyhodnocení.

V oblasti sledovaného proudového pole jsou částice osvětleny dvěma či více krátkými laserovými pulsy vygenerovanými s určitou časovou prodlevou  $\Delta t$ . Laserové záření je vytvarováno do osvětlující roviny (laserového řezu) pomocí speciální optiky. Polohy částic v měřící rovině jsou zaznamenány na médium, které je citlivé na světlo, například fotografický film či CCD/CMOS detektor kamery. [6]

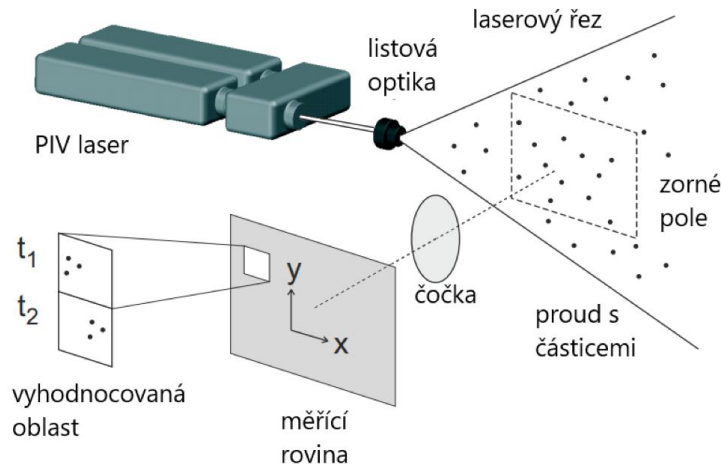
Vyhodnocení takto pořízených záznamů je založeno na elementární rovnici:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad (10)$$

kde  $v$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je rychlost,  $\Delta s$  (m) vzdálenost uražená částicí a  $\Delta t$  (s) čas mezi snímky.

### 2.2 Záznam PIV obrazů

Laserový řez definuje osvětlenou měřící rovinu v proudovém poli (viz obr.7). Částice unášené proudem rozptylují v této rovině světlo do objektivu kamery nebo fotoaparátu. Optická osa objektivu je kolmá k laserovému řezu a objektová rovina objektu je s ním totožná. Částice nacházející se v objektové rovině jsou promítnuty do obrazové roviny digitálního snímače a zaznamenány CCD/CMOS maticovým detektorem kamery nebo na film fotoaparátu. Na pořízeném záznamu kamery vypadají částice jako světlé skvrny na tmavém pozadí. [6]



Obr. 7: Typické uspořádání metody PIV [7]

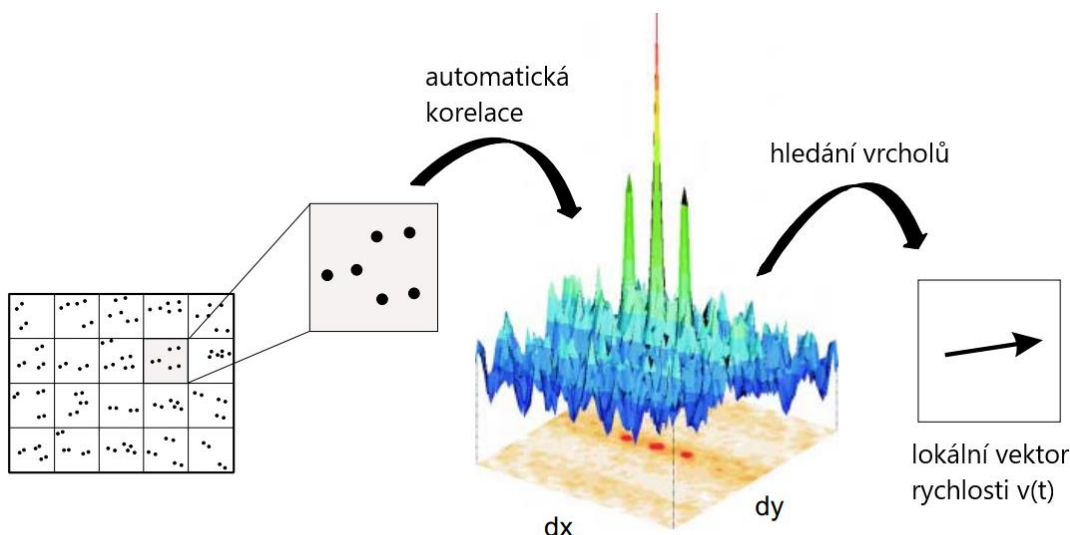
Měřicí rovina není běžně osvětlena spojitě, ale pouze po krátký okamžik. Z tohoto důvodu se využívají pulsní lasery, které osvětlují měřicí rovinu pouze po dostatečně krátký čas pro ostré zaznamenání okamžité polohy částic, a přitom poskytují dostatečně velký světelný výkon pro expozici obrazu. [6]

Pro vlastní měření je nutné pořídit alespoň dva záznamy s definovaným časovým odstupem. Na prvním záznamu je pak zachycena počáteční poloha částic, na druhém jejich koncová poloha. Oba záznamy tak nesou informaci o vektorech posunutí částic v měřené rovině. [6]

PIV obrazy jsou rozděleny na pravoúhlé oblasti, tzv. vyhodnocované oblasti (*interrogation areas*). Úkolem analýzy PIV obrazů je stanovení průměrného posunutí částic v každé vyhodnocované oblasti. Jedná se o čtverce s velikostmi hrany např. 16, 32 a 64 a volba velikosti je závislá na velikosti měřených struktur. [6]

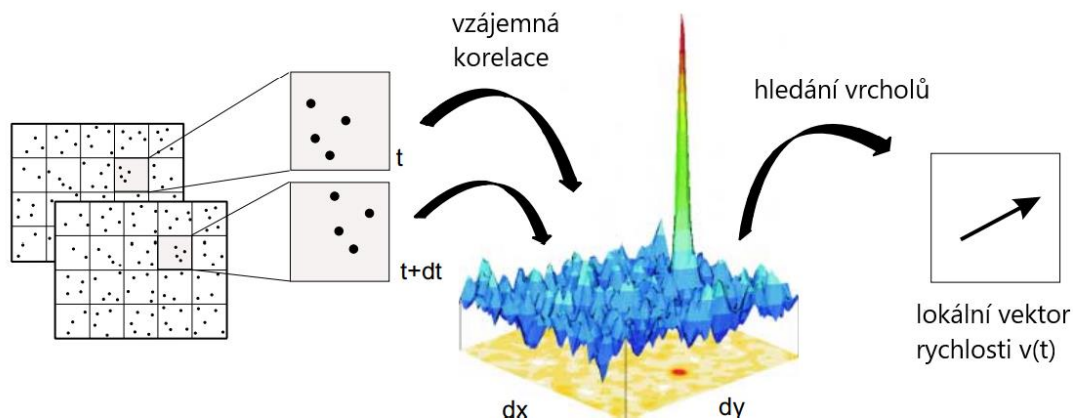
Vyhodnocení je provedeno stanovením závislosti mezi posunem jednotlivých částic neboli korelací v každé z vyhodnocovaných oblastí. Jedním ze způsobů vyhodnocení je automatická korelace, při níž se vyhodnocují oba záznamy do jednoho snímku. Druhým způsobem je vzájemná korelace, kde se porovnávají polohy na dvojici snímků. Jsou tedy možné dva způsoby záznamu PIV obrazu:

- 1) Dvojnásobná expozice (automatická korelace) – oba záznamy polohy částic v laserovém řezu jsou exponovány do jednoho obrazu. Na výsledném obrazu, který je rozdělen na vyhodnocované oblasti, se nalézají jak počáteční, tak koncové polohy částic (obr.8). [6]



Obr. 8: Vyhodnocení záznamu pomocí automatické korelace [7]

- 2) Jednotlivé expozice (vzájemná korelace) – z každého záznamu polohy částic v laserovém řezu se exponuje do samostatného obrazu. Na prvním obrazu jsou zachyceny počáteční polohy částic a na druhém koncové polohy částic (obr. 9).[6]



Obr. 9: Vyhodnocení záznamu pomocí vzájemné korelace [7]

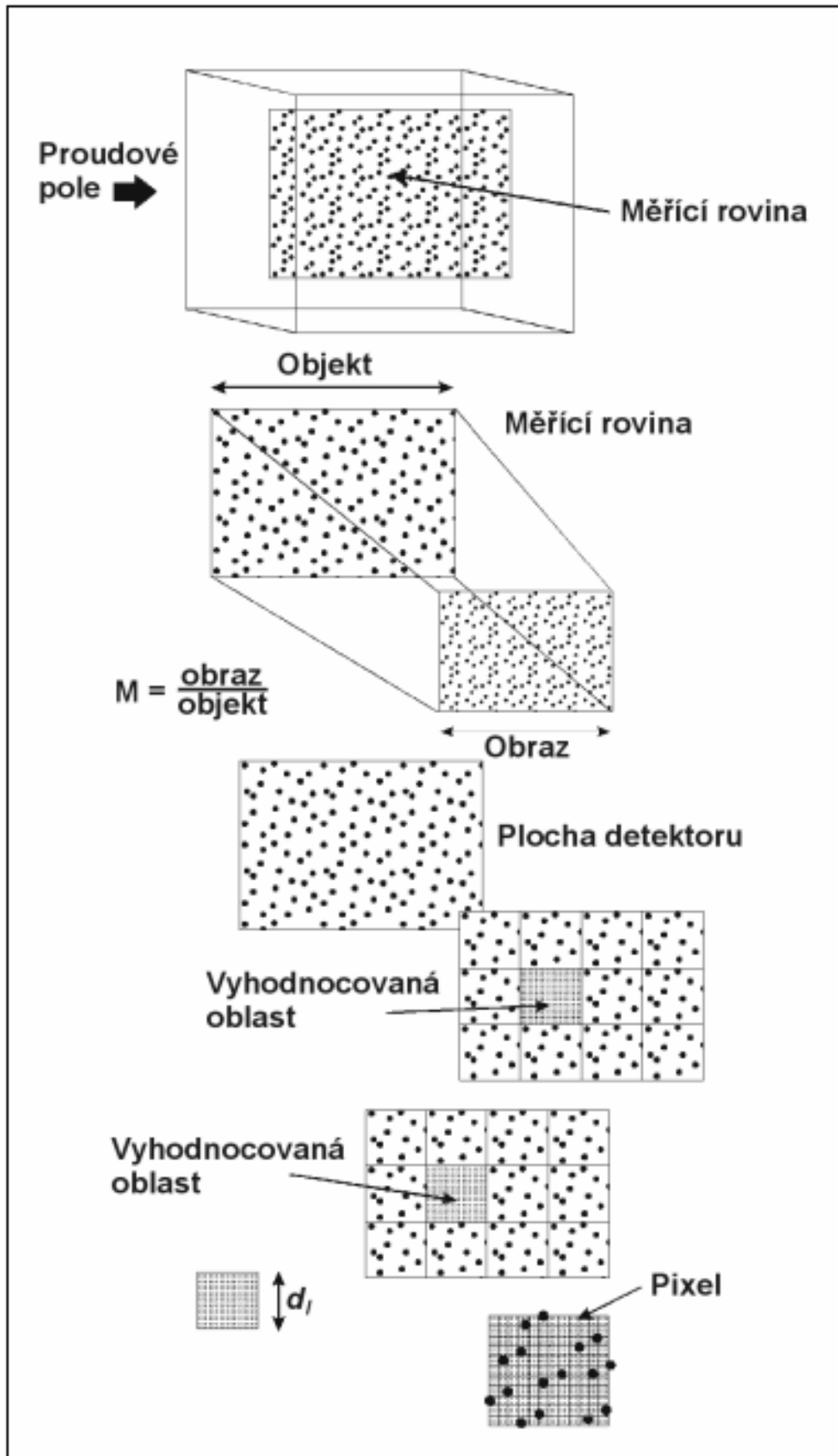
Při vyhodnocování dat je u automatické korelace obtížné vyhodnotit velice malé posuny částic z důvodu velké blízkosti korelačních vrcholů k centrálnímu vrcholu. V porovnání se vzájemnou korelací jsou zde výrazně nižší výšky vrcholů, při vyšším šumu tedy hrozí ztráta vrcholu. Jelikož jsou u metody automatické korelace obě pozice zaznamenány v jednom snímku, je vhodné použít vyšší počet částic oproti druhé metodě. [7]

Osvětlování proudového pole je realizována tvorbou tenké světelné měřicí roviny (laserového řezu). Na sytících částicích rozptýlené světlo reprezentuje signal, který je zaznamenáván kamerou. Laserový řez musí splňovat určitá kritéria, mezi které patří dostatečně velká intenzita světla rozptýleného na částicích pro pořízení PIV záznamů, dostatečně krátká délka světelného pulsu pro zanedbatelnost pohybu částic během osvitu a aby se částice neposunuly o více jak  $\frac{1}{4}$  vyhodnocované oblasti. Proto se provádí výpočet časového odstupu mezi dvojicí snímků  $\Delta t$ . Na každou vyhodnocovanou oblast mělo připadnout alespoň 5 částic pro vzájemnou korelaci a 10 částic pro automatickou korelaci. [6]

Kalibrace kamery se provádí výhradně experimentálně pomocí rovinných terčů. Tyto terče jsou etalony, které obsahují kalibrační značky s přesně určenou polohou. [6]

Základní schéma optického záznamu PIV obrazu je znázorněno na obr.10. Často se pro záznam PIV obrazů používají digitální kamery, protože přímo poskytují digitalizovaný obraz polohy částic vhodný k dalšímu zpracování. [6]

Měřicí rovina definována laserovým řezem leží v objektové rovině a je promítána do obrazové roviny maticového detektoru. Transformace mezi objektovou a obrazovou rovinou je zvětšení  $M = \text{obraz}/\text{objekt}$ . [6]



Obr. 10: Základní schéma optického záznamu PIV [6]

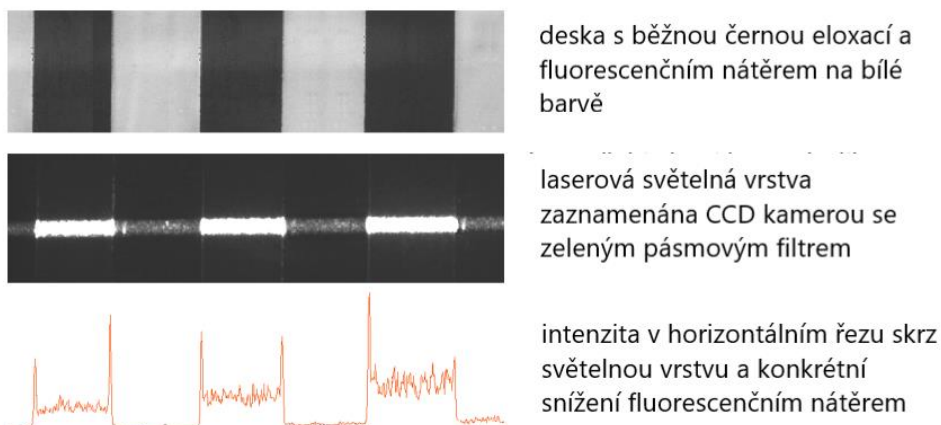
### 2.3 Stopovací částice

Pro měření touto metodou je důležitá přítomnost trasovacích částic v proudu. Tyto částice jsou velké od desetin mikrometru po jejich desítky a jejich výběr záleží na druhu proměřovaného rychlostního pole a na měřené rychlosti změn. V některých případech stačí malé částičky, které se již nacházejí v tekutině ve formě znečištění, nicméně často se je nutné tekutinu o trasovací částice obohatit. [6]

Částice by měly mít tyto vlastnosti: dobré sledování proudu, dobré rozptylování záření, vhodný způsob generování a nízká cena zařízení. Dále by měly být chemicky netečné, netoxické, nekorozi atd. [6]

### 2.4 Problematika měření u stěn

V případě, kdy je důležité měření v blízkosti stěny, jsou limitujícím faktorem odlesky, které zasahují do měřené oblasti. Intenzita těchto odlesků bývá mnohem vyšší, než je intenzita rozptýleného světla od částic. Pro získání potřebné intenzity světla částic je tedy potřeba minimalizovat intenzitu odlesků. Často stačí nabarvit oblast měření matnou černou barvou. V případech, u nichž snížení intenzity tímto způsobem není dostatečné, lze použít fluorescenční nátěr, který mění část (asi 30 %) zeleného světla laseru na červené spektrum. Během měření se na kameru nasazuje filtr, jehož cílem je blokáce červeného světla. Díky tomu se sníží intenzita nežádoucích odlesků a usnadní se vlastní měření. Ukázka je zobrazena na obr. 11. [8]



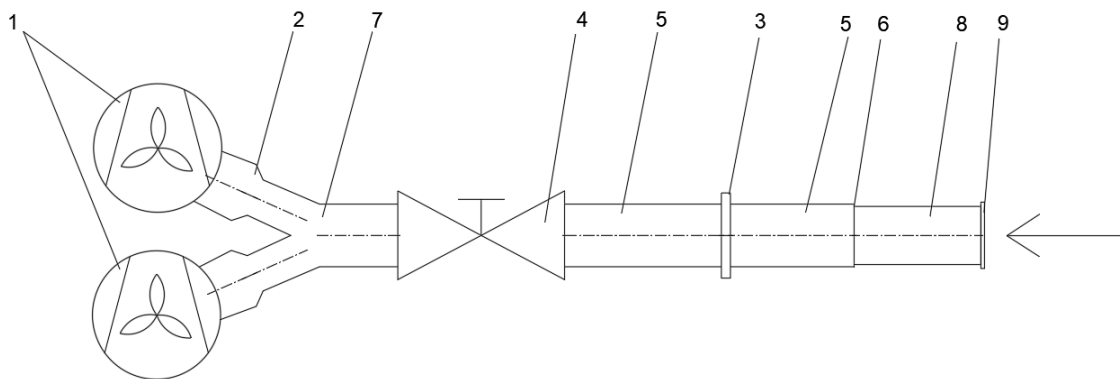
Obr. 11: Názorná ukázka snížení intenzity fluorescenčním nátěrem [8]

### 3 Uspořádání experimentu a použítá zařízení

Před stavbou měřicí trati bylo vytvořeno několik modelů pro určení použitého poměru tloušťky mezní vrstvy, potřebné rychlosti a délky obtékané desky. Tloušťka mezní vrstvy musela být dostatečně velká, aby byla měřitelná metodou PIV. Celý experiment byl proveden v pravoúhlém uspořádání.

#### 3.1 Měřicí trať

Sací měřicí trať je znázorněna na obr. 12. Skládala se ze dvou axiálních ventilátorů TT silent – M250 (1), redukce potrubí z průměru 250 mm na 200 mm (2), škrťací clony (3), ventilu (4), dvou kusů potrubí z pozinkované oceli o průměru 200 mm (5), redukce průměru z průměru 200 mm na 180 mm (6), rozbočky (7) a čiré extrudované trubky z plexiskla s vnitřním průměrem 174 mm a vnějším 180 mm (8), do které byl vložen pás plechu. Na vstup byla připevněna kovová mřížka (9) pro zvýšení intenzity turbulence.

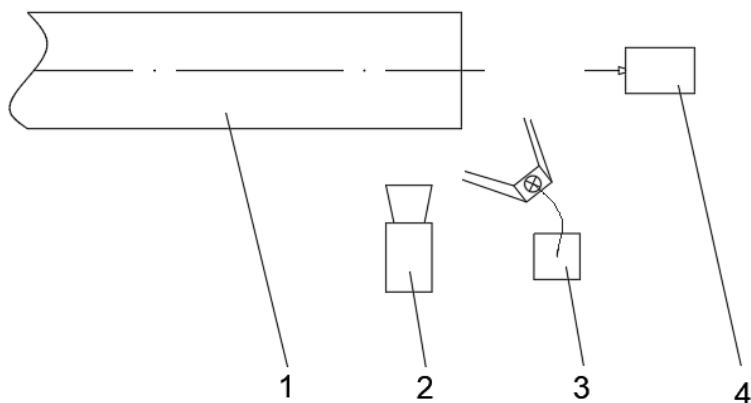


Obr. 12: Schéma měřicí tratě

1 – ventilátory, 2 – redukce potrubí, 3 – škrťací clona, 4 – ventil, 5 – ocelové potrubí, 6 – redukce potrubí, 7 – rozbočka, 8 – čirá trubka, 9 – kovová mřížka

Ventilátory byly zapojeny paralelně pro zvýšení objemového průtoku. Přechody mezi jednotlivými prvky byly utěsněny hliníkovou páskou.

Na obr.13 je zobrazen vrchní pohled na schéma uspořádání. Na schématu je znázorněna vzájemná pozice čiré trubky (1), použité kamery (2), přídatného LED světla (3) a laseru pro tvorbu tenkého laserového řezu (4), který je kolmo k rovině obrázku.

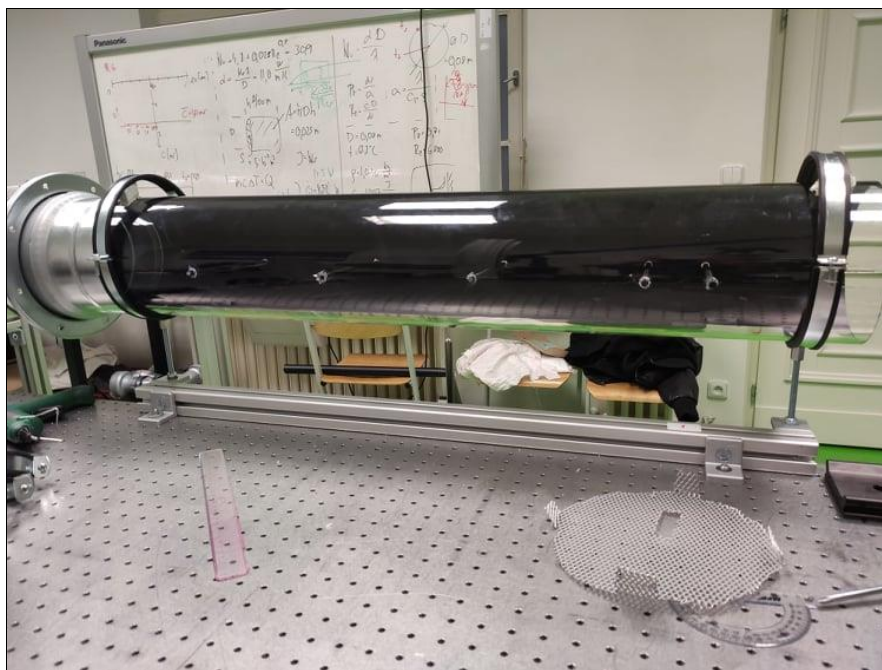


*Obr. 13: Schéma uspořádání*

*1 – čirá trubka; 2 – kamera; 3 – přídavné světlo; 4 - laser*

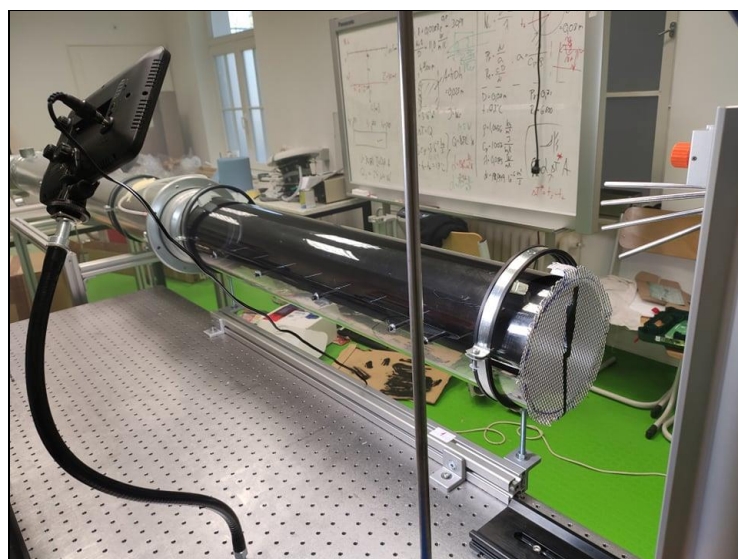
Čirá trubka (obr. 14) byla v zadní polovině nastříkána matnou černou barvou z důvodu zamezení vzniku odlesků. Následně do ní byly vyvrtány díry pro podpěry ocelového plechu. Pás plechu byl na jednom konci ohnut pro vytvoření zakulacené hrany a rovněž nastříkán černou barvou ze stejného důvodu. Plechový pás byl rovněž pokryt černou barvou a pruh, kde docházelo ke kontaktu s laserovým řezem, byl natřen transparentním akrylovým nátěrem s příměsí Rhodaminu 6G k další eliminaci odlesků. Nátěr byl namíchán v poměru 3 g Rhodaminu 6G ( $C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$ ) v 10 ml ethanolu, pro optimální fluorescenci bylo přidáno 500 ml akrylového barviva. Na plechu byly také vyznačeny značky bílým popisovačem pro vymezení vzdáleností při vyhodnocování jednotlivých úseků.





*Obr. 14: Měřicí část trati*

Po sestavení tratě byl nastaven laser, který tvořil laserový řez do měřicí roviny, tj. svislé centrální roviny trubky. Pro průchod laseru byl do plechové mřížky zhotoven úzký podlouhlý otvor. Pro zlepšení světelných podmínek při kalibraci bylo použité LED světlo, které je viditelné na obr.15.

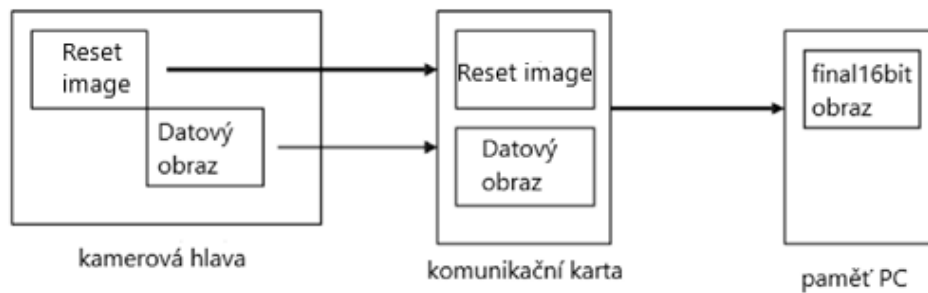


*Obr. 15: Umístění trubky z plexiskla na optickém stole*

### **3.2 Kamera a další použitá zařízení**

Pro tento experiment byla použita kamera Imager sCMOS. Tato kamera je uzpůsobena pro záznam jednotlivých expozic. Pro finální obraz je potřeba tzv. *reset image*,

tedy výchozí obraz, a datový obraz, tedy obraz po posunu částic. Oba dva obrazy jsou generovány metodou korelovaného dvojitého vzorkování a jsou poslány do komunikační karty, v níž jsou oba dva obrazy zpracovány do jednoho finálního obrazu. Komunikační karta následně pošle finální 16bitový obraz do paměti počítače. Postup je schematicky znázorněn na obr. 16. [10]



Obr. 16: Princip kamery Imager sCMOS [10]

Na kameru byl nasazen band-pass filtr se střední hodnotou pásma propustnosti 532 nm.

K produkci trasovacích částic byl využit generátor aerosolu (obr. 17).



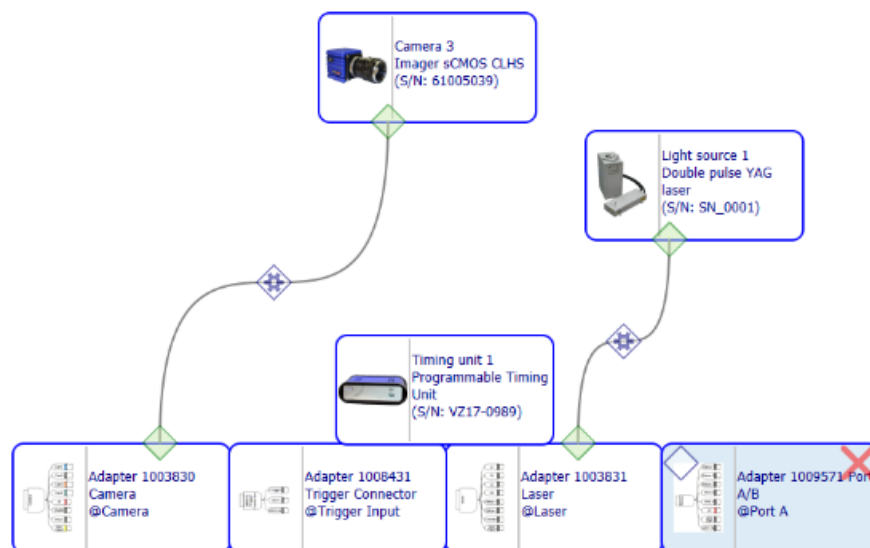
Obr. 17: Generátor aerosolu [9]

Pro orientační měření rychlosti na vstupu byl použit drátkový anemometr TESTO 425, který zprůměroval naměřené rychlosti za určitý časový úsek, zde se jednalo o 15 vteřin.

Laser byl použit *double pulse YAG laser*, který vysokou rychlostí generoval dvojice krátkých pulsů. Časový rozdíl  $\Delta t$  (viz kapitola 2.2) byl vypočten z orientační naměřené rychlosti na vstupu.

### 3.3 Zapojení měřicí aparatury

Na obr. 18 je zobrazeno schéma zapojení měřicí aparatury v uživatelském prostředí softwaru DaVis 10.2. Pro tvorbu laserového řezu zde byl zapojen laser *Double pulse YAG laser*, pro záznam obrazu byla použita kamera *Imager sCMOS CLHS* a pro synchronizaci pulsů laseru se závěrkou kamery byla zapojena jednotka *Programmable timing unit*, tzv. spouštěč (*trigger*).

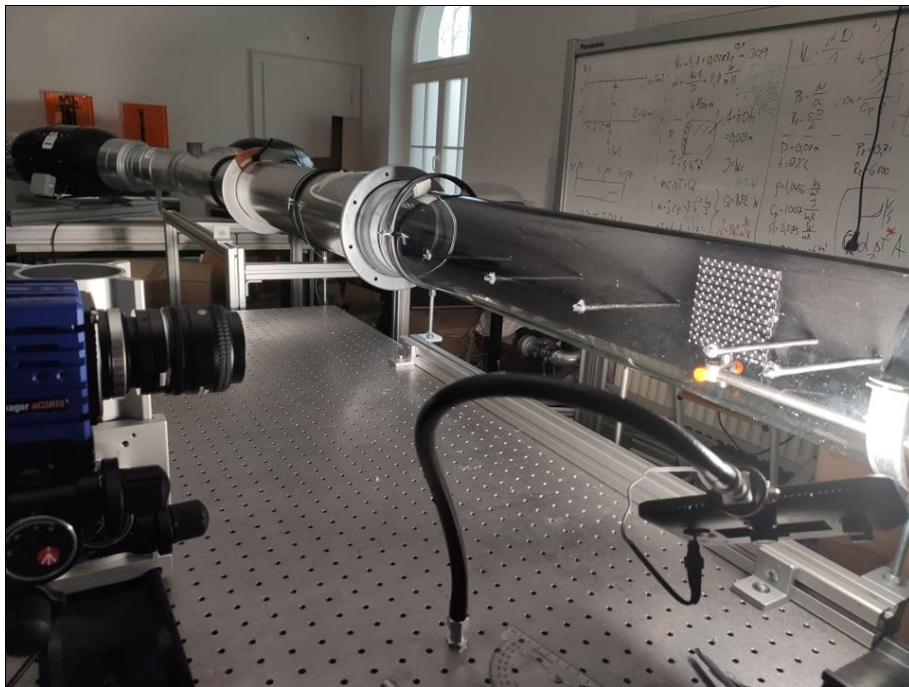


Obr. 18: Schéma zapojení

## 4 Provedení experimentu

### 4.1 Kalibrace

Kartézský souřadnicový systém surového záznamu je v pixelech. Bylo tedy nutné provedení kalibrace pro převod pixelů na milimetry. Při tomto úkonu byl použit čtvercový 3D kalibrační terč o straně 100 mm. Ten byl srovnán do roviny řezu, byla zaostřena kamera a následně byl zaznamenán obraz. Celkový pohled na kameru a kalibrační terč v prostoru experimentu je zobrazen na obr. 19.



Obr. 19: Uspořádání pro kalibraci

Obraz kalibračního terče byl vyhodnocen výpočetním programem, ve kterém byly využity bílé značky na terči pro transformaci záznamu z pixelů na milimetry.

### 4.2 Záznam dat

V laboratoři byla před měřením naměřena teplota  $21 \pm 0,5$  °C. Pomocí lineární aproximace byla z teploty zjištěna velikost kinematické viskozity, která byla použita pro výpočet Reynoldsova čísla. Během chodu paralelně zapojených ventilátorů byla dle anemometru na začátku měřicí trati dosažena střední rychlost  $14,03 \pm 0,73$  m/s.

Naměřená rychlost byla také použita pro vyhodnocení charakteru proudění v měřené trubce kruhového průřezu. Jelikož bylo v tomto případě  $Re_{krit} < Re$  ( $2300 < 161\,000$ ), proudění bylo vyhodnoceno jako turbulentní.

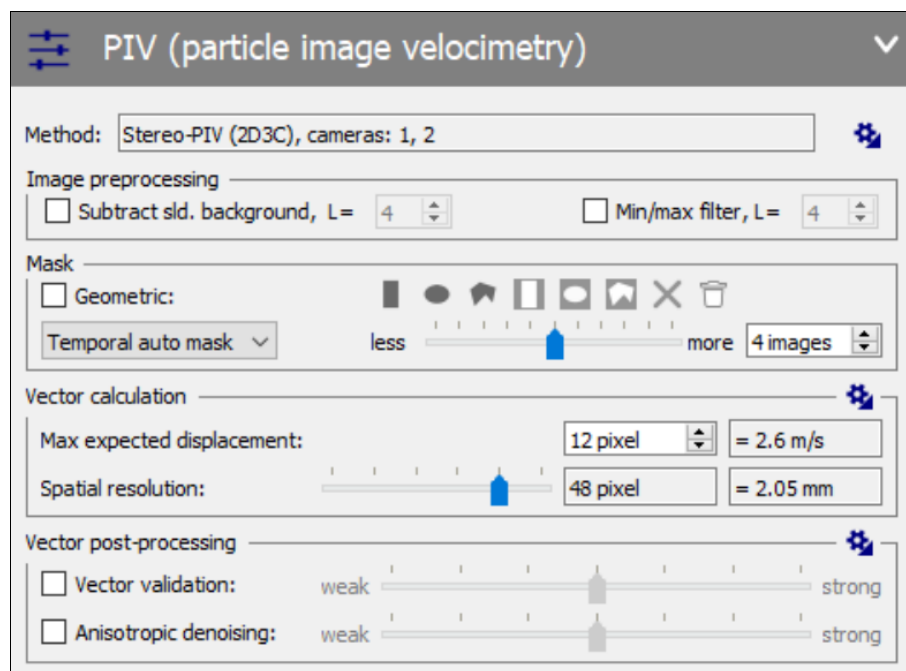
Měřeno bylo 7 různých úseků z důvodu kompletního pokrytí plechového pásu, respektive mezní vrstvy nad ním. Kamera byla posouvána do požadovaných oblastí po kolejnici. V každé měřené oblasti byl před měřením zaznamenán snímek bez filtru pro přesnější určení polohy snímku při vyhodnocovacích operacích. Místnost byla vyplněna částicemi aerosolu pomocí generátoru aerosolu (kapitola 3.2 Kamera a další použitá zařízení).

Zaznamenáno bylo 300 dvojic snímků na každé poloze pro statistické zpřesnění získaných dat.

## 5 Vyhodnocení experimentu

Pro zpracování dat byl použit software DaVis 10.2. s modulem Flowmaster pro PIV. Naměřená data byla vyhodnocena nejdříve výpočetní operací softwaru. Metodika této operace je založena na vyhodnocování obrazů pomocí vzájemných korelací, viz kapitoly 2.1 a 2.2.

Processing se dělí do čtyř hlavních částí: *image preprocessing*, nastavení masky, kalkulace vektorů a *vector postprocessing*. Dialogové okno processingu je zobrazeno na obr. 20.



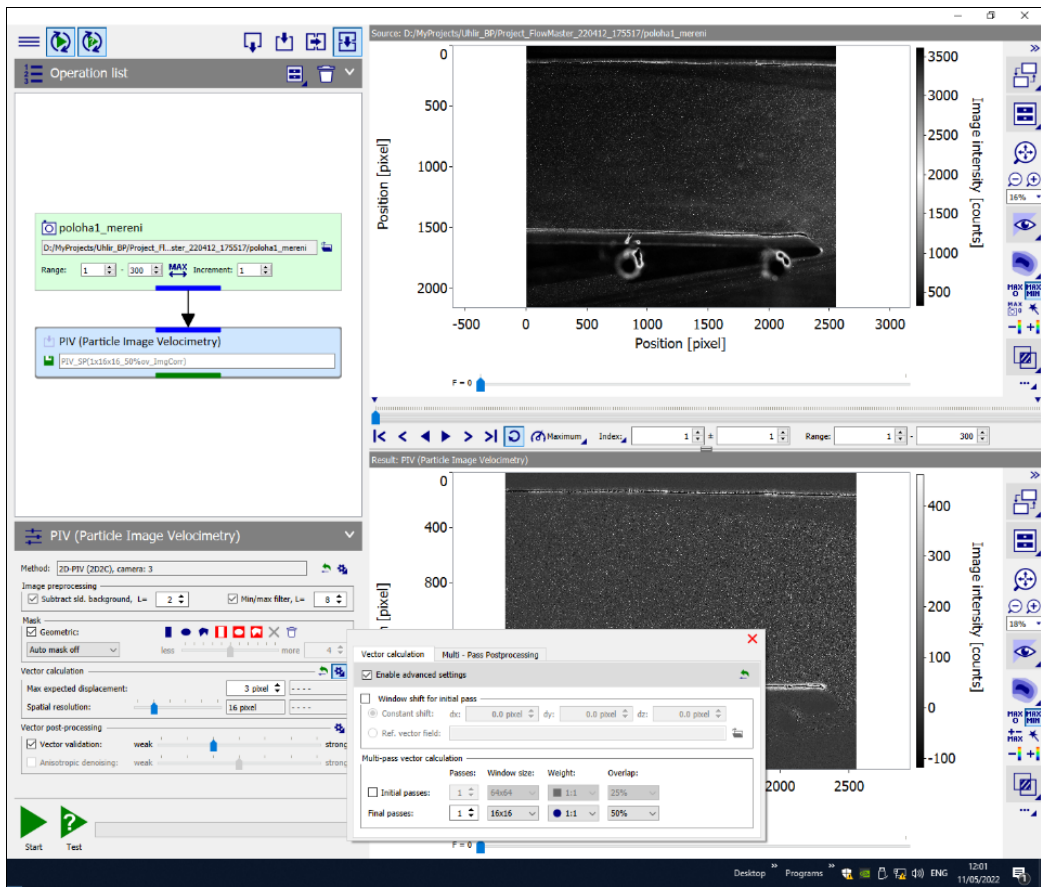
Obr. 20: Ilustrační obrázek nastavení výpočtu PIV [7]

Část *image preprocessing* obsahuje nastavení *Subtract a sliding background*, jež je užitečný v případě nemožnosti zabránit fluktuacím intenzity na pozadí z důvodu např. odlesků, a *Min/max filter*, který slouží pro korekci nerovnoměrně rozložených částic. [7]

Nastavení masky (*mask*) slouží pro stanovení oblasti výpočtu.

Pro kalkulaci vektorů jsou důležité dvě věci: maximální předpokládané posunutí částic (*max expected displacement*) a prostorové rozlišení (*spatial resolution*) neboli velikost vyhodnocované oblasti.

V části *vector postprocessing* se nachází funkce *vector validation* nastavující kritéria pro validaci vektoru a *anisotropic denoising* pro určení rovnováhy mezi vyhlazováním výsledků a chybou vzniklou funkcí *vector validation*.



Obr. 21: Použité nastavení operace PIV

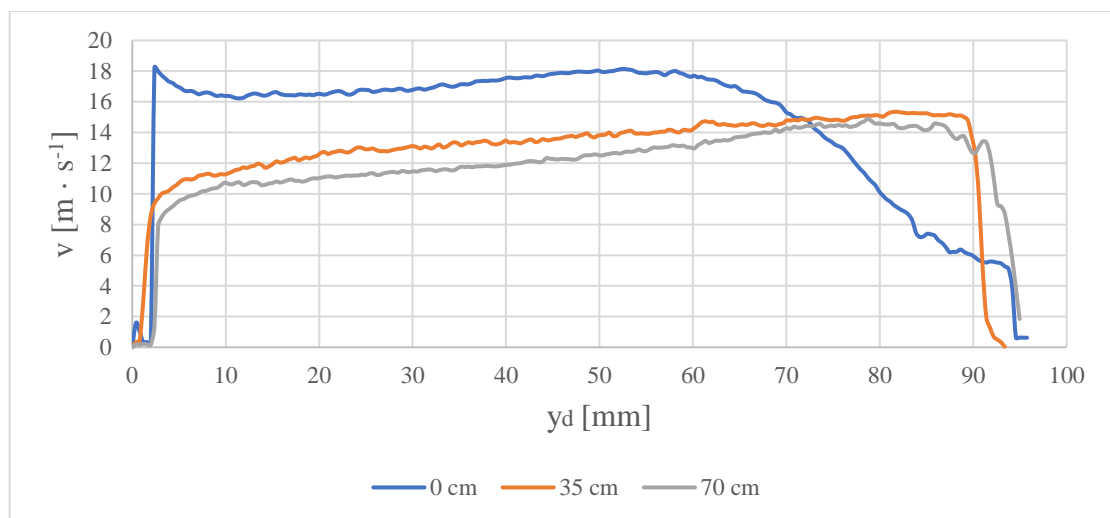
Na obr. 21 je zobrazen celkový pohled na uživatelské prostředí dialogového okna pro výpočet vektorového pole. Data byla vyhodnocena s velikostí vyhodnocované oblasti  $16 \times 16$  pixelů.

Anemometrem naměřená rychlost byla použita pro bližší nastavení časového rozdílu  $\Delta t$ , viz kapitola 2.2. Velikost každé vyhodnocované oblasti zde byla  $16 \times 16$  pixelů. Tato velikost byla vybrána z důvodu co nejmenšího prostorového rozlišení vektorového pole, které je potřeba pro vyhodnocení mezní vrstvy, a hustoty sycení. Maximální teoretický posun byl stanoven na 3 pixely, byl tedy spočítán čas mezi expozicemi  $\Delta t = 14 \mu s$  a zvolen čas  $\Delta t = 10 \mu s$ .

## 5.1 Získané výsledky

Jeden z výstupů tohoto experimentu je vyobrazení rychlostních profilů mezi obtékanou deskou a horním okrajem trubky. Pro názornost je na Graf 1 vyobrazen rychlostní

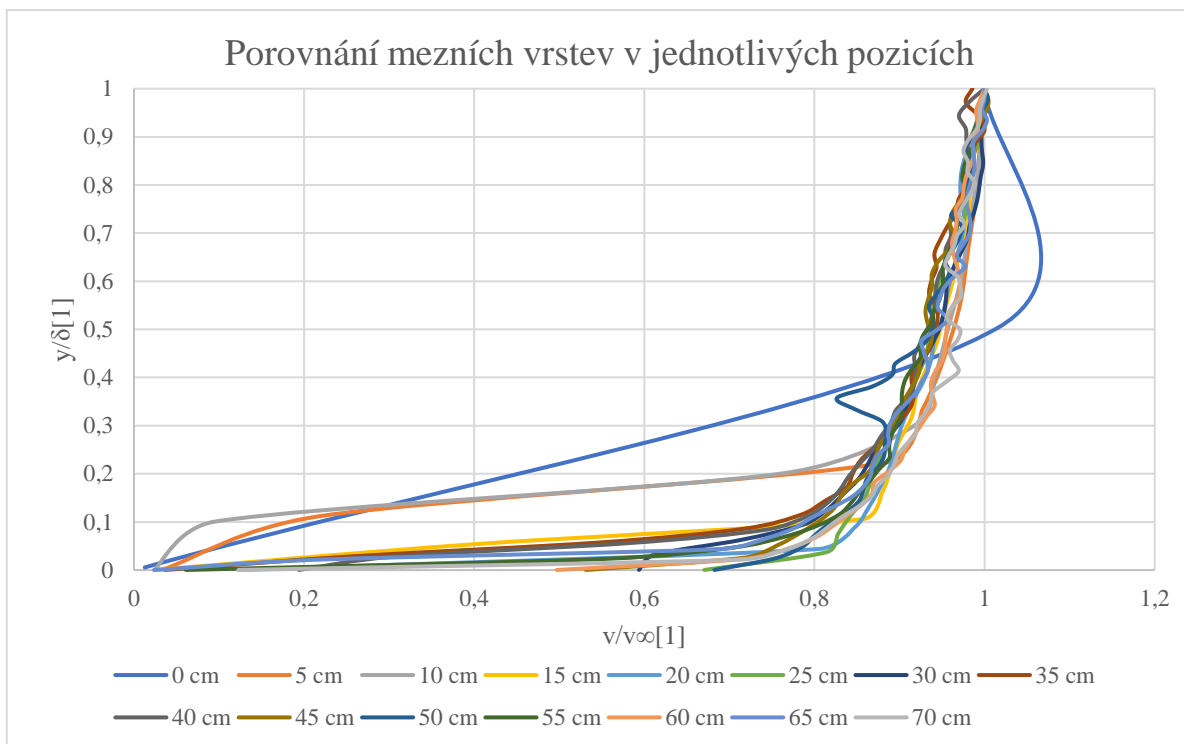
profil na počátku desky, uprostřed a konci desky. Na vodorovné ose je vzdálenost od obtékané desky a na svislé ose je průměrná rychlost v daném místě získána zprůměrováním naměřených dat z 300 měření. Úkolem této práce bylo naměření mezní vrstvy, rychlostní profily celé oblasti nad měřenou stěnou jsou zde vykresleny pro ilustraci toho, že během měření nebylo dosaženo konstantní střední hodnoty volného proudu. Velikost rychlosti s narůstající vzdáleností od stěny neustále narůstá až do oblasti, kde se projevuje vznik mezní vrstvy u stěny kanálu. Pro měření by tedy byl vhodnější větší kanál. Rychlostní profil nad náběžnou hranou je znehodnocen kvůli urychlení a náběhu.



Graf 1: Porovnání rychlostních profilů na začátku, ve prostředku a na konci obtékané desky

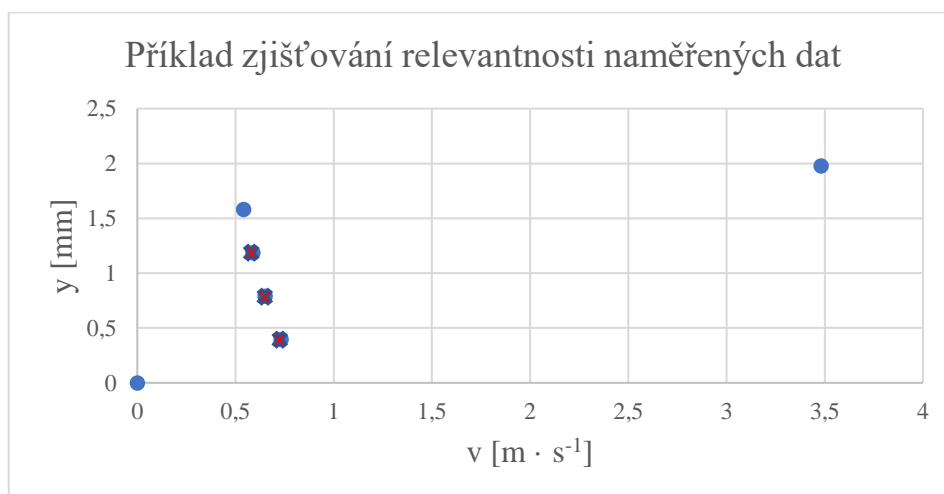
Graf 2 ukazuje porovnání mezních vrstev v jednotlivých pozicích. Zobrazené rychlosti v jednotlivých polohách jsou výsledkem zprůměrováním 300 měření. Na vodorovné ose je bezrozměrná rychlost, tedy poměr aktuální rychlosti ku rychlosti na konci mezní vrstvy. Na svislé ose je pak bezrozměrná vzdálenost, tedy poměr vzdálenosti od obtékané desky ku tloušťce mezní vrstvy v daném rychlostním profilu. Na souhrnném grafu je porovnáno 15 mezních vrstev naměřených po 5 cm od počátku náběžné hrany po konec obtékané desky. Počátky rychlostních profilů v tomto grafu nemají stejný průběh na počátku kvůli rozdílnému počtu naměřených hodnot kvůli velkému rozpětí tloušťky mezní vrstvy mezi profily. V případě zobrazení mezních vrstev bez použití bezrozměrné vzdálenosti část grafu s rapidním nárůstem rychlostí splývá. Rychlostní profily mají také se zvyšující se vzdáleností od náběžné hrany nižší rozpětí naměřených rychlostí ve volném proudu. Nejistota měření u naměřených hodnot není u žádné z naměřených hodnot větší než 1 procento.





Graf 2: Porovnání mezních vrstev

Nejnižší spolehlivá měřitelná vzdálenost platíci pro všechny profily je 2,8 mm. Vyhodnocení proběhlo určením chybných hodnot naměřených v těsné blízkosti obtékané desky. Chybné hodnoty se daly rozeznat tím, že se v jedné poloze zvýšila rychlost a hned v následující poloze se snížila, kdy je tento úkaz v rozporu s teorií, viz kapitola 1.7. Toto platilo u nízkých rychlostí (pod  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Příklad vyhodnocení chybných hodnot je na obr. 22. Na obrázku je vidět počátek mezní vrstvy, kde jsou křížky vyznačeny hodnoty v rozporu s teorií.

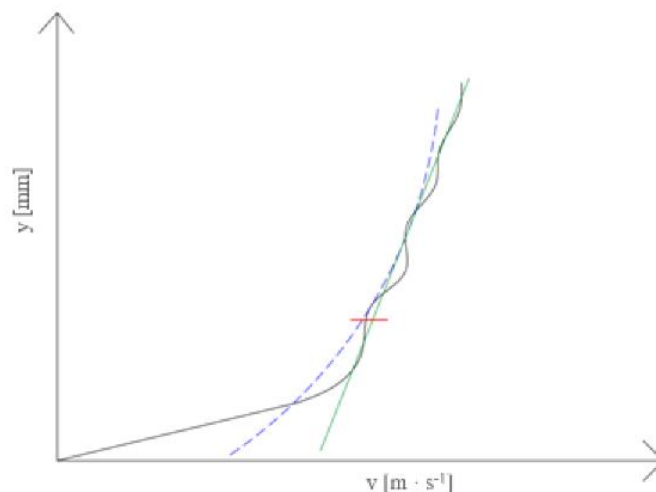


Obr. 22: Příklad zjišťování relevantnosti naměřených dat

Obrázky surových dat i vypočtených vektorových polí v několika měřicích úsecích se nacházejí v příloze 1. Všech 15 získaných rychlostních profilů naměřených s krokem po 5 cm se nachází v příloze 2.

## 5.2 Tloušťka mezní vrstvy

Tloušťka mezní vrstvy byla v této práci určena metodou 99 %, viz kapitola 1.71.7 Mezní vrstvy. V případě, kdy rychlost nedojde do stavu ustálení (kvůli nedostatečné velikosti kanálu) se tato metoda lehce upraví. Nejprve se naměřená data proloží polynomem vhodného stupně a poté je k tomuto polynomu vytvořena tečna, která odpovídá konstantnímu nárůstu rychlosti. Poté se data porovnávají s touto tečnou již stejným způsobem. Tato alternativa je schematicky znázorněna na obr. 23, kdy černá křivka reprezentuje naměřená data, modrá křivka reprezentuje polynom, zelená čára tečnu na polynom a červená čára vyhodnocení 99 % rychlosti oproti tečně.

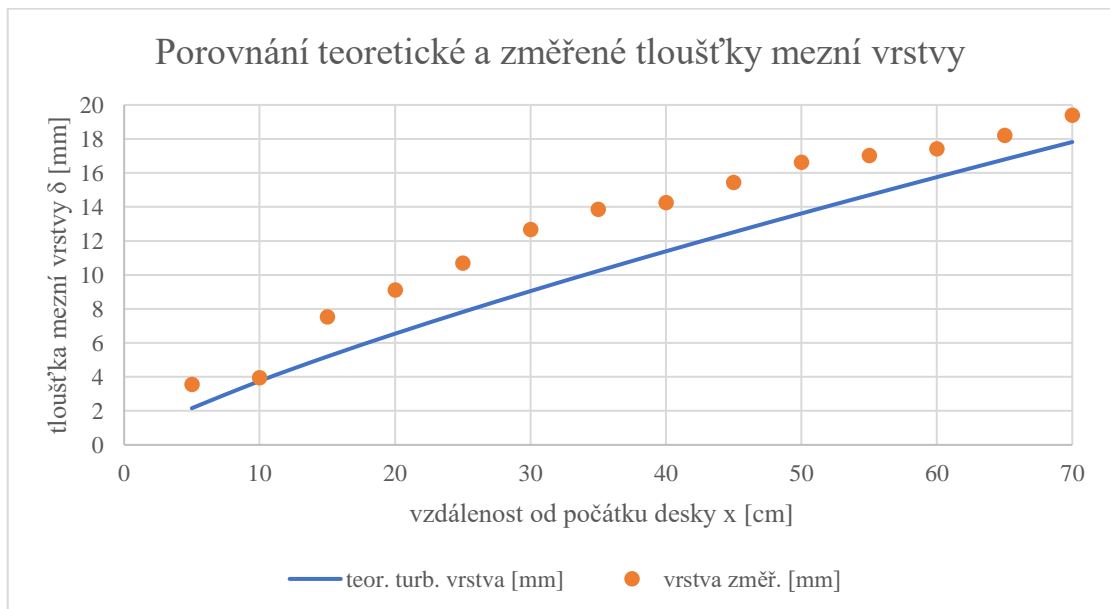


Obr. 23: Schéma vyhodnocení metodou 99 % při nedosažení konstantní střední rychlosti volného proudu

V tabulce 2 je zobrazeno porovnání hodnoty naměřené a vypočtené de rovnice (9) v daném místě včetně procentuální odchylky. Hodnoty jsou graficky znázorněny na Graf 3, kde je na vodorovné ose vyznačena vzdálenost od náběžné hrany a na svislé ose tloušťka mezní vrstvy. Znehodnocená vstupní hodnota byla z Graf 3 vyřazena.

Tabulka 2: Porovnání tloušťky mezní vrstvy

| vzd. od poč. desky [cm] | teor. turb. vrstva [mm] | vrstva změř. [mm] | odchylka od teorie |
|-------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|
| 0                       | 0,341972646             | 1,9784            | 479%               |
| 5                       | 2,157701524             | 3,5611            | 65%                |
| 10                      | 3,756776555             | 3,9568            | 5%                 |
| 15                      | 5,196230074             | 7,5179            | 45%                |
| 20                      | 6,540927892             | 9,1006            | 39%                |
| 25                      | 7,819290925             | 10,6834           | 37%                |
| 30                      | 9,047162036             | 12,6618           | 40%                |
| 35                      | 10,2345747              | 13,8488           | 35%                |
| 40                      | 11,38841692             | 14,2445           | 25%                |
| 45                      | 12,51368953             | 15,4316           | 23%                |
| 50                      | 13,61417624             | 16,6186           | 22%                |
| 55                      | 14,69283212             | 17,0142           | 16%                |
| 60                      | 15,75202401             | 17,4099           | 11%                |
| 65                      | 16,79368683             | 18,2013           | 8%                 |



Graf 3: Porovnání teoretické a změřené tloušťky mezní vrstvy

## Závěr

Cílem této bakalářské práce byl výzkum mezních vrstev nad obtékanou deskou. Teoretická část se zabývala některými ze základních procesů mechaniky tekutin a principu měření metodou PIV. Praktická část se skládala z popisu uspořádání experimentu, použitých zařízení, metodou kalibrace a zaznamenání dat, vyhodnocením vektorových polí a následně vyhodnocením mezní vrstvy.

Vyhodnocení mezní vrstvy bylo provedeno pomocí metody 99 %, v případě nedosažení konstantní rychlosti v rychlostním profilu byla použita úprava této metody. Experiment prokázal, že hodnoty naměřené rychlosti jsou relevantní už od vzdálenosti 2,8 mm od stěny napříč všemi měřenými polohami. Ověření proběhlo určením evidentně chybných hodnot na počátcích všech rychlostních profilů a poté určením nejbližší vzdálenosti k desce, kde nebyla ani jedna hodnota rychlosti vyšší než ve vzdálenější oblasti profilu.

Z měření je patrné, že nebyla dodržena podmínka konstantní rychlosti volného proudu v dostatečně velké oblasti mimo mezní vrstvu obtékané desky. Lepších výsledků by mohlo být dosaženo při měření v aerodynamickém tunelu, jehož průměr je řádově větší než tloušťka mezní vrstvy.

Pro zpřesnění výsledků by bylo rovněž vhodné zajistit větší hustotu sycení stopovacích částicemi.

## Seznam literatury

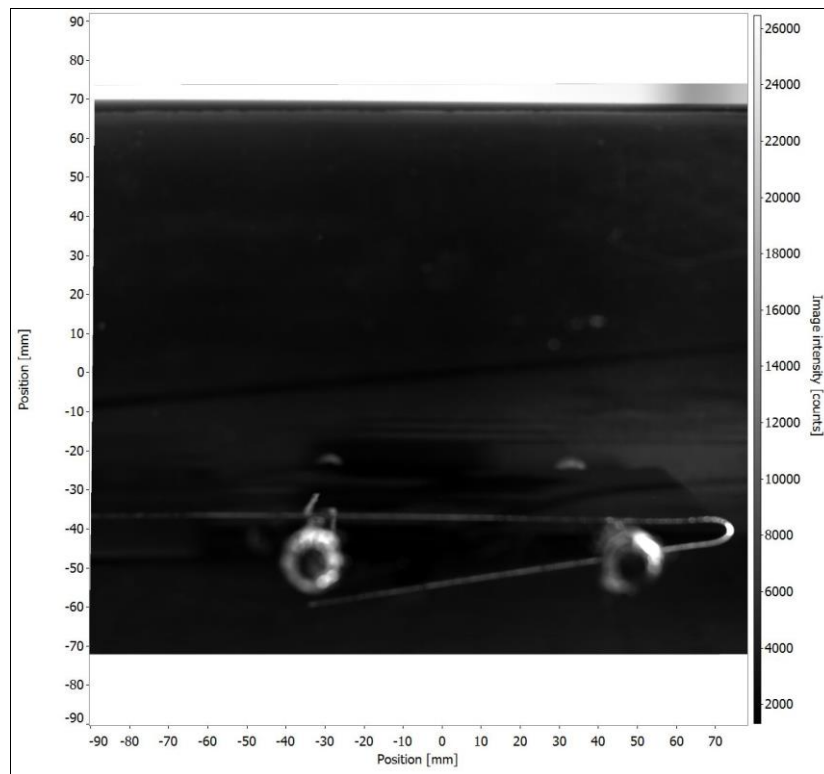
- [1] WHITE, Frank M. *Fluid mechanics*. Seventh edition in SI units. New York: McGraw Hill Education, [2010]. ISBN 978-0-07-352934-9. (Vlastní překlad)
- [2] ČMELÍK, Milan, Zdislav ŠÍMA a Lubor MACHONSKÝ. *Fyzikální tabulky*. Liberec: Technická univerzita, Pedagogická fakulta, 2001. ISBN 80-7083-515-X.
- [3] JEŽEK, Jan, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. *Mechanika tekutin*. Vyd. 3., přeprac. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01615-3.
- [4] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [5] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1508-4.
- [6] KOPECKÝ, Václav. *Laserové anemometrie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7083-945-7.
- [7] LAVISION GMBH. (2021). *FlowMaster: Product manual*. Göttingen, Germany: Author (vlastní překlad)
- [8] LAVISION GMBH. (2021). *Fluorescent Paint: Product manual*. Göttingen, Germany: Author (vlastní překlad)
- [9] LAVISION GMBH. (2021). *Aerosol Generator: Product manual*. Göttingen, Germany: Author
- [10] LAVISION GMBH. (2021). *Imager sCMOS: Product manual*. Göttingen, Germany: Author (vlastní překlad)

## **Seznam příloh**

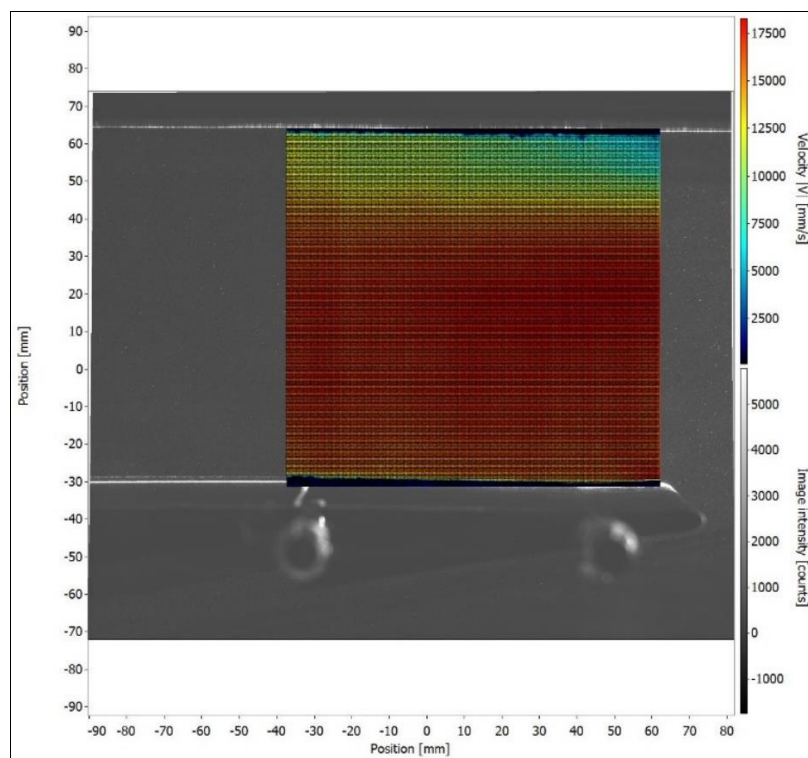
**Příloha 1:** Snímky vybraných měřených úseků spolu se zprůměrovanými rychlostními profily v nich

**Příloha 2:** Všechny naměřené rychlostní profily

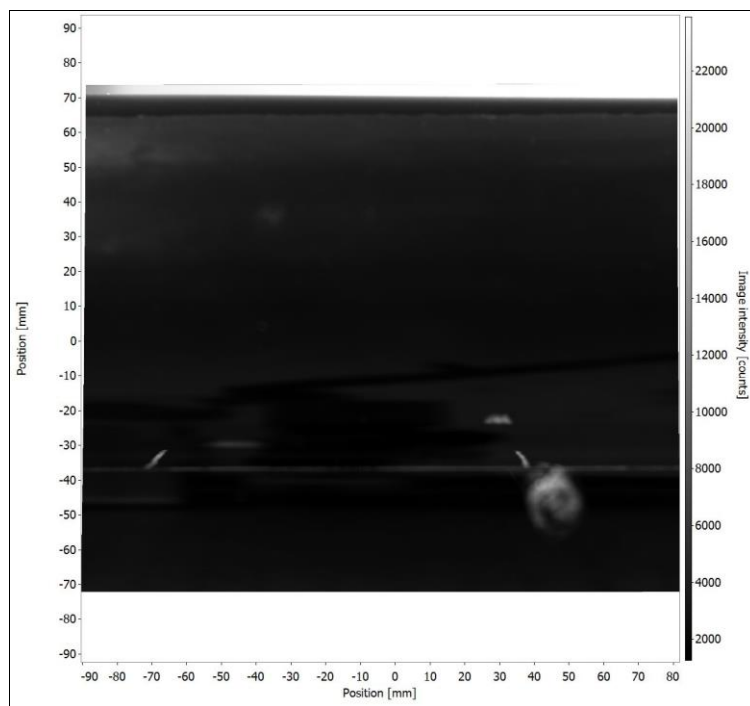
**Příloha 1:** Snímky vybraných měřených úseků spolu se zprůměrovanými rychlostními profily v nich



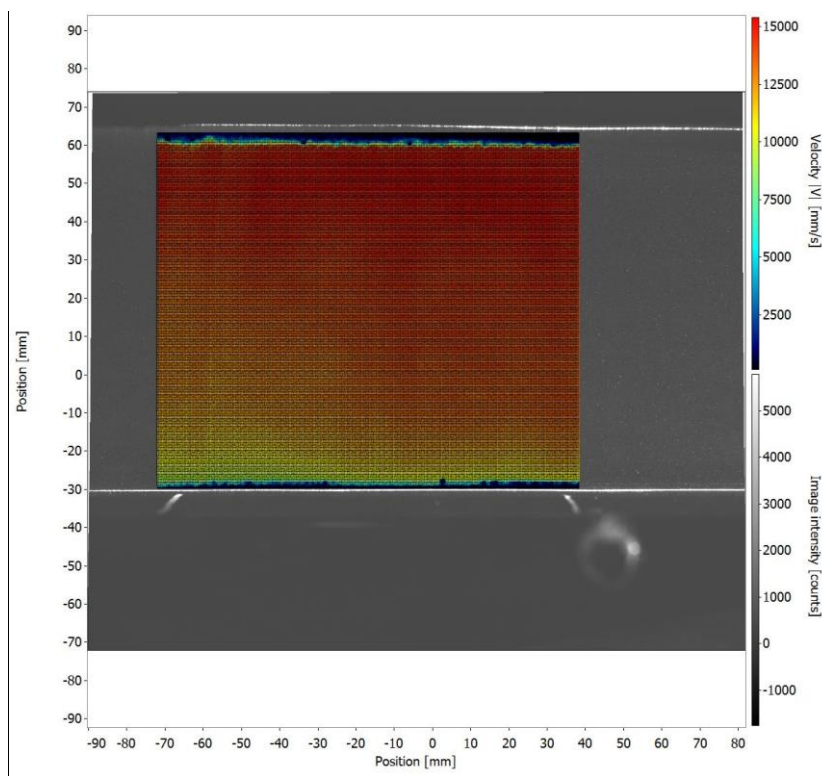
*Obr. P 1. 1: Počátek obtékané desky*



*Obr. P 1. 2: Průměrné rychlostní pole na počátku desky*

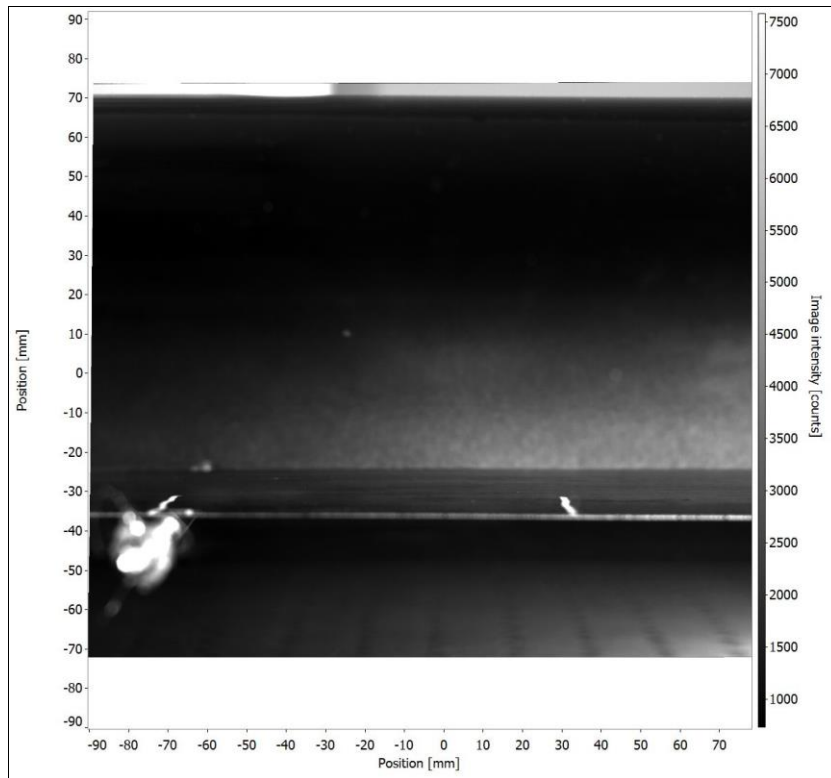


*Obr. P 1. 3: Střední úsek obtékané desky*

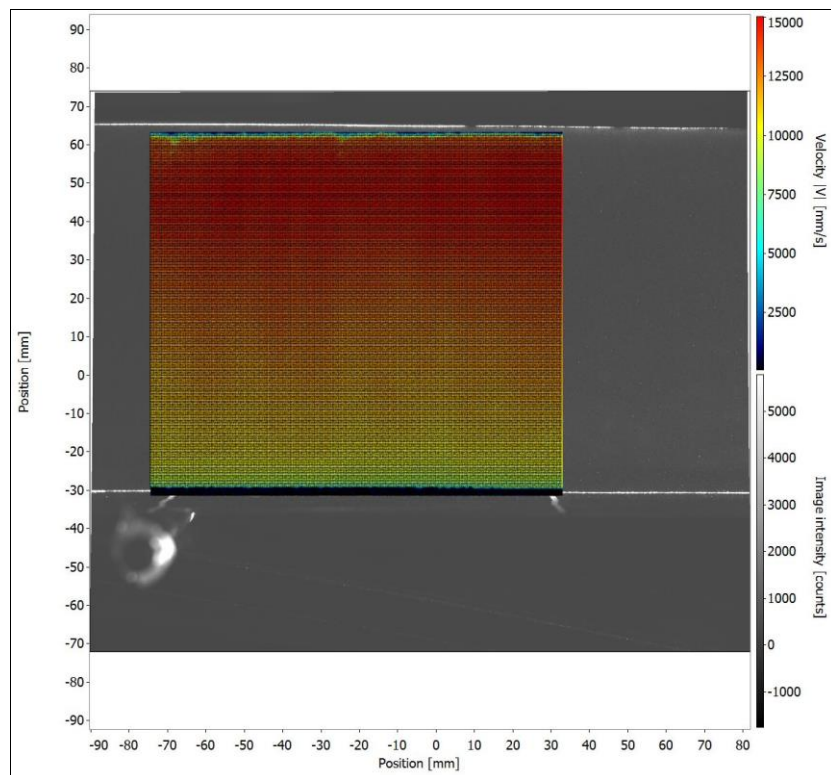


*Obr. P 1. 4 Průměrné rychlostní pole ve středním úseku obtékané desky*



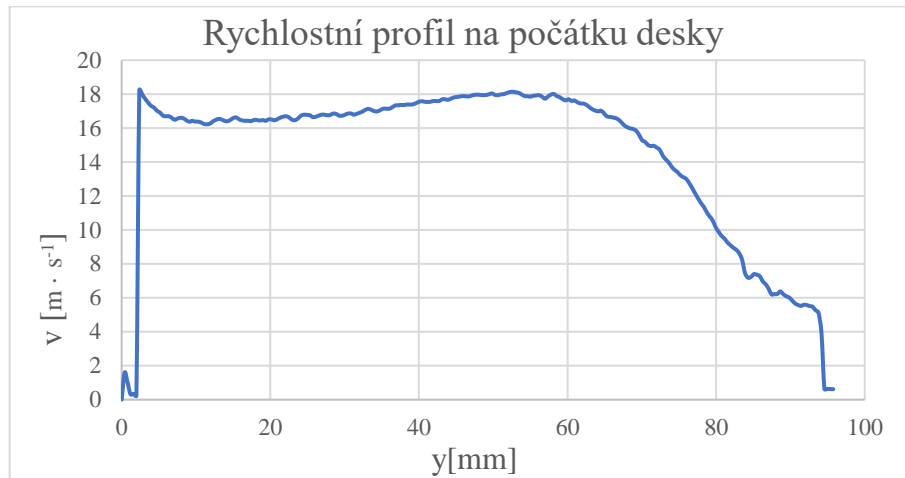


Obr. P 1. 5: Konec obtékané desky

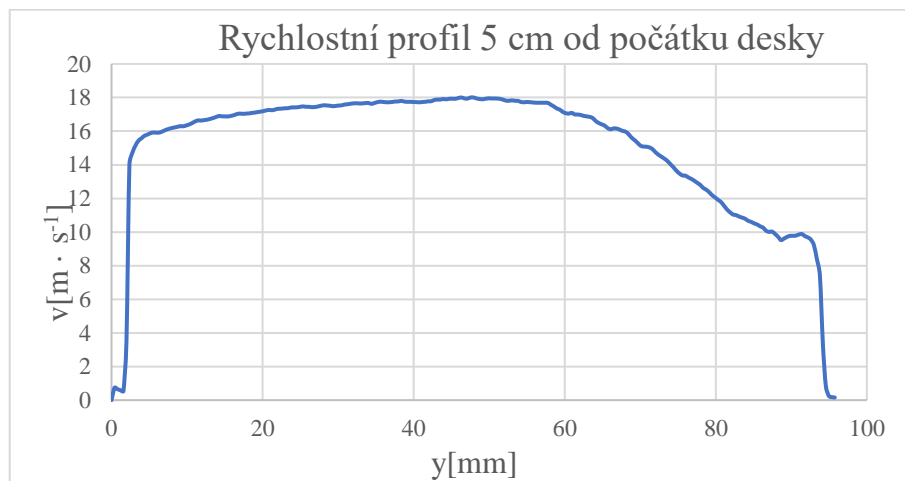


Obr. P 1. 6: Průměrné rychlostní pole na konci obtékané desky

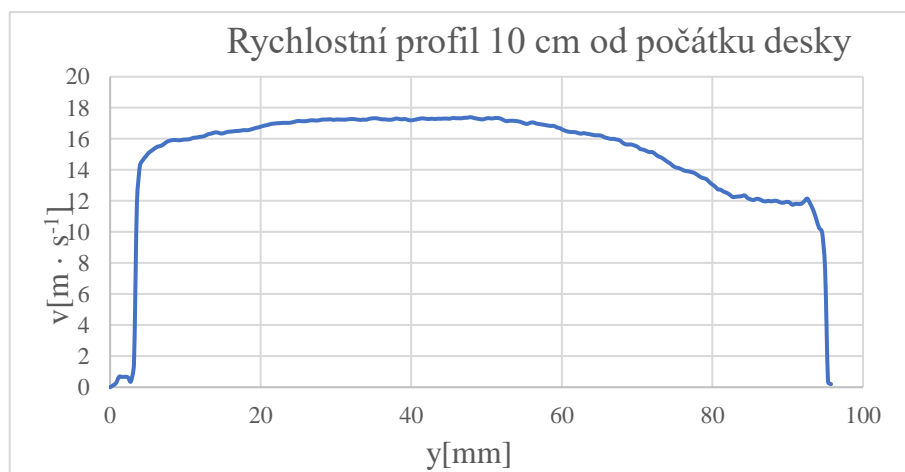
## Příloha 2: Naměřené rychlostní profily



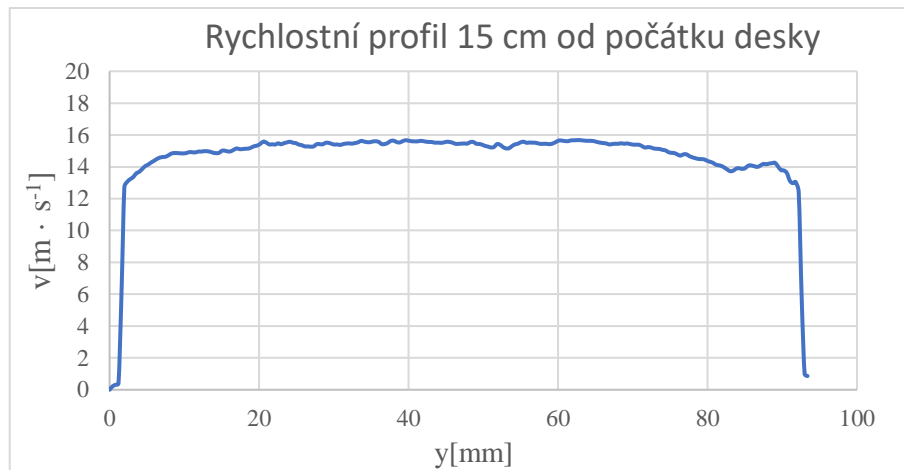
Graf P 2. 1: Rychlostní profil na počátku



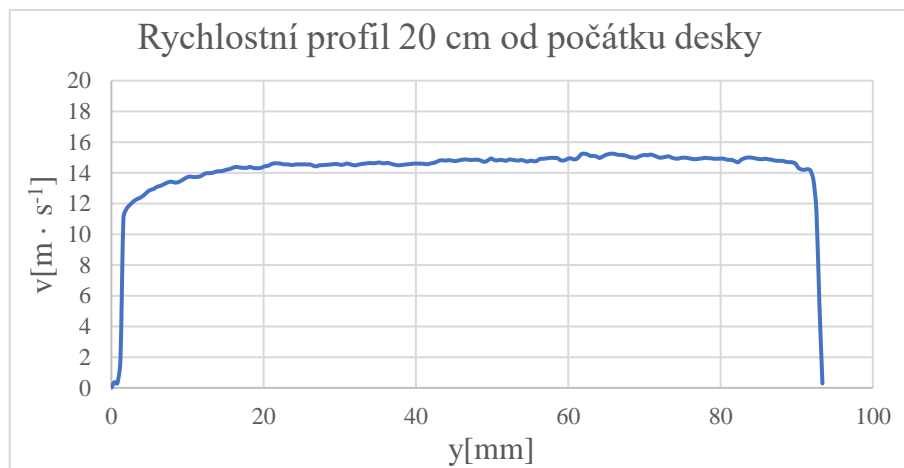
Graf P 2. 2: Rychlostní profil 5 cm od počátku



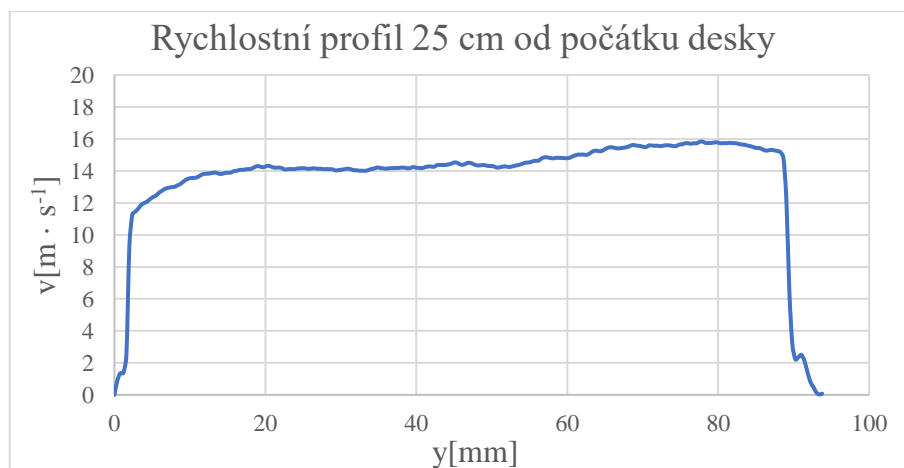
Graf P 2. 3: Rychlostní profil 10 cm od počátku



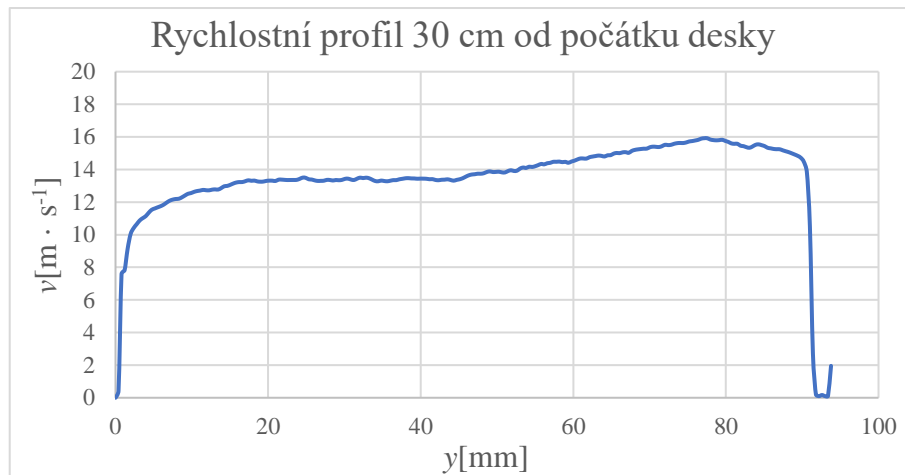
*Graf P 2. 4: Rychlostní profil 15 cm od počátku*



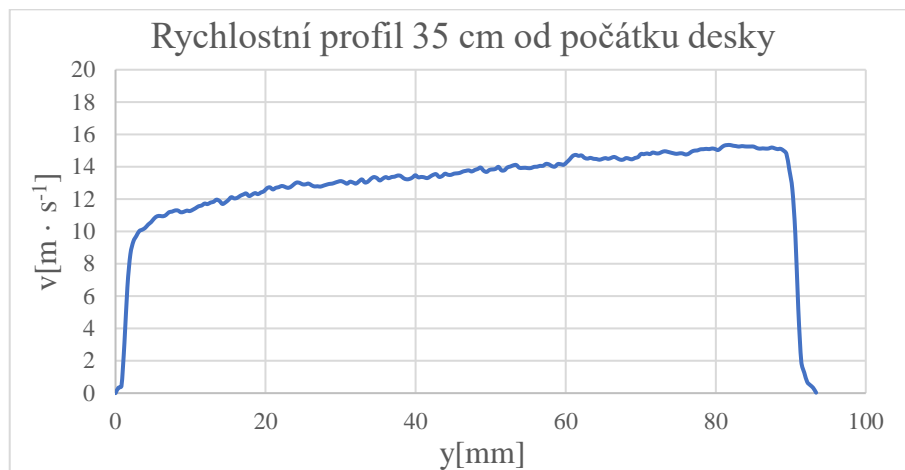
*Graf P 2. 5: Rychlostní profil 20 cm od počátku*



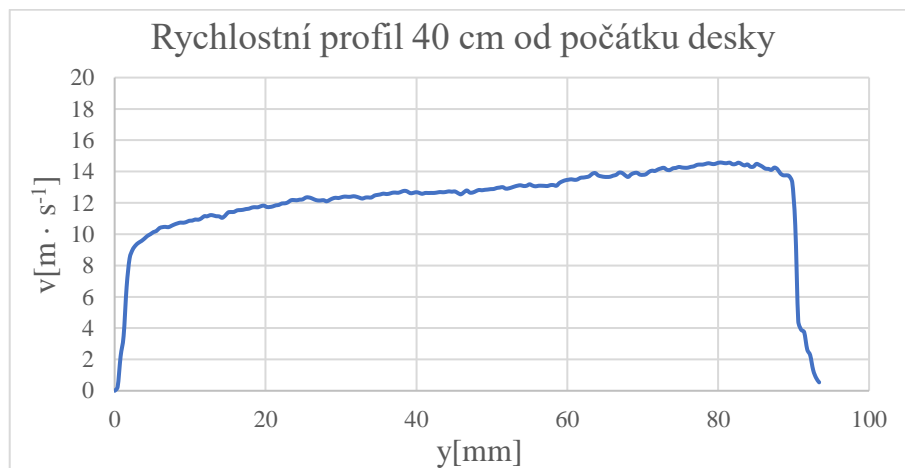
*Graf P 2. 6: Rychlostní profil 25 cm od počátku*



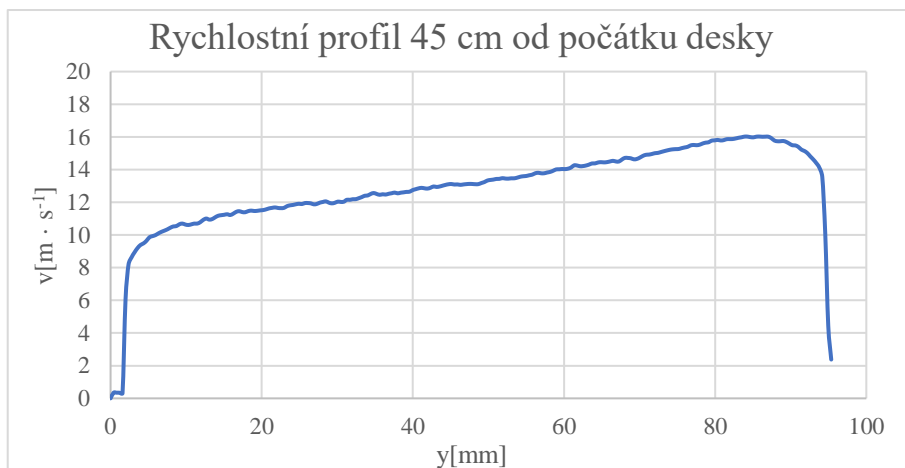
*Graf P 2. 7: Rychlostní profil 30 cm od počátku*



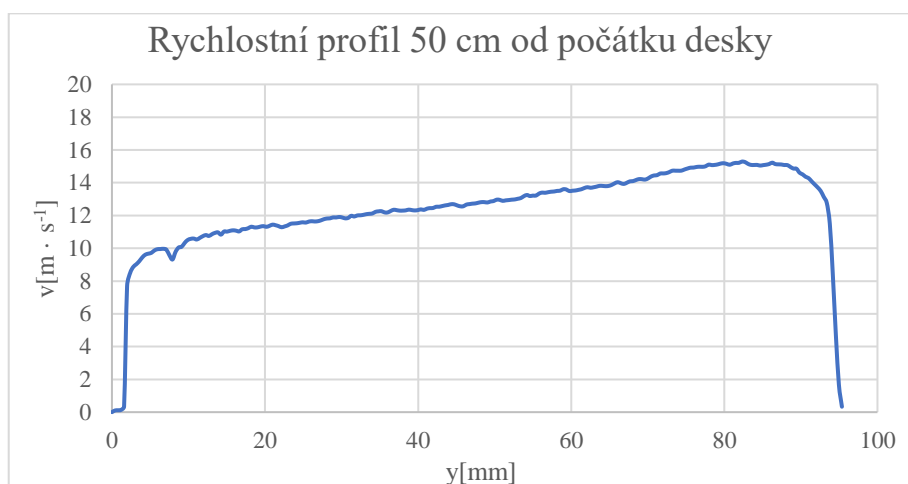
*Graf P 2. 8: Rychlostní profil 35 cm od počátku*



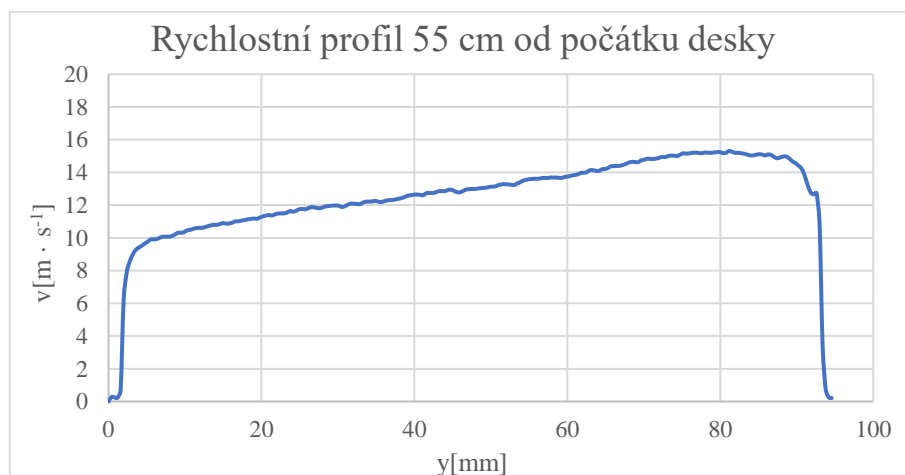
*Graf P 2. 9: Rychlostní profil 40 cm od počátku*



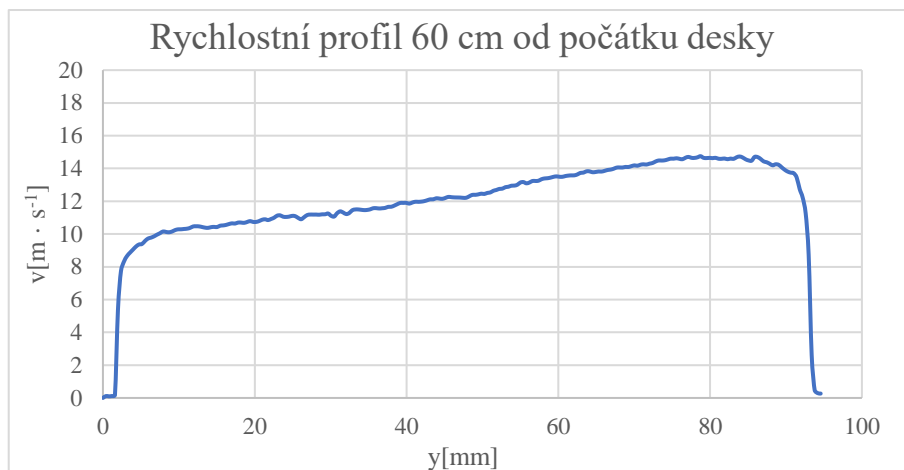
Graf P 2. 10: Rychlostní profil 45 cm od počátku



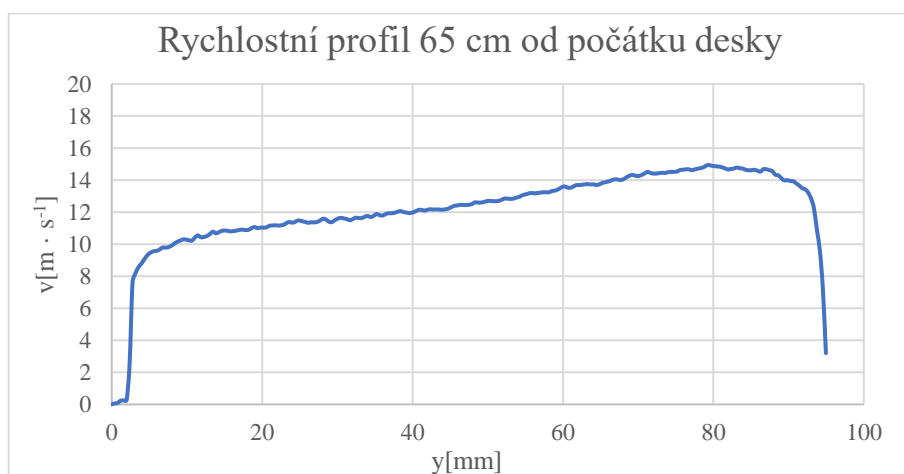
Graf P 2. 11: Rychlostní profil 50 cm od počátku



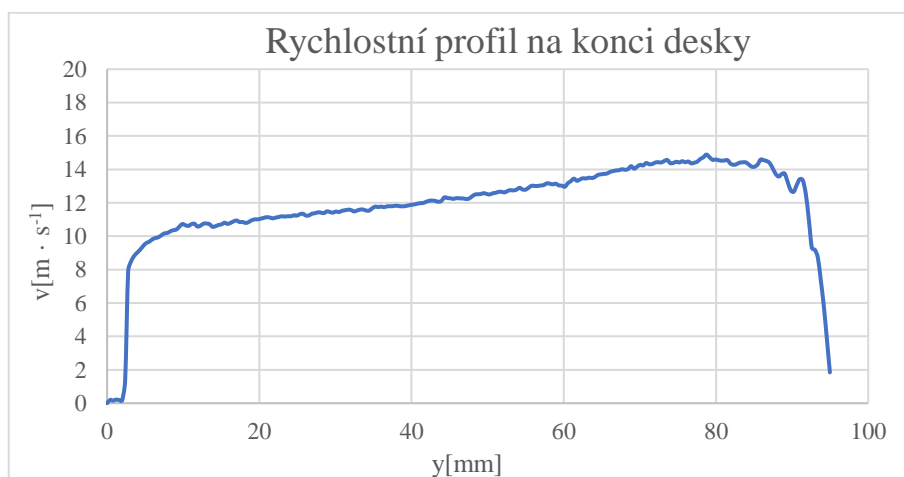
Graf P 2. 12: Rychlostní profil 55 cm od počátku



Graf P 2. 13: Rychlostní profil 60 cm od počátku



Graf P 2. 14: Rychlostní profil 65 cm od počátku



Graf P 2. 15: Rychlostní profil na konci