

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: 2301R016 Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Proměření rychlostního pole v měřicím prostoru  
aerodynamického tunelu pomocí tlakových sond

Autor: **Vít HORÁČEK**

Vedoucí práce: **RNDr. Daniel DUDA, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

## Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## Poděkování

Rád bych poděkoval všem lidem, kteří mě během psaní této práce podporovali, pomáhali mi a stáli při mně. Chtěl bych zde vyzdvihnout pomoc všech, kteří se mnou pracovali na přípravě experimentu a zařízení popisovaného níže v této práci. Jmenovitě pak jde hlavně o RNDr. Daniela Dudu, Ph.D. za vedení práce, odbornou pomoc a rady ke zpracování práce, Vitalii Yanovyche za pomoc s prováděním experimentu a především pak za tvorbu velké části mnou použitého software a Prof. Ing. Václava Urubu, CSc. za konzultaci a odbornou pomoc s prací. V neposlední řadě bych nerad opomenul svoji rodinu, která mne rovněž podpořila v maximální možné míře.

Vít Horáček

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vít HORÁČEK**  
Osobní číslo: **S15B0090P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Název tématu: **Proměření rychlostního pole v měřicím prostoru aerodynamického tunelu pomocí tlakových sond**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

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

Máte za úkol provést:

- přípravu měření celkových a statických tlaků na výtlačné trati,
- přípravu 2D posuvníku pro automatizované proměření příčného průřezu měřicího prostoru,
- vlastní měření rozložení celkových a statických tlaků v příčném průřezu v několika polohách a pro různé rychlosti,
- vyhodnocení rychlostí v měřicích rovinách,
- zpracování výsledků měření v grafické formě, rozložení rychlosti v dané měřicí rovině.

Rozsah grafických prací: **rozložení rychlostí v měřicích rovinách**  
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- **Tropea C., Yarin A., Foss J. F. (Eds.): Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Springer, 2007**
- **LabView users manual, NI, 2017**

Vedoucí bakalářské práce: **RNDr. Daniel Duda, Ph.D.**  
Katedra energetických strojů a zařízení  
Konzultant bakalářské práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**  
Katedra energetických strojů a zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **30. října 2018**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Dr. Ing. Jaroslav Synáč  
vedoucí katedry

V Plzni dne 25. října 2018

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Horáček	<b>Jméno</b> Vít	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 – Stavba energetických strojů a zařízení		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení</b> RNDr. Duda, Ph. D.	<b>Jméno</b> Daniel	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Proměření rychlostního pole v měřicím prostoru aerodynamického tunelu pomocí tlakových sond		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	64	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	40	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	9
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Bakalářská práce pojednává o proměření rychlostního pole v měřicím prostoru aerodynamického tunelu pomocí tlakových sond. Naměřená data jsou vykreslena do 2D a 3D grafů mapujících rozložení tlaku a rychlosti ve zvolených místech měřicího prostoru. Součástí práce je popis používaného zařízení a měřicí metody, vývoj tlakové sondy a její následné použití.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	aerodynamika, větrný tunel, rychlostní pole, tlakové sondy

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Horáček	Name Vít	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 - Design of Power Machines and Equipment		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname RNDr. Duda, Ph. D.	Name Daniel	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Measuring the velocity field in test section of wind tunnel by pressure probes		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	---------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	64	<b>TEXT PART</b>	40	<b>GRAPHICAL PART</b>	9
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	<p>This bachelor work is focused on measuring the velocity field in tunnel test section by pressure probes. Measured data are processed to 2D and 3D charts mapping distribution of pressure and velocity in selected positions in the test section. The work includes description of the tunnel and measuring method and a chapter about the pressure probe.</p>
<b>KEY WORDS</b>	aerodynamics, wind tunnel, velocity field, pressure probes

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Popis pracoviště</b> .....	<b>15</b>
2.1	Popis aerodynamického tunelu .....	16
2.1.1	Měřicí prostor .....	16
2.1.2	Uklidňovací prostor .....	17
2.1.3	Ventilátor .....	19
2.1.4	Hlavní rám.....	19
2.1.5	Řídící stanoviště.....	20
2.1.6	Skříň s elektrovýzbrojí .....	21
2.2	Potřebné příslušenství.....	21
2.2.1	Traverzéry .....	21
2.2.2	Tlakové sondy.....	23
2.2.3	Tlakový snímač .....	24
<b>3</b>	<b>Popis experimentu</b> .....	<b>25</b>
3.1	Fyzikální popis .....	25
3.1.1	Tunelová konstanta $K$ .....	27
3.1.2	Proměření rychlostních profilů .....	30
3.2	Příprava experimentu .....	30
3.2.1	Příprava a výroba potřebného vybavení .....	31
3.2.2	Potřebný software .....	38
<b>4</b>	<b>Výsledky</b> .....	<b>46</b>
4.1	Chyby měření.....	46
4.2	Tunelová konstanta.....	46
4.3	Tlakové a rychlostní profily měřicího prostoru.....	48
4.3.1	Rychlostní profily napříč měřicím prostorem.....	49
4.3.2	Porovnání středních hodnot dosažených měření.....	51
4.3.3	Porovnání metody tlakových sond a LDA .....	52
<b>5</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Seznam modelů ostatních autorů použitých v 3D modelu tunelu</b> .....	<b>55</b>



## Seznam příloh

Příloha 1	3D model aerodynamického tunelu	1xA3
Příloha 2	Kompletní program na vyhodnocování naměřených výsledků	1xA3
Příloha 3	Kód programu vytvořeného v Mathworks MATLAB pro úpravu a vykreslení dat	1xA3
Příloha 4	Kód programu vytvořeného v Mathworks MATLAB pro porovnání dat	2xA3
Příloha 5	Kompletní tlakový a rychlostní profil	1xA4
Příloha 6	Kompletní tlakový a rychlostní profil	1xA4
Příloha 7	Kompletní tlakový a rychlostní profil	1xA4
Příloha 8	Maximálních a minimálních hodnoty včetně směrodatných odchylek	1xA4

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 2-1</b>	– Boční pohled na skutečný tunel.....	15
<b>Obrázek 2-2</b>	– Render 3D modelu z programu Autodesk Inventor 2017.....	15
<b>Obrázek 2-3</b>	– Pohled na 3D model aerodynamického tunelu.....	16
<b>Obrázek 2-4</b>	– Detail na měřicí prostor.....	17
<b>Obrázek 2-5</b>	– Schématický nákres tunelu.....	17
<b>Obrázek 2-6</b>	– Detail 3D modelu první sekce uklidňovací komory.....	18
<b>Obrázek 2-7</b>	– 3D model sestavy ventilátoru aerodynamického tunelu.....	19
<b>Obrázek 2-8</b>	– Hlavní okno programu pro ovládání tunelu.....	20
<b>Obrázek 2-9</b>	– Snímek dvouosého traverzéro na měřicím prostoru tunelu.....	22
<b>Obrázek 2-10</b>	– Sonda na proměření rychlostních profilů v měřicím prostoru.....	23
<b>Obrázek 2-11</b>	– Tlakový snímač.....	24
<b>Obrázek 3-1</b>	– Schéma proudění dýzou s průběhy jednotlivých veličin.....	26
<b>Obrázek 3-2</b>	– Situace při určování tunelové konstanty.....	27
<b>Obrázek 3-3</b>	– Schéma přední části Prandtlovy trubice.....	28
<b>Obrázek 3-4</b>	– Napojení výstupu z dýzy před vložením těsnění.....	31
<b>Obrázek 3-5</b>	– Tisk těla sondy na 3D tiskárně.....	33
<b>Obrázek 3-6</b>	– Pohled na měřicí prostor s umístěnou a připojenou sondou.....	34
<b>Obrázek 3-7</b>	– Detail úchyty hadiček na výstupu z měřicího prostoru.....	35
<b>Obrázek 3-8</b>	– Všechny verze měřicí sondy seřazené dle stupně vývoje.....	35
<b>Obrázek 3-9</b>	– Schéma měřicího prostoru a pohybu sondy.....	36
<b>Obrázek 3-10</b>	– Schéma čelního panelu tlakového snímače NetScanner 9116.....	38
<b>Obrázek 3-11</b>	– Vývojový diagram měření rychlosti tlakovými sondami.....	39
<b>Obrázek 3-12</b>	– Uživatelské rozhraní generátoru měřicích plánů.....	40
<b>Obrázek 3-13</b>	– Úvodní obrazovka hlavního programu.....	42
<b>Obrázek 3-14</b>	– Druhá část hlavního programu.....	43
<b>Obrázek 3-15</b>	– Program pro úpravu vstupních dat a vykreslení 2D a 3D grafů.....	44
<b>Obrázek 3-16</b>	– Oblasti pokrytí měřicího prostoru.....	45
<b>Obrázek 4-1</b>	– Graf s naměřenými hodnotami tunelové konstanty $K$ .....	46
<b>Obrázek 4-2</b>	– Graf hodnot tunelové konstanty $K$ .....	47
<b>Obrázek 4-3</b>	– Schéma měření s jednotlivými rovinami P1, P2 a P3.....	48
<b>Obrázek 4-4</b>	– 3D graf naměřených tlaků při rychlosti 15 m/s.....	48
<b>Obrázek 4-5</b>	– Tlakové pole stejných dat jako na obrázku 4-4.....	49
<b>Obrázek 4-6</b>	– Rychlostní profily všech měřených rychlostí v rovině P3.....	49
<b>Obrázek 4-7</b>	– Rychlostní profily všech měřených rychlostí bez mezní vrstvy.....	50
<b>Obrázek 4-8</b>	– Rychlostní profily pro 45 m/s ve všech měřicích rovinách.....	50
<b>Obrázek 4-9</b>	– Rychlostní profily 45 m/s bez dat zahrnujících mezní vrstvu.....	51
<b>Obrázek 4-10</b>	– Graf znázorňující střední hodnoty rychlosti všech měření.....	51
<b>Obrázek 4-11</b>	– Porovnání dat naměřených metodou LDA a tlakovými sondami.....	52

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Název
$E_k$	[J]	Kinetická energie
$E_p$	[J]	Potenciální energie
$E_g$	[J]	Potenciální gravitační energie
$E_{pp}$	[J]	Potenciální tlaková energie
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$h$	[m]	Poloha (výška)
$K$	[-]	Tunelová konstanta
$K_{stř}$	[-]	Střední hodnota tunelové konstanty
$K_{min}$	[-]	Minimální hodnota tunelové konstanty
$K_{max}$	[-]	Maximální hodnota tunelové konstanty
$m$	[kg]	Hmotnost
$\dot{m}$	[kg/s]	Hmotnostní průtok
$p$	[Pa]	Statický tlak
$p_1$	[Pa]	Statický tlak na vstupu do oblasti
$p_2$	[Pa]	Statický tlak na výstupu z oblasti
$p_{s1}$	[Pa]	Statický tlak na vstupu do dýzy
$p_{s2}$	[Pa]	Statický tlak na výstupu z dýzy
$p_c$	[Pa]	Celkový tlak
$p_d$	[Pa]	Dynamický tlak
$p_{d1}$	[Pa]	Dynamický tlak na vstupu do dýzy
$p_{d2}$	[Pa]	Dynamický tlak na výstupu z dýzy
$p_{dp}$	[Pa]	Dynamický tlak měřený Prandtlovo sondou
$p_{dt}$	[Pa]	Tlakový spád dýzy
$R$	[mm]	Poloměr zaoblení
$R_k$	[-]	Variační rozpětí tunelové konstanty
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Obsah plochy

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Název
$S_1$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez na vstupu
$S_2$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez na výstupu
$v$	[m/s]	Rychlost proudění ve směru y
$v_1$	[m/s]	Rychlost proudění na vstupu do oblasti
$v_2$	[m/s]	Rychlost proudění na výstupu z oblasti
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem
$X$	[mm]	Poloha v ose x
$Y$	[mm]	Poloha v ose y
$Z$	[mm]	Poloha v ose z
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$\xi_p$	[Pa]	Chyby dané nepřesností snímače
$\xi_t$	[Pa]	Chyby dané změnou teploty při měření
$\xi_c$	[Pa]	Celkové chyby měření

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Vysvětlení
2D	Dvojdímenzionální
3D	Trojdímenzionální
CFD	Computational Fluid Dynamics (angl. Počítačová dynamika tekutin)
LDA	Laser Doppler Anemometry (angl. Laserová Dopplerovská Anemometrie)
LSWT	Low Speed Wind Tunnel (angl. Nízkorychlostní větrný tunel)

## 1 Úvod

Aerodynamický tunel je základním vybavením experimentálního výzkumu aerodynamiky. V historii lze najít první využití větrných tunelů již v roce 1871. Důležité zjištění, které následně zajistilo používání tunelů a jejich další výzkum, bylo učiněno roku 1883 Osbornem Reynoldsem na univerzitě v Manchesteru. Reynolds měřil vlastnosti obtékání těles a zaměřil se na geometricky podobná tělesa různých velikostí. Při tom zjistil, že pokud je poměr setrvačných a třecích sil působících na obě zkoumaná tvarově podobná tělesa stejný, pak je i obtékání obou těles stejné a pro měření se skutečnou věcí je možné použít zmenšený model. Vztah mezi setrvačnou a třecí silou je dnes znám jako Reynoldsovo číslo  $Re$ . Aerodynamické tunely byly dále vyvíjeny a přizpůsobovány aktuálním potřebám jako bylo letectví, vojenské účely, výzkum dynamiky tekutin, ale také zefektivnění sportovního vybavení nebo architektura.

Soudobé větrné tunely jsou vyráběny ve čtyřech základních modifikacích: Otevřené nebo uzavřené a s otevřeným, či uzavřeným měřicím prostorem. Otevřené tunely jsou takové, kde proudící médium na jedné straně vstupuje do tunelu a na druhé ho opouští. V uzavřeném tunelu médium cirkuluje potrubím. Výhodou otevřeného zařízení jsou nízké pořizovací náklady a snadné použití kouře pro vizualizaci průtoku, bez nutnosti složitějšího čištění. Nevýhodou je horší kvalita proudění média, časté a snadné ovlivnění vnějšími vlivy a potřeba většího výkonu ventilátoru, s čímž souvisí větší hlučnost zařízení. Měřicí prostor může být také otevřený – měřený objekt je volně v atmosférických podmínkách – nebo uzavřený – prostor je ohraničen stěnami.

Ve druhé polovině roku 2018 byl na Západočeskou univerzitu v Plzni, Fakultu strojní, Katedru energetických strojů a zařízení zakoupen nový otevřený aerodynamický tunel s uzavřeným měřicím prostorem. Zařízení bylo dodáno a zkompletováno firmou WTTech.CZ v závěru roku 2018 a počínaje lednem 2019 je možné provádět zkušební provoz. Celý experiment vede prof. Ing. Václav Uruba, CSc. a RNDr. Daniel Duda, Ph. D. Dále na experimentu pracuje Vitalii Yanovych a autor této práce. Cílem témat probíraných níže je vyzkoušet nový tunel, vyladit a odhalit případné nedostatky a pro budoucí měření proměřit rychlostní pole v prázdném měřicím prostoru tunelu. Metodou použitou k proměření rychlostního pole je měření tlakovými sondami – Pitotovými trubicemi.

## 2 Popis pracoviště

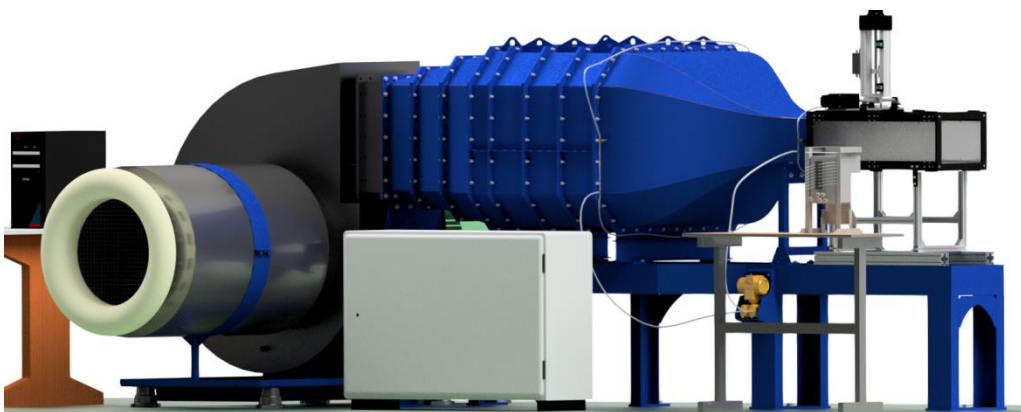
Měření bylo realizováno v laboratoři katedry energetických strojů Západočeské univerzity v Plzni. Součástí laboratoře je více druhů experimentální techniky, například vzduchová turbína, ale především se zde nachází větší z aerodynamických tunelů Západočeské univerzity.

Zařízení je úplně nové a sestává se ze samotného tunelu, ovládacího centra a příslušenství potřebného k jednotlivým experimentům. Mezi takovéto příslušenství patří především dvojice traverzérů, z nichž ten menší umožňuje přesný pohyb ve dvou osách, větší traverzér je pro trojrozměrný pohyb.

Díky podkladům od dodavatele technologie firmy WTTech.CZ bylo možné vytvořit přesný 3D model části pracoviště s tunelem. Obrázky 2-1 a 2-2 ukazují srovnání mezi reálnou a 3D verzí pracoviště. Obrázky 3D modelu použité jako ilustrace na následujících stranách této práce tedy odpovídají reálné předloze. Další obrázky 3D modelu tunelu se nachází v Příloze č. 1.



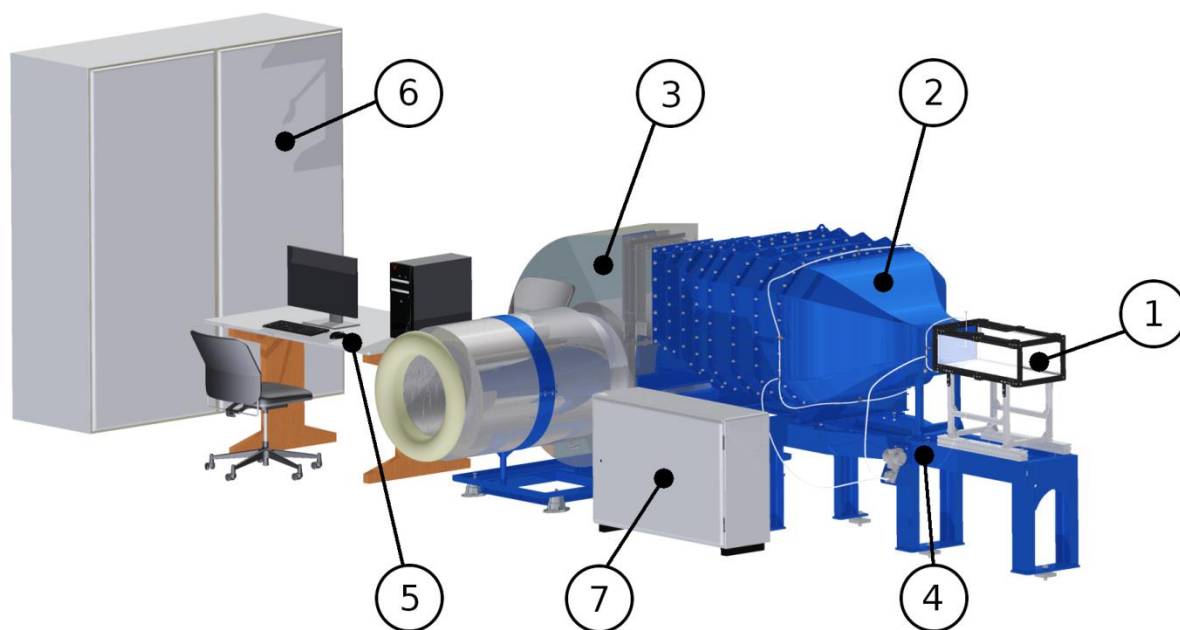
*Obrázek 2-1 – Boční pohled na skutečný tunel.*



*Obrázek 2-2 – Render 3D modelu z programu Autodesk Inventor 2017.*

## 2.1 Popis aerodynamického tunelu

Aerodynamický tunel je otevřeného typu a jedná se *nízkorychlostní aerodynamický tunel* LSWT<sup>1</sup> typu. Zkratkou LSWT se označují aerodynamické tunely, ve kterých je nízká rychlost proudění ve srovnání s rychlostí zvuku, zpravidla se jedná o proudění do 100 m/s, kdy lze proudění považovat za nestlačitelné. V tomto případě je možné stabilně dosáhnout rychlosti 80 m/s.



**Obrázek 2-3** – Pohled na 3D model aerodynamického tunelu.

Čísla označují: **1** – měřicí prostor; **2** – uklidňovací prostor;  
**3** – ventilátor; **4** – rám; **5** – řídicí centrum;  
**6,7** – skříně s elektrovýzbrojí

### 2.1.1 Měřicí prostor

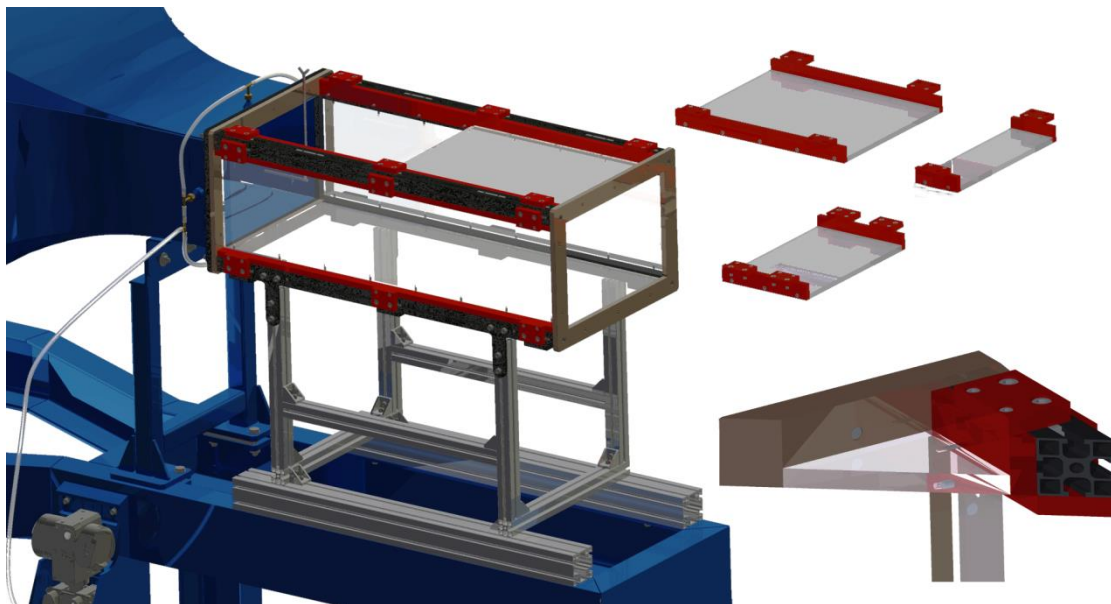
Měřicí prostor je uzavřeného typu s obdélníkovým průřezem o velikosti 300 x 200 mm a délkou 740 mm. Je umístěn na pomocném rámu z hliníkových profilů, přišroubovaném na hlavním rámu. Základem konstrukce jsou laserem vypalované čelní díly s přesně vrtanými otvory pro šrouby. Mezi tyto dva čelní rámy jsou vešroubovány boční díly z extrudovaných hliníkových profilů s drážkami umožňujícími variabilní rozestavení vrchní stěny měřicího profilu.

Všechny stěny jsou z extrudovaného polykarbonátu vyrobeného s vysokou kvalitou povrchu a optickou čistotou. Boční stěny a dno jsou z monobloku, vrchní stěna je modulární a ve více variantách umožňující zakrytí buď celého měřicího prostoru, nebo pouze části, podle aktuální potřeby.

<sup>1</sup> Z anglického Low-Speed Wind Tunnel.



Celková variabilita a rozebiratelnost konstrukce tunelu umožňuje demontáž měřicího prostoru a využití pomocného rámu pro montáž měřicího vybavení, či měřeného objektu. Takto pak lze dosáhnout podmínek měření v otevřeném prostoru.

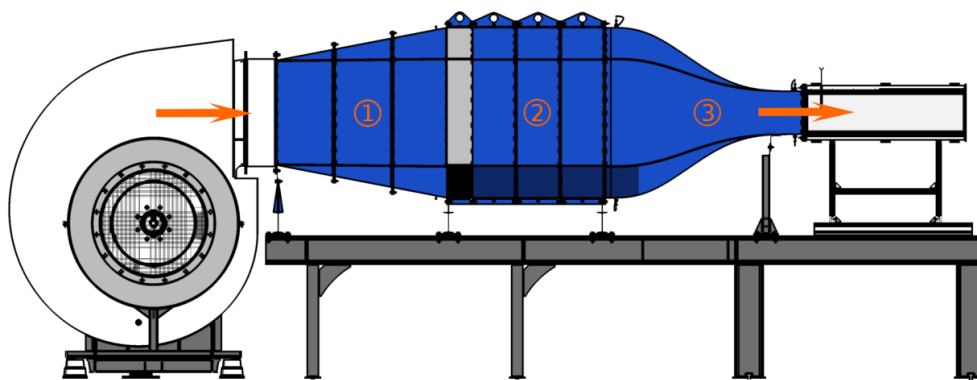


Obrázek 2-4 – Detail na měřicí prostor - 3D model se zvýrazněnými jednotlivými částmi:  
**modrá** – rám a uklidňovací prostor; **stříbrná** – pomocný rám;  
**černá a šedá** – konstrukce měřicího prostoru; **červená** – uchycení stěn

Obrázek 2-4 ukazuje a popisuje měřicí prostor. V jeho pravé vrchní části jsou umístěny jednotlivé modulární prvky vrchní stěny, jejichž montáží či demontáží je možné upravovat vrchní část měřicího prostoru pro uchycení měřicího vybavení – např. traverzěru nebo Prandtlovy trubice. Vpravo dole je pak detail řezu jednoho z rohů měřicího prostoru. Zde je vidět průřez hliníkového profilu s drážkami a detail uchycení vrchní stěny.

### 2.1.2 Uklidňovací prostor

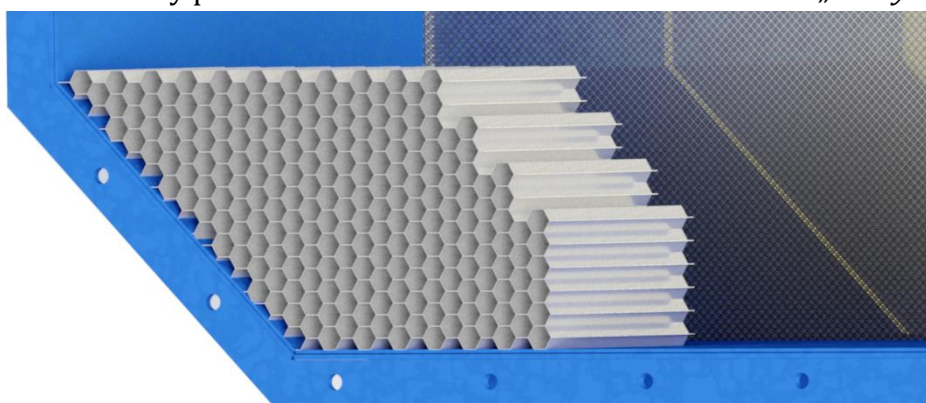
Prostor pro uklidnění proudu se skládá z *difusoru*, *uklidňovací komory* a *dýzy*, za kterou následuje měřicí prostor. Hlavním účelem je vyrovnání a zjemnění proudění po výstupu z lopatkového ventilátoru.



Obrázek 2-5 – Schématický náčrt tunelu s barevně vyznačeným uklidňovacím prostorem.  
Čísla označují: 1 – difusor; 2 – uklidňovací komora; 3 – dýza

Proudící médium jde z ventilátoru do difusoru, ve kterém se rychlost proudění snižuje před vstupem do uklidňovací komory. Nižší rychlost proudění je výhodná z hlediska tlakových ztrát při průchodu uklidňovací komorou. Difusor má vstupní otvor obdélníkového průřezu o velikosti 400 x 500 mm a výstupní otvor tvaru obdélníku se zkosenými rohy o velikosti 1150 x 800 mm a zkosením 150 x 150 mm. Délka difusoru je 800 mm a je rozdělen do tří sekcí. Každá ze sekcí je ocelovým svařencem a mezi jednotlivými sešroubovanými sekcemi se nachází kovová síta pro úpravu proudícího média. Aby se zabránilo přenosu vibrací od ventilátoru, je difusor připojen přes pružný spojovací člen. Zkosení uklidňovací komory je vytvořeno za účelem úpravy proudění média, při použití obdélníkového průřezu by v rozích docházelo ke vzniku nežádoucího sekundárního proudění<sup>2</sup>.

Uklidňovací komora je konstantního průřezu v celé délce 740 mm. Velikost průřezu odpovídá výstupu z difusoru. Cílem této komory je usměrnit proudění, snížit intenzitu turbulencí, potlačit případné víření a odstranit pulsování rychlosti proudu. Za tímto účelem je prostor komory rozdělen do čtyř samostatných sekcí, mezi které jsou opět vložena kovová síta. Každá sekce je ocelovým svařencem a umožňuje odběr tlaku ve dvou místech – nahoře a vespodu komory. V proudu média může docházet k rotacím podle osy ve směru toku<sup>3</sup>, proto je první svařenec odlišný od ostatních a obsahuje navíc vložený element tvořený pravidelnou šestiúhelníkovou strukturou tzv. „honeycomb“.<sup>4</sup>



**Obrázek 2-6** – Detail 3D modelu první sekce uklidňovací komory, v přední části je zobrazen tzv. „honeycomb“, v zadní části pak kovová síta mezi jednotlivými sekcemi.

V poslední části uklidňovací komory se nachází teploměr měřící teplotu proudícího média, jejíž hodnoty jsou odesílány do řídicího software tunelu k dalšímu zpracování.

Na komoru je přišroubovaná dýza, která urychluje proudění na rychlost požadovanou v měřicím prostoru. Z konstrukčního hlediska se jedná složitý ocelový svařenec dlouhý 920 mm s výstupním otvorem odpovídajícím měřicímu prostoru. Tvarově jde o velmi přesný výrobek optimalizovaný pomocí *CFD metod*. Na vstupu a výstupu z této dýzy jsou umístěny dvě čtveřice odběrů statického tlaku, díky kterým je možné měřit rychlost proudění tunelem. Odběry jsou situovány symetricky uprostřed všech čtyř stěn.

<sup>2</sup> [2] strana 16;

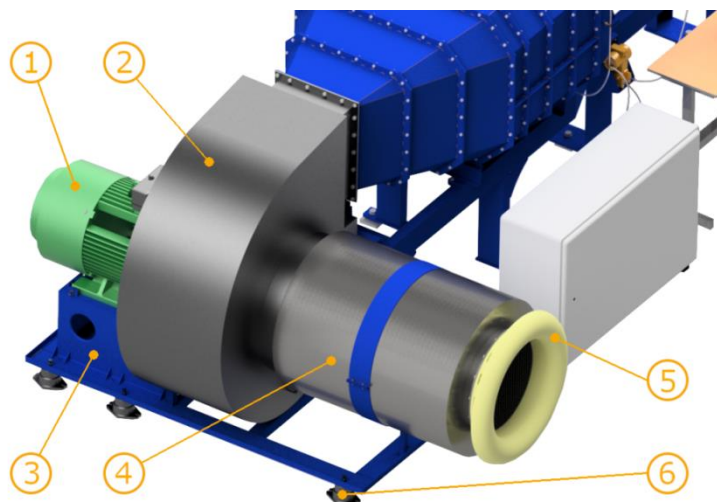
<sup>3</sup> [3] strana 5;

<sup>4</sup> Na obrázku 2-6 je zobrazena pouze část elementu, reálně je vyplněn celý průřez.

### 2.1.3 Ventilátor

Ventilátory u aerodynamických tunelů bývají axiálního či radiálního typu. V tomto případě je použit radiální ventilátor výrobce ZVVZ Group poháněný třífázovým elektromotorem Tamel o maximálním výkonu 55 kW a otáčkách 2955 za minutu. Plný výkon motoru není využíván, příkon tunelu je omezen na 45,7 kW při otáčkách 2270 min<sup>-1</sup>.

Elektromotor roztáčí přes spojku lopatkové kolo s 9 lopatkami, které je uloženo ve spirální skříni. Nasávaný vzduch prochází skrze uklidňovací prostor válcového tvaru, ve kterém se zároveň nachází soustava filtrů zabraňující vstupu nežádoucích předmětů. Před vstupem do tohoto prostoru je umístěna malá dýza, která vylepšuje kvalitu proudění.



Obrázek 2-7 – 3D model sestavy ventilátoru aerodynamického tunelu.  
Jednotlivé pozice označují: 1 – elektromotor; 2 – ventilátor;  
3 – rám; 4 – uklidňovací prostor;  
5 – vstupní dýza; 6 – tlumící prvky

Celé soustrojí ventilátoru je uloženo na vlastním rámu, který není spojen s hlavním rámem. Tento rám je vyroben z šedé litiny a je umístěn na speciálních tlumících prvcích tak, aby nedocházelo k přenosům vibrací od ventilátoru do dalších částí tunelu.

Ventilátor může být obsluhou řízen podle několika zadávaných parametrů – rychlosti proudění v tunelu, zadanou *frekvencí*, *Reynoldsovým číslem* a požadovaným *dynamickým tlakem*<sup>5</sup>.

### 2.1.4 Hlavní rám

Primární funkcí hlavního rámu je sloužit jako kostra pro upevnění dalších součástí tunelu, jako je měřicí prostor nebo uklidňovací prostor. Rám nemá za účel pouze držet jednotlivé součásti pohromadě, zároveň také tlumí vibrace. Konstrukčně jde o jeden svařenec, který je připevněn na 6 místech k podlaze laboratoře. Na rozdíl od rámu pro ventilátor je použitým materiálem konstrukční ocel.

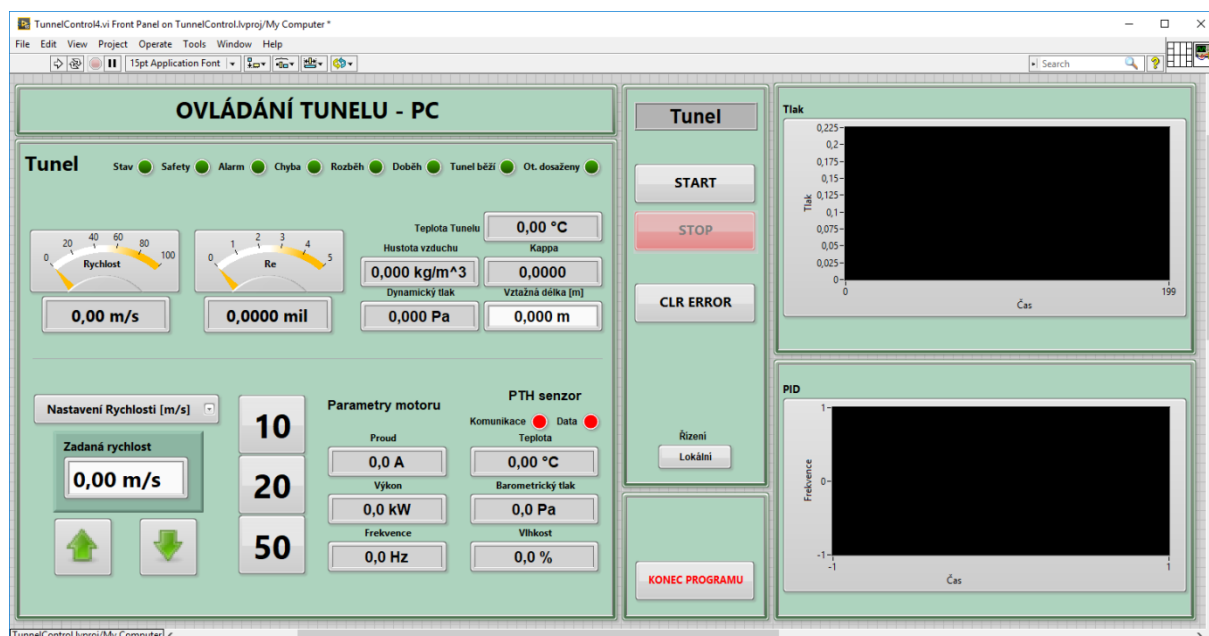
<sup>5</sup> Ve skutečnosti jde o spád statického tlaku na dýze. Podrobněji vysvětleno v kapitole 2.1 Fyzikální popis.

### 2.1.5 Řídicí stanoviště

Obsluha tunelu je možná ve dvou módech – lokálním – pomocí dotykového ovládacího pultu – a vzdáleném – pomocí počítače s nainstalovaným software.

Použitím ovládacího pultu lze regulovat otáčky motoru ventilátoru – zadat požadovanou vstupní frekvenci nebo rychlost v tunelu. Na tomto ovládání se také nachází jedno ze dvou tlačítek *Central STOP*. Při řízení tunelu z pultu však není možné ovládat další měřicí vybavení používané při experimentech.

Řízením z počítače je obsluha k dispozici klasické prostředí *Microsoft Windows* s nainstalovaným programem *LabView*, ve kterém se spouští výrobcem dodaný software umožňující všechny funkce jako při ovládání z panelu. Výhodou je možnost spuštění a používání dalších programů, vyšší přehlednost a větší množství funkcí. Zároveň je možné vytvářet a používat nové programy nebo při měření nechat program postupovat podle předem napsaného plánu.



Obrázek 2-8 – Hlavní okno programu pro ovládání tunelu.

Pokud je tunel v provozu diagramy v pravé části obrázku 2-8 ukazují aktuální vývoj dynamického tlaku v tunelu měřeného z odběrů na výstupní dýze a PID regulaci motoru – změny frekvence napětí elektromotoru. Prostředí část uživatelského rozhraní umožňuje spuštění a vypínání programu a pod položkou „Tunel“ jsou dostupné další informace týkající se aktuálních dosahovaných parametrů v tunelu, které se nezobrazují na hlavní obrazovce. Mezi tato data patří například hustota. Dalšími informacemi, které se takto dají zobrazit, jsou diagnostická data týkající se alarmu při překročení některé z omezujících podmínek softwaru.

Levá část rozhraní je vyhrazena pro samotné ovládání tunelu a zadávání požadovaných parametrů. Na obrázku 2-8 je zachyceno řízení přes zadanou rychlost. Kliknutím na „Nastavení Rychlosti [m/s]“ lze vybrat jinou veličinu, například frekvenci. V horní části se pak nachází řada indikátorů sledujících stav tunelu.

### 2.1.6 Skříňe s elektrovýzbrojí

Nedílnou součástí jakéhokoliv elektronicky řízeného soustrojí je elektrovýzbroj. V případě tohoto tunelu jde o elektromotor na ventilátoru a elektroniku, jež ho řídí. Tato regulační elektronika sestávající se především z frekvenčního měniče a komunikačních uzlů je umístěná ve speciální skříni. Skříň je napájena z univerzitní sítě napětím 400 V a směřují do ní napájecí a komunikační kabely všech zařízení tunelu. Výjimkou je napájení počítače, které je na zbytku zařízení nezávislé. Součástí jsou také jističe a informační displej, který dává obsluze informace o stavu zařízení. Veškerá komunikace mezi jednotlivými zařízeními probíhá přes *ethernet*.

Druhá, menší skříň se nachází poblíž uklidňovací komory a obsahuje elektroniku pro řízení krokových motorů a komunikaci mezi softwarem tunelu a používaným traverzérem. V jednom okamžiku je možné mít ke skříni připojen pouze jeden traverzér.

## 2.2 Potřebné příslušenství

V předchozí podkapitole byl popisován aerodynamický tunel. Z pohledu experimentu jde o nutné vybavení, avšak v zásadě se jedná pouze o emulátor prostředí, ke kterému je třeba přidat další vybavení přesně přizpůsobené povaze měření. Tunel je totiž možné použít i pro další typy měření, jako jsou optické metody nebo měření žhaveným drátkem.

Pro první část měření – určení tunelové konstanty – byl odsunut měřicí prostor stranou a na dýzu k výstupu z uklidňovacího prostoru přimontována *Prandtlova sonda* měřící statický a celkový tlak. Sonda byla připojena přes polyuretanové hadičky ke snímači tlaku. Takto naměřený tlak byl pak porovnán s tlakem naměřeným na dýze tunelu měřeným diferenčním tlakoměrem ze dvou odběrových míst.

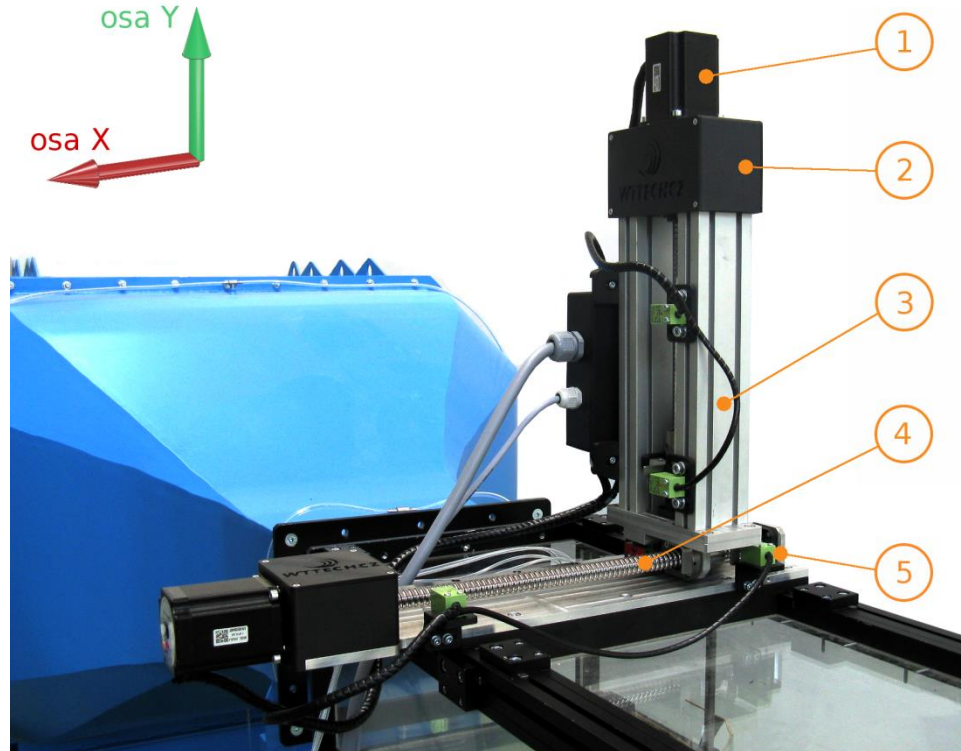
Rychlost pro sestavení rychlostního profilu je potřeba proměřit po pravidelných krocích v celém průřezu měřicího prostoru. K tomu je použit *traverzér* schopný pohybu ve dvou osách a speciálně vyrobený přípravek osazený Pitotovými trubicemi, které měří celkový tlak. Statický tlak je měřen čtyřmi odběry ve víku měřicího prostoru.

### 2.2.1 Traverzéry

Součástí vybavení dodaného k tunelu byla dvojice traverzérů a obslužný software. Traverzér je zařízení sloužící k přesnému pohybu ve vybraných osách a vymezeném prostoru. Pro prováděný experiment je možné použít menší z obou traverzérů, který má možnost pohybu ve dvou osách. Druhý traverzér je celkově větší a tedy schopný pokrýt větší oblast, především je však umožňuje pohyb ve třech osách.

Oba traverzéry jsou podobné modulární konstrukce a umožňují přichycení na měřicí prostor, případně k pomocnému rámu pod měřicím prostorem. Jsou tvořeny základnou, na které jsou upevněna vedení pro pohyb v jednotlivých osách, v případě menšího, používaného k experimentu, v ose *X* a *Y*. Pohyb podle každé osy je možný díky hřídeli s kuličkovým šroubem a maticí. Každý kuličkový šroub je poháněn vlastním krokovým motorem přes pružnou spojku. Rozsah pohybu v dané ose je omezen oběma směry dvojicí koncových spínačů s nastavitelnými polohami.

Člen, který se pohybuje v měřicím prostoru, je ocelová válcová kulatina, na kterou se připevňuje měřicí přípravek. Minimální vzdálenost od stěny, ke které se dokáže tato kulatina dostat při optimálním nastavení koncových snímačů, je přibližně 20 mm.



**Obrázek 2-9** – Snímek dvouosého traverzéro namontovaného na měřicím prostoru tunelu.  
Jednotlivé pozice označují: **1** – krokový motor; **2** – skříň se spojkou;  
**3** – vedení svislé osy; **4** – kuličkový šroub;  
**5** – koncový spínač

Pohyb traverzéro je možné řídit z počítače, případně z ovládacího panelu, který se nachází poblíž menší ze skříní s elektrovýzbrojí. Přesnost posunu je na setinu milimetru s možností plynulé regulace rychlosti pohybu nezávisle v každé ose.

Projíždění měřicího prostoru je možné několika způsoby. Před začátkem experimentu je výhodné provést ruční najetí na libovolnou vybranou polohu a následně vytvořit pozici se souřadnicemi  $X = 0$ ,  $Y = 0$ . Tato pozice označená v systému jako *HOME* je uložena do programu až do dalšího přepsání. Z tohoto bodu je pak možné řídit traverzér dvěma způsoby – v absolutním a relativním módu. V absolutním módu se traverzér přesune na pozici vzdálenou od domovské pozice o zadanou hodnotu. V relativním módu je pohyb vztažen k poslední dosažené pozici a do příkazu se píše pouze délka pohybu.

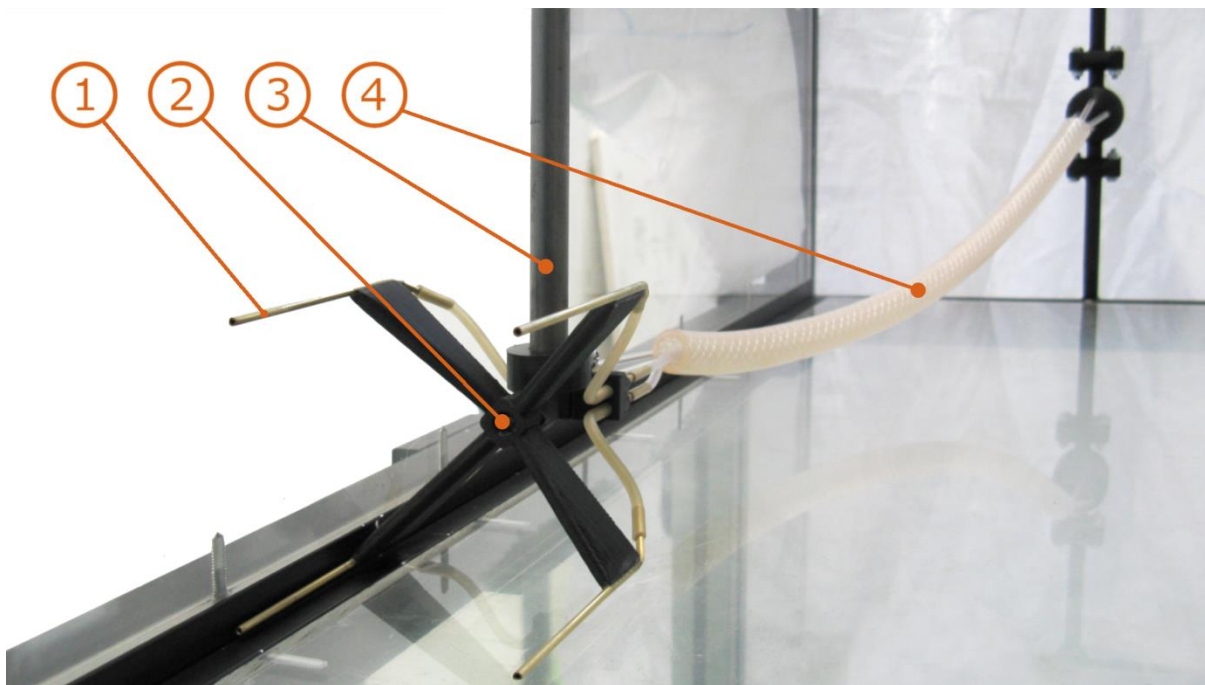
Většina měření neprobíhá nahodile, ale obvykle je požadováno měření začínající v určité pozici, po danou dobu a při určité časové prodlevě od přesunu měřicího přípravku. K tomu se dá s výhodou použít naprogramovaného časového plánu. Časový plán je vkládán v textovém formátu a obsahuje informace o všech bodech přesunu, tedy polohu v jednotlivých souřadnicích, rychlost přesunu, dobu měření a prodlevu mezi měřeními a přesunem.

### 2.2.2 Tlakové sondy

Tunelovou konstantu stačí určit v jediném bodě, avšak pro všechny rychlosti s předem stanoveným krokem. Je ideální měřit na proudnici procházející těžištěm průřezů výstupní dýzy a měřicího prostoru. Na speciální držák přišroubovaný k výstupní dýze se pak připevní Prandtlova trubice, tak aby se její špička nacházela na průsečíku úhlopříček obdélníkového průřezu výstupní dýzy. Používaná Prandtlova trubice má průměr 5 mm a odebírá statický a celkový tlak. Sonda je nepohyblivá, při měření nemění pozici a jejím účelem je změřit hodnoty tlaků při rychlosti od 1 do 80 m/s. Tlaky jsou zaznamenávány snímačem a data odesílána do řídicího software.

Stanovení rychlostních profilů vyžaduje proměření celého průřezu měřicího prostoru pomocí traverzéro, který umožňuje přichycení vhodného přípravku na ocelovou tyčku o průměru 10 mm pohybující se měřicím prostorem. Z tohoto důvodu není možná žádná továrně vyrobená sonda, ale je třeba použít na míru vyrobený měřicí přípravek.

Během testování bylo navrženo několik konstrukcí a variant sondy, které jsou popsány níže, v kapitole o přípravě experimentu.<sup>6</sup> Výsledným návrhem je sonda se čtyřmi Pitotovými trubicemi uchycenými na plastovém těle sondy ve tvaru kříže, tak aby vždy některá z trubic dokázala změřit každé místo v měřicím prostoru. Jednotlivé trubice jsou přilepeny k plastovému tělu, které je přišroubováno přes plastovou objímku k pohyblivé tyči traverzéro.



**Obrázek 2-10** – Sonda na proměření rychlostních profilů v měřicím prostoru.

Jednotlivé pozice: **1** – Pitotova trubice; **2** – plastové těleso sondy

**3** – pohyblivá tyč traverzéro; **4** – hadice ke snímači tlaku

<sup>6</sup> Viz kapitola 2.2.1 – Tlakové sondy

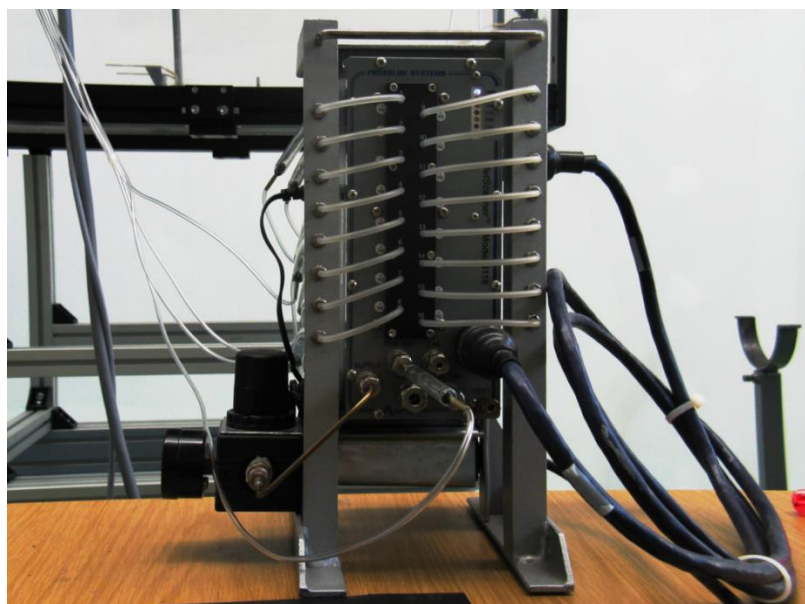
Pitotovy trubice umožňují měřit celkový tlak, pro výpočet rychlosti potřebný statický tlak je měřen z odběrů nad sondou, tedy ve stropě měřicího prostoru. Jednotlivé trubice jsou vyrobeny z mosazi a mají délku 55 mm. Průměr trubičky je 2 mm, světlost 1,6 mm. Vzhledem k těmto parametrům není možné s touto sondou proměřovat mezní vrstvu s dostatečnou přesností. Rozsah pohybu sondy je 230 mm v ose *X* a 130 mm v ose *Y*. Sonda se díky trubicím v rozích chová jako čtverec 70 x 70 mm. Ukládány jsou výsledky měření všemi čtyřmi trubicemi, při zpracování dat jsou pak naměřené hodnoty protříděny.

### 2.2.3 Tlakový snímač

Používané zařízení pro záznam tlaků je soustava několika modulů anglické společnosti Chell Instruments z modelové řady *Net Scanner*. Hlavním modulem je tlakový snímač *Net Scanner Model 9116*.

Model 9116 je šestnáctikanálový snímač schopný měřit tlak suchých nevodivých plynů<sup>7</sup>. Jednotlivé kanály jsou navzájem nezávislé a obsahují piezorezistivní tlakové senzory<sup>8</sup>. Data z jednotlivých kanálů jsou vyhodnocována vestavěným 32 bitovým mikroprocesorem, který zároveň kompenzuje chyby snímání, včetně chyb způsobených teplotou. Všechny senzory mají svoji uživatelskou paměť umožňující přesnou kalibraci každého kanálu zvlášť. Konstrukce snímače je řešená jako voděodolná a tlumící vibrace z okolí pro lepší přesnost měření. Dosahovaná přesnost je  $\pm 0,05$  % z rozsahu přístroje. Komunikace s ostatním používaným vybavením je přes ethernetový kabel.

Tlakový snímač funguje jako relativní, tedy od měřených hodnot odečítá hodnotu referenčního tlaku, který je společný pro všechny kanály. Při měření je brán jako referenční hodnota statický tlak z odběru v měřicím prostoru. Zbylé tlaky – dynamické tlaky ze sondy, ostatní statické tlaky a tlak okolní atmosféry jsou připojeny ke kanálům 1 až 8.



Obrázek 2-11 – Tlakový snímač.

<sup>7</sup> [6] Oficiální stránky výrobce – Chell Instruments

<sup>8</sup> Odporové snímače s křemíkovou měřicí destičkou využívající jevu piezorezistivity. [8]



### 3 Popis experimentu

Cílem měření je stanovení rychlostních profilů v celém průřezu měřicího prostoru. Rychlostní profil je určen rychlostmi vypočtenými na základě tlaků měřených sondami umístěnými v měřicím prostoru. Aby bylo možné tyto rychlostní profily stanovit, je nutné znát *tunelovou konstantu*  $K$ . U zaběhnutého aerodynamického tunelu je tato konstanta pro jednotlivé rychlosti známa, avšak v tomto případě jde o nový tunel a velikost tunelové konstanty v závislosti na rychlosti proudění ( $v$ ) je třeba určit. Následně po určení tunelové konstanty je možné proměřit tlaky v celém průřezu tunelu.

#### 3.1 Fyzikální popis

Určení tunelové konstanty a proměření tlaku v měřicím prostoru je založeno na stejném principu. V obou případech se vychází z předpokladu platnosti *Bernoulliho rovnice*. Bernoulliho rovnice je vyjádřením zákona zachování mechanické energie pro ustálené proudění tekutiny<sup>9</sup>.

$$E_k + E_p = konst \quad (2.1.1)$$

$E_k$  vyjadřuje kinetickou energii proudícího média,  $E_p$  potenciální energii proudící kapaliny, která se v tomto případě se dá rozložit na potenciální tlakovou energii  $E_{pp}$  a gravitační potenciální energii  $E_g$ .

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1.2)$$

$$E_p = E_{pp} + E_g; E_{pp} = pV; E_g = mgh \quad (2.1.3)$$

Dosazení do zákona o zachování mechanické energie:

$$\frac{1}{2}mv^2 + pV + mgh = konst \quad (2.1.4)$$

Z hlediska proudící kapaliny není vhodné počítat s hmotnostmi  $m$  a objemy  $V$ . Objemy je možno s výhodou vyjádřit pomocí hustoty  $\rho$  a hmotnosti  $m$ .

$$\frac{1}{2}mv^2 + p\frac{m}{\rho} + mgh = konst \quad (2.1.5)$$

Po této úpravě je v každém členu rovnice závislost na hmotnosti, díky tomu je možné rovnici vztáhnout na 1 kg proudícího média a v dalším zápise již tedy hmotnost nefiguruje.

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} + gh = konst \quad (2.1.6)$$

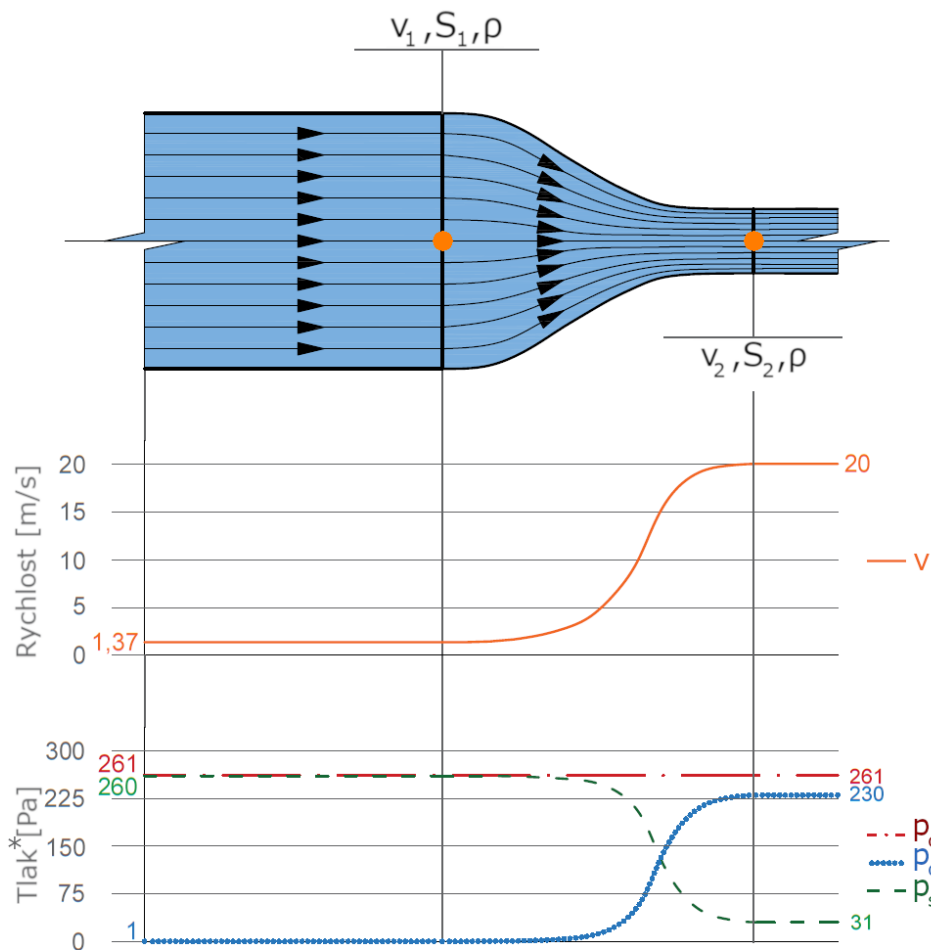
Těmito úpravami bylo dosaženo finálního přepisu Bernoulliho rovnice v energetickém tvaru. Pro použití v této práci je energetický tvar nevhodný a rovnice se vyjádří v tlakovém tvaru:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho gh = konst \quad (2.1.7)$$

<sup>9</sup> [9] podkapitola Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice musí platit ve všech bodech na stejné proudnici v celé měřené oblasti. Prochází-li tedy určité množství média kanálem o neměnném průřezu, rychlost zůstává konstantní; při změně průřezu pak musí dojít ke změně rychlosti, tak aby platila rovnice kontinuity (2.1.8). Z toho vyplývá, že pokud se zmenší průřez, pro stejný objemový průtok musí narůst rychlost. Při pohledu na vztah (2.1.7) je vidět, že rychlost se vyskytuje v prvním členu rovnice. Aby zůstal vztah pro všechny body platný, musí dojít k tlakové změně ve druhém členu. Tuto situaci lze shrnout do tvrzení, že pokud se zvyšuje rychlost proudícího média, tlak klesá a opačně. První člen rovnice se díky své závislosti na rychlosti označuje jako dynamický tlak  $p_d$ . Druhý a třetí člen lze označit za statický tlak  $p_s$ . Součtem statického a dynamického tlaku je celkový tlak  $p_c$ , který je stejný v celém průběhu kanálu.

$$\rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2 \quad (2.1.8)$$



Obrázek 3-1 – Schéma proudění dýzou s průběhy jednotlivých veličin.

Na obrázku 3-1 je schematicky zakreslena situace na dýze aerodynamického tunelu. Ve spodní části jsou vykresleny průběhy jednotlivých veličin. Je zde patrné, že i malá změna rychlosti výrazně změní poměr statického a dynamického tlaku<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> Hodnoty celkového a statického tlaku jsou zakresleny bez atmosférického tlaku, který byl během vyobrazeného měření  $9,892 \cdot 10^4 \pm 8$  Pa.

Aplikace Bernoulliho rovnice na tento případ:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 + \rho gh = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 + \rho gh = konst \quad (2.1.9)$$

Gravitační potenciální energie je v obou bodech stejná, ve vztahu (2.1.9) se tedy vykrátí. Zavedením statických tlaků  $p_{s1} = p_1$ ,  $p_{s2} = p_2$ , dynamických tlaků  $p_{d1} = \frac{1}{2}\rho v_1^2$  a  $p_{d2} = \frac{1}{2}\rho v_2^2$  a celkového tlaku  $p_c$  pak lze Bernoulliho rovnici zapsat v následujícím tvaru:

$$p_{d1} + p_{s1} = p_{d2} + p_{s2} = p_c \quad (2.1.10)$$

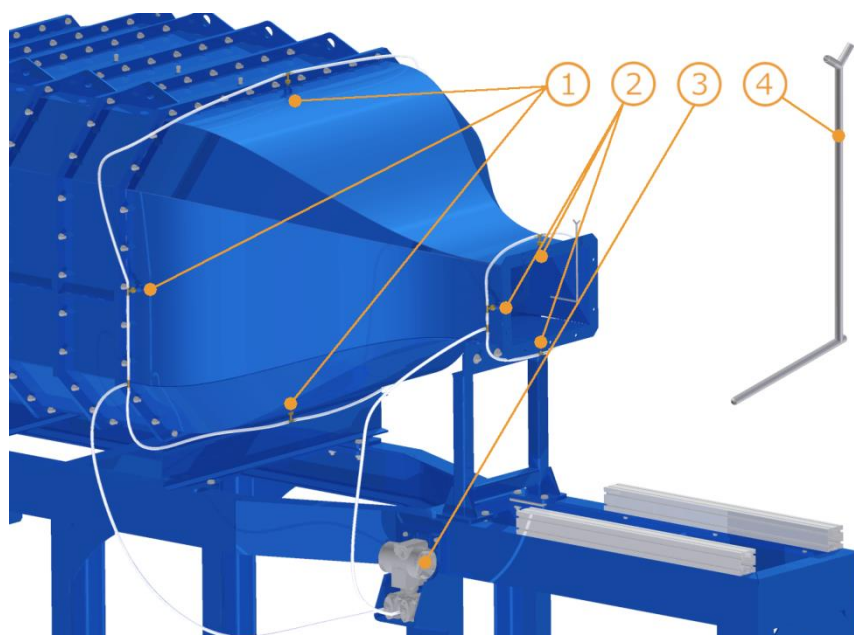
### 3.1.1 Tunelová konstanta $K$

Tunelová konstanta je poměrová veličina specifická pro každý větrný tunel. Jejím účelem je zajistit správnost hodnot dynamického tlaku měřených na tunelu, které jsou negativně ovlivněny třecími ztrátami a především pak možnostmi měřicí metody. Při běžném provozu tunelu je dynamický tlak  $p_{dt}$  určen diferenčním tlakoměrem z tlakového spádu na dýze. Určení tunelové konstanty spočívá v porovnání těchto hodnot se skutečným dynamickým tlakem  $p_{dp}$ , v tomto případě měřeným Prandtlovou sondou.

$$K = \frac{p_{dp}}{p_{dt}} \quad (2.1.11)$$

Při správně navrženém tunelu by poměr dynamických tlaků měl vycházet blízky číslu 1, obvyklá odchylka bývá maximálně 1 až 2 %.

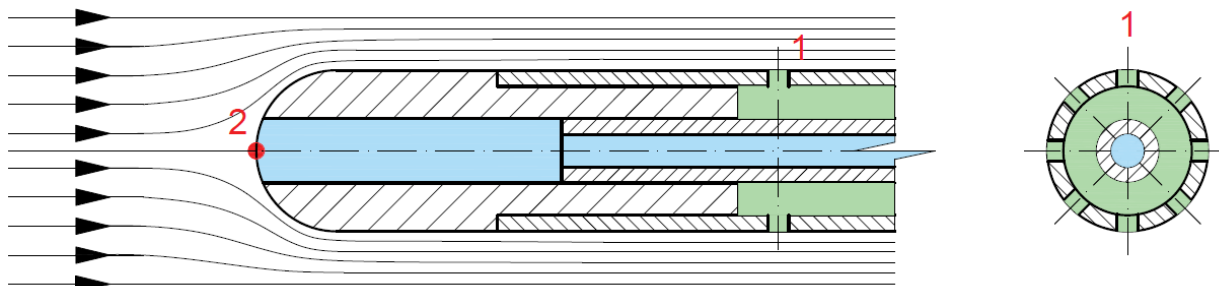
Dynamický tlak  $p_{dp}$  je určen jako rozdíl celkového a statického tlaku naměřeného Prandtlovou trubicí, tlak  $p_{dt}$  je měřen diferenčním tlakoměrem díky odběrům na začátku a konci dýzy aerodynamického tunelu.



**Obrázek 3-2** – Situace při určování tunelové konstanty.  
Jednotlivé pozice: 1 – odběry statického tlaku před dýzou  
2 – odběry statického tlaku za dýzou  
3 – diferenční tlakoměr  
4 – Prandtlova trubice

Určení dynamického tlaku měřeného Prandtlou trubicí vychází z Bernoulliho rovnice v tlakovém tvaru:

$$\frac{1}{2}\rho v_p^2 + p + \rho gh = konst \quad (2.1.12)$$



**Obrázek 3-3** – Schéma přední části Prandtlovy trubice.  
 Číslo 1 označuje odběr statického tlaku,  
 číslo 2 odběr celkového tlaku.

Aplikace Bernoulliho rovnice (2.1.12) na Prandtlou trubicí pro oblasti 1 a 2:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 + \rho gh_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 + \rho gh_2 \quad (2.1.13)$$

Bod na čele trubice (2) je stagnačním bodem a relativní rychlost proudění je v tomto místě nulová. Použitím předpokladů pro danou situaci:  $v_2 = 0 \text{ m/s}$ ;  $h_1 = h_2$  lze rovnici upravit:

$$p_2 = \frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 \quad (2.1.14)$$

První člen ve vztahu (2.1.14) představuje celkový tlak  $p_c$ , druhý člen dynamický tlak  $p_d = p_{dp}$  ( $p_{dp}$  vzhledem k použití při výpočtu tunelové konstanty  $K$ ). Poslední člen reprezentuje statický tlak  $p_s$ .

$$p_c = p_s + p_{dp} \quad (2.1.15)$$

$$p_{dp} = p_c - p_s \quad (2.1.16)$$

Na obrázku 3-3 s přední částí Prandtlou trubice je modře zvýrazněn prostor, z kterého se měří celkový tlak  $p_c$ , zeleně pak oblast se statickým tlakem  $p_s$ . Oba dva prostory jsou vyvedeny polyuretanovými hadičkami do tlakového snímače.

Z dynamického tlaku  $p_d$  je možné vypočítat rychlost. Toho se využívá především v letectví, avšak je možné vypočítat rychlost i v aerodynamickém tunelu a porovnat jí s rychlostí zadávanou do softwaru tunelu<sup>11</sup>.

$$v_p = \sqrt{\frac{2 p_{dp}}{\rho}} \quad (2.1.17)$$

<sup>11</sup> [5] strana č. 5

Určení dynamického tlaku diferenčním tlakoměrem pomocí odběrů před zúžením dýzy a před výstupní přírubou bude opět vycházet z principů popsaných Bernoulliho rovnicí. Tentokrát je výhodný přepsaný tvar s jednotlivými tlaky (2.1.15):

$$p_{d1} + p_{s1} = p_{d2} + p_{s2} = p_c \quad (2.1.18)$$

Pro výpočet dynamického tlaku  $p_{d1}$  je celkový tlak neznámý a není možné ho změřit Prandtlovou sondou ani jiným způsobem bez zásahu do proudu. Pokud je proveden odběr ve stěně dýzy, vždy se bude jednat o odběr statického tlaku, protože rychlost na stěně je nulová. V tomto případě, kdy máme odběry před a za dýzou, to znamená, že ve vztahu (2.1.18) jsou známy dvě proměnné z pěti. Pro určení dalších proměnných se využívá vlastnosti zakreslené v dolní části obrázku 3-1, ve které je zakreslen průběh rychlosti a statických a dynamických tlaků. Z tohoto obrázku je patrné, že i malá změna rychlosti má obrovský vliv na poměr statického a dynamického tlaku.

Velikost změny rychlosti mezi odběry se dá určit z rovnice kontinuity:

$$\dot{m} = \rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2 \quad (2.1.19)$$

Vyjádření  $v_2$  v závislosti na  $v_1$ :

$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2} \quad (2.1.20)$$

V konkrétním případě tohoto tunelu jsou průřezy následující:

$$S_1 = 8,75 \cdot 10^5 \text{ mm}^2; S_2 = 6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{8,75 \cdot 10^5}{6 \cdot 10^4} \approx 14,6 \cdot v_1$$

Jelikož ve výpočtu dynamického tlaku je rychlost ve druhé mocnině, znamená to, že bez ohledu na velikost rychlosti bude dynamický tlak na začátku  $p_{d1}$  213 krát menší než na výstupu  $p_{d2}$ .

$$p_{d2} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.1.21)$$

$$p_{d2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (14,6 \cdot v_1)^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 213 \cdot v_1^2 \quad (2.1.22)$$

$$p_{d1} = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (2.1.23)$$

$$p_{d2} = 213 \cdot p_{d1} \quad (2.1.24)$$

Je patrné, že podíl dynamického tlaku v celkovém tlaku na vstupu je velmi malý a naopak na výstupu vysoký. Díky této skutečnosti je možné celkový tlak  $p_c$  určit jako statický tlak  $p_{s1}$  z odběru na vstupu do dýzy a složku dynamického tlaku  $p_{d1}$  zanedbat. Tato nepřesnost je korigována počítanou tunelovou konstantou  $K$ .

$$p_c = p_{s1} = p_{d2} + p_{s2} \quad (2.1.25)$$

Velikost dynamického tlaku měřeného na dýze  $p_{dt}$  je pak tedy vyjádřena vztahem:

$$p_{dt} = p_{s1} - p_{s2} \quad (2.1.26)$$

### 3.1.2 Proměření rychlostních profilů

Rychlosti v měřicím prostoru tunelu byly určeny principiálně stejně jako v případě dynamického tlaku při určení tunelové konstanty. Problém však činí měření statického tlaku v proudu. Použité řešení využívá speciálně zkonstruovaného měřicího přípravku tvořeného čtveřicí Pitotových trubic, které díky správnému návrhu přípravku a nastavení koncových spínačů traverzéro umožní kompletní proměření průřezu měřicího prostoru.

Pro výpočet rychlosti je však nutné znát hodnotu dynamického tlaku. U měření tunelové konstanty stačilo pouze zaznamenávat hodnoty měřené Prandtlovou sondou, které obsahovaly údaje o dynamickém i statickém tlaku zároveň. Měření statického tlaku na povrchu sondy však v tomto případě není realizovatelné a statický tlak se tedy musí měřit na jiném vhodném místě.

Při výběru místa pro měření statického tlaku je potřeba ctít určitá pravidla. Ta popsal a publikoval Ludvig Prandtl v roce 1904 v *Prandtlově teorii mezní vrstvy*<sup>12</sup>. Jedním ze závěrů této teorie je poznatek, že velikost statického tlaku je prakticky závislá pouze na poloze v podélném směru. Tato skutečnost je při popisovaném experimentu aplikována tak, že statické tlaky jsou měřeny ze čtyř pevných odběrů v různé vzdálenosti na stěně měřicího prostoru a zaznamenávány snímačem tlaku. Takto jsou tedy změřeny statické tlaky ve čtyřech rovinách. Z Bernoulliho rovnice je dáno, že celkový tlak na proudnici je konstantní a je součtem dynamického a statického tlaku. Tento celkový tlak je měřen Pitotovými sondami a zaznamenáván snímačem. Díky čtyřem odběrům statického tlaku v různých polohách je pak možné určit rychlost ve čtyřech měřicích rovinách z dynamického tlaku odečtením příslušné hodnoty statického tlaku od celkového.

## 3.2 Příprava experimentu

Samotný experiment by měl být co nejvíce automatizovaný, měření by mělo proběhnout rychle, bez velkých zásahů obsluhy a, především, naměřená data musí být korektní. Aby bylo těchto požadavků dosaženo, je nutné před zahájením experimentu provést důkladnou přípravu týkající se naplánování jednotlivých operací a zajištění, případně výrobu, potřebného měřicího vybavení a software. Během přípravy je také nutno krok za krokem projít celý experiment, naplánovat sled jednotlivých operací, zkontrolovat a vyzkoušet použité vybavení a zkušebně provést každou část měření. Na závěr je pak nutné provést kompletní test funkčnosti celého pracoviště.

---

<sup>12</sup> [11] strana č. 14

### 3.2.1 Příprava a výroba potřebného vybavení

#### Aerodynamický tunel

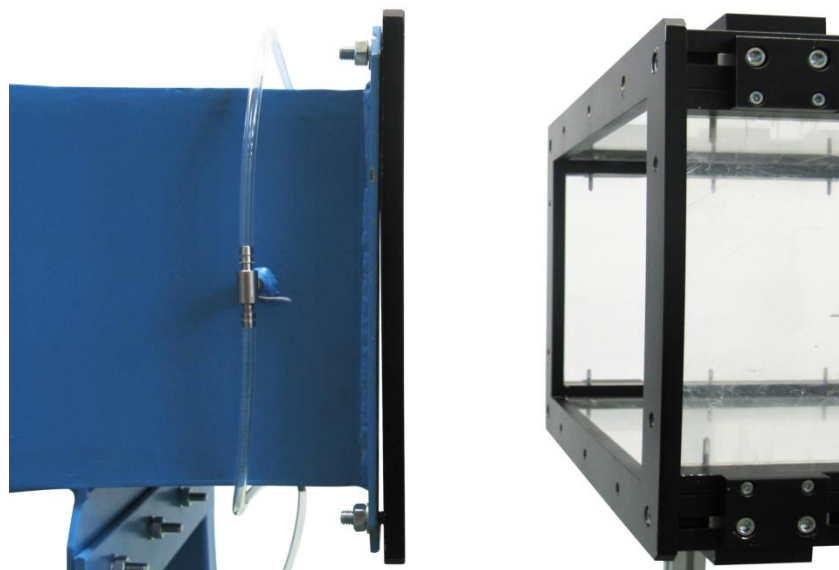
Větrný tunel byl smontován a zprovozněn techniky dodavatele. Zároveň k němu byl dodán základní software pro ovládání tunelu a traverzérů a bylo tedy ihned možné začít s jeho kontrolou a úpravou nedostatků.

Při prvním zkušebním měření tunelové konstanty byly zjištěny velké rozdíly – až okolo 10 % – mezi hodnotami dynamického tlaku naměřených na dýze tunelu a Prandtlovou trubicí na vstupu do měřicího prostoru. Rozdíl těchto hodnot by měl být okolo 1 až 2 %. Proto bylo znovu vyčištěno a zkontrolováno měřicí vybavení, kalibrován snímač tlaku, avšak nové měření dopadlo shodně. Kvůli tomu byla provedena detailní kontrola tunelu, při které bylo nalezeno několik nedostatků.

Jednak nebyly zajištěny nevyužívané odběry statického tlaku na uklidňovací komoře, ale především byly zjištěny vůle velké až 2 mm v napojení měřicího prostoru k výstupní dýze. Další výrazné nepřesnosti byly v sestavení konstrukce měřicího prostoru, kde vlivem nesprávného sestavení docházelo k tvorbě skulin mezi jednotlivými díly, které se negativně projevily na kvalitě proudění. Vady v sestavení měřicího prostoru navíc prakticky znemožňovaly použití traverzérů, protože jeho osy pohybu nebyly rovnoběžné se stěnami měřicího prostoru a nebylo tedy možné kompletní proměření prostoru.

Na uklidňovací komoře a výstupní dýze se nachází celkem 12 odběrů statického tlaku, ze kterých se však využívají pouze 4 odběry na dýze. Odběr umožňuje připojení polyuretanové hadičky přes speciální dutou součást, která se k tunelu přišroubuje do připraveného závitu. Těchto závitů bylo využito a zbylých 8 odběrů bylo šroubem a těsněním pod hlavou zaslepeno.

Při řešení problému s napojením dýzy na měřicí prostor bylo shledáno, že příruba dýzy není navařená dostatečně přesně. Kvůli tomu vzniká v dolních rozích měřicího kanálu mezi dýzou a měřicím prostorem škvíra o velikosti až 2 mm. Touto skulinou při používání tunelu docházelo k úniku proudícího média a zakřivení proudu.



Obrázek 3-4 – Napojení výstupu z dýzy k měřicímu prostoru před vložením těsnění.

Připojením měřicího prostoru se sice díky dotahování šroubů skulina zmenšovala, avšak docházelo ke vzniku pnutí ve spoji, jehož působení modulární konstrukce měřicího prostoru nevydržela a deformovala se. Jako řešení bylo zvoleno vyplnění díry měkkým pěnovým těsněním, přesně upraveným vzhledem k tvaru otvoru. Těsnění bylo po sešroubování měřicího prostoru s dýzou oříznuto a zarovnáno podle okolní stěny. Spoj byl dotažen tak, aby byla eliminována mezera mezi tunelem a dýzou, ale aby zároveň nedošlo k velkému pnutí v konstrukci měřicího prostoru.

Nepřesnosti v sestavení pravděpodobně vznikly působením napětí ve šroubovém spojení dýzy a měřicího prostoru po dotažení šroubů. Důkladným měřením bylo zjištěno, že laserem pálená čela měřicího prostoru jsou rovná a jsou vůči sobě pouze vzájemně posunuta. Nepřesnosti tedy byly v modulární konstrukci z hliníkových profilů. Postupným povolením všech šroubových spojů držících profily a čela dohromady byla konstrukce odlehčena a ustavena do správné polohy. Citlivým dotažením pak bylo dosaženo vzájemné kolmosti stěn a správného usazení jednotlivých komponent.

### **Tlakové sondy**

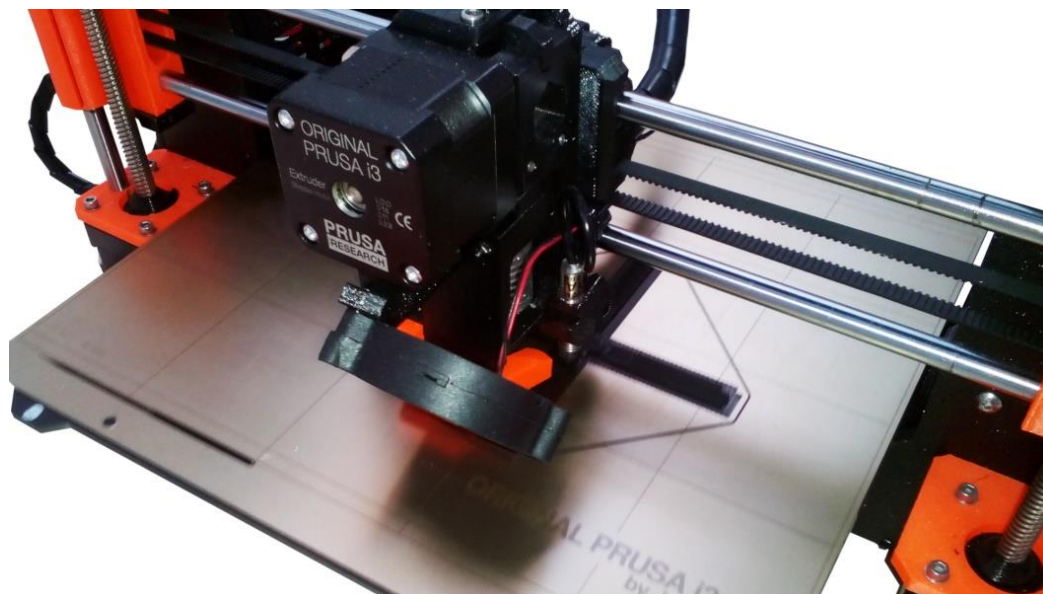
V první kapitole byly popsány použité tlakové sondy. Na měření tunelové konstanty byla použita Prandtlova trubice o průměru 5 mm. Pro její připevnění byl vyroben speciální držák. Sonda byla po odstranění měřicího prostoru přišroubována k přírubě výstupní dýzy a vycentrována špičkou do průsečíku úhlopříček průřezu kanálu. Prandtlova trubice byla před použitím zkontrolována, vyčištěna, propláchnuta technickým lihem a poté dokonale vysušena.

Pro proměření rychlostního pole byla vyrobena speciální sonda se čtyřmi Pitotovými trubicemi. Původní myšlenka byla vyrobít z mosazného plechu těleso, které by umožňovalo přichycení k posuvné tyči traverzéro a zároveň by k němu šlo připájet mosazné trubičky vytvarované tak, aby byl možný dojezd vždy jedné z trubiček až do rohů měřicího prostoru. Jako problém se ukázala celkově malá tuhost konstrukce a obtížná výroba a proto byl tento koncept zamítnut.

Dalším návrhem, který se na rozdíl od toho prvního dočkal realizace, byl tenkostěnný plastový kříž nesoucí na ramenech mosazné trubičky o průměru 2 mm a světlosti 1 mm. Konstrukce v zásadě odpovídala později zrealizovanému návrhu, lišila se v proporcích a celkové velikosti. Hlavní kladený důraz byl na co nejmenší tloušťku plastových částí sondy tak, aby proudění bylo co možná nejméně ovlivněno.

Celkové rozměry sondy byly zvoleny 80 x 80 x 50 mm, tloušťka stěn 2,5 mm se zaoblenými čelními hranami  $R = 1,25$  mm. Tělo sondy bylo vyrobeno jako plastový monoblok vytištěný na 3D tiskárně PRŮŠA. Jednotlivé mosazné trubičky byly přilepeny vteřinovým lepidlem.





*Obrázek 3-5 – Tisk těla sondy na 3D tiskárně.*

Tato první verze sondy byla pokusně nainstalována na výsuvnou tyč traverzéro a ustavena do provozní polohy, nebyla však hadičkami připojena ke snímači tlaku. Cílem experimentu bylo zjistit chování výrobku v proudícím médiu. Pokus začal při 10 m/s a s krokem po 5 m/s pokračoval až do 65 m/s. Okolo 30 m/s začaly být patrné vibrace tělesa sondy. Konec pokusu při 65 m/s nastal ve chvíli, kdy pozorovaný rozkmit ramen kříže a trubiček přesáhl 2 mm a tento prototyp sondy byl označen za nepoužitelný.

Druhá verze měřicího přípravku vycházela z té první a byly na ní aplikovány poznatky z proběhlé zkoušky. Hlavním zjištěným problémem byly vibrace. Jako nejjednodušší řešení problému se jevílo zkrácení ramen nosného kříže a celkové zmenšení sondy. Nově také nebyly vnější rozměry sondy řešeny jako čtverec, ale rozměry vycházely z kružnice se středem na posuvné tyči traverzéro. Jednotlivé trubičky byly opět přilepeny a nacházely se na kružnici o průměru 50 mm. Ramena na sebe byla kolmá a byla natočena o 45° od osy tyče traverzéro. Další změnou pak bylo rozdělení tělesa sondy na dva nezávislé konstrukční celky, které spolu byly sešroubovány.

Nová verze byla opět testována nepřipojená ke snímači. Zkouška ve větrném tunelu tentokrát proběhla úspěšně, vibrace nebyly pozorovány. Nepříjemným zjištěním však bylo, že poloha koncových spínačů na traverzéro neumožňuje dostatečně přesné nastavení tak, aby se posun mezi spínači dal realizovat celočíselným pohybem s hodnotou dělitelnou pěti. Hodnota 5 mm byla zvolena jako krok pro budoucí měření rychlostních profilů. Zároveň vzhledem k malé velikosti sondy muselo z prostorových důvodů dojít k velké deformaci mosazných trubiček, což by mohlo vést ke zhoršeným výsledkům měření. Navíc při velkém ohybu jednotlivých trubiček je těžké při ohýbání zajistit dostatečnou geometrickou podobnost všech čtyřech trubic.

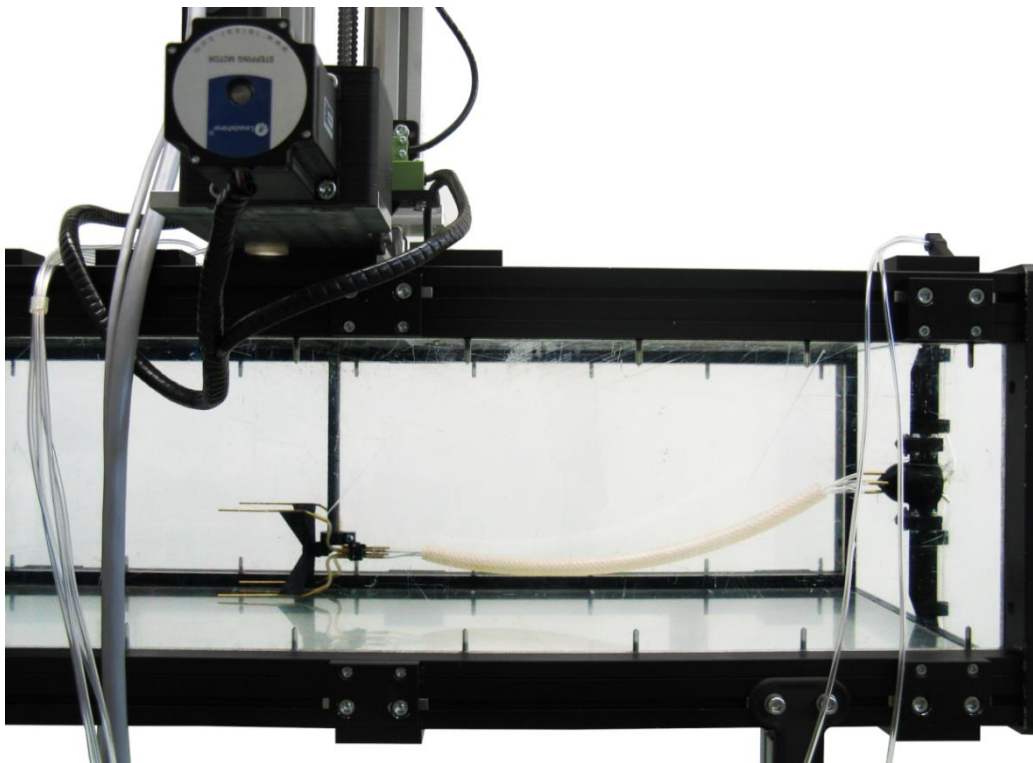
Nastavováním koncových spínačů bylo zjištěno, že jediná dosažitelná vzdálenost konce posuvové tyče od všech čtyř stěn je 30 mm. Z tohoto zjištění pak vycházel další návrh sondy.

Třetí návrh sondy reflektoval poznatky z první i druhé verze. Nový výrobek využil adaptér k uchycení z druhé verze sondy a nové plastové těleso ve tvaru kříže, optimalizované do tvaru čtverce 70 x 70 mm<sup>13</sup>.

Problém s vibracemi byl vyřešen kompletním přepracováním geometrie nosného kříže, zvětšením tloušťky stěny na 5mm a přepracováním řešení čelních partií plastového tělesa. Nová verze má náběžné hrany více zkosené a přechody mezi jednotlivými plochami zaoblené. Vzhledem k velké tloušťce stěny musela být zkosená i část ramene tak, aby přilepená trubička o průměru 2 mm plynule navazovala na zbytek sondy. Zároveň bylo celé těleso posunuto vpřed proti směru proudu a jednotlivá ramena byla v tomto směru zesílena. Drobnou změnou pak bylo zapuštění šroubu a matice spojujícího obě části sondy.

Problémy s ohýbáním mosazných trubiček, při kterém docházelo k zborcení stěny trubičky v místě ohybu, byly vyřešeny zmenšením úhlu ohybu a rozdělením trubičky do dvou částí. První část je přilepena k nosnému kříži sondy, druhá je vlepena do adaptéru přišroubovanému k tyči traverzéro. Spojení mezi trubičkami bylo realizováno silikonovými hadičkami.

Tato verze byla zkoušena přímo i s připojením Pitotových trubic ke snímači tlaku. Zkouška proběhla pro kompletní rozsah rychlostí 0 až 80 m/s a dopadla z hlediska vibrační sondy úspěšně.

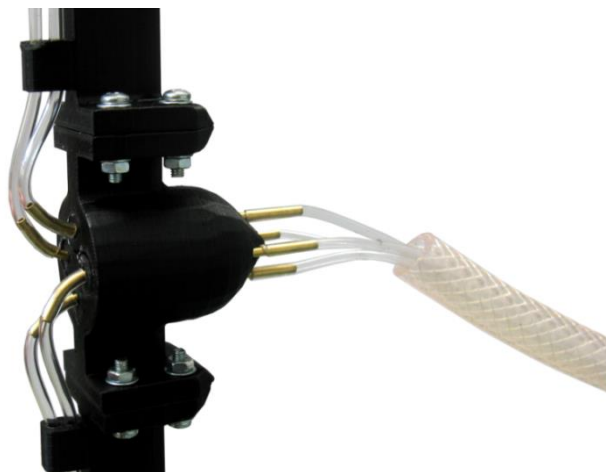


**Obrázek 3-6** – Pohled na měřicí prostor s umístěnou a připojenou sondou.

Předchozí zkoušky byly statické a sonda se nepohybovala v prostoru. Následně tedy bylo přikročeno k vyzkoušení chování sondy při maximální rychlosti proudění a

<sup>13</sup> Přesah 30 mm na každou stranu od upínací tyče traverzéro o průměru 10 mm.

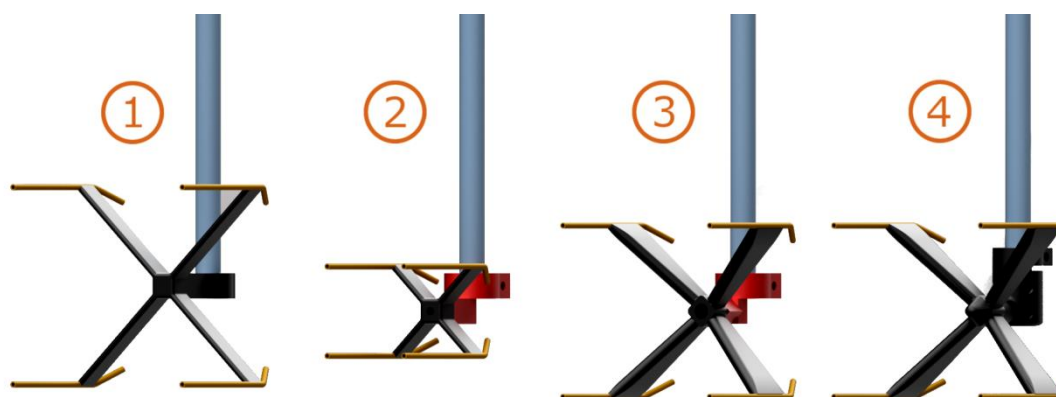
zároveň velké rychlosti pohybu traverzéro při přesunech v obou osách. I tento test proběhl úspěšně. Nepříjemným zjištěním však byl vznik nových vibrací od hadiček vedoucích ke snímači tlaku. Tento problém byl řešen přichycením hadiček na výstupu z měřicího prostoru pomocí na 3D tiskárně vyrobených úchytů a vložením hadiček do větší hadice, jejíž tuhost a váha neumožňuje vznik vibrací, avšak stále je dostatečně flexibilní.



**Obrázek 3-7** – Detail úchytu hadiček na výstupu z měřicího prostoru.

Třetí verze sondy vykazovala již požadovanou kvalitu naměřených výsledků, problémy s vibracemi byly odstraněny, avšak připojení hadic k výstupu z měřicího prostoru značně omezovalo posun traverzéro v podélném směru měřicího prostoru, kde bylo třeba mít větší množství sad polyuretanových hadiček o různých délkách.

Data prezentovaná v této práci byla naměřena právě touto verzí sondy. Pro další měření však byla navržena nová verze, tvarově odpovídající verzi číslo 3, avšak vyrobená jako monoblok. Posuvná tyč traverzéro bude nahrazena již zakoupenou trubkou o průměru 10 mm a světlosti 7 mm, skrze kterou bude možné vyvést polyuretanové hadičky ven z měřicího prostoru vrchem. Traverzéro pak půjde libovolně pohybovat v celé délce měřicího prostoru bez nutnosti odpojovat sondu a mít více sad hadiček o různých délkách. Zároveň nebude docházet k ovlivnění proudu hadičkami a úchyty nutnými pro stávající řešení.



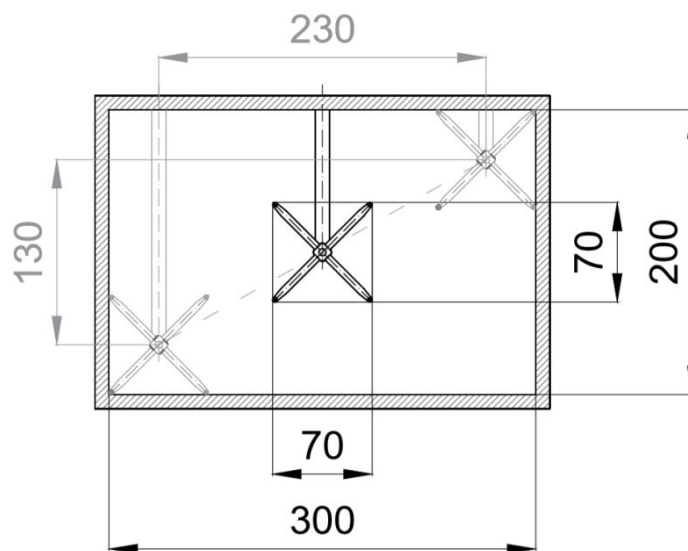
**Obrázek 3-8** – Všechny verze měřicí sondy seřazené dle stupně vývoje – modely použité pro tisk na 3D tiskárně.

## Traverzér

Použitý 2D traverzér byl spolu s tunelem zkoušen přímo technikou dodavatele, díky čemuž byla ověřena jeho funkčnost i komunikace mezi traverzérem a počítačem. Proto bylo možné rovnou zkoušet traverzér s namontovanou sondou.

Již práce na návrhu sondy ukázaly několik nedostatků. Jednalo se především o špatné sestavení traverzéro, které se projevilo tím, že posuvná tyč nebyla rovnoběžná se stěnami měřicího prostoru a nebylo tedy možné adekvátní proměření prostoru. Odchylna vzdálenosti tyče od stěny měřicího prostoru dosahovala až 2 mm. Vzhledem k tomu, že průměr Pitotovy trubice použité při měření je rovněž 2 mm, jedná se o velkou, jednoznačně neakceptovatelnou chybu. Dalším proměřováním bylo zjištěno, že odchylna je symetrická a projevuje se pouze na tyči a jejím vedení. Pro řešení problému bylo rozebráno vedení svislé osy traverzéro a upraven jeden z plastových dílů vyrobených na 3D tiskárně. Úprava spočívala v převrtání děr a následnému přesnému uchycení posuvné tyče. Díky tomu došlo k naklopení tyče se sondami do správné polohy.

Dále byly řešeny koncové spínače vymežující pohyb v jednotlivých osách. Jejich správné nastavení bylo nutné pro návrh a výrobu měřicí sondy. Spínač je uchycen na dvou šroubech a umožňuje posun 10 mm. Pro další posunutí bylo nutné šrouby přichytit na vedlejší pozici, do jiných děr. Bohužel konstrukce není symetrická a hledání pozice, která by zastavila sondu na obou stranách ve stejné pozici, bylo poměrně obtížné. Jediným akceptovatelným řešením bylo nastavení maximálního přiblížení tyče ke stěně na 30 mm.



Obrázek 3-9 – Schéma měřicího prostoru a pohybu sondy.

Vnitřní rozměry měřicího prostoru jsou 300 x 200 mm, průměr posuvné tyče traverzéro je 10 mm. Koncové spínače tedy byly nastaveny tak, aby umožňovaly pohyb 230 mm v horizontální směru a 130 mm ve vertikální směru. Díky tomu, že obě tyto hodnoty jsou dělitelné 2, 5 a 10, je zároveň možné provádět měření s velkou škálou kroků.

S nastavením kroku měření však nesouvisí pouze teoretické předpoklady, ale bohužel je nutné také reflektovat technické možnosti zařízení. Uvažovaným krokem bylo 5 mm v ose X i v ose Y. Při zkušebních měřeních však docházelo k poměrně rychlému dosažení teplotních limitů a v měření nastávaly vynucené přestávky na chlazení krokových motorů.

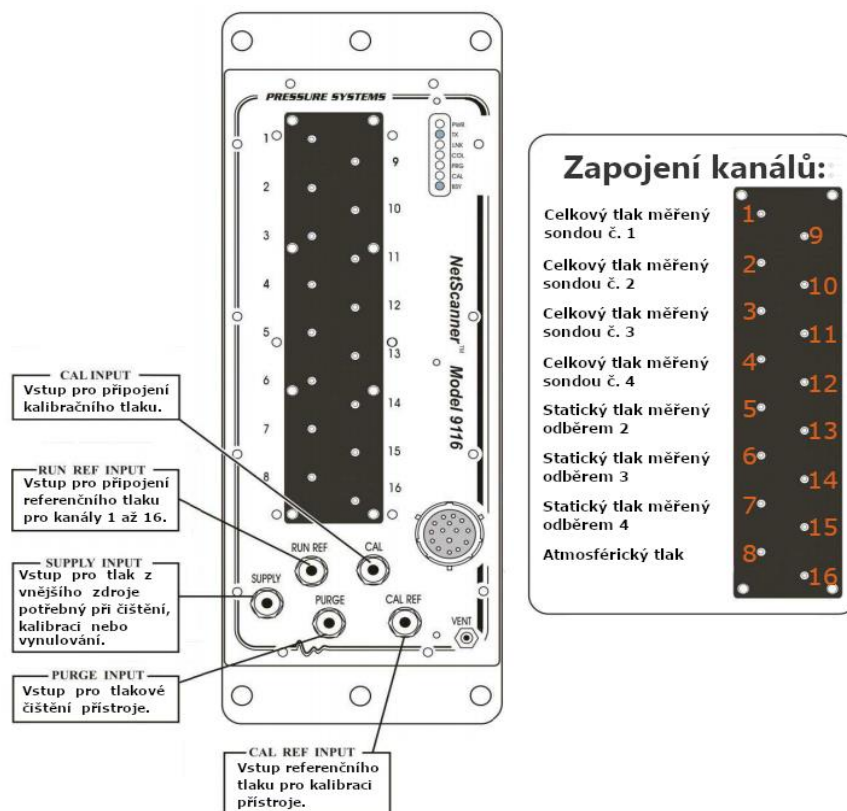
Délka a míra těchto pauz byla neakceptovatelná a hledání příčin vedlo ke zvětšení kroku na 10 mm. Příčinou je podle všeho nesouosost krokového motoru a kuličkového šroubu, která, byť je kompenzována spojkou s plastovým elementem, vede k nadměrnému zatěžování motoru a následnému přehřátí. Zkoušením bylo zjištěno, že sestava svislé osy je vyrobena přesněji a je schopna výrazně delšího pohybu. Plán měření byl tedy proti původnímu záměru přepracován a přejezdy s měřením po stanoveném kroku byly realizovány ve vertikální ose, zatímco v horizontální dochází vždy pouze k přesunu o velikost kroku a následně, během měření a posunu ve svislé ose, je motor v klidu. Při tomto nastavení lze provést kompletní měření bez přerušení. Mezi jednotlivými měřeními musí být přibližně hodinová přestávka.

### **Tlakový snímač**

Ještě před zahájením experimentu je nutné prověřit a vyzkoušet používané měřicí přístroje. V tomto případě jde hlavně o tlakový snímač, u kterého je nutné ověřit pravdivost měřených a zaznamenávaných hodnot a případně snímač nastavit, tak aby snímané hodnoty odpovídaly realitě. Toho lze dosáhnout kalibrací snímače, který má uživatelskou paměť a pomocí softwaru od výrobce lze jednotlivé kanály kalibrovat.

Pro kalibraci byly kanály snímače postupně připojeny ke zdroji tlaku o známé hodnotě, která je považována za dostatečně důvěryhodnou. V tomto případě bylo rozhodnuto o porovnání hodnot tlaku vyvozeném injekční stříkačkou. Tento tlak byl zaznamenáván snímačem tlaku a zároveň také kapalinovým manometrem, který byl použit jako etalon z důvodu jednoduchosti metody měření tlaku a malé náchylnosti k chybám.

Nejprve bylo provedeno kompletní vyčištění manometru technickým lihem a po následném důkladném vyschnutí byl přístroj naplněn destilovanou vodou. Destilovaná voda byla použita z důvodů známé hustoty, snadné dostupnosti a vhodných vlastností pro použití v kovovém manometru. Po nalití dostatečného množství vody tak, aby byla hladina kapaliny v trubici manometru na 0 Pa, následovalo připojení polyuretanových hadiček. Ty vedly od injekční stříkačky k rozdělení na jednotlivé větve vedoucí do kapalinového manometru a k tlakovému snímači. Stlačováním pístu docházelo k vyvození tlaku zaznamenávaného na obou přístrojích, přičemž bylo sledováno, zda je oběma dosaženo stejné hodnoty. V případě nestejnosti výsledků byl pomocí software kalibrován daný kanál tlakového snímače. Snímač byl po kalibraci všech kanálů odpojen a na jednotlivé kanály byly postupně připojeny polyuretanové hadičky s měřenými tlaky.



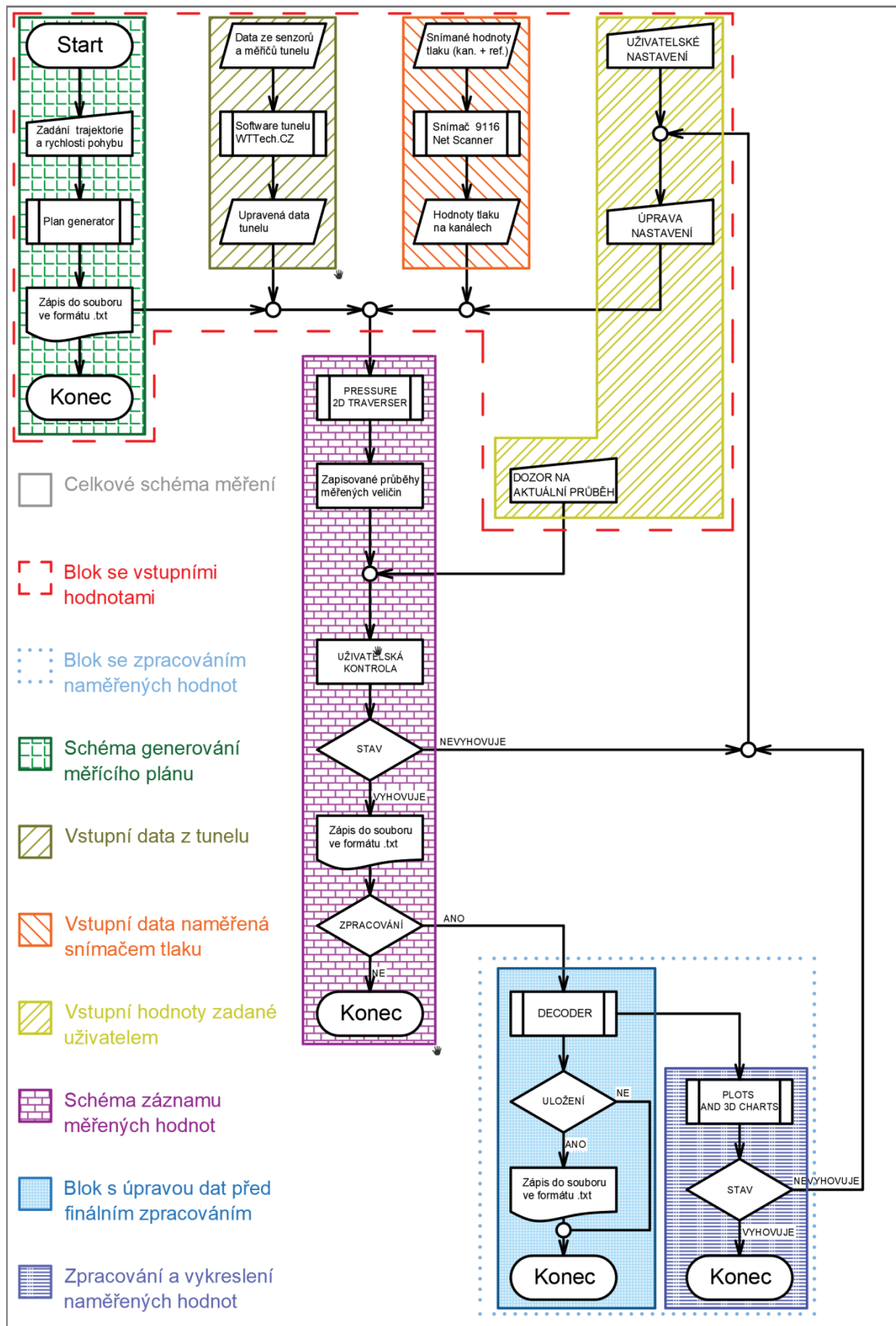
**Obrázek 3-10** – Schéma čelního panelu tlakového snímače NetScanner 9116 a zapojení jednotlivých kanálů. [7]

Při prvních měřeních – při určování tunelové konstanty – byly použity 2 kanály pro celkový a statický tlak měřené Prandtlovou trubicí. Další měření vyžadovala použití až osmi kanálů. První 4 kanály byly napojeny na měřicí sondu s Pitotovými trubicemi. Na dalším kanále byl snímán atmosférický tlak z okolí. Hodnoty statického tlaku měřeného odběrem na vrchní stěně tunelu byly snímány jako referenční tlak připojený ke zvláštnímu vstupu mimo snímané kanály (vstup RUN REF). Po prvních několika měřeních bylo rozhodnuto o připojení dalších odběrů statického tlaku nacházejících se ve větších vzdálenostech od měřicí sondy. Výsledné zapojení jednotlivých kanálů ukazuje pravá část obrázku 3-10.

### 3.2.2 Potřebný software

Měření tlakovými sondami využívá techniky několika výrobců měřicího vybavení. Každý používaný přístroj má svoje programy umožňující výrobcem stanovené operce a výstupy. Pro potřeby experimentu bylo třeba vytvořit balíček programů, které v reálném čase zpracují vstupní data z jednotlivých přístrojů, upraví je a požadovaný výstup zaznamenají do souboru, který se dá dále editovat a s výsledky pracovat.

Celý experiment lze brát jako jeden proces, do kterého vstupují určité veličiny, ty jsou zpracovány a ukládány do souborů. Proces měření je možno rozdělit na několik postupně navazujících bloků.



Obrázek 3-11 – Vývojový diagram měření rychlosti tlakovými sondami.

První blok obsahuje zadání vstupních hodnot uživatelem, data z přístrojů a jejich zpracování ve firmware, plán měření a zbylé vstupní hodnoty. Výstupem z této části jsou data ve formátu použitelném pro druhou výpočetní část.

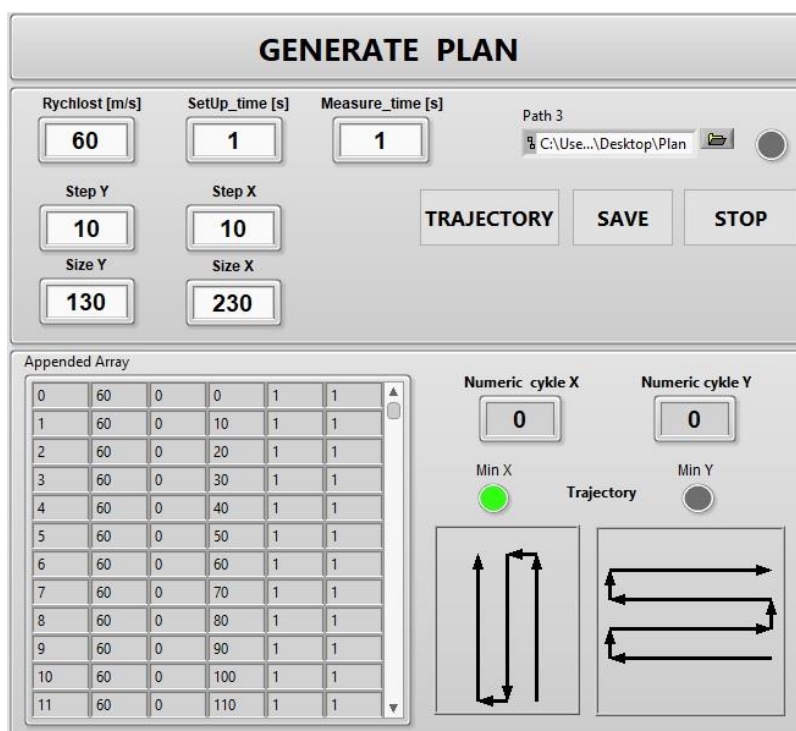
Druhá část používaného software zpracovává vstupující data z prvního bloku, upravuje je, zaznamenává do souboru k dalšímu zpracování. Zároveň uživateli poskytuje aktuální informace o měřených veličinách, stavu jednotlivých částí zařízení a možnost běh programu pozastavit, případně zastavit úplně. Během pozastaveného programu lze ručně měnit parametry měření. Zapisovanými daty jsou textové soubory obsahující tabulku s číslem a časem měření, doplněnou hodnotami všech zaznamenávaných veličin.

Třetí část obsahuje uživatelské zpracování. Rozsah zpracování je závislý na následném využití naměřených dat. Měření je realizováno čtveřicí Pitotových trubic, z nichž každá proměří přibližně 50 % průřezu měřicího prostoru. Data z druhé části procesu obsahují kompletní data z každé sondy, které je možné následně sloučit a vytvořit uživatelem požadovaný výstup – například sestavení rychlostních profilů na zvolené rovině, teplotní nebo tlakové pole ve 3D diagramu nebo vykreslení směrodatných odchylek pro jednotlivé měřené body. Výsledná struktura ukládaných dat jednotlivých souborů je vždy shodná a mimo zpracování speciálním softwarem umožňuje snadné načtení do tabulkových procesorů jako je *Microsoft Excel*, případně *LibreOffice Calc*.

### Blok se vstupními hodnotami

Při pohledu do schématu z obrázku 3-11 je patrné, že vstupní hodnoty pro hlavní část programu jsou ze čtyř zdrojů. Jedná se o snímaná data z tunelu a snímače tlaku, plán měření a uživatelské definování vstupních veličin.

Generátor plánu (GENERATE PLAN) je jednoduchý program vytvořený v prostředí LabView, jehož účelem je automaticky vytvořit plán měření - trajektorii pohybu traverzéro (sondy) měřicím prostorem dle zadání uživatele.



Obrázek 3-12 – Uživatelské rozhraní generátoru měřicích plánů.



Plán měření se používá tehdy, pokud je měření pravidelně opakujícího se charakteru v uživatelem vymezené oblasti. Plán měření je ukládán ve formě pole hodnot, ve kterém každý řádek značí aktuální cílovou pozici pohybu traverzéry vzhledem k počátku souřadného systému traverzéry později definovanému uživatelem. Poloha pozice je zadána v absolutních souřadnicích, při měření dle plánu je tedy nutné s tímto počítat při obsluze hlavního programu. Ve sloupcích jsou informace o číslech pozic, jejich polohách, době setrvání na pozici a rychlosti přesunu, kterou bylo pozice dosaženo.

Jednoduché rozhraní uživateli umožňuje v horní části definování požadovaných parametrů a uložení vytvořeného plánu do textového souboru. Nastavit lze velikost traverzované oblasti v osách X a Y, posuvový krok v obou osách a rychlost přesunu. Dále jde nastavit čas setrvání na pozici a dobu měření. Tlačítko TRAJECTORY přepíná primární směr měření – vertikálně/horizontálně. Ve spodní části je signalizace směru pohybu a ukázka tvořeného pole pozic pohybu.

Data ze snímačů a tunelu jsou zaznamenávána a editována softwarem výrobce.

V případě dat z tunelu si hlavní program měření vybírá k záznamu určitou část dat, která jsou zaznamenána snímači a čidly na tunelu nebo jsou z těchto hodnot dopočítána. Tato data se čerpají přímo z běžícího software pro obsluhu tunelu a traverzéry. Jedná se o hodnoty dynamického tlaku (tlakového spádu na dýze), rychlosti a teploty proudění v tunelu, Reynoldsova čísla, hustoty a frekvenci.

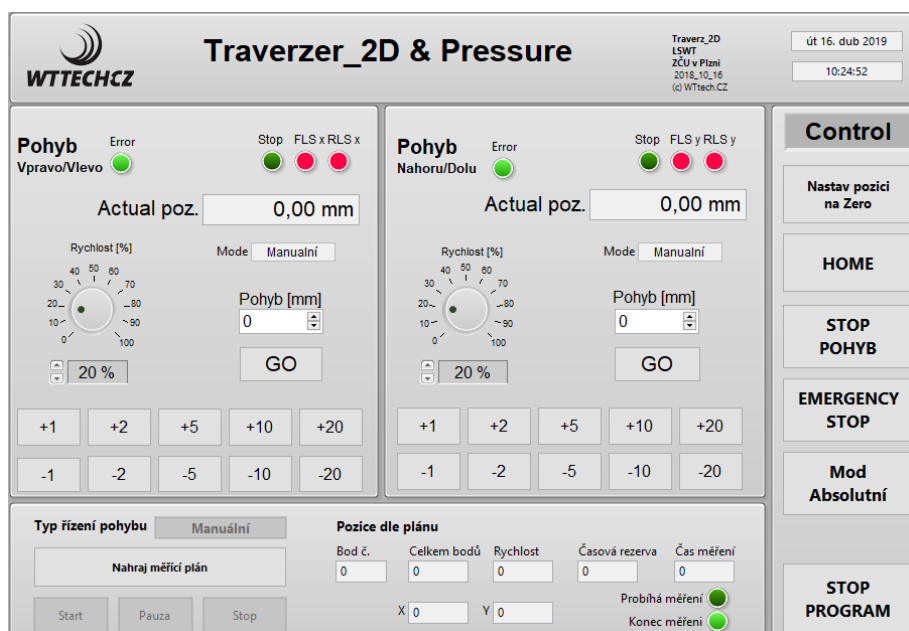
Data z tlakového snímače obsahují hodnoty tlaku na jednotlivých kanálech. Ta jsou přes ethernet načítána hlavním programem a upravována. Jelikož je snímač anglické výroby, všechny měřené tlaky nejsou vyjádřeny v pascálech, ale v PSI a pro další zpracování musí být nejprve převedeny na pascaly ( $1 \text{ PSI} = 6894,757 \text{ Pa}$ ).

Blok hodnot s uživatelsky definovanými hodnotami má ve schématu tři části.

První část zahrnuje primárně nastavená data, která definují podmínky experimentu – způsob řízení tunelu (rychlost proudění, frekvence, Reynoldsovo číslo) a velikost řízené veličiny, nastavení domovské pozice ( $X = 0, Y = 0$ ), nastavení absolutního módu pohybu traverzéry (velmi důležité při měření dle plánu, který je vygenerován v absolutních souřadnicích). Druhá část ve schématu zahrnuje změnu vstupních dat uživatelem používanou tehdy, pokud zaznamenávané výsledky zobrazované v průběhu měření vykazují vady a měření je třeba zastavit a vstupní parametry předefinovat. Posledním uživatelským vstupem je dozor nad probíhajícím procesem. Uživatel vidí na obrazovce hlavního programu aktuální měřené veličiny, průběh hodnot, pozici sondy a v případě, že některá ze sledovaných veličin neodpovídá předpokladům, může měření pozastavit, případně zastavit úplně.

## Hlavní program – Traverzer\_2D & Pressure

Zpracování a zaznamenávání hodnot patří do druhé části procesu a probíhá ve hlavním programu. Ten byl vytvořen v prostředí Labview a tvoří ho dvě části. První část tvoří dodavatelem tunelu dodaný software k ovládání 2D traverzéro. Druhá část byla vytvořena speciálně kvůli zpracování, zobrazení a záznamu snímaných veličin.

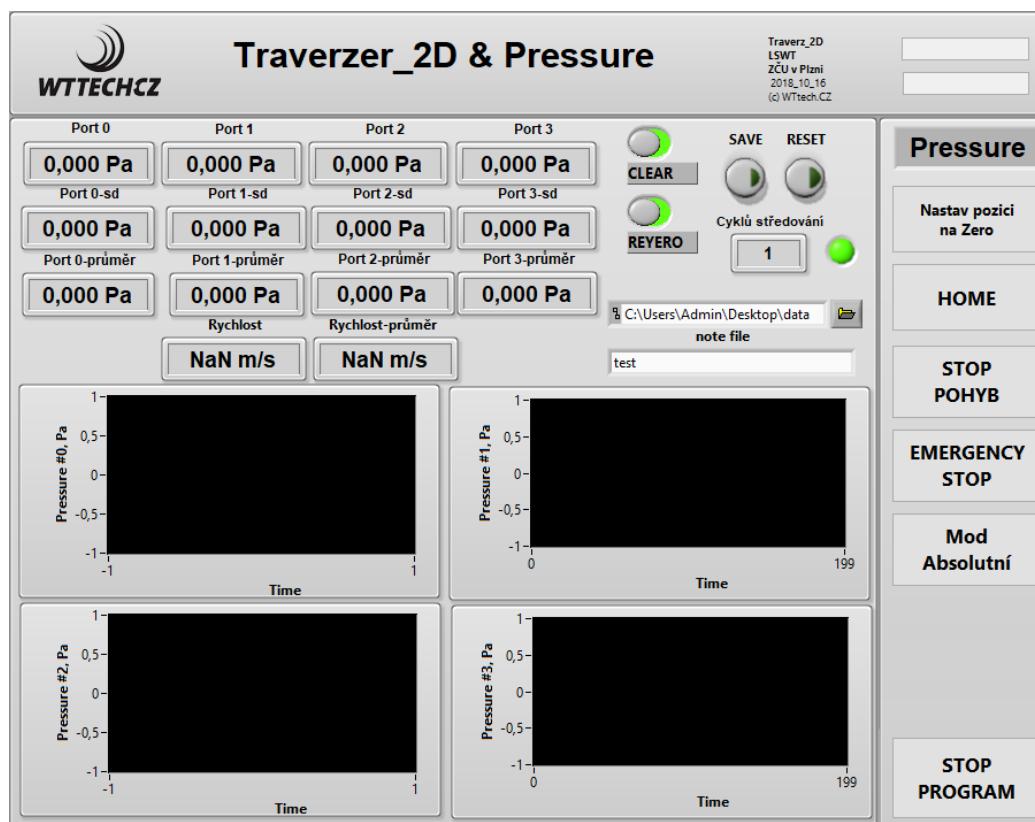


Obrázek 3-13 – Úvodní obrazovka hlavního programu.

První část programu slouží pro nastavení pohybu traverzéro. Jak již bylo zmíněno v popisu předchozích částí, při použití měřicího plánu je nutné nejprve nastavit absolutní mód pohybu. Dále je třeba zkontrolovat, zda se sonda nachází v domovské (*HOME*) pozici a jestli je tato pozice správně nastavena<sup>14</sup>. Pokud není, musí se ručním posunem dojet do požadované polohy, vytvořit nulovou pozici a až následně načíst měřicí plán.

Druhá část programu je vytvořena čistě pro zpracování vstupujících hodnot a jejich záznam. Měřené hodnoty jsou zaznamenávány a po nastaveném počtu proběhlých měření (400) dojde k zobrazení a zapsání středních hodnot tlaků měřených jednotlivými sondami. Měřené hodnoty u každé sondy tvoří statistický soubor hodnot, u kterého se při každém měření automaticky stanoví směrodatná odchylka. Zároveň také dojde k dopočítání rychlosti proudění z aritmetického průměru naměřených hodnot dynamického tlaku a hustoty vypočítané softwarem tunelu. Průběh měřených tlaků, rychlost a střední hodnoty posledního uloženého tlaku včetně směrodatné odchylky se uživateli zobrazují v okně programu.

<sup>14</sup> Základní nulová pozice pro všechna měření a tvorbu plánu byla zvolena tak, aby se sonda při pohledu do výstupu z měřicího prostoru nacházela v pravém dolním rohu.



Obrázek 3-14 – Druhá část hlavního programu.

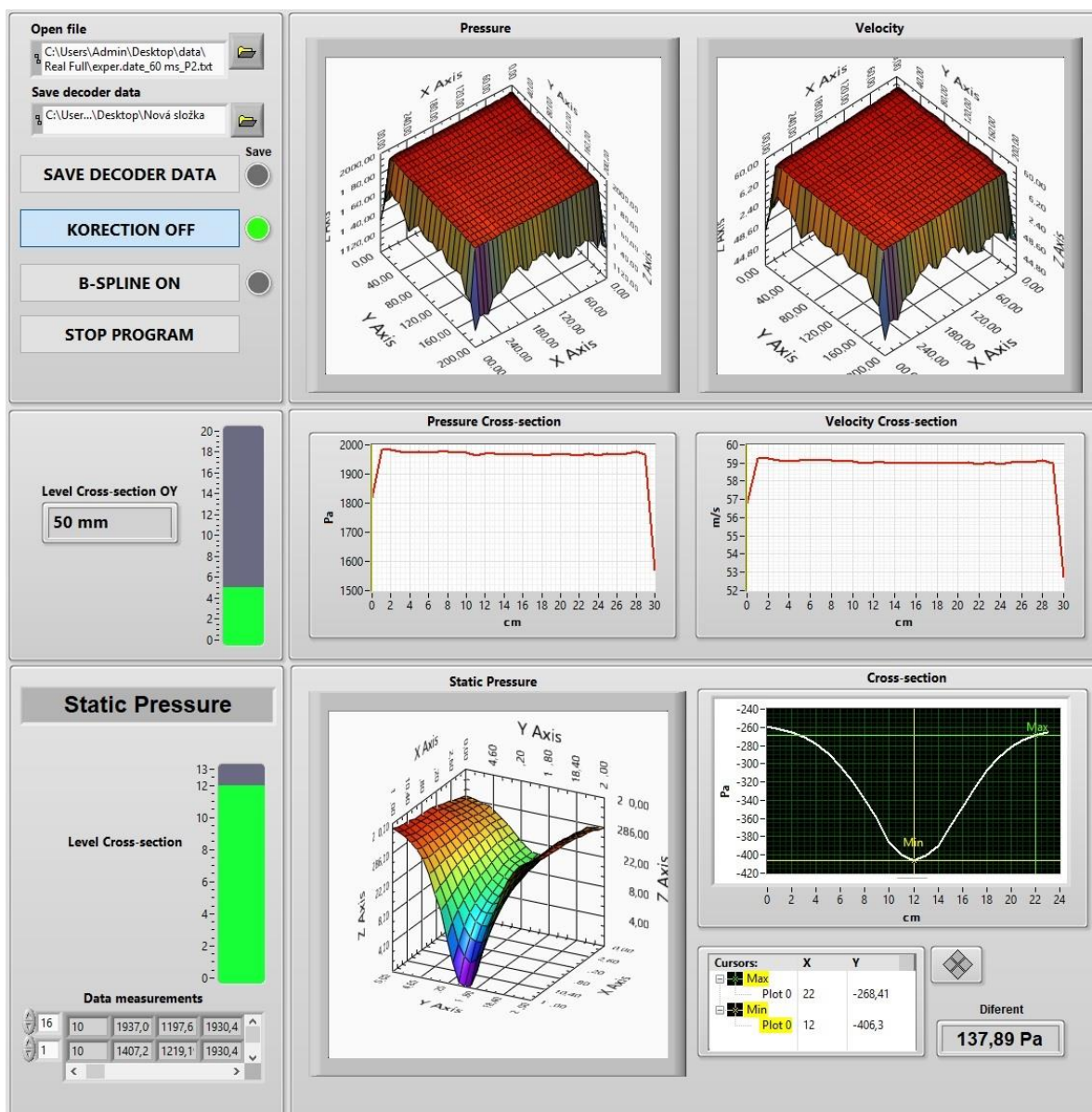
Kromě průběhu tlaků zaznamenávaných tlakovým snímačem je uživateli k dispozici kompletní diagnostika původního programu, počítadlo proběhlých měření od posledního uložení a indikátor značící zda probíhá měření. Na úvodní obrazovce je popsána aktuální pozice traverzéro a indikátor stavu krokových motorů.

### Zpracování naměřených hodnot

Naměřená data jsou ukládána ve značně nepřehledném textovém formátu, který lze načíst do tabulkového procesoru (např. Microsoft Excel), kde jsou uspořádána do tabulky a je možné tvořit uživatelská srovnání, grafy, diagramy. Velmi výhodné je využití této možnosti při porovnání dat z více měření - s různými počátečními podmínkami. Druhou možností zpracování je použití speciálně vyvinutého programu pro vykreslení tlakových a rychlostních profilů a 3D grafů.

Z použité měřicí metody však pramení řada problémů, kvůli kterým je přímé zpracování naměřených hodnot uskutečnitelné pouze ve velmi omezeném počtu případech. Měření je totiž prováděno v pravidelných intervalech v celém průřezu měřicího prostoru, z čehož vyplývá, že některé body jsou měřené více sondami, zatímco například rohy prostoru jsou proměřené pouze jednou sondou. Dále pak každá trubice proměří maximálně necelých 50 % průřezu, takže kompletní tlakový a potažmo rychlostní profil musí být vytvořen z dat všech trubic. Mezi výsledky z různých trubic pro jeden bod je určitá odchylka, která byla empiricky zkoumána, avšak v zaznamenaných datech není nijak zanesena. Z těchto důvodů byl napsán program pro úpravu dat před dalším zpracováním.

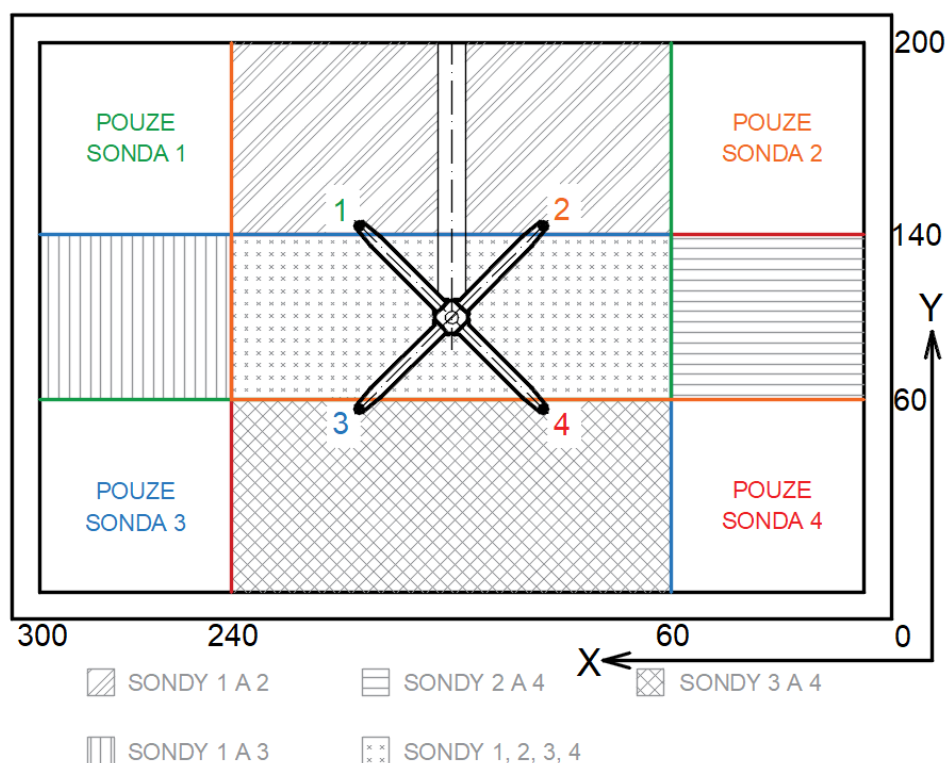
Úprava dat pro další zpracování probíhá v programu na vykreslení tlakových a rychlostních profilů. Zdrojový textový soubor je načten do programu a následně jsou vykresleny 3D a 2D profily dynamického tlaku, jeho směrodatných odchylek a rychlosti. nebo je možné pouze uložit upravená data do nového souboru a zpracovat je v tabulkovém procesoru.



Obrázek 3-15 – Program pro úpravu vstupních dat a vykreslení 2D a 3D grafů.

Obrázek kompletního programu pro zpracování dat se nachází v Příloze č. 2.

Cílem tohoto programu je zobrazení naměřených dat. Jelikož naměřená data zcela neodpovídají skutečnosti, je hned po načtení automaticky spuštěn dekodér, který je navržen pro aktuální měřicí sondu a krok<sup>15</sup>. Dekodér načte data z Pitotových sond do nové proměnné. Z dat této proměnné se pak tvoří pole nových hodnot dle pokrytí. Oblasti s pokrytím jednou sondou ( $X \in < 0; 60 > \cup < 240; 300 >$ ;  $Y \in < 0; 60 > \cup < 140; 200 >$ ) překopíruje beze změny, oblasti proměřené více sondami pak vyplní příslušnými aritmetickými průměry. Nová data jsou pak vykreslena ve 2D a 3D grafech.



Obrázek 3-16 – Oblasti pokrytí měřicího prostoru.

Další funkcí je korekce. Jedná se o opravnou funkci, která vyrovnává pokles statického tlaku způsobený blízkostí sondy k odběru statického tlaku. Několika postupnými pokusy byla zjištěna závislost statického tlaku a polohy sondy. Porovnáním hodnoty statického a atmosférického tlaku byla stanovena odchylka jednotlivých bodů. Z této závislosti byla určena korekční funkce jako absolutní hodnota odchylek. Aplikací korekční funkce dojde k vyrovnání poklesu statického tlaku. Správnost řešení byla ověřována několika experimenty s prázdným měřicím prostorem i s několika modely v měřicím prostoru. Zároveň byly provedeny simulace v programu ANSYS Fluent, které rovněž potvrdily, že korekce funguje správně a výsledky jsou správné.

<sup>15</sup> Rozměry sondy jsou 70 x 70 mm, krok 10 mm. Použití jiné sondy nebo kroku vyžaduje předefinování parametrů.

## 4 Výsledky

### 4.1 Chyby měření

Před vyhodnocením naměřených dat je nutné stanovit maximální možnou chybu měření. Ta je v případě tohoto měření dána použitým přístrojem a byla stanovena podle manuálu ke snímači tlaku od výrobce. [7]

Výrobce udává pro model Net Scanner 9116 následující chyby:

Přesnost v celém rozsahu:  $\pm 0,05\%$  z 1 PSI (6894,76 Pa)

Chyby způsobené teplotou:  $\pm 0,001\%$  z 1 PSI (6894,76 Pa) při změně teploty  $1^\circ\text{C}$

Během měření rostla teplota průměrně o  $2,6^\circ\text{C}$ .

Chyba daná přesností:  $\xi_p = \pm 0,05 \cdot 0,01 \cdot 6894,76 = \pm 3,45 \text{ Pa}$

Chyba daná změnou teploty:  $\xi_t = \pm 0,001 \cdot 0,01 \cdot 6894,76 \cdot 2,6 = \pm 0,18 \text{ Pa}$

Celková chyba:  $\xi_c = \pm (|\xi_p| + |\xi_t|) = \pm (3,45 + 0,18) = \pm 3,63 \text{ Pa}$

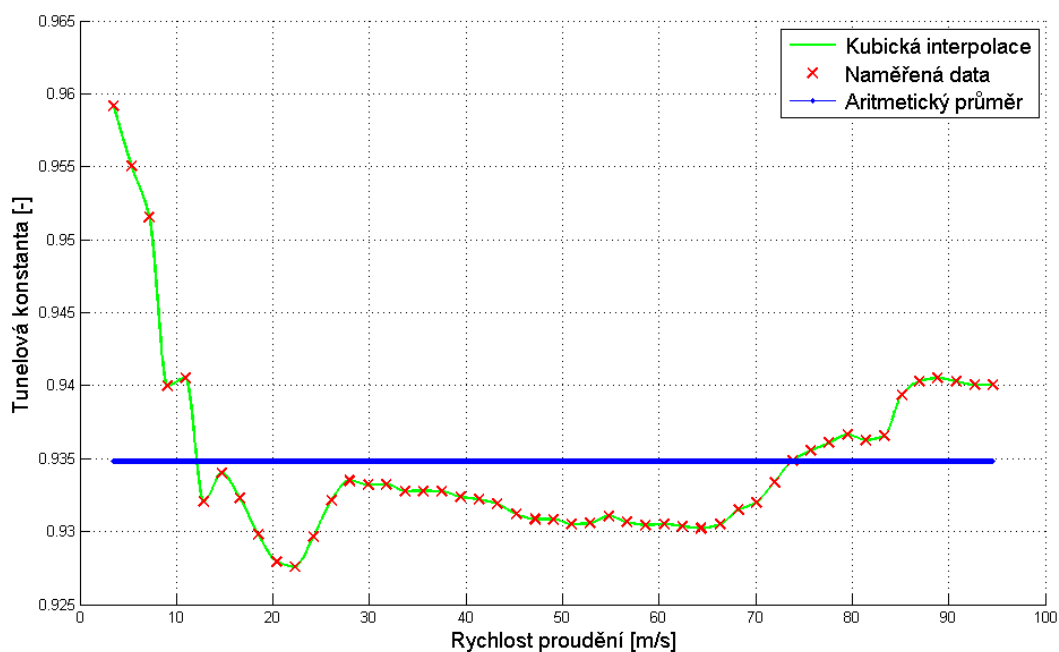
### 4.2 Tunelová konstanta

Datum a čas měření: 20. 2. 2019 – 13:10 až 14:00

Teplota okolí:  $23^\circ\text{C}$

Atmosférický tlak: 98,339 kPa

Měřicí sonda: Prandtlova trubice



Obrázek 4-1 – Graf s naměřenými hodnotami tunelové konstanty  $K$  (podílu dynamického tlaku naměřeného Prandtlovou trubicí a tlakového spádu na dýze)

Naměřených výsledků bylo dosaženo při souvislém měření, tunel byl řízen zadanou frekvencí po 1 Hz v rozsahu 2 až 50 Hz. Výsledky byly následně zpracovány v programu MathWorks MATLAB, kde bylo provedeno stanovení tunelové konstanty  $K$  dle naměřených tlaků. Jednotlivá měření byla proložena křivkou pomocí kubické interpolace. Následně byla dopočtena střední hodnota (aritmetický průměr) tunelové konstanty a směrodatná odchylka.

Z výsledného grafu (Obrázek 4-1) je patrný velký rozptyl hodnot při nízkých rychlostech proudění. Přibližně do 10 m/s jsou výsledky vlivem podstaty použité metody značně nepřesné. Tunelová konstanta pro 10 a více metrů za sekundu se pohybuje v poměrně úzkém pásu hodnot od 0,93 do 0,94.

#### Dosažené hodnoty:

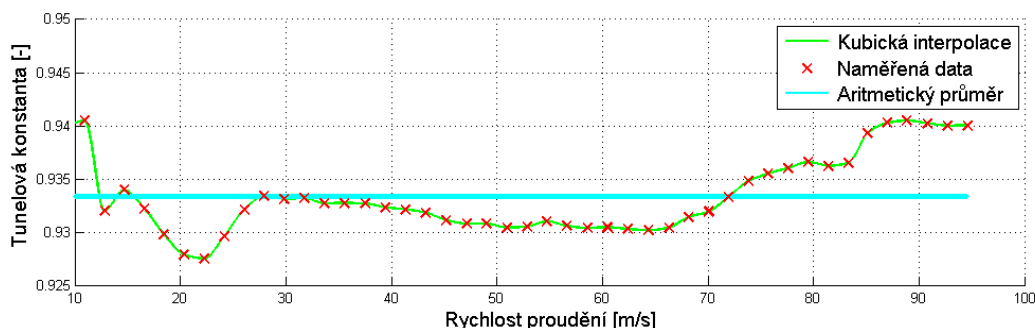
Aritmetický průměr souboru:  $K_{\text{stř}} = 0,9348$

Směrodatná odchylka:  $\sigma_K = 0,0064$

Maximální a minimální hodnoty:  $K_{\text{max}} = 0,9591$        $K_{\text{min}} = 0,9276$

Variační rozpětí:  $R_K = 0,0316$

Při aplikaci dat naměřených při rychlostech nad 10 m/s byly získány následující výsledky:



Obrázek 4-2 – Graf hodnot tunelové konstanty bez zahrnutí dat naměřených při nízké frekvenci motoru

#### Dosažené hodnoty:

Aritmetický průměr souboru:  $K_{\text{stř}} = 0,9334$

Směrodatná odchylka:  $\sigma_K = 0,0036$

Maximální a minimální hodnoty:  $K_{\text{max}} = 0,9405$        $K_{\text{min}} = 0,9276$

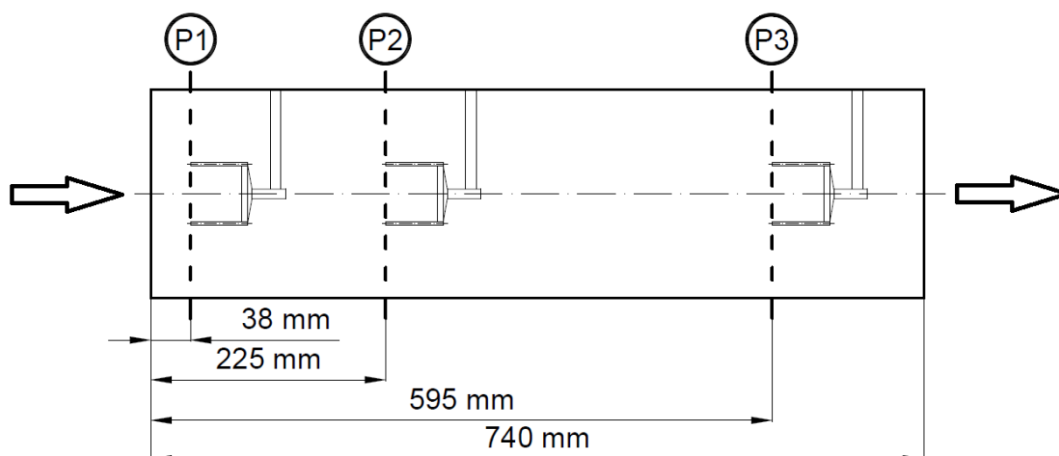
Variační rozpětí:  $R_K = 0,0129$

Ze zpracování výběrového souboru (po nezapočítání dat změřených při frekvencích 2, 3, 4 a 5 Hz) je patrné, že variační rozpětí jednotlivých hodnot už je velmi malé, oproti celému souboru o 59 % menší.

### 4.3 Tlakové a rychlostní profily měřicího prostoru

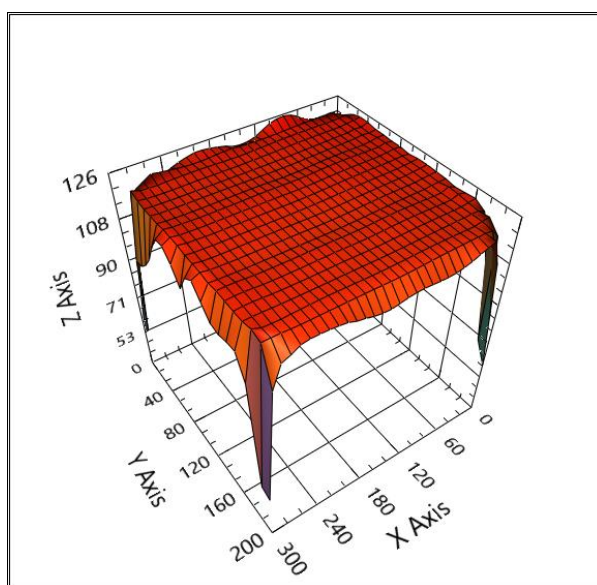
Měřicí prostor byl proměřen v rychlostech proudění 10 až 50 m/s. Jednotlivá měření byla realizována po 5 m/s. Měření v maximálním rozsahu – do 80 m/s nebylo realizováno z technických a časových důvodů.

Uskutečněná měření byla prováděna ve třech rovnoběžných rovinách (P1, P2, P3) ve vzdálenostech 38 mm, 225 mm a 595 mm od vstupu do měřicího prostoru.



Obrázek 4-3 – Schéma měření s jednotlivými rovinami P1, P2 a P3.

Vyhodnocení naměřených dat proběhlo v software popisovaném v kapitole 3.2.2. Vykreslená data ze všech měření byla podobného charakteru jako na přiloženém obrázku 4-4.

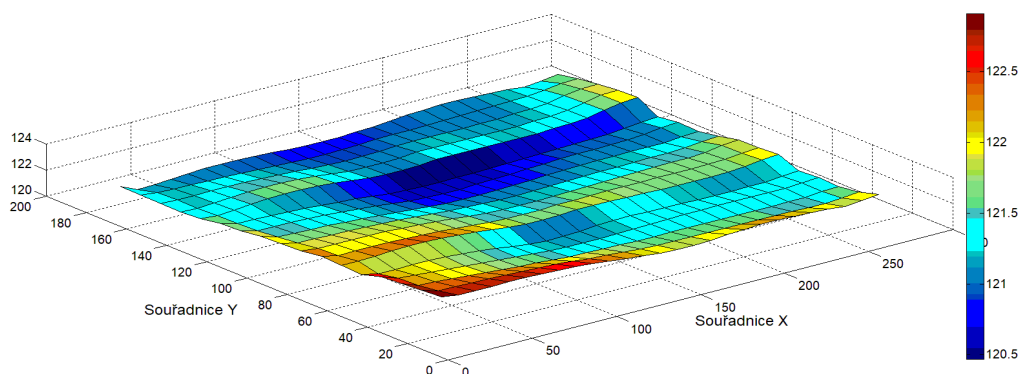


Obrázek 4-4 – 3D graf naměřených tlaků při rychlosti 15 m/s.  
X Axis – vodorovná poloha; Y Axis – svislá poloha  
Z Axis – dynamický tlak

Z obrázku 4-4 je vidět rozložení tlaku v měřicí rovině – většina naměřených dat se pohybuje v malém rozmezí, avšak měření v blízkosti stěn a zejména v rozích jsou značně vychýlena. Rozdíl hodnot mezi měřeními uprostřed měřicí roviny a na jejích krajích je dán mezní vrstvou u stěn měřicího prostoru.



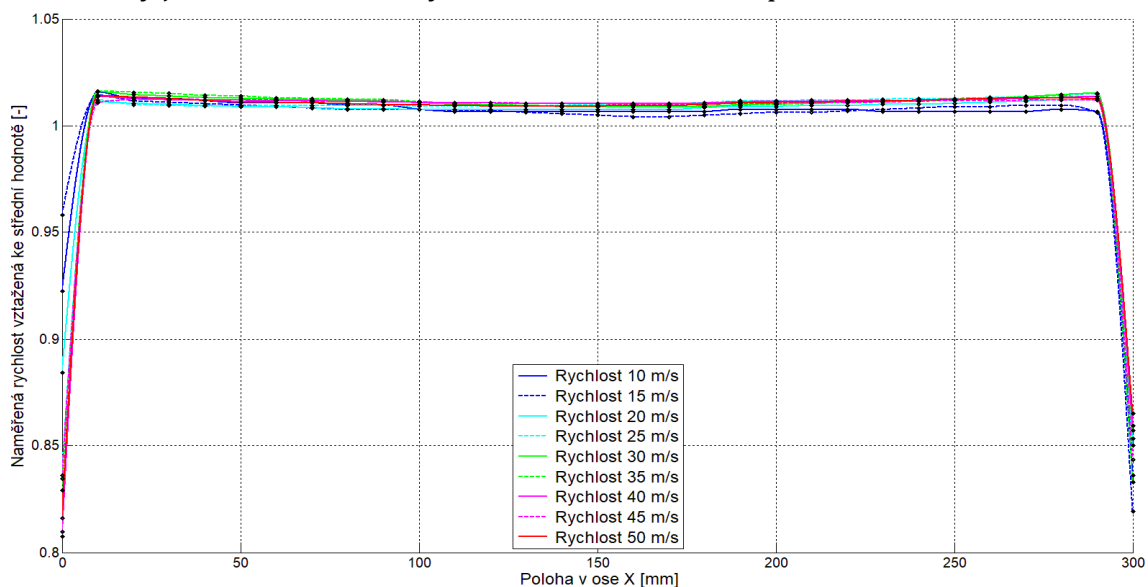
Data ovlivněná mezní vrstvou jsou z hlediska výstupu požadovaného v této práci problematická. Použitá metoda měření – tlaková sonda o světlosti trubice 1 mm s krokem měření 10 mm je naprosto nedostatečná a nevhodná pro podrobnější výzkum mezních vrstev. Z těchto důvodů byla všechna naměřená data po jejich uspořádání v dekodéru uložena a načtena do programu vytvořeného v MathWorks MATLAB. Načtená data byla seřazena a uložena do nové proměnné tak, aby neobsahovala měření zahrnující mezní vrstvu. Testování programu pro různé rychlosti ukázalo, že výrazně ovlivněné jsou vždy dvě řádky mřížky u každé stěny. Původní i takto vyselektovaná data byla vykreslena a pro nová data byla vypočtena střední hodnota, směrodatná odchylka a dohledáno maximum a minimum včetně polohy v měřicí rovině.



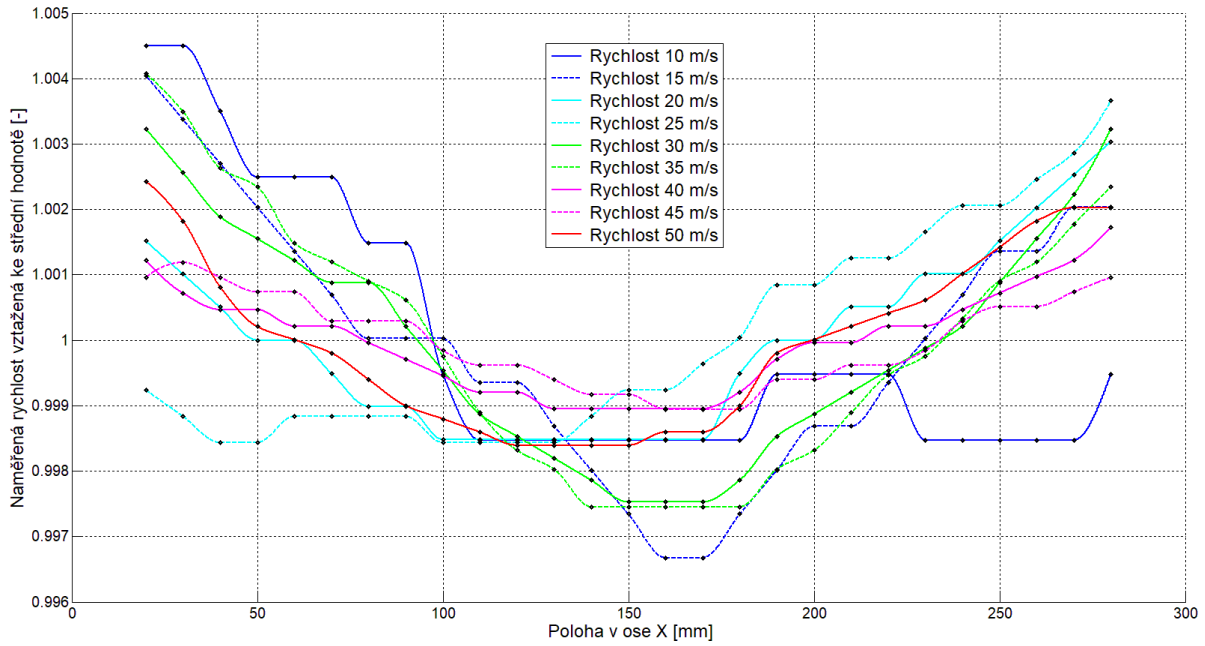
**Obrázek 4-5** – Tlakové pole stejných dat jako na obrázku 4-4 po ořezu a následném vykreslení. Ve svislé ose je znázorňován dynamický tlak.

#### 4.3.1 Rychlostní profily napříč měřicím prostorem

Celkem byla naměřena data pro 9 zadaných rychlostí, měřených ve třech rovinách, celkově se tedy jedná o 27 kompletních tlakových profilů a stejný počet rychlostních profilů. Ukázka kompletních zpracovaných dat je v Přílohách č. 5 až 7. Všechna tato data byla zpracována v kompletním rozsahu, avšak pro potřeby této práce by byl jejich značný rozsah nežádoucí. Z tohoto důvodu byla na následující stránky vybrána vždy jen část dat, která byla následně mezi sebou porovnána.

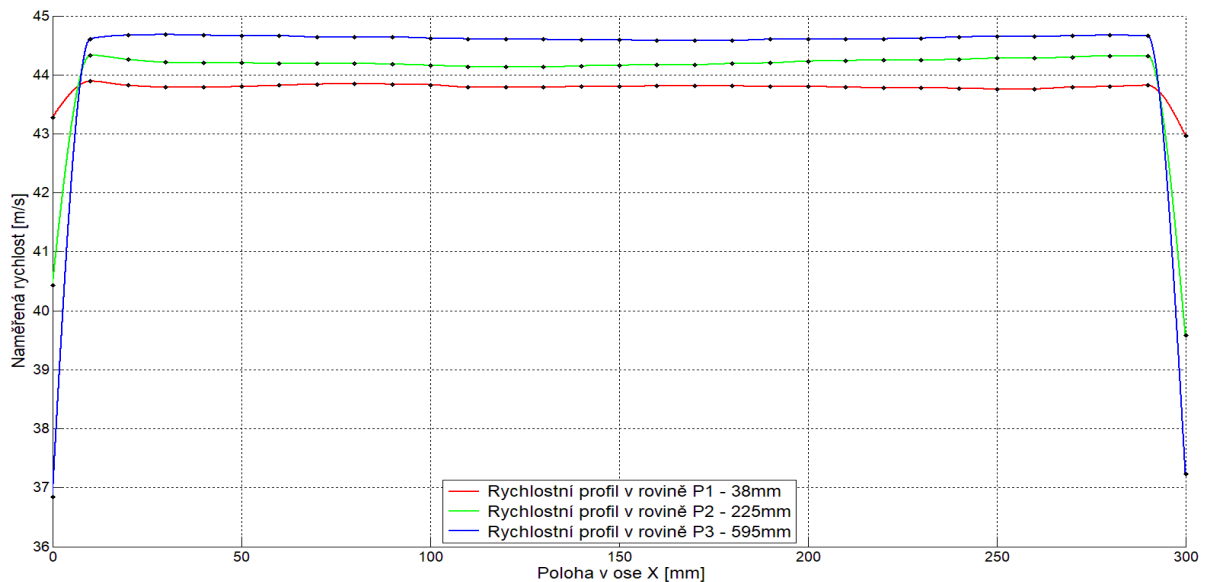


**Obrázek 4-6** - Rychlostní profily všech měřených rychlostí v rovině P3 (595 mm). Všechny profily jsou měřené v totožné poloze v rovině rovnoběžné s rovinou XZ ve vzdálenosti  $y = 100$  mm. Rychlosti jsou pro vzájemné porovnání vztážené ke střední hodnotě daného profilu.

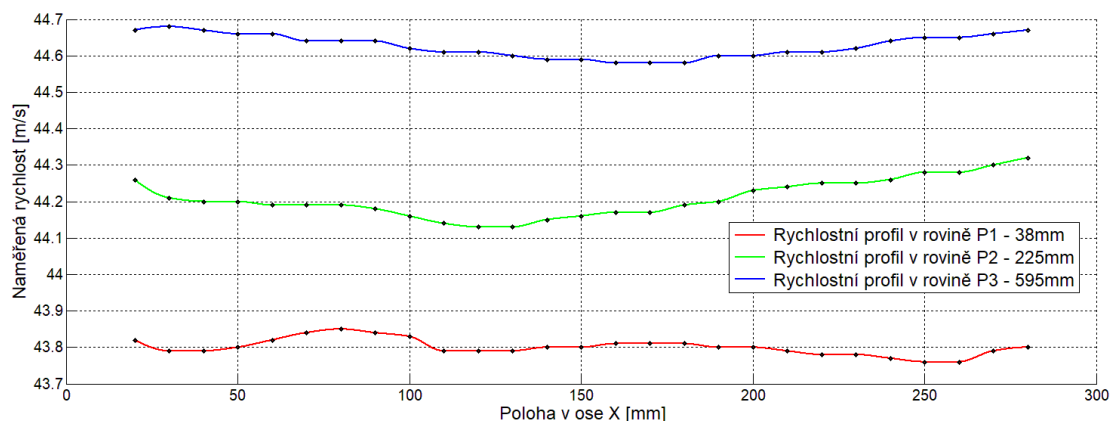


**Obrázek 4-7** – Stejně rychlostní profily jako na obrázku 4-6, avšak bez dat ovlivněných mezní vrstvou (oříznuty byly dva měřicí kroky, tedy 20 mm z každé strany).

Obrázky 4-6 a 4-7 zachycují vykreslené rychlostní profily v jedné z měřících rovin a umožňují porovnání stejné situace při změně rychlosti proudění. Kvůli možnostem porovnání byly rychlosti vztaženy vzhledem ke střední hodnotě. Z vykreslených dat je patrné, že hodnoty mají tendenci tvořit určité hladiny. Tyto hladiny jsou dané zaokrouhlovací chybou. Další patrným trendem je nižší rychlost u hodnot uprostřed profilu. Tato skutečnost je dána mezní vrstvou, která ovlivňuje data u stěn. Způsob ovlivnění je ještě lépe viditelný u následujících obrázků 4-8 a 4-9.



**Obrázek 4-8** – Rychlostní profily pro rychlost proudění 45 m/s ve všech měřících rovinách.

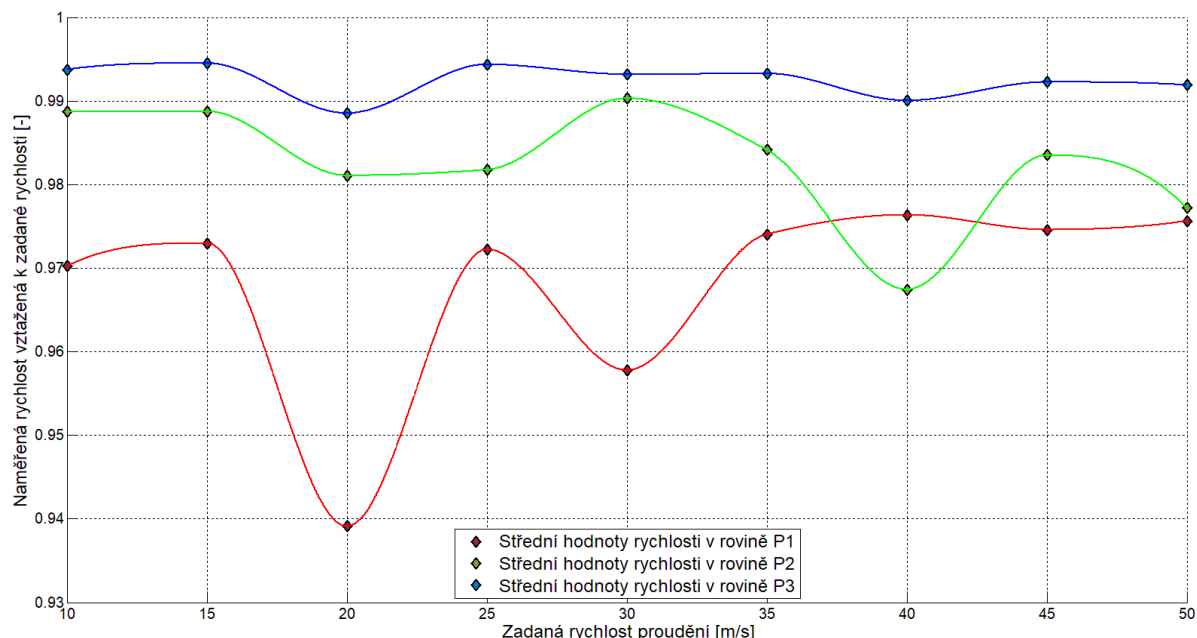


**Obrázek 4-9** – Rychlostní profily pro rychlost 45 m/s bez dat zahrnujících mezní vrstvu (oříznuty byly dva měřicí kroky, tedy 20 mm z každé strany).

Diagram na obrázku 4-8 ukazuje, že se vzrůstající vzdáleností od vstupu do měřicího prostoru výrazně narůstá vliv mezní vrstvy. Je to dané zvětšováním její tloušťky. Je však také zřejmé, že se snižující se vzdáleností měřicí roviny od vstupu do měřicího prostoru dochází ke snižování rozdílu mezi maximálními hodnotami dosaženými při měřeních na hranici dat ovlivněných mezní vrstvou a zbytkem souboru. Se vzrůstající tloušťkou mezní vrstvy je pozorovatelné urychlení proudu, neboť měřicí prostor díky mezní vrstvě působí jako dýza.

V Přílohách je pod čísly 3 a 4 uveden kompletní kód programu pro zpracování dat, jejich vykreslení a porovnání v závislosti na poloze.

#### 4.3.2 Porovnání středních hodnot dosažených měření

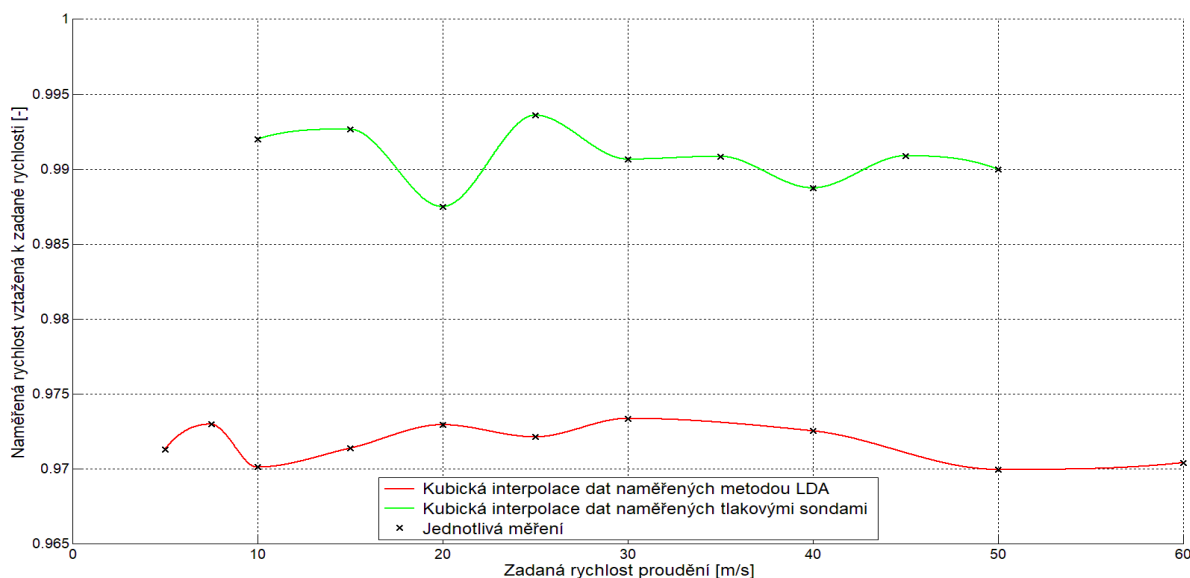


**Obrázek 4-10** – Graf znázorňující střední hodnoty (aritmetické průměry) rychlosti všech měření. Měření byla rozdělena podle měřicí roviny a kubicky interpolována. Střední hodnota naměřených rychlostí byla pro každé měření vztávena k zadané rychlosti při daném měření.

Z obrázku 4-10 je znovu patrný trend zmenšování rozptylu dat se vzrůstající vzdáleností od vstupu proudu do měřicího prostoru. Zároveň se snižujícím se rozptylem se naměřená data blíží více zadaným datům. Za pozornost rovněž stojí výchyly v některých měřeních, zejména pak to v rovině P1 (38 mm od vstupu) při rychlosti 20 m/s, které oproti ostatním výrazně vybočuje. Měření by mělo být zopakováno a zjištěno zda se jedná o chybu daného měření, či zda se chyba opakuje a pak by bylo záhodno zjistit důvod.

#### 4.3.3 Porovnání metody tlakových sond a LDA

Na závěr, po vyhotovení všech měření tlakovými sondami, bylo realizováno krátké porovnávací měření metodou LDA<sup>16</sup>. Jde o bodovou měřicí metodu pro určení rychlostního pole využívající odrazu laserového paprsku od částic obsažených v proudícím médiu<sup>17</sup>. Pro porovnání byl měřen pouze jeden bod v měřicím prostoru tunelu, který odpovídá průsečíku úhlopříček v měřicí rovině P3 (vzdálenost 595 mm od vstupu do měřicího prostoru).



Obrázek 4-11 – Porovnání dat naměřených metodou LDA a tlakovými sondami.

Naměřená data byla porovnána s odpovídajícími daty z tlakových sond. Pro porovnání byl použit aritmetický průměr dat naměřených metodou LDA pro danou rychlost a hodnoty rychlosti na pozici X = 150 mm, Y = 100 mm naměřené v rovině P3. Jednotlivé rychlosti byly vztaheny k zadané a kubicky interpolovány pro lepší porovnání.

Je patrné, že hodnoty změřené tlakovými sondami jsou blíže k rychlosti proudění zadané do software tunelu, odchylka je menší než 1,5 % a variační rozpětí je rovněž malé, pod 1 %. Data naměřená metodou LDA mají větší odchylku od zadané hodnoty – přibližně 3 % - avšak variační rozpětí naměřené rychlosti pro rozsah 5 až 60 m/s zadané rychlosti je menší než 0,5 %. Z porovnání je zřejmé, že data měřená tlakovými sondami jsou blíže zadané hodnotě, avšak trpí výrazně většími odchylkami mezi jednotlivými měřeními.

<sup>16</sup> Z angličtiny - Laser Doppler Anemometry

<sup>17</sup> [12]

## 5 Závěr

V úvodu práce je popsáno použité zařízení a tunel, a jelikož se jedná o nové zařízení, bylo třeba popsat a vyzkoušet jednotlivé komponenty. Pro popis zařízení byl vytvořen kompletní 3D model zařízení, který je možné v budoucnu dále využívat.

Další kapitoly se věnují popisu experimentu, jeho fyzikální podstatě a vysvětlení jevů a zákonitostí, díky kterým je možné využívat pro měření rychlosti metodu tlakových sond.

Práce dále obsahuje pasáže o výrobě vlastních tlakových sond a optimalizaci větrného tunelu. Zde je popsán kompletní postupný vývoj tlakové sondy schopné proměřit celý průřez měřicího prostoru, řešení problémy s vibracemi a velikostí sondy, včetně optimalizačního návrhu nového provedení sondy pro budoucí měření.

Hlavní části práce pojednává o funkci použitého software, který zpracovává naměřené hodnoty, jež jsou následně zpracovávány, editovány a vykreslovány v podobě grafických výsledků jako příslušné rychlostní nebo tlakové profily. V práci a v přílohách k ní je prezentován pouze reprezentativní část výsledků, kterých je při možnostech zařízení a použité metody velké množství. V poslední kapitole jsou grafy znázorňující tunelovou konstantu  $K$  a její průběh v závislosti na rychlosti, rychlostní profily a jejich porovnání v závislosti na zadané rychlosti proudění nebo poloze měřicí roviny. Na závěr kapitoly je srovnání dvou metod, které je v plánu na tomto aerodynamickém tunelu v budoucnu používat – metody tlakových sond a metody LDA. V přílohách se nacházejí kompletní vykreslená data pro vybrané rychlosti a tabulky se středními hodnotami, maximy a minimy dosažených pro jednotlivá měření. Dále se v přílohách nachází obrázky z použitých vytvořených programů a kódy programů vytvořených pro vykreslení dat.

Cílem práce bylo určení tunelové konstanty  $K$  a rychlostních polí v měřicím prostoru tunelu při různých polohách. Tyto znalosti budou použity při dalších experimentech realizovaných na aerodynamickém tunelu, jako je například zkoumání obtékání těles. Pro tyto experimenty jsou podstatné i ostatní nabyté znalosti o tunelu, provedená vylepšení a opravy, vývoj a odzkoušení software a tlakových sond.

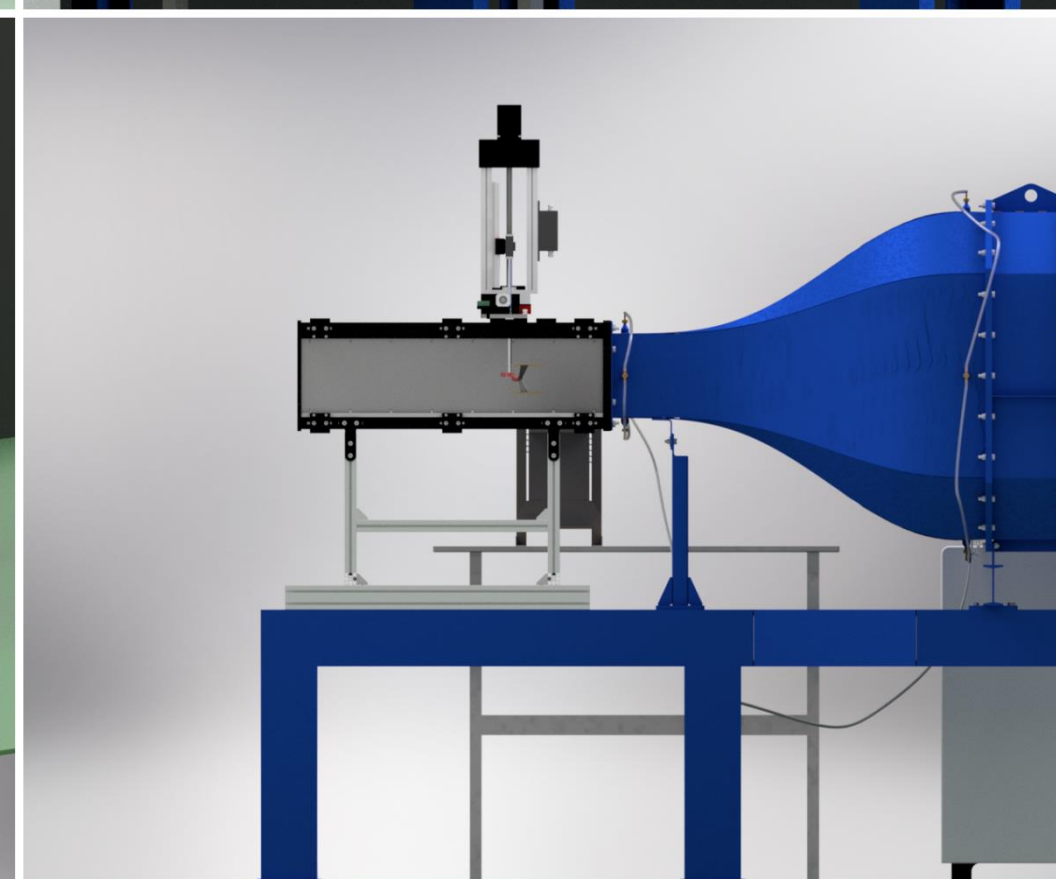
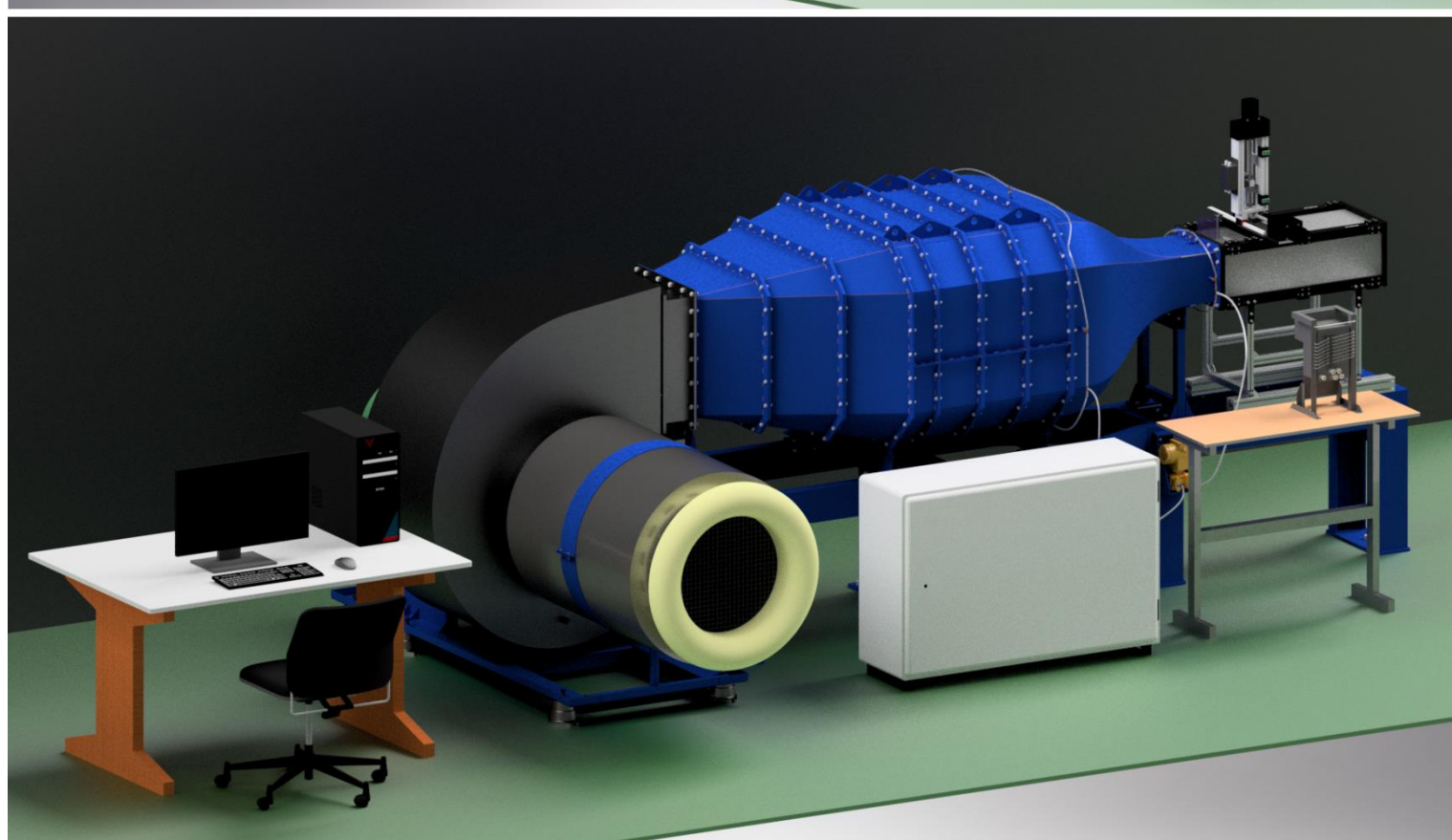
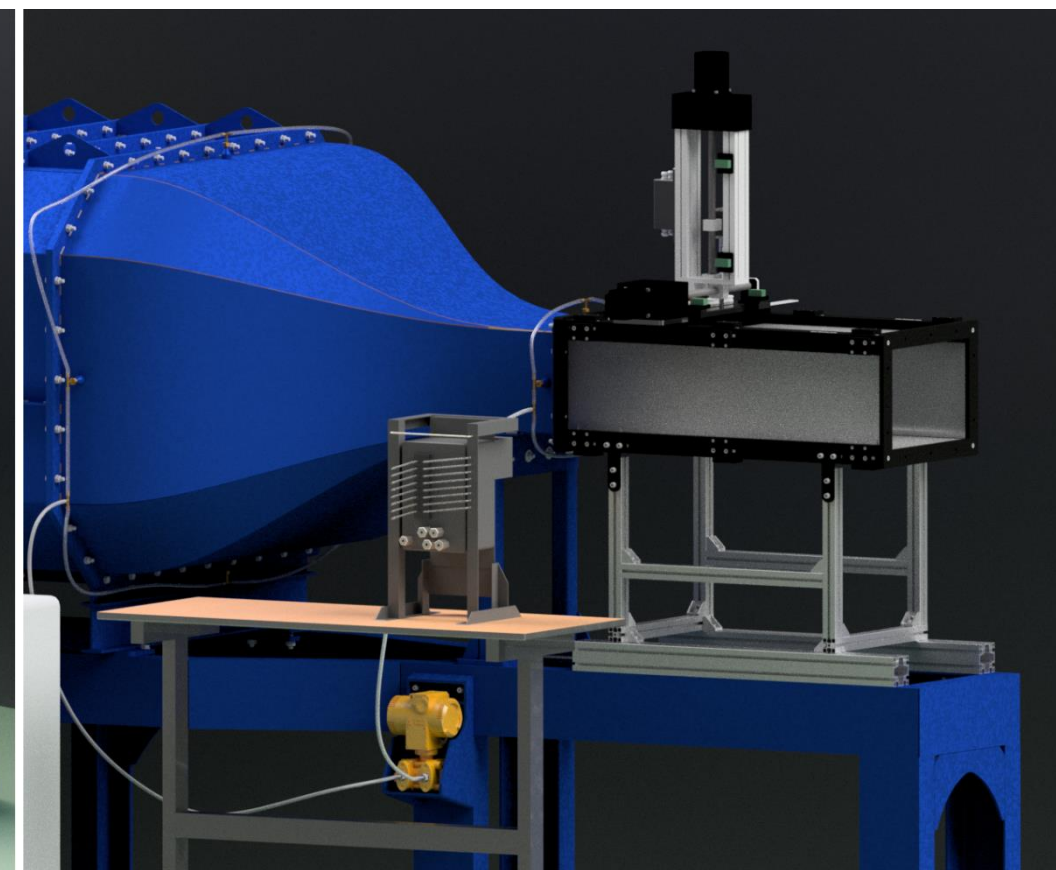
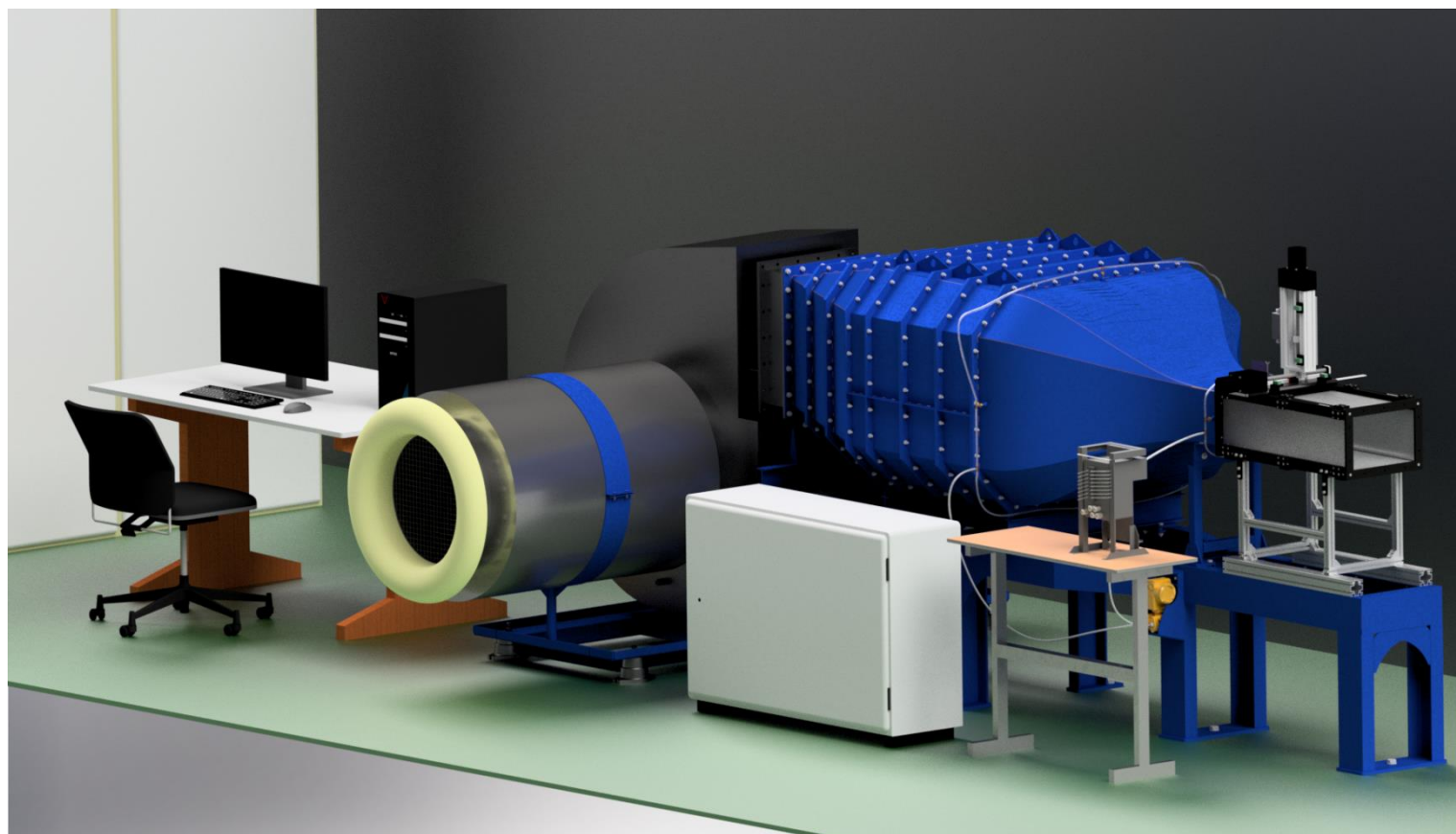
## 6 Seznam použité literatury

- [1] BARLOW J. B., RAE Jr. W. H., POPE A. Low-speed wind tunnel testing, Third edition. New York (John Wiley & Sons, Inc.), 1999. 713 s.
- [2] HROMADA M.. Aerodynamické tunely v oblasti automobilního průmyslu. Brno (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství), 2011. 45 s.
- [3] Cattafesta L., Bahr C., Mathew J.. Fundamentals of Wind-Tunnel Design. New York (John Wiley & Sons, Inc.), 2010. 10 s.
- [4] Almeida O., Miranda F. C., Ferreira Neto O., Saad F. G. Low Subsonic Wind Tunnel – Design and Construction. J Aerosp Technol Manag (2018). 20s
- [5] Experimental Aerodynamics Lecture 2: Wind Tunnel Instrumentation ©2014 [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: [www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero02.pdf](http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expaero02.pdf)
- [6] 9116 Pressure Scanner ©2016 [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.chell.co.uk/pressure/pressure-scanners/9116-pressure-scanners/9116-pressure-scanner>
- [7] Model 9116 Intelligent Pressure Scanner User's Manual ©2007 [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.chell.co.uk/pressure/pressure-scanners/9116-pressure-scanners/9116-pressure-scanner>
- [8] Snímače tlaku ©2007 [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/42719.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42719.pdf)
- [9] Bernoulliho rovnice ©2010 [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/125-bernoulliho-rovnice>
- [10] Mechanika tekutin – přednášky – 10. Mezní vrstvy ©2018 [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~uruba/MT/>
- [11] URUBA V. Turbulence. Praha (ČVUT, Fakulta strojní) 2014. 142 s.
- [12] LDA: laser-doppler anemometrie ©2001 [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/modelovani/cesky/metody/lda.htm>

## 7    Seznam modelů ostatních autorů použitých v 3D modelu tunelu

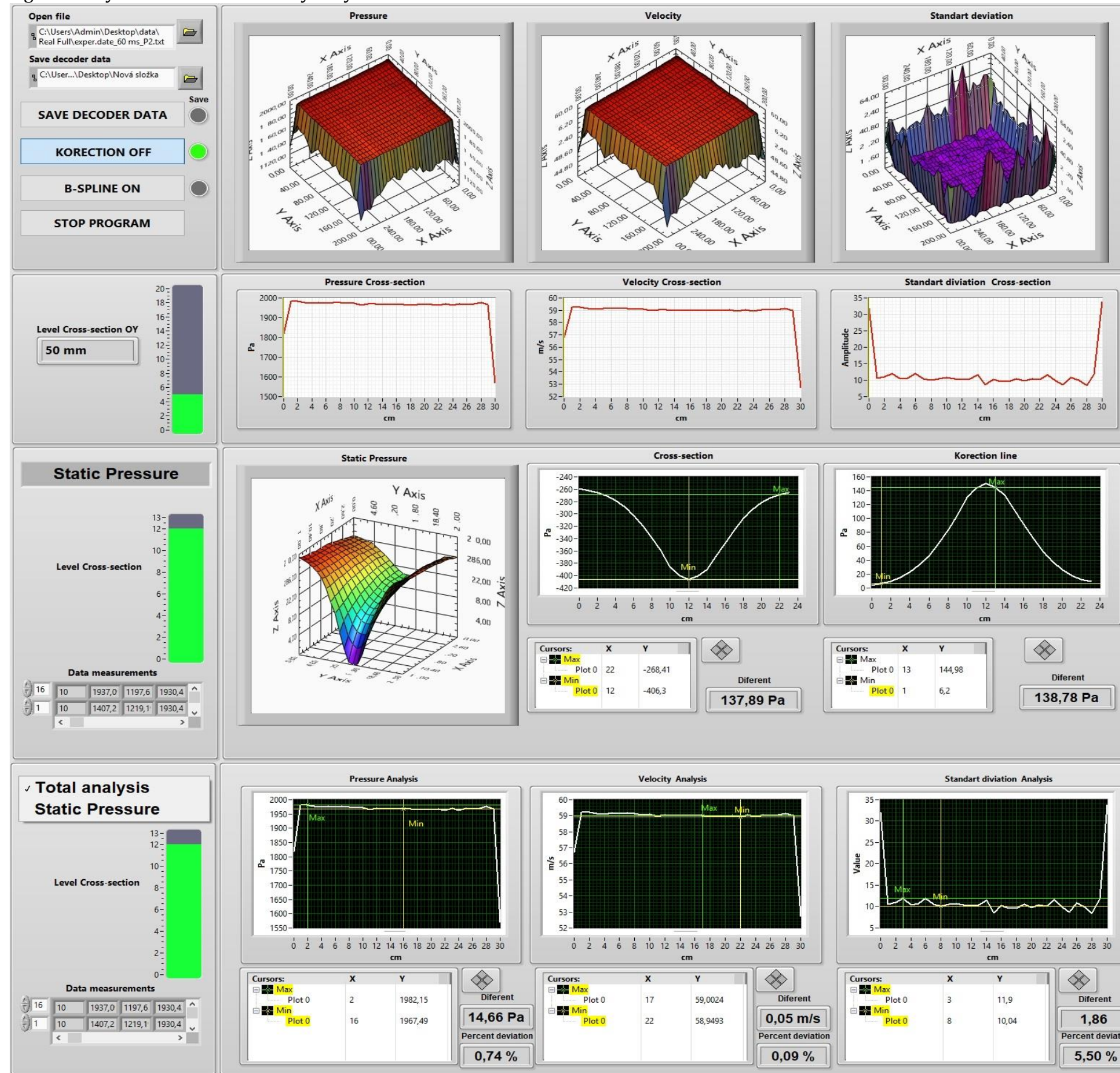
- [1]    Monitor DELL S2716DG ©2018. In: Grabcad [online]. 29.12.2018. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/monitor-dell-s2716dg-1>. Autor - vyfast
- [2]    CPU Cabinet ©2018. In: Grabcad [online]. 9.7.2018. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/cpu-cabinet-4>. Autor – Aditya Patil
- [3]    A4TECH Wireless Mouse Prototype(External Shape Only) ©2014. In: Grabcad [online]. 6.9.2014. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/a4tech-wireless-mouse-prototype-external-shape-only-1>. Autor – Nahid Mubin
- [4]    Fujitsu Keyboard ©2017. In: Grabcad [online]. 20.1.2017. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/cpu-cabinet-4>. Autor – samuel lamb
- [5]    Simple Office Chair ©2018. In: Grabcad [online]. 20.11.2018. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/simple-office-chair-1>. Autor – Ben

Příloha č. 1 – 3D model aerodynamického tunelu





Příloha č. 2 – Kompletní program na vyhodnocování naměřených výsledků



**Příloha č. 3 – Kód programu vytvořeného v Mathworks MATLAB pro úpravu a vykreslení dat**

```

% Program pro zobrazení a úpravu dat z dekodéru
%Created by V. Horáček
clc;
clear all;
close all;
%%% načtení dat z dekodéru
DATA = 'DECODER.xlsx';
A = xlsread(DATA, 'P3_50', 'A:A');
B = xlsread(DATA, 'P3_50', 'D:D');
C = xlsread(DATA, 'P3_50', 'E:E');
D = xlsread(DATA, 'P3_50', 'B:B');
%%% uspořádání dat
X = zeros(21,31); %polohy bodů x
for i=1:1:21
X(i,1:31)=B(i:21:651);
end
Y = zeros(21,31); %polohy bodů Y
for i=1:1:21
Y(i,1:31)=C(i:21:651);
end
P = zeros(21,31); %Tlakové pole
for i=1:1:21
P(i,1:31)=A(i:21:651);
end
V = zeros(21,31); %Rychlostní pole
for i=1:1:21
V(i,1:31)=D(i:21:651);
end
%%% ořezání mezní vrstvy
OREZ = 2;
XX = X((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
YY = Y((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
PP = P((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV = V((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
%%% Vykreslení 3D grafu
%%% Tlakové pole
figure('Renderer', 'painters', 'Position', [-39 66 1900 700])
set(gca, 'fontsize', 15)
surf(XX, YY, PP) %ořezané - bez mezní vrstvy
xlabel(['\fontsize{18} Souřadnice X']);
ylabel(['\fontsize{18} Souřadnice Y']);
xlim([0 300]);
ylim([0 200]);
colorbar('eastoutside');
figure('Renderer', 'painters', 'Position', [-39 66 850 700])
set(gca, 'fontsize', 15)
surf(X, Y, P) %originál - uspořádaná vstupní data
xlabel(['\fontsize{18} Souřadnice X']);
ylabel(['\fontsize{18} Souřadnice Y']);
xlim([0 300]);
ylim([0 200]);
colorbar('eastoutside');
%%% Rychlostní pole
figure('Renderer', 'painters', 'Position', [-39 66 1900 700])
set(gca, 'fontsize', 15)
surf(XX, YY, VV) %ořezané - bez mezní vrstvy
xlabel(['\fontsize{18} Souřadnice X']);
ylabel(['\fontsize{18} Souřadnice Y']);
xlim([0 300]);
ylim([0 200]);
colorbar('eastoutside');

ylabel(['\fontsize{18} Souřadnice Y']);
xlim([0 300]);
ylim([0 200]);
colorbar('eastoutside');
%%% Výpočet středních hodnot a odchylek
SUMA_P = 0;
SUMA_V = 0;
for i=1:1:17
for j=1:1:27
SUMA_V = SUMA_V + VV(i,j);
SUMA_P = SUMA_P + PP(i,j);
end
end
r = (21-2*OREZ)*(31-2*OREZ); %počet prvků polí
AVG_P = SUMA_P/r %střední hodnota tlaku
AVG_V = SUMA_V/r %střední hodnota tlaku
%%% Výpočet směrodatné odchylky
ODCHYLKY_P = zeros(17,27);
ODCHYLKY_V = zeros(17,27);
for i=1:1:17
for j=1:1:27
ODCHYLKY_P(i,j) = PP(i,j)-AVG_P; %pole odchylek tlaku od AVG_P
ODCHYLKY_P(i,j) = ODCHYLKY_P(i,j).^2; %odchylky na druhou
ODCHYLKY_V(i,j) = VV(i,j)-AVG_V; %pole odchylek rychlosti od AVG_V
ODCHYLKY_V(i,j) = ODCHYLKY_V(i,j).^2; %odchylky na druhou
end
end
%SOUČET PRVKŮ
SUMA_ODCH_P = 0;
SUMA_ODCH_V = 0;
for i=1:1:17
for j=1:1:27
SUMA_ODCH_P = SUMA_ODCH_P + ODCHYLKY_P(i,j);
SUMA_ODCH_V = SUMA_ODCH_V + ODCHYLKY_V(i,j);
end
end
ST_DEVIATION_P = ((1/(r-1))*(SUMA_ODCH_P)).^(1/2) %směrodatná odchylka tlaku
ST_DEVIATION_V = ((1/(r-1))*(SUMA_ODCH_V)).^(1/2) %směrodatná odchylka rychlosti
%%% maximum/minimum tlak
MAX_P = max(max(PP));
MIN_P = min(min(PP));
MAX_V = max(max(VV));
MIN_V = min(min(VV));

```

**Příloha č. 4 – Kód programu vytvořeného v Mathworks MATLAB pro porovnání dat**

```
% Vykreslení profilů v zadané vzálenosti v ose Y
%Created by V. Horáček
clc;
clear all;
close all;
%%% načtení dat z dekodéru
DATA = 'DECODER.xlsx';
A = xlsread(DATA, 'P1_10', 'D:D');
V115 = xlsread(DATA, 'P1_15', 'B:B');
V215 = xlsread(DATA, 'P2_15', 'B:B');
V315 = xlsread(DATA, 'P3_15', 'B:B');
V130 = xlsread(DATA, 'P1_30', 'B:B');
V230 = xlsread(DATA, 'P2_30', 'B:B');
V330 = xlsread(DATA, 'P3_30', 'B:B');
V145 = xlsread(DATA, 'P1_45', 'B:B');
V245 = xlsread(DATA, 'P2_45', 'B:B');
V345 = xlsread(DATA, 'P3_45', 'B:B');
%%% uspořádání dat
X = zeros(21,31); %polohy bodů x
for i=1:1:21
X(i,1:31)=A(i:21:651);
end
V151 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=15 P1
for i=1:1:21
V151(i,1:31)=V115(i:21:651);
end
V152 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=15 P2
for i=1:1:21
V152(i,1:31)=V215(i:21:651);
end
V153 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=15 P3
for i=1:1:21
V153(i,1:31)=V315(i:21:651);
end
V301 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=30 P1
for i=1:1:21
V301(i,1:31)=V130(i:21:651);
end
V302 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=30 P2
for i=1:1:21
V302(i,1:31)=V230(i:21:651);
end
V303 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=30 P3
for i=1:1:21
V303(i,1:31)=V330(i:21:651);
end
V451 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=45 P1
for i=1:1:21
V451(i,1:31)=V145(i:21:651);
end
V452 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=45 P2
for i=1:1:21
V452(i,1:31)=V245(i:21:651);
end
V453 = zeros(21,31); %Rychlostní pole v=45 P3
for i=1:1:21
V453(i,1:31)=V345(i:21:651);
```

```
end
%%% ořezání mezní vrstvy
OREZ = 2;
XX = X((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV151 = V151((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV152 = V152((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV153 = V153((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV301 = V301((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV302 = V302((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV303 = V303((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV451 = V451((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV452 = V452((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
VV453 = V453((1+OREZ):19, (1+OREZ):29);
%%% Profil
POLOHA = 12; %%% !!!!!!! Poloha profilu !!!!!!!
XP = X(POLOHA,:); %X profilu celej
XXP = XX(POLOHA,:); %X profilu ořez
XI = 0:0.01:300; %X profilu interpolace celek
XIO = 20:0.01:280; %X profilu interpolace ořez
%%% Rychlosti do profilu - celek
V151P = V151(POLOHA,:);
V152P = V152(POLOHA,:);
V153P = V153(POLOHA,:);
V301P = V301(POLOHA,:);
V302P = V302(POLOHA,:);
V303P = V303(POLOHA,:);
V451P = V451(POLOHA,:);
V452P = V452(POLOHA,:);
V453P = V453(POLOHA,:);
%%% Rychlosti do profilu - ořez
V151PO = VV151((POLOHA-OREZ),:);
V152PO = VV152((POLOHA-OREZ),:);
V153PO = VV153((POLOHA-OREZ),:);
V301PO = VV301((POLOHA-OREZ),:);
V302PO = VV302((POLOHA-OREZ),:);
V303PO = VV303((POLOHA-OREZ),:);
V451PO = VV451((POLOHA-OREZ),:);
V452PO = VV452((POLOHA-OREZ),:);
V453PO = VV453((POLOHA-OREZ),:);
%%%INTERPOLACE - PLNĚ
Y151 = interp1(XP,V151P,XI,'pchip','extrap');
Y152 = interp1(XP,V152P,XI,'pchip','extrap');
Y153 = interp1(XP,V153P,XI,'pchip','extrap');
Y301 = interp1(XP,V301P,XI,'pchip','extrap');
Y302 = interp1(XP,V302P,XI,'pchip','extrap');
Y303 = interp1(XP,V303P,XI,'pchip','extrap');
Y451 = interp1(XP,V451P,XI,'pchip','extrap');
Y452 = interp1(XP,V452P,XI,'pchip','extrap');
Y453 = interp1(XP,V453P,XI,'pchip','extrap');
%%%INTERPOLACE - OŘEZANÉ
Y1510 = interp1(XXP,V151PO,XIO,'pchip','extrap');
Y1520 = interp1(XXP,V152PO,XIO,'pchip','extrap');
Y1530 = interp1(XXP,V153PO,XIO,'pchip','extrap');
Y3010 = interp1(XXP,V301PO,XIO,'pchip','extrap');
Y3020 = interp1(XXP,V302PO,XIO,'pchip','extrap');
Y3030 = interp1(XXP,V303PO,XIO,'pchip','extrap');
Y4510 = interp1(XXP,V451PO,XIO,'pchip','extrap');
Y4520 = interp1(XXP,V452PO,XIO,'pchip','extrap');
Y4530 = interp1(XXP,V453PO,XIO,'pchip','extrap');
```

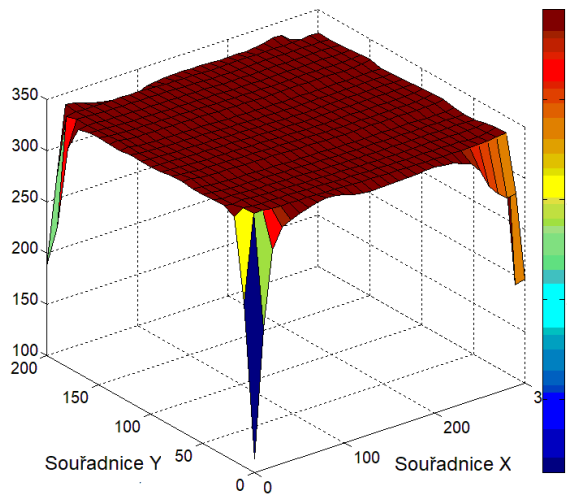
**Příloha č. 4 – Kód programu vytvořeného v Mathworks MATLAB pro porovnání dat**

```
%%% Vykreslení rychlostního 2D profilu - PLNÉ
figure
set(gca,'fontsize',15)
hold on
xlabel(['\fontsize{18} Poloha v ose X [mm]']);
ylabel(['\fontsize{18} Naměřená rychlost [m/s]']);
grid;
plot (XI,Y151,'-r','LineWidth',2)
plot (XI,Y152,'-g','LineWidth',2)
plot (XI,Y153,'-b','LineWidth',2)
plot (XP,V151P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XP,V152P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XP,V153P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
legend(['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P1 - 38mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P2 - 225mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P3 - 595mm']},...
       'Location','south');
figure
set(gca,'fontsize',15)
hold on
xlabel(['\fontsize{18} Poloha v ose X [mm]']);
ylabel(['\fontsize{18} Naměřená rychlost [m/s]']);
grid;
plot (XI,Y301,'-r','LineWidth',2)
plot (XI,Y302,'-g','LineWidth',2)
plot (XI,Y303,'-b','LineWidth',2)
plot (XP,V301P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XP,V302P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XP,V303P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
legend(['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P1 - 38mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P2 - 225mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P3 - 595mm']},...
       'Location','south');
figure
set(gca,'fontsize',15)
hold on
xlabel(['\fontsize{18} Poloha v ose X [mm]']);
ylabel(['\fontsize{18} Naměřená rychlost [m/s]']);
grid;
plot (XI,Y451,'-r','LineWidth',2)
plot (XI,Y452,'-g','LineWidth',2)
plot (XI,Y453,'-b','LineWidth',2)
plot (XP,V451P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XP,V452P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XP,V453P,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
legend(['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P1 - 38mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P2 - 225mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P3 - 595mm']},...
```

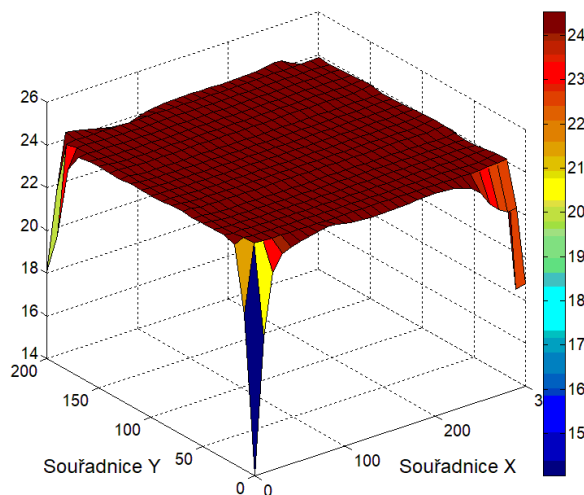
```
'Location','south');
%%% Vykreslení rychlostního 2D profilu - ořez
figure
set(gca,'fontsize',15)
hold on
xlabel(['\fontsize{18} Poloha v ose X [mm]']);
ylabel(['\fontsize{18} Naměřená rychlost [m/s]']);
grid;
plot (XIO,Y1510,'-r','LineWidth',2)
plot (XIO,Y1520,'-g','LineWidth',2)
plot (XIO,Y1530,'-b','LineWidth',2)
plot (XXP,V151PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XXP,V152PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XXP,V153PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
legend(['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P1 - 38mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P2 - 225mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P3 - 595mm']},...
       'Location','south');
figure
set(gca,'fontsize',15)
hold on
xlabel(['\fontsize{18} Poloha v ose X [mm]']);
ylabel(['\fontsize{18} Naměřená rychlost [m/s]']);
grid;
plot (XIO,Y3010,'-r','LineWidth',2)
plot (XIO,Y3020,'-g','LineWidth',2)
plot (XIO,Y3030,'-b','LineWidth',2)
plot (XXP,V301PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XXP,V302PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XXP,V303PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
legend(['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P1 - 38mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P2 - 225mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P3 - 595mm']},...
       'Location','south');
figure
set(gca,'fontsize',15)
hold on
xlabel(['\fontsize{18} Poloha v ose X [mm]']);
ylabel(['\fontsize{18} Naměřená rychlost [m/s]']);
grid;
plot (XIO,Y4510,'-r','LineWidth',2)
plot (XIO,Y4520,'-g','LineWidth',2)
plot (XIO,Y4530,'-b','LineWidth',2)
plot (XXP,V451PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XXP,V452PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
plot (XXP,V453PO,'kd','LineWidth',2,...
      'MarkerSize',4)
legend(['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P1 - 38mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P2 - 225mm'],...
       ['\fontsize{18} Rychlostní profil v rovině P3 - 595mm']},...
       'Location','south');
```

### Příloha č. 5 – Kompletní tlakový a rychlostní profil

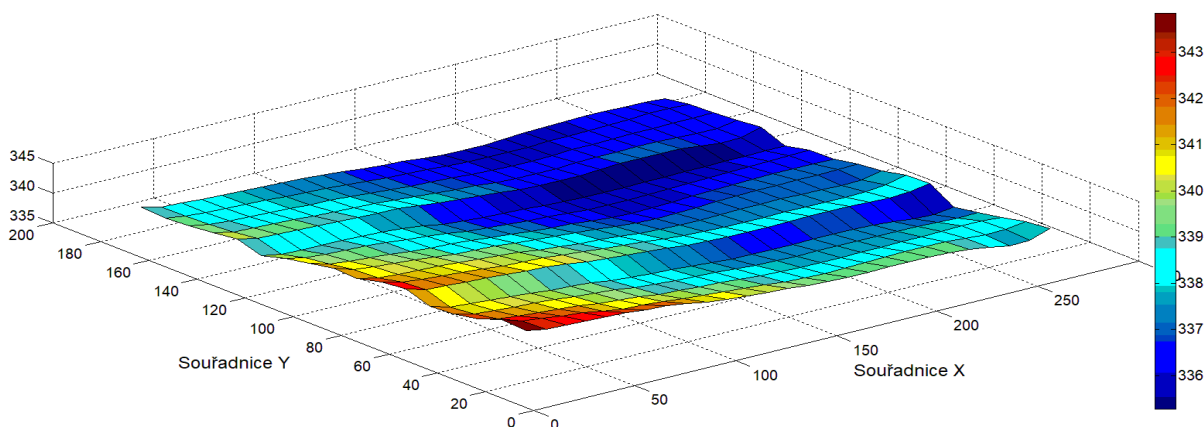
Rychlost proudění 25 m/s, měřicí rovina P1



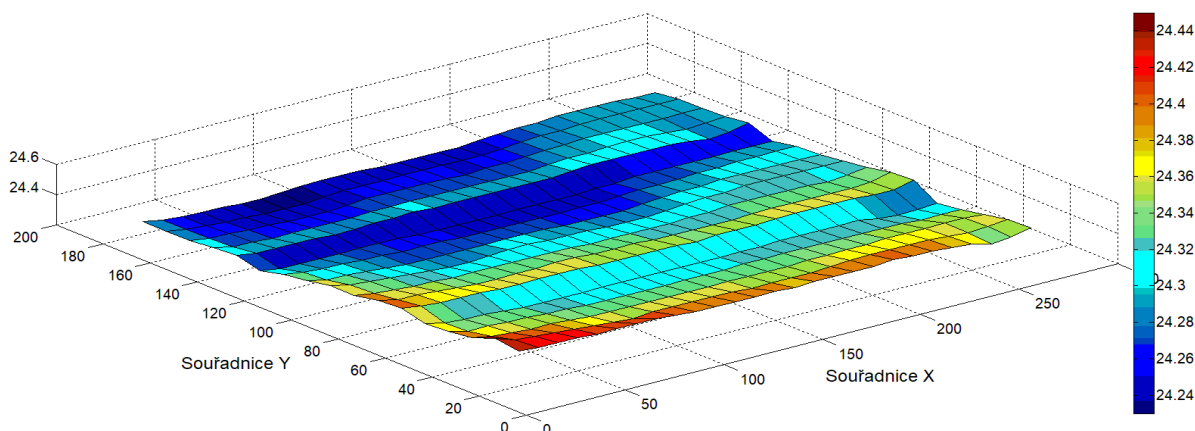
**Obrázek P5-1** - Kompletní tlakový profil, rychlost 25 m/s, měřicí rovina P1 (38 mm). Svislá osa a vybarvení popisují dynamický tlak v Pa.



**Obrázek P5-2** - Kompletní rychlostní profil, rychlost 25 m/s, měřicí rovina P1 (38 mm). Svislá osa a vybarvení popisují rychlost v m/s.



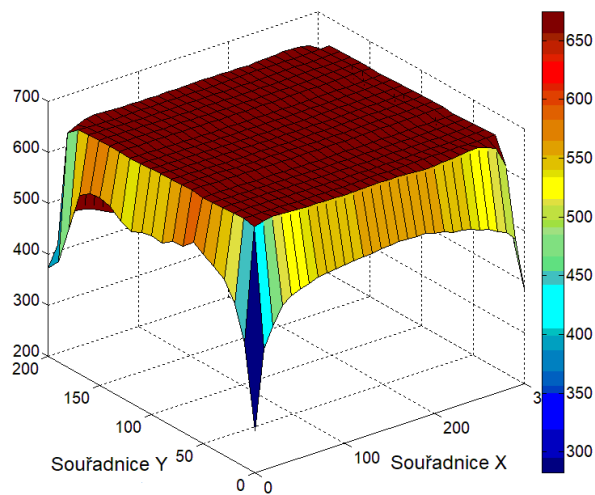
**Obrázek P5-3** - Tlakové pole hodnot naměřených v rovině P1 při rychlosti 25 m/s bez zahrnutí dat ovlivněných mezní vrstvou. Svislá osa a vybarvení popisují hodnoty dynamického tlaku v Pa.



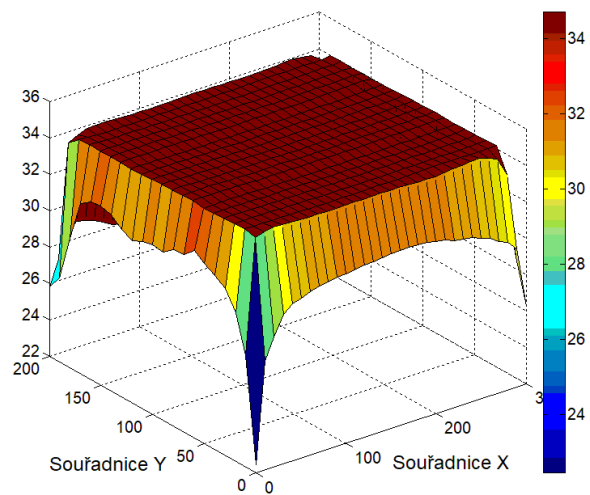
**Obrázek P5-4** - Rychlostní pole vypočtené z dynamických tlaků naměřených v rovině P1 při rychlosti 25 m/s bez zahrnutí dat ovlivněných mezní vrstvou. Svislá osa a vybarvení popisují hodnoty vypočtené rychlosti v m/s.

### Příloha č. 6 – Kompletní tlakový a rychlostní profil

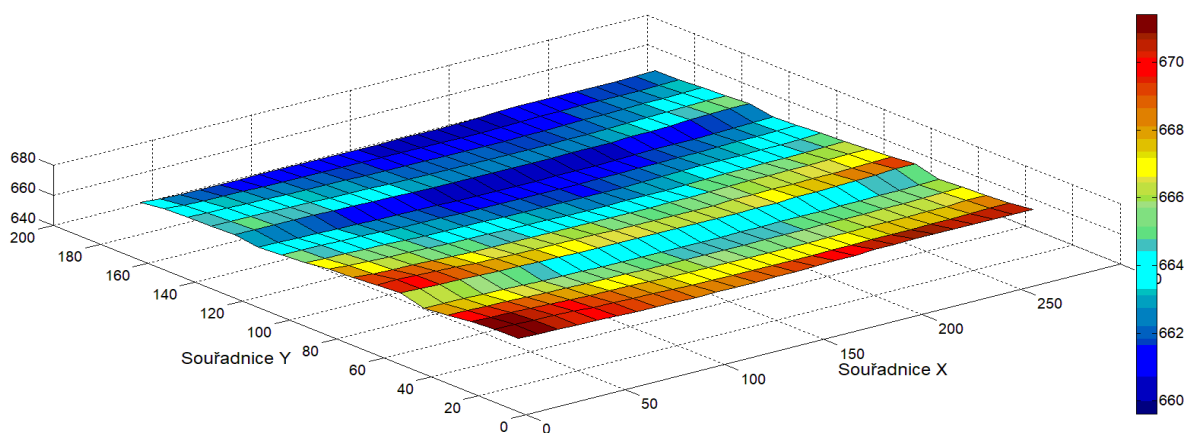
Rychlost proudění 35 m/s, měřicí rovina P2



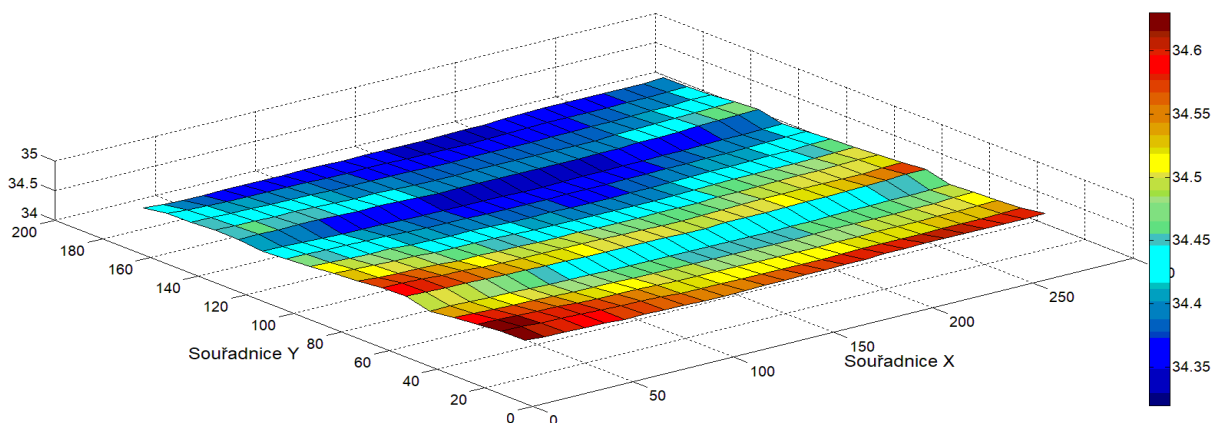
**Obrázek P6-1** - Kompletní tlakový profil, rychlost 35 m/s, měřicí rovina P2 (225 mm). Svislá osa a vybarvení popisují dynamický tlak v Pa.



**Obrázek P6-2** - Kompletní rychlostní profil, rychlost 35 m/s, měřicí rovina P2 (225 mm). Svislá osa a vybarvení popisují rychlost v m/s.



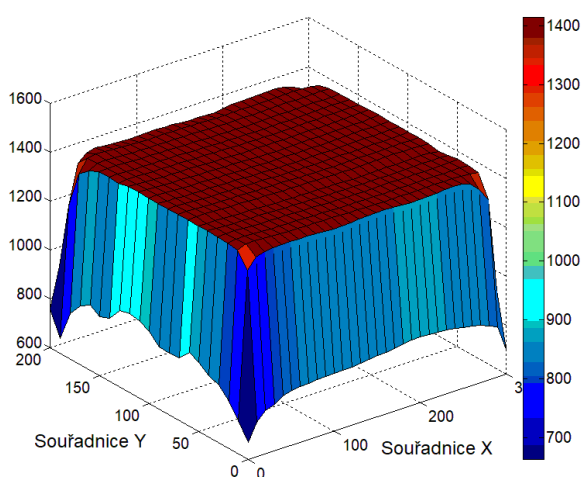
**Obrázek P6-3** - Tlakové pole hodnot naměřených v rovině P2 při rychlosti 35 m/s bez zahrnutí dat ovlivněných mezní vrstvou. Svislá osa a vybarvení popisují hodnoty dynamického tlaku v Pa.



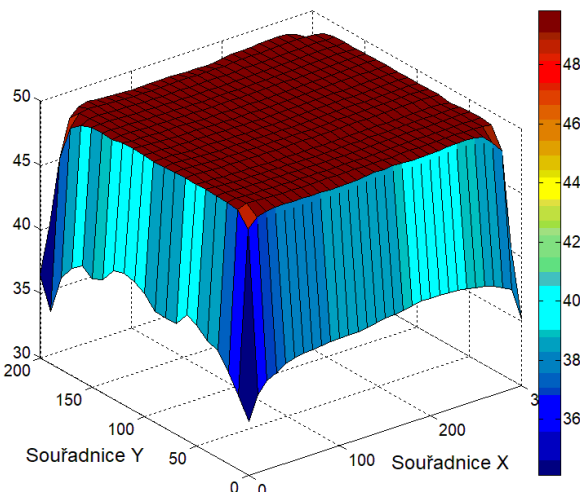
**Obrázek P6-4** - Rychlostní pole vypočtené z dynamických tlaků naměřených v rovině P2 při rychlosti 35 m/s bez zahrnutí dat ovlivněných mezní vrstvou. Svislá osa a vybarvení popisují hodnoty vypočtené rychlosti v m/s.

### Příloha č. 7 – Kompletní tlakový a rychlostní profil

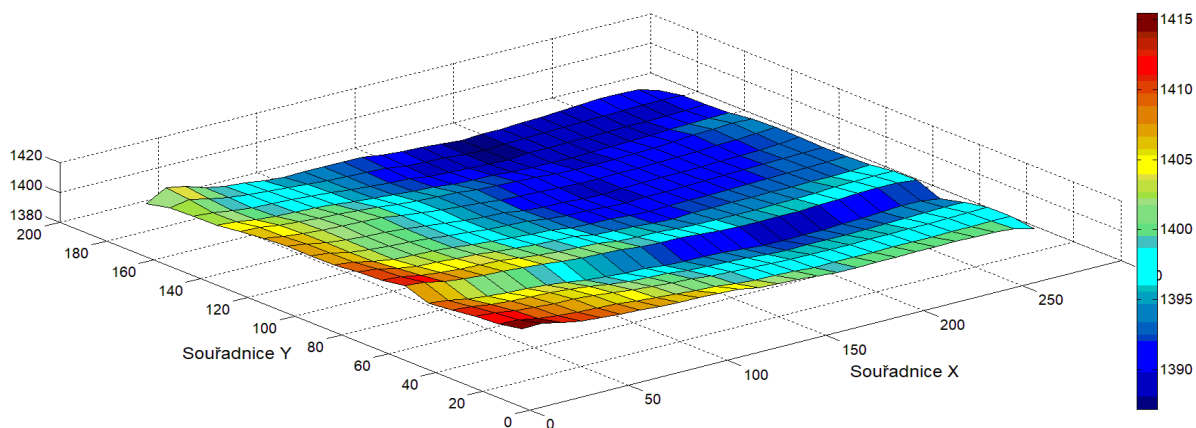
Rychlost proudění 50 m/s, měřicí rovina P3



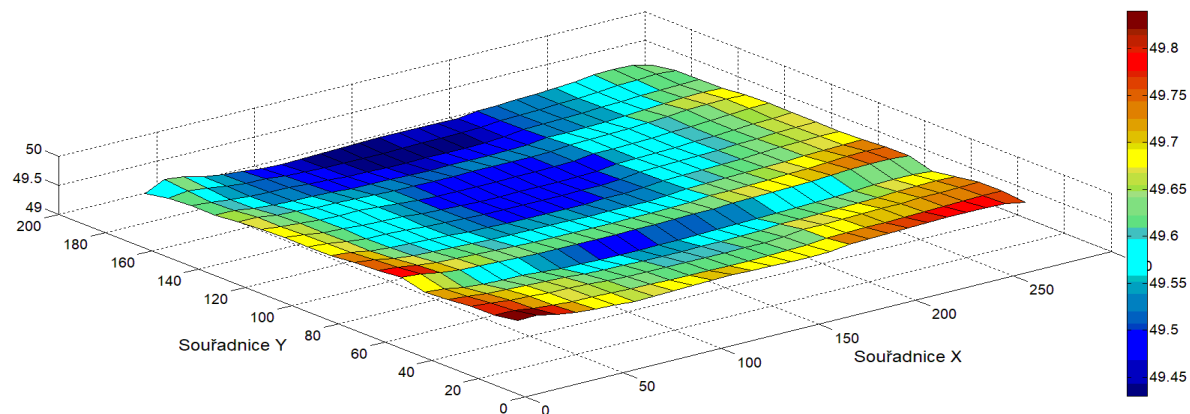
**Obrázek P7-1** - Kompletní tlakový profil, rychlost 50 m/s, měřicí rovina P3 (595 mm). Svislá osa a vybarvení popisují dynamický tlak v Pa.



**Obrázek P7-2** - Kompletní rychlostní profil, rychlost 50 m/s, měřicí rovina P3 (595 mm). Svislá osa a vybarvení popisují rychlost v m/s.



**Obrázek P7-3** - Tlakové pole hodnot naměřených v rovině P3 při rychlosti 50 m/s bez zahrnutí dat ovlivněných mezní vrstvou. Svislá osa a vybarvení popisují hodnoty dynamického tlaku v Pa.



**Obrázek P7-4** - Rychlostní pole vypočtené z dynamických tlaků naměřených v rovině P3 při rychlosti 50 m/s bez zahrnutí dat ovlivněných mezní vrstvou. Svislá osa a vybarvení popisují hodnoty vypočtené rychlosti v m/s.

**Příloha č. 8 – Maximálních a minimálních hodnoty včetně směrodatných odchylek**

Měřicí rovina a Zadaná rychlost	Aritmetický průměr rychlosti [m/s]	Směrodatná odchylka rychlosti	Minimální hodnota rychlosti [m/s]	Maximální hodnota rychlosti [m/s]
<b>P1 10 m/s</b>	9,70	0,045	9,62	9,84
<b>P1 15 m/s</b>	14,59	0,028	14,54	14,68
<b>P1 20 m/s</b>	18,78	0,080	18,64	19,01
<b>P1 25 m/s</b>	24,30	0,045	24,23	24,45
<b>P1 30 m/s</b>	28,73	0,083	28,60	29,4
<b>P1 35 m/s</b>	34,09	0,071	33,94	34,28
<b>P1 40 m/s</b>	39,05	0,093	38,88	39,29
<b>P1 45 m/s</b>	43,86	0,101	43,65	44,13
<b>P1 50 m/s</b>	48,78	0,121	48,56	49,1
<b>P2 10 m/s</b>	9,89	0,027	9,72	9,97
<b>P2 15 m/s</b>	14,83	0,035	14,77	14,98
<b>P2 20 m/s</b>	19,62	0,053	19,49	19,77
<b>P2 25 m/s</b>	24,54	0,047	24,45	24,66
<b>P2 30 m/s</b>	29,71	0,068	29,57	29,87
<b>P2 35 m/s</b>	34,45	0,073	34,32	34,63
<b>P2 40 m/s</b>	38,70	0,107	34,48	38,94
<b>P2 45 m/s</b>	44,26	0,103	44,06	44,55
<b>P2 50 m/s</b>	48,86	0,106	48,66	49,14
<b>P3 10 m/s</b>	9,94	0,030	9,65	10,02
<b>P3 15 m/s</b>	14,92	0,037	14,73	15,02
<b>P3 20 m/s</b>	19,77	0,034	19,62	19,9
<b>P3 25 m/s</b>	24,86	0,047	24,67	25
<b>P3 30 m/s</b>	29,80	0,057	29,68	29,96
<b>P3 35 m/s</b>	34,76	0,074	34,62	34,98
<b>P3 40 m/s</b>	39,60	0,051	39,44	39,75
<b>P3 45 m/s</b>	44,65	0,063	44,35	44,89
<b>P3 50 m/s</b>	49,59	0,085	49,43	49,84

*Tabulka 1 – Střední hodnoty rychlostí všech měření, rozdělené dle zadané rychlosti a měřicí roviny (P1 = 38 mm, P2 = 225 mm a P3 = 595 mm od vstupu).*