

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**CHARAKTERISTIKY EXPERIMENTÁLNÍ
MĚŘICÍ TRATI**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Šimunský	Jméno: Martin	Osobní číslo: 437739
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav techniky prostředí		
Studijní program:	Strojírenství		
Studijní obor:	Technika životního prostředí		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Charakteristiky experimentální měřicí trati

Název bakalářské práce anglicky:

Characteristics of an Experimental Duct System

Pokyny pro vypracování:

Proveďte měření parametrů existující experimentální tratě. Zmapujte měřitelný rozsah parametrů z hlediska akustiky a hydrauliky. Proměřte podrobně rychlostní profily na výstupní trysce. Definujte podmínky využitelnosti systému, rozsahy rychlostí ve vztahu k vlastnímu hluku tratě.

Seznam doporučené literatury:

Nový, R.: Hluk a chvění. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2000. 389s. ISBN 80-02246- 3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miroslav Kučera, Ph.D., ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **22.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:

 Ing. Miroslav Kučera, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	 doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)
---	---	--

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

<u>26. 4. 2018</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta
---	---------------------

Souhrn

Tato experimentální bakalářská práce se zabývá měřením hydraulických a akustických parametrů vzduchotechnické trati situované pod podlahou akustické laboratoře a sousedící dílny. Obě tyto místnosti jsou umístěny v přízemí halových laboratoří Fakulty strojní ČVUT v Praze. V úvodu je čtenář seznámen s problémy souvisejícími s hlukem a krátce je představena teorie aerodynamického hluku. V druhé části je proveden experiment mapování rychlostního pole proudění vzduchu v rovině nad dýzou. Následuje zjištění tunelové konstanty potřebné pro nastavení střední rychlosti proudění vzduchu z dýzy. Závěrem hydraulického měření je zmapováno jádro volného proudu. Ve třetí části práce, která se zabývá měřením akustických veličin, je změřen hluk vzduchotechnické trati a dýzy. Posledním měřením je zjištěna frekvenční závislost hluku volného proudu. V závěru jsou shrnuty nejdůležitější poznatky a navrženy možné změny pro zlepšení jak hydraulických, tak akustických veličin. Součástí přílohy je návod pro práci s anemometrem se žhaveným drátkem typu CTA společnosti Dantec Dynamics. Je zaměřen na experimenty popisované v této bakalářské práci.

Summary

In this experimental bachelor thesis hydraulic and acoustic parameters of air duct system are measured. The system is situated under the floor of the acoustic laboratory and workshop which is next to the laboratory. These rooms are located at the ground floor of indoor labs. They can be found at the Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague. Introduction of the thesis contains a description of a problem that noise can cause to human health and a short theory about aerodynamic noise is also introduced. Experiment of velocity mapping is contained in the second part together with finding the duct parameter and free jet's core mapping. Reader will find measurement of acoustic parameters of experimental duct system and nozzle in the third part. Last experiment is about free jet's relationship between frequency and aerodynamic noise. Conclusion contains summary of important results and suggestions for improvement of hydraulic and acoustic parameters. Guide used for hot-wire anemometry from Dantec Dynamics company is attached in the appendix. It is focused on the experiments described in this bachelor thesis.

Prohlášení o samostatném vypracování práce

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Charakteristiky experimentální měřicí trati“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Kučery, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 22. 6. 2018

.....
Martin Šimunský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Miroslavu Kučerovi, Ph.D. a Ing. Janu Králíčkovi za pomoc a poskytnuté konzultace během experimentu a zpracování této práce. Děkuji také panu prof. Ing. Jiřímu Baštovi, Ph.D. za cenné rady týkající se formátování práce a typografických pravidel. Na závěr patří poděkování mé rodině, blízkým, přátelům a všem, kteří mě jakkoliv podporovali nejen při psaní práce, ale i během celého studia.

Obsah

SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	7
1 ÚVOD	9
1.1 Cíl práce a popis vzduchotechnické trati.....	10
1.2 Aerodynamický hluk	12
1.3 Volný zatopený proud	13
2 MĚŘENÍ HYDRAULICKÝCH VELIČIN.....	14
2.1 Mapování rychlostního pole.....	15
2.1.1 Postup měření	15
2.1.2 Výsledky a vyhodnocení měření.....	15
2.2 Stanovení tunelové konstanty.....	19
2.2.1 Definice zjišťované veličiny.....	19
2.2.2 Postup měření	21
2.2.3 Podmínky měření	22
2.2.4 Výsledky měření	23
2.2.5 Vyhodnocení měření.....	24
2.3 Mapování jádra volného proudu.....	25
2.3.1 Definice zjišťované veličiny	25
2.3.2 Výsledky a vyhodnocení měření.....	26
3 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN	29
3.1 Měření hluku experimentální trati.....	34
3.1.1 Postup měření	34
3.1.2 Výsledky a vyhodnocení měření.....	35
3.2 Vyhodnocení frekvenční závislosti hluku volného proudu.....	39
3.2.1 Výsledky a vyhodnocení měření.....	39
4 ZÁVĚR.....	41
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
PŘÍLOHOVÁ ČÁST	I
1 Zapojení měřicího zařízení CTA.....	I
2 Obsluha programu StreamWare	IV

SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ

značení	jednotka	význam
A	[-]	bod A
B	[-]	bod B
C	[-]	bod C
D	[-]	bod D
D_0	[mm]	průměr konce dýzy
I_t	[-]	intenzita turbulence
K_A	[dB]	korekce váhovým filtrem A
L	[dB]	celková hladina akustického tlaku/výkonu
L_p	[dB]	hladina akustického tlaku (korigovaná/nekorigovaná na hluk pozadí)
L_{pA}	[dB]	hladina akustického tlaku A (korigovaná/nekorigovaná na hluk pozadí)
L_W	[dB]	hladina akustického výkonu (korigovaná/nekorigovaná na hluk pozadí)
L_{WA}	[dB]	hladina akustického výkonu A (korigovaná/nekorigovaná na hluk pozadí)
\bar{L}	[dB]	logaritmičeský průměr hladiny akustického tlaku/výkonu
Q	[-]	směrovost zdroje
R^2	[-]	hodnota spolehlivosti (součinitel korelace)
S	[m ²]	obsah mezikruží
\dot{V}_i	[m ³ · s ⁻¹]	objemový průtok v i -tém mezikruží
X_i	[-]	tunelová konstanta
d_e	[m]	průměr vnějšího mezikruží
d_i	[m]	průměr vnitřního mezikruží
f	[Hz]	frekvence
h	[mm]	výška mikrofonu od podlahy
n	[-]	počet hodnot
p_b	[Pa]	barometrický tlak
p_d	[Pa]	dynamický tlak

Δp_s	[Pa]	statický přetlak
p_v	[Pa]	parciální tlak vodních par
r	[mm]	vzdálenost mikrofonu od zdroje zvuku
r_a	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	měrná plynová konstanta
w_s	[m · s ⁻¹]	střední rychlost proudění vzduchu
x	[mm]	osa x
y	[mm]	osa y (směr v rovině kolmé na dveře)
z	[mm]	osa z (výška od konce dýzy)
ρ	[kg · m ⁻³]	hustota vzduchu proudícího z dýzy

Indexy

značení význam

A	bod A
B	bod B
C	bod C
D	bod D
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
i	i -tá hodnota
pozadí	pozadí hluku v laboratoři
z	směr osy z

1 ÚVOD

Sluch má člověk určen především k přijímání zvukových informací od okolí. V současnosti může sluchový orgán přijímat více informací, než je třeba, a tak v některých případech dochází k následkům, jenž mají negativní vliv na lidské zdraví.

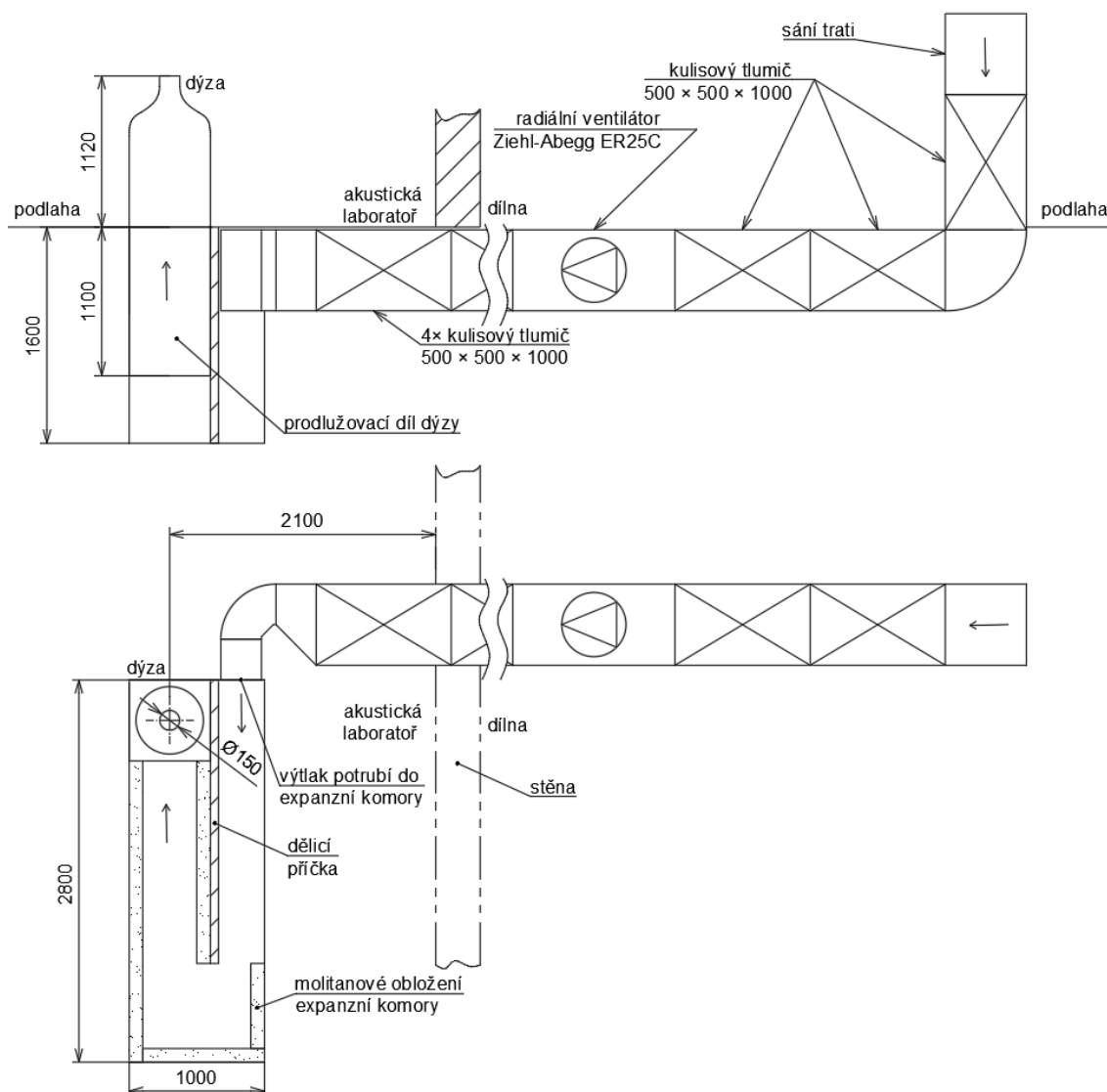
Při extrémních hodnotách hladiny akustického tlaku (130 dB až 140 dB) či při dlouhodobém působení hluku nad 70 dB u zdravého dospělého jedince může dojít k nevratným poškozením sluchu. Nepříznivý vliv má hluk na kardiovaskulární systém – zvyšuje krevní tlak, způsobuje poruchy spánku a jeho možné následky jako rozmrzelost, snížená pozornost a výkonnost, deprese. V neposlední řadě snižuje kvalitu mezilidské komunikace. [1]

Tuto problematiku v současné době právně řeší nařízení vlády č. 217/2016 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Udává například maximální přípustnou hladinu akustického tlaku pro chráněný venkovní prostor staveb (což je prostor do vzdálenosti 2 m okolo obytného domu, rodinného domu atp.) 50 dB pro den a 40 dB pro noc. [2]

Problematikou aerodynamického hluku se na Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze v posledních letech zabýval například Ing. Jan Králíček ve své diplomové práci Hluk koncových elementů VZT [3]. Částečně navázal na disertační práci Ing. Lukáše Putty, Ph.D., jenž řešil aerodynamický hluk vzduchotechnických lopatek při nízkých rychlostech obtékání [4], a na disertační práci Ing. Miroslava Kučery, Ph.D. s názvem Aerodynamické zdroje hluku při nízkých Machových číslech [5].

1.1 Cíl práce a popis vzduchotechnické trati

Cíl práce je proměřit hydraulické a akustické parametry nového konceptu vzduchotechnické trati znázorněného na Obr. 1-1.



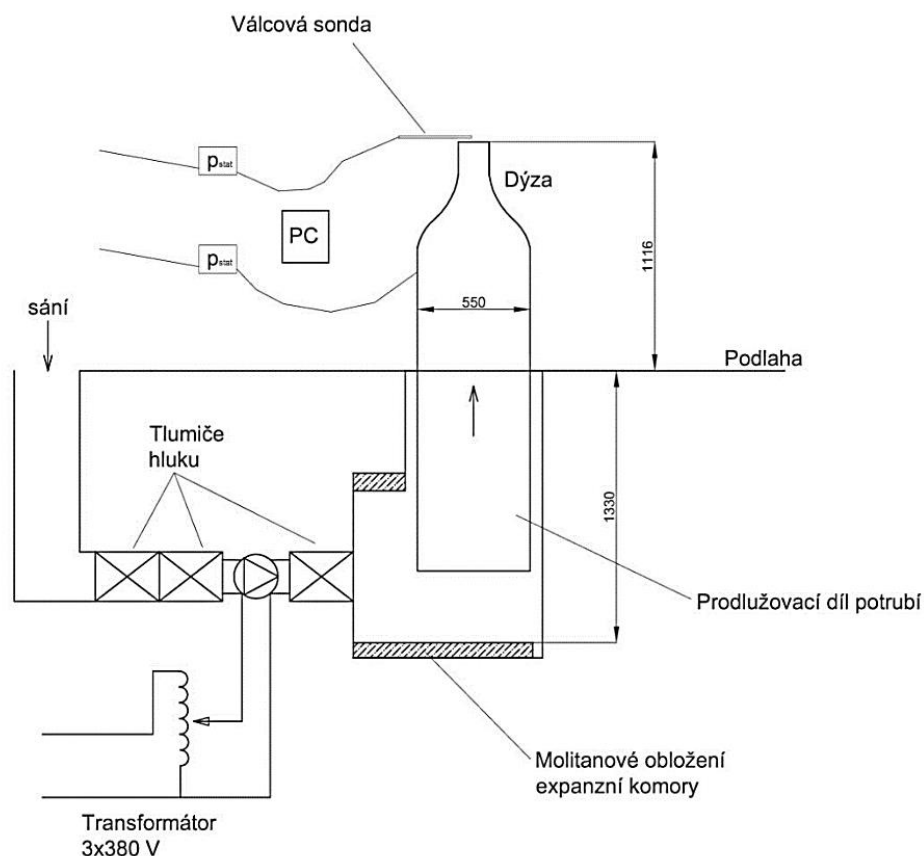
Obr. 1-1 Schéma nového konceptu vzduchotechnické trati

Trat' je součástí akustické laboratoře a sousední dílny v přízemí halových laboratoří (blok G3) Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze. V dílně se nachází sání vzduchotechnické trati opatřené filtrem proti nečistotám. Na vertikálním úseku vzduchotechnického potrubí je umístěn frekvenční měnič Icontrol Ziehl-Abegg pro nastavení ventilátoru a jeden kulisový tlumič délky 1000 mm. Potrubí tímto vertikálním dílem pokračuje dolů pod úroveň podlahy do železobetonového kanálu. Zde mění směr do horizontální roviny, v níž je instalováno celkem šest kulisových tlumičů o jednotlivé délce 1000 mm a radiální ventilátor s dozadu zahnutými lopatkami Ziehl-Abegg ER25C.

Horizontální část je přivedena až pod akustickou laboratoř, kde ústí do expanzní komory rozdělené příčkou a obložené molitanem. Do expanzní komory je zaveden prodlužovací díl dýzy o délce 1100 mm, který má za cíl ustálit proud vzduchu. Potrubí končí vyvedením dýzy do akustické laboratoře.

Veškeré části potrubí jsou uloženy v železobetonovém kanálu pružně vůči konstrukci přes vrstvu minerální izolace na boční a horní straně potrubí. Spodní strana je řešena přes vrstvu kročejové izolace. Celý kanál je zakryt železobetonovými deskami. [6]

Původní řešení experimentální trati je vyobrazeno na Obr. 1-2. Tato trať byla použita při měření v literatuře [3].



Obr. 1-2 Schéma původní vzduchotechnické trati [3]

Hlavní rozdíl je v pozici sání a ventilátoru. Byly umístěny ve stejné místnosti jako dýza, což se projevovalo negativně z hlediska hluku, který se šířil od ventilátoru sáním do laboratoře. Po úpravě trati, kterou realizovali Ing. Miroslav Kučera, Ph.D. spolu s Ing. Janem Králíčkem, bylo cílem zlepšení hlukových parametrů. Ověření tohoto předpokladu je jedním z témat této práce.

V literatuře [3] je rychlost proudění vzduchu z dýzy měřena Pitotovou trubicí. Pro zefektivnění a zpřesnění práce je v této práci pro měření rychlosti využit anemometr se žhavaným drátkem společnosti Dantec Dynamics. Zapojení a nastavení tohoto systému v programu StreamWare by měla přiblížit příloha práce.

1.2 Aerodynamický hluk

Aerodynamický hluk je jednou z kapitol technické akustiky. Teoretický popis je složitou záležitostí, jehož základy popsal Lighthill v letech 1951–1954. Hluku při nízkých Machových číslech je v současné době věnováno stále málo pozornosti. Propracovanější je pouze aerodynamický hluk při vysokých rychlostech proudění, tzn. v oblasti letectví – hluku letadel a proudových motorů. [7]

Ke vzniku aerodynamického hluku je zapotřebí turbulentní proudění, jenž je charakterizováno Reynoldsovým číslem. U turbulentního proudění obecně dochází ke generaci hluku na celém spektru zvuku. Proudění probíhá buď na koncovém elementu vzduchotechnického potrubí (tryska, dýza) do volného prostoru (volné proudění), anebo přímo v potrubí, kde proudící vzduch musí obtékat tělesa (clony, tlumiče, překážky či nerovnosti v potrubí). Při obtékání válce se střídavě z obou stran povrchu odtrhávají víry, které tvoří Kármánovu vírovou cestu a samy generují hluk s diskrétními složkami zvuku. Jedná se o zřetelné tóny, jenž můžeme v praxi pozorovat například u točícího se švihadla. [7], [8].

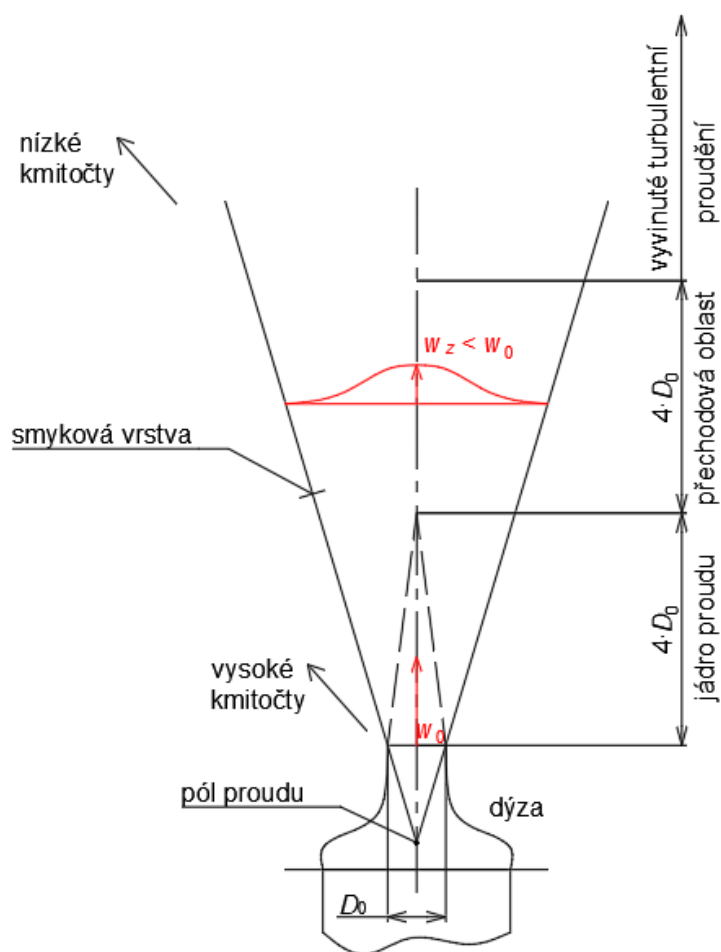
V potrubí může dojít také ke vzniku mechanického zdroje hluku, a to v případě, že frekvence vírů turbulentního proudění bude blízká vlastní frekvenci jakékoliv překážky umístěné v potrubí. Víry takto rozkmitají mezní vrstvu překážky a tento objekt začne na vlastních frekvencích a jejích přirozených násobcích generovat hluk. Při vyšších rychlostech proudění vzduchu je vliv mechanického hluku v porovnání s vlivem aerodynamického hluku zanedbatelný. V opačném případě je ale nutno s tímto vlivem počítat. [7], [8]

Ve vzduchotechnickém potrubí se hluk snižuje vložení tlumiče za zdroj hluku. Při vysokých rychlostech proudění vzduchu je také nasnadě rozbít víry překážkou či výstupkem na povrchu obtékaného tělesa, popřípadě volbou hrubého povrchu. U nízkých rychlostí je vhodné zvolit hladké přechody a vhodný profil obtékaného tělesa, jelikož díky tomu

dojde ke snížení generace vírů [8]. Nevhodné a nereálné je pokoušet se snížit hluk změnou charakteru proudění na laminární. Při běžných rozměrech by totiž bylo třeba omezit střední rychlost proudění vzduchu v potrubí na hodnotu $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a méně. [9]

1.3 Volný zatopený proud

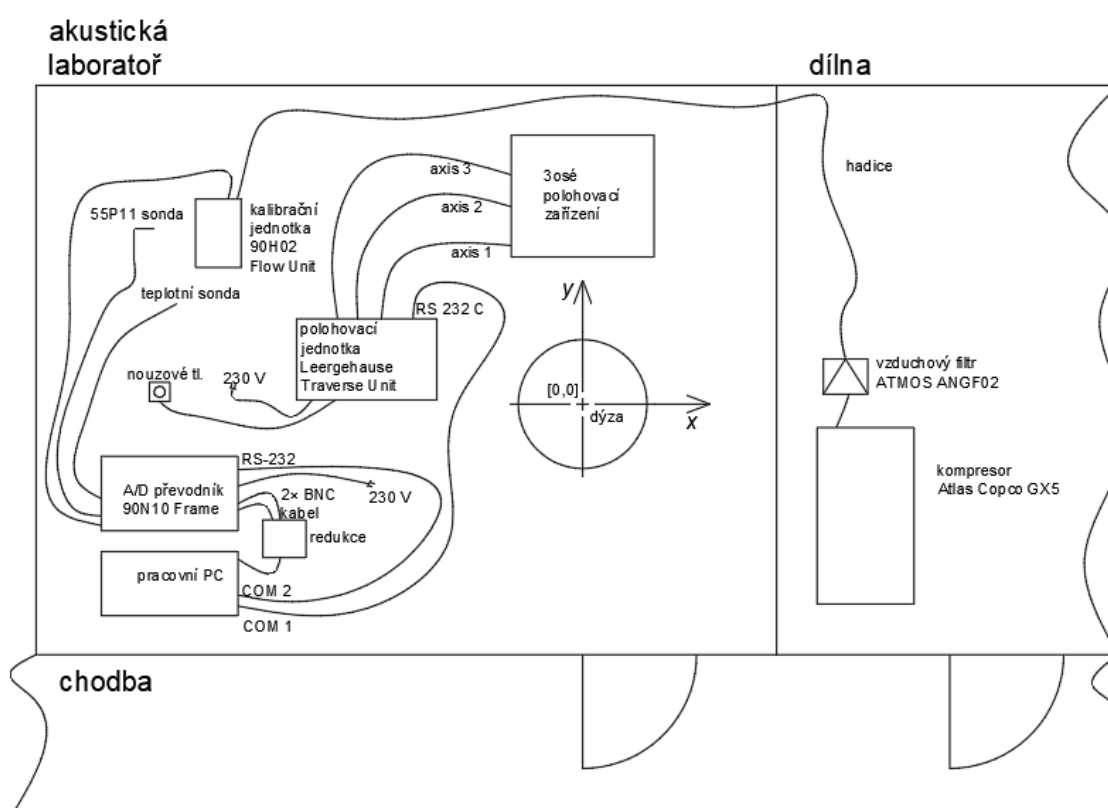
Volný proud je jedním z případů vzniku aerodynamického hluku. Znárodnění volného proudu aplikované na dýze v laboratoři je patrné z Obr. 1-3. U hrany dýzy dochází k vyzařování vysokých frekvencí hluku. V oblasti vyvinutého turbulentního proudění jsou vyzařovány frekvence nízké. Největší akustický výkon je vyzařován přibližně pod úhlem 45° . Jádru proudu je příznačné tím, že je v něm vyrovnaný rychlostní profil. Rychlost v jádru je rovna hodnotě w_0 , což je rychlost v místě konce dýzy. Mimo jádro proudu rychlost klesá. V přechodové oblasti je rychlost v každém místě w_z menší než w_0 . [7], [10]



Obr. 1-3 Schéma volného zatopeného proudu dýzy

2 MĚŘENÍ HYDRAULICKÝCH VELIČIN

V této kapitole je zmapováno rychlostní pole proudění vzduchu, který je přiváděn ventilátorem v potrubí (měřenou veličinou je střední rychlost w_s). Mapování probíhá těsně nad hranou dýzy. Druhým krokem je zjištěna tunelová konstanta pro účely nastavení požadované rychlosti proudění vzduchu z dýzy na základě statického přetlaku. V poslední fázi této kapitoly je zjištěna intenzita turbulence v rovině kolmé na hranu dýzy pro účely nalezení dosahu jádra volného proudu popsaného v kapitole 1.3.



Obr. 2-1 Schéma zapojení úlohy, sonda 55P11 a teplotní sonda jsou umístěny nad koncem dýzy na rameni polohovacího zařízení

Pro měření těchto veličin je využito anemometru se žhaveným drátkem (thermo-anemometr, žhavený anemometr, hot-wire anemometer) společnosti Dantec Dynamics, typ CTA (dále jen CTA). Zapojení a schéma měření je znázorněno na Obr. 2-1. Hlavními součástmi jsou A/D převodník, polohovací jednotka, 3osé polohovací zařízení a kalibrační jednotka. Kompresor slouží pro kalibrování systému přes kalibrační jednotku, do níž proudí vzduch z kompresoru přes filtr. Ten zabraňuje vniknutí mazacího oleje, kapiček zkondenzované vody a jiných cizích částic do kalibrační jednotky, jelikož

by tímto vniknutím mohlo dojít k poškození sondy. Kalibrace se musí provádět před každým měřením. Principem CTA (Constant Temperature Anemometry) je v udržování konstantní teploty drátku při jeho ochlazování proudícím vzduchem. To je dosaženo změnou protékajícího proudu, který je měřen a je z něj vyhodnocena rychlost. Poloha sondy je automaticky řízena 3osým přesným polohovacím zařízením s krokovými motory. Počátek souřadnic x , y , z je ve středu konce dýzy, jak je patrné z Obr. 2-1. Souřadnice z značí výšku od konce dýzy, x a y představují vodorovnou rovinu. S tímto souřadnicovým systémem je pracováno v celé práci. Detailní popis zapojení a práce s CTA jsou uvedeny v příloze práce. [11]

Zjišťovány jsou navíc klimatické podmínky důležité pro stanovení tunelové konstanty. K tomuto účelu slouží Assmannův aspirační psychrometr a staniční barometr. Statický přetlak je měřen manometrem AIRFLOW MEDM 500.

2.1 Mapování rychlostního pole

2.1.1 Postup měření

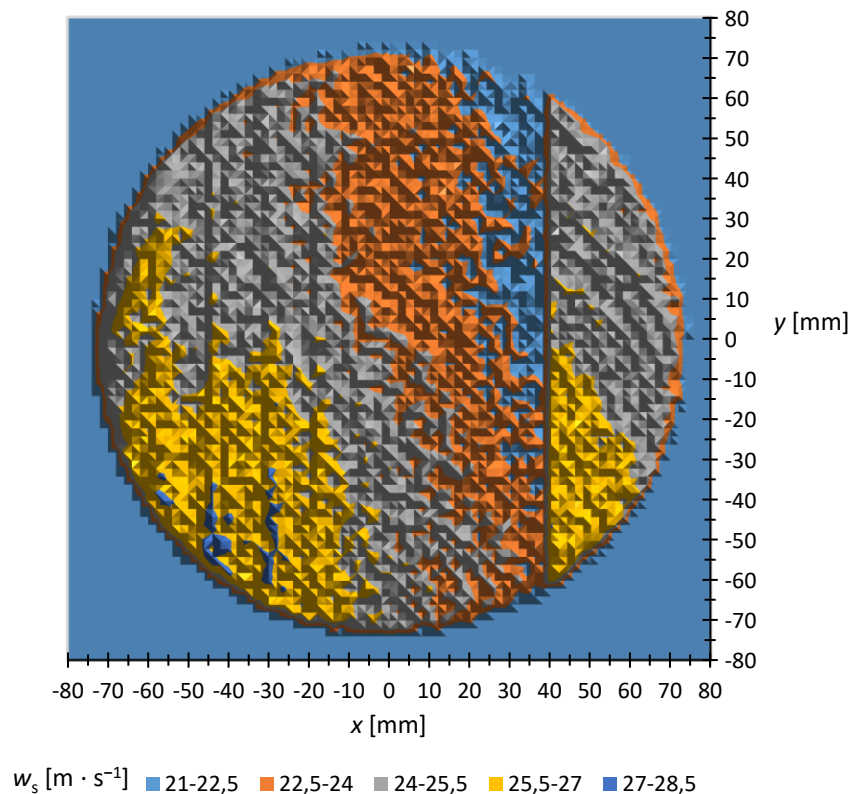
- 1) Příprava CTA se řídí především přílohou této práce.
- 2) Pozice termo-anemometru je volena těsně nad dýzou (3 mm nad hranou). K termo-anemometru je třeba přistupovat obzvlášť opatrně proto, aby se žhavený drátek nepřetrhl o hranu dýzy.
- 3) Zapnutí ventilátoru a vyrovnání tepelně vlhkostních parametrů (cca 10 min).
- 4) Spuštění měření.
- 5) Exportování a zpracování dat po skončení měření.

2.1.2 Výsledky a vyhodnocení měření¹

Zkušební měření s krokem pro obě souřadnice $[x, y] = 2$ mm bylo dosaženo podrobného měření, ovšem na úkor času. Výsledek reprezentuje povrchový graf na Obr. 2-2 v rovině 3 mm nad koncem dýzy. Svislá a vodorovná osa představuje souřadnice x , y a barvy znázorňují interval velikosti střední rychlosti w_s v této horizontální rovině. Počet vzorků na jednu snímací pozici byl stanoven na 30 (30 hodnot rychlosti na jednu pozici,

¹ Detailní výsledky této úlohy je možno najít na přiloženém CD: $\backslash I_rychlostni_pole \backslash MM.DD.RR \backslash XXhz_krokYY.xlsm$, kde $MM.DD.RR$ je datum měření, XX je nastavení frekvenčního měniče a YY je krok polohovacího zařízení. Soubor *dantec.xlsm* je soubor, který potenciálně v budoucnu bude možno využít pro zpracování dat z CTA pro měření typově podobné této úloze.

ze kterých byla stanovena střední rychlost w_s). Sonda začala měřit ve stanovené pozici $[x, y] = [-80, -80]$. V grafu je tato pozice v levém dolním rohu. V jedné této pozici systém nasnímal 30 vzorků a posunul se na další pozici $[x, y] = [-80, -78]$, kde se proces opakoval. Frekvenční měnič pro ventilátor byl nastaven na 50 Hz. Pozice $[x, y] = [0, 0]$ odpovídá geometrickému středu konce dýzy.

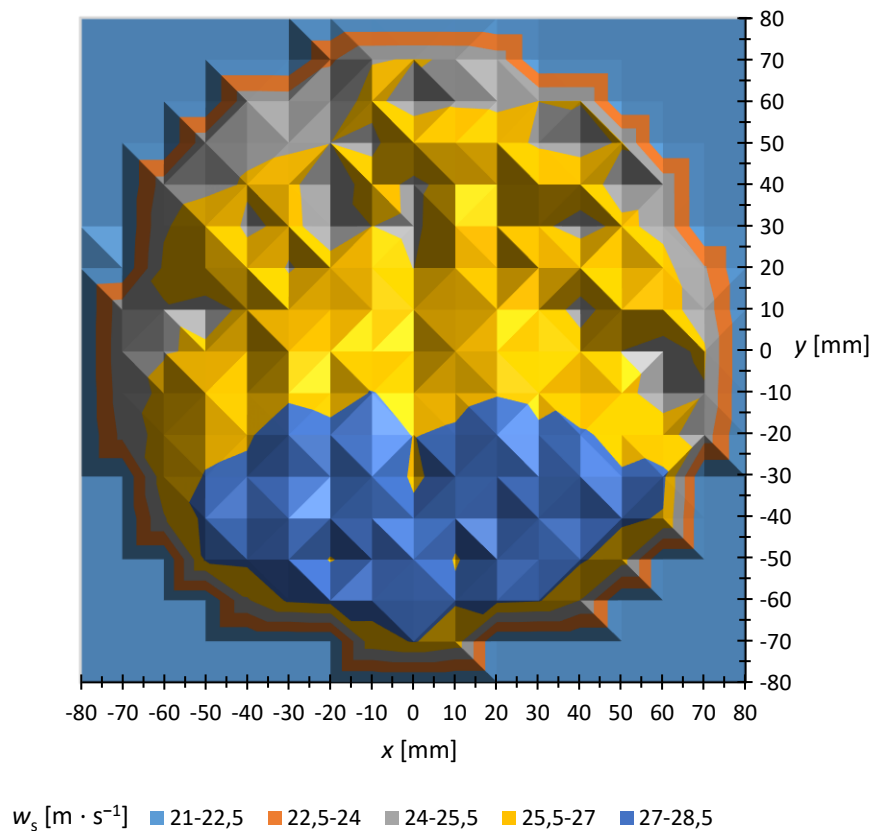


Obr. 2-2 Graf zkušebního měření, krok: 2 mm, doba měření: 5.28 h, výška sondy nad dýzou: 3 mm, frekvenční měnič: 50 Hz

Za povšimnutí stojí postupná klesající rychlost ve směru osy x a skok v poloze $x = 38$ mm. S největší pravděpodobností klesání rychlosti bylo způsobeno natočením sondy vlivem vibrací, jež vznikaly při posuvu. Tyto vibrace natočily sondu z kolmosti na proud vzduchu až o 45° . V poloze $x = 38$ mm byla sonda natočena do původní polohy, což zapříčinilo onen skok v grafu.

Snahou výsledného měření (zobrazeno na Obr. 2-3) bylo snížit dobu, proto byl krok zvýšen na 10 mm pro obě souřadnice. Zbytek vstupních parametrů (tedy souřadnice x , y , frekvence na frekvenčním měniči, počet vzorků na jednu pozici) zůstal nezměněn. Čas měření se podařilo snížit na 16 min, přičemž hustota bodů sítě je stále dostatečná pro

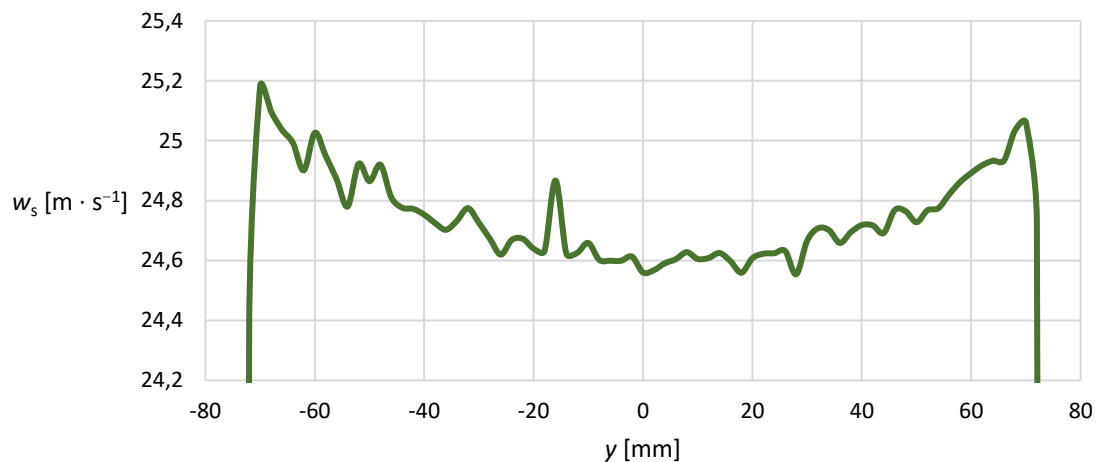
zjištění nerovností v proudění. Sonda byla lépe uchycena, a nedocházelo tak k jejímu natáčení, jako tomu bylo u zkušebního měření.



Obr. 2-3 Graf výsledného měření pro krok 10 mm, doba měření 0.16 h, výška sondy nad dýzou: 3 mm, frekvenční měnič: 50 Hz

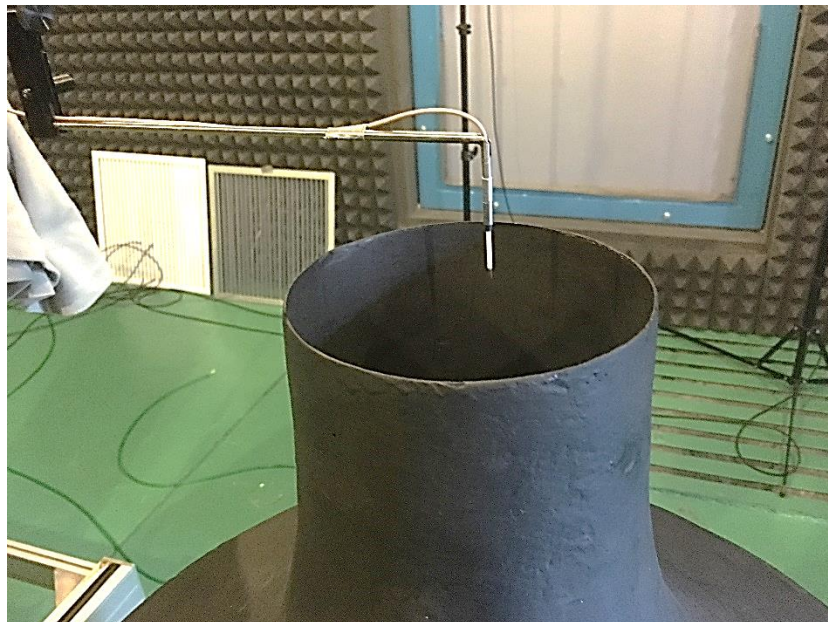
Stále je možno pozorovat postupné snižování rychlosti ve směru osy y . Byly vyvozeny tři závěry ohledně možné příčiny. Nevyrovnané proudění v potrubí, nedokonalost tvaru dýzy, popřípadě (jak je konstatováno v literatuře [3]) narušení proudění při zakrytí dýzy úchytem sondy v poloze, kdy se sonda nachází u vzdálenější stěny směrem od polohovacího zařízení.

Třetí závěr byl ověřen měřením v ose $x = 0$. Na Obr. 2-4 je vodorovně vyznačena osa y a svislou osu představuje střední rychlost w_s . Z podkladů [12] byla získána informace o vhodnější volbě uchycení sondy způsobem, který je zobrazen na Obr. 2-5.



Obr. 2-4 Graf ověřovacího měření v ose $x = 0$ (krok 2 mm) s uchycením sondy do 90° , frekvenční měnič: 50 Hz

Tímto měřením byl potvrzen zmíněný třetí závěr o narušení proudění, jelikož rychlost ve směru osy y již neklesá a uchycení neovlivňuje proudění v místě měření. Zároveň je vidět propad rychlosti téměř o $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ uprostřed dýzy. S největší pravděpodobností je tento jev způsoben nevyrovnaným prouděním v potrubí. Pro zrovnoměření proudu vzduchu je možné umístit do prodlužovacího dílu dýzy lamely, které svou strukturou připomínají tvar plástve [13]. Na tuto úpravu a ověření však nezbyl čas.



Obr. 2-5 Vhodné uchycení sondy 55P11 do 90°

Důležitý poznatek při vyhodnocení byl ten, že teplota proudícího vzduchu z dílny je nestabilní. V přilehlé dílně je nestabilita dána velkými zasklenými plochami způsobujícími

tepelné zisky z oslunění. Pro částečnou eliminaci tohoto vlivu je třeba chvíli před měřením zapnout ventilátor v trati pro vyrovnání teplot v obou místnostech. Tento krok byl učiněn před každým měřením.

2.2 Stanovení tunelové konstanty

2.2.1 Definice zjišťované veličiny

Tunelová konstanta je stanovena ze vztahu

$$X_i = \frac{p_d}{\Delta p_s}, \quad (1)$$

kde je

X_i [-] tunelová konstanta,

p_d [Pa] je dynamický tlak,

Δp_s [Pa] statický přetlak.

Statický přetlak představuje potenciální složku energie proudění. Je to tlak, který je zapotřebí k tomu, aby vzduch mohl proudit. Z toho důvodu musí překonat veškeré odpory v potrubí. Statický přetlak je měřen digitálním manometrem na odběrném místě válcové části dýzy. Odběrné místo je situováno kolmo na proud vzduchu (viz Obr. 2-6).



Obr. 2-6 Odběrná místa statického přetlaku (zelená hadička)

Dynamický tlak je kinematická složka energie proudění. Stanovuje se z rychlosti proudění vzduchu v místě vyústění trati ze vzorce

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_s^2, \quad (2)$$

kde je

ρ	[kg · m ⁻³]	hustota proudícího vzduchu z dýzy,
w_s	[m · s ⁻¹]	střední rychlost proudění vzduchu z dýzy.

Hustota je vypočtena pomocí psychrometrické metody Assmannovým aspiračním psychrometrem (pro stanovení teploty suchého teploměru t_s a parciálního tlaku vodních par p_v). Barometrický tlak je možno určit ze staničního barometru nebo pomocí aktuálních informací o počasí ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav). Tyto parametry jsou dosazeny do vzorce

$$\rho = \frac{p_b - 0,378 \cdot p_v}{r_a \cdot (t_s + 273,15)}, \quad (3)$$

kde je

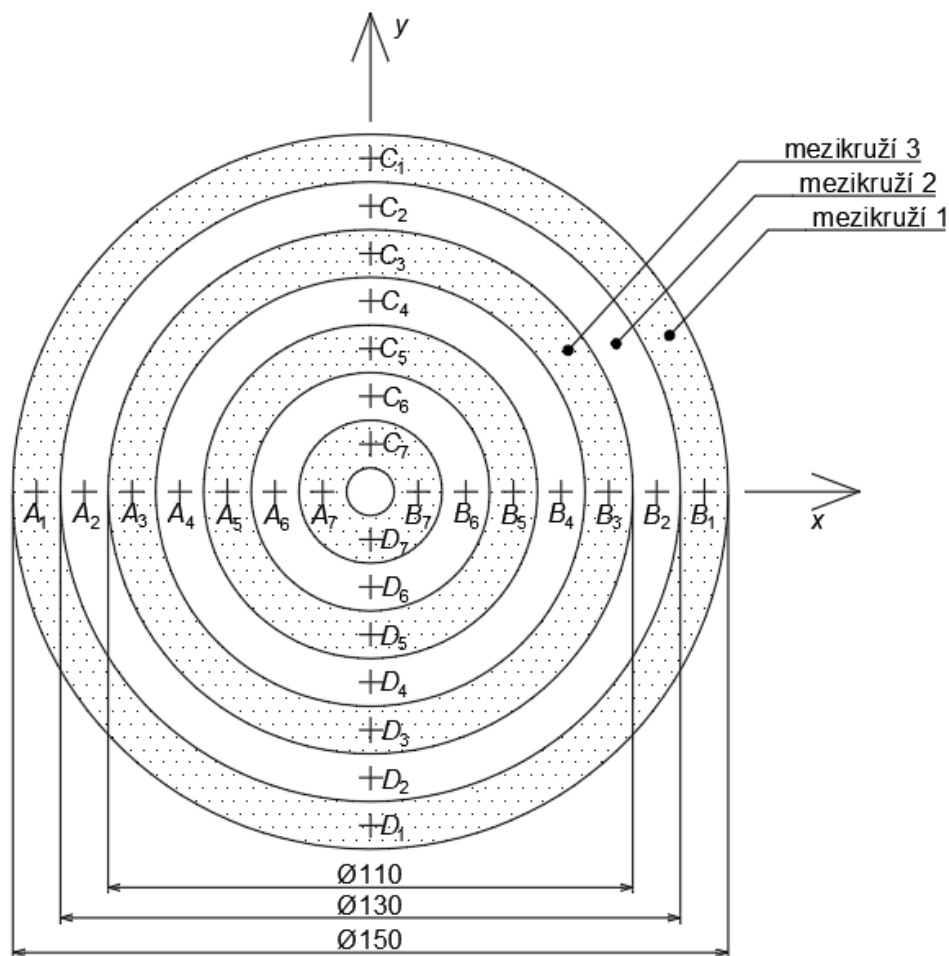
p_b	[Pa]	barometrický tlak,
p_v	[kg · m ⁻³]	parciální tlak vodních par,
r_a	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	měrná plynová konstanta suchého vzduchu,
t_s	[°C]	teplota suchého teploměru.

Pro zjištění celkové střední rychlosti proudění vzduchu z dýzy w_s je použito mezikruží o stejné vzdálenosti okrajových kružnic (nejedná se o rovnoploché mezikruží). Schéma metody je na Obr. 2-7. Z prvního mezikruží je vyloučena rychlost v bodě C_1 (nejdál od dveří), jelikož v tomto místě je hrana dýzy zdeformovaná. Objemový průtok je spočítán:

$$\dot{V}_i = S_i \cdot w_{s,i} = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \cdot \frac{w_{s,A_i} + w_{s,B_i} + w_{s,C_i} + w_{s,D_i}}{4}, \quad (4)$$

kde je

\dot{V}_i	[m ³ · s ⁻¹]	objemový průtok v i -tém mezikruží,
S_i	[m ²]	obsah i -tého mezikruží,
d_e	[m]	průměr vnější kružnice i -tého mezikruží,
d_i	[m]	průměr vnitřní kružnice i -tého mezikruží,
w_{s,A_i}	[m · s ⁻¹]	střední rychlost v bodě A_i (analogicky pro ostatní body).



Obr. 2-7 Pohled shora na dýzu – schéma pro výpočet střední rychlosti

Výsledná celková střední rychlost w_s je spočítána opačným způsobem – sečtou se objemové průtoky všech mezikruží a vydělí se celkovou plochou konce dýzy, která má průměr 150 mm.

$$w_s = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{V}_i}{\pi \cdot \frac{0,150^2}{4}} \quad (5)$$

2.2.2 Postup měření

- 1) Přípravení měřicí trajektorie pro program StreamWare: $[x, y] = [-74, 0], [-72, 0], \dots, [74, 0]; [0, -74], [0, -72], \dots, [0, 74]$.
- 2) Zapnutí ventilátoru a vyrovnání tepelně vlhkostních parametrů (cca 10 min).
- 3) Opakování bodů pro jednotlivé nastavení frekvenčního měniče (50 Hz; 42 Hz; 36 Hz; 30 Hz; 24 Hz; 18 Hz; 12 Hz; 10 Hz; 8,5 Hz a 7 Hz):
 - a. Nastavení požadované frekvence.
 - b. Odečtení statického přetlaku Δp_{s1} z manometru po ustálení teplot.

- c. Spuštění měření v programu StreamWare.
 - d. Odečtení statického přetlaku Δp_{s2} v momentě, kdy sonda přejíždí ze souřadnice [74, 0] do souřadnice [0, -74] (polovina měření).
 - e. Odečtení poslední hodnoty statického přetlaku Δp_{s3} po skončení měření.
 - f. Opakovat pro další nastavení frekvenčního měniče od bodu a.
- 4) Exportování dat do příloženého souboru Excel na CD².
 - 5) Zjištění celkové střední rychlosti w_s pomocí metody mezikruží popsané v podkapitole 2.2.1.
 - 6) Vypočtení statického přetlaku Δp_s (aritmetický průměr z Δp_{s1} , Δp_{s2} a Δp_{s3}).
 - 7) Vypočtení hustoty pomocí vztahu (3).
 - 8) Stanovení dynamického tlaku p_d ze vzorce (2).
 - 9) Vynesení statických přetlaků a dynamických tlaků jednotlivých nastavení frekvenčního měniče do grafu a zjištění tunelové konstanty X_i pomocí metody interpolace (spojnice trendu).

2.2.3 Podmínky měření

V Tab. 2-1 a v Tab. 2-2 jsou teplotní a tlakové veličiny pro dva dny měření v měsíci dubnu. Druhým měřením se ověřovala správnost měření CTA.

Tab. 2-1 Teploty z Assmannova aspiračního psychrometru

11. 4. 2018	v laboratoři	v dílně	20. 4. 2018	v laboratoři	v dílně
t_s [°C]	20,5	21,2	t_s [°C]	23,0	24,0
t_m [°C]	15,6	14,4	t_m [°C]	16,2	16,1

Barometrický tlak je pro porovnání určen nejen ze staničního barometru, ale i z údajů ČHMÚ pro porovnání.

Tab. 2-2 Barometrické tlaky

11. 4. 2018	p_b [Pa]	20. 4. 2018	p_b [Pa]
ve škole	98 181	ve škole	99 656
podle ČHMÚ (Ruzyně)	100 600	podle ČHMÚ (Ruzyně)	102 430

² \2_tunelova_konstanta\MM.DD.RR\XXhz, kde MM.DD.RR je datum měření a XX nastavení frekvenčního měniče.

2.2.4 Výsledky měření³

Tab. 2-3 Hustoty vlhkého vzduchu

11. 4. 2018	v laboratoři	v dílně	20. 4. 2018	v laboratoři	v dílně
ρ [kg · m ⁻³]	1,16	1,16	ρ [kg · m ⁻³]	1,17	1,16
$\rho_{\text{ČHMÚ}}$ [kg · m ⁻³]	1,19	1,19	$\rho_{\text{ČHMÚ}}$ [kg · m ⁻³]	1,20	1,20

V Tab. 2-3 jsou pro porovnání zjištěny hustoty vlhkého vzduchu na dvou místech: v laboratoři a v dílně. Barometrický tlak byl zjišťován jak ze staničního barometru, tak pomocí ČHMÚ pro ověření přesnosti. Jak je vidět, rozdíl je v řádu setin, což má částečný vliv na hodnotu tunelových konstant popsanych v Tab. 2-4.

Tab. 2-4 Tunelové konstanty s hodnotami spolehlivosti R^2

11. 4. 2018	X_i [-]	R^2 [-]	20. 4. 2018	X_i [-]	R^2 [-]
hustota spočítána z barometrického tlaku staničního barometru					
v laboratoři	0,807	0,999 3	v laboratoři	0,874	1
v dílně	0,806	0,999 3	v dílně	0,871	1
hustota spočítána z barometrického tlaku ČHMÚ					
v laboratoři	0,827	0,999 3	v laboratoři	0,898	1
v dílně	0,826	0,999 3	v dílně	0,895	1

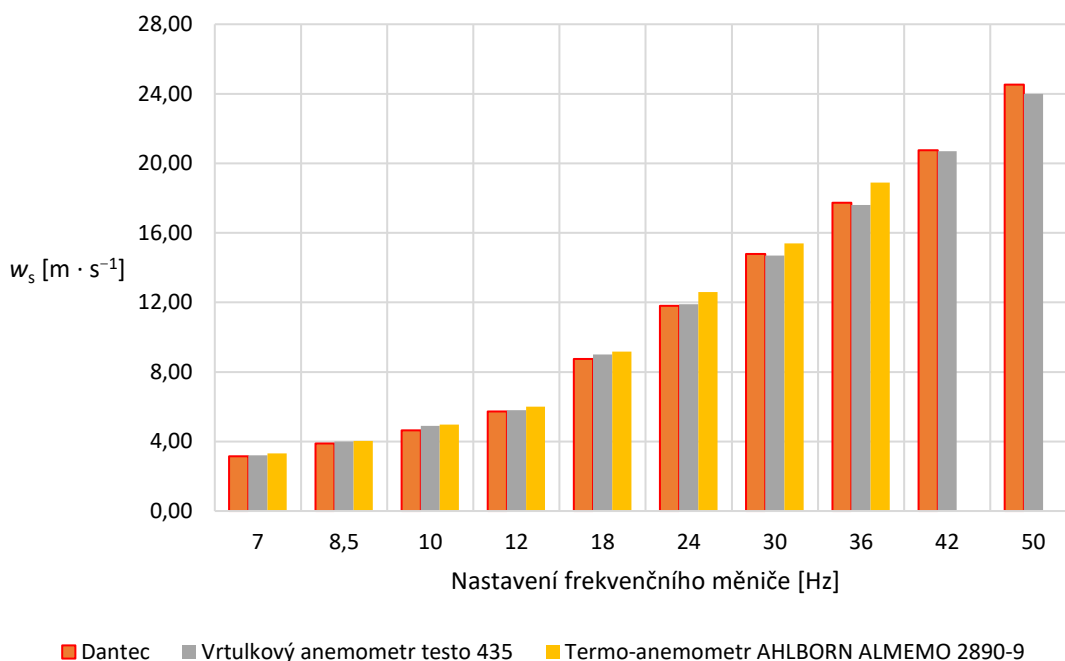
V Tab. 2-4 jsou vypočtené tunelové konstanty pro všechny kombinace (místo měření a způsob zjištění barometrického tlaku) pro oba měřené dny. Při porovnání maximální a minimální hodnoty je dosaženo odchylky 11 %. Proto pro výpočet výsledné tunelové konstanty pro pozdější nastavení střední rychlosti proudění vzduchu z dýzy byl stanoven průměr dvou nejrelevantnějších hodnot měřených staničním barometrem ze dne 20. 4.

$$X_i = \frac{0,874 + 0,871}{2} \doteq 0,87 \quad (6)$$

³ Detailní výsledky této úlohy je možno najít na přiloženém CD ve složce: \2_tunelova_konstanta\MM.DD.RR, kde MM.DD.RR je datum měření. Soubor *tunelova_konstanta.xlsx* je souhrnný soubor, který čerpá data z ostatních souborů v dané složce. Soubor *dantecXY.xlsm* je soubor, který potenciálně v budoucnu bude možno využít pro zpracování dat z CTA pro měření typově podobné této úloze.

2.2.5 Vyhodnocení měření

V prvním měření byla zjištěna překvapivě nízká hodnota tunelové konstanty v porovnání s literaturou [3]. Z toho důvodu bylo měření zopakováno a ověřeno dalšími dvěma přístroji: příručním vrtulkovým anemometrem testo 435 a příručním termo-anemometrem AHLBORN ALMEMO 2890-9. Výsledek ověření je zobrazen ve sloupcovém grafu na Obr. 2-8. V něm je na vodorovné ose zobrazeno nastavení frekvenčního měniče, na svislé ose je zjištěná střední rychlost w_s v ose konce dýzy a barevně jsou odlišeny použité měřicí přístroje.



Obr. 2-8 Graf ověření měření rychlosti

Největší odchylky 7,4 % je dosaženo při nastavení 36 Hz mezi termo-anemometrem a vrtulkovým anemometrem. Rozsah termo-anemometru byl maximálně do $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a proto v grafu hodnoty pro nastavení 42 Hz a 50 Hz nejsou zobrazeny. Vrtulkový anemometr v porovnání s CTA dosahuje odchylky 2,1 % při nejvyšším nastavení frekvence 50 Hz. Tímto se vyvrátila nepřesnost v měřicí metodě. Odchylky v grafu na Obr. 2-8 byly s největší pravděpodobností způsobeny nevyrovnaným prouděním.

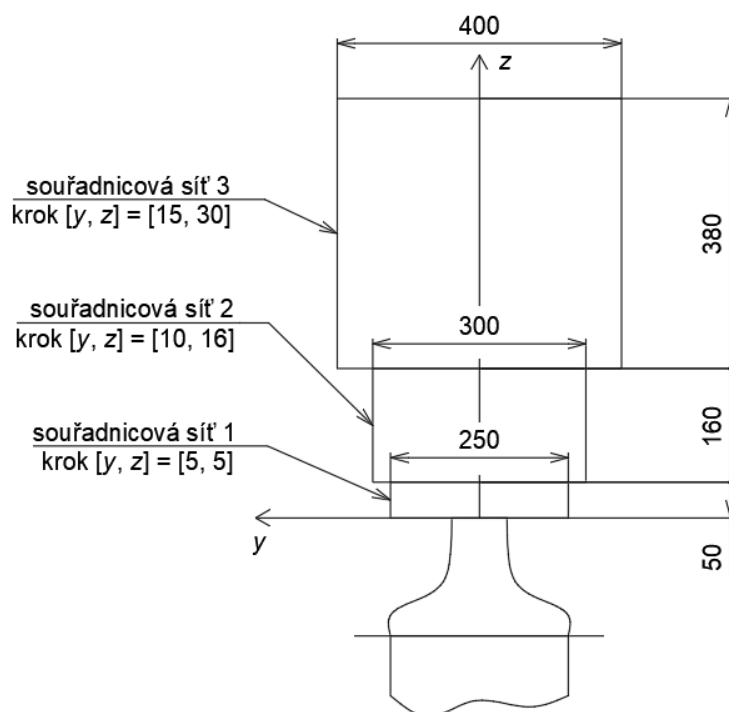
V Tab. 2-5 je porovnání tunelových konstant X_i a hodnot spolehlivosti R^2 s literaturou [3]. Zdroj chyby je pravděpodobně v měření rychlostí Pitotovou trubicí a sklonným mikroanemometrem, s nimiž se pracuje v literatuře [3].

Tab. 2-5 Výsledné tunelové konstanty a hodnoty spolehlivosti R^2

zdroj	X_i [-]	R^2 [-]
měření v této práci	0,872	1
literatura [3]	1,085	0,999 987

2.3 Mapování jádra volného proudu

Měření probíhá ve svislé rovině $x = 0$. Maximální výška, kterou polohovací zařízení může dosáhnout, je $z = 593$ mm. Měřicí síť je rozdělena na 3 části (viz Obr. 2-9) pro dostatečně detailní zmapování.



Obr. 2-9 Schéma měření

V této úloze je využita tunelová konstanta X_i pro nastavení střední rychlosti $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Statický přetlak Δp_s je měřen manometrem stejným způsobem jako na Obr. 2-6. Zjistí se tepelně vlhkostní podmínky, z nichž se stanoví hustota a dynamický tlak p_d podle vztahu (2) a (3). Pomocí vztahu (1) se vypočte statický přetlak.

2.3.1 Definice zjišťované veličiny

Volný proud je mapován pomocí intenzity turbulence. Vyjadřuje poměr velikosti amplitud fluktuací vzhledem ke střední rychlosti proudění – hodnota se pohybuje v rozmezí od

0 (minimální fluktuace) do 1 (maximální fluktuace). Intenzita turbulence je počítána podle vzorce

$$I_t = \frac{\sqrt{w'^2}}{w_s} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (w_i - w_s)^2}}{w_s}, \quad (7)$$

kde je

I_t	[-]	intenzita turbulence,
n	[-]	počet hodnot,
w_i	[m · s ⁻¹]	i -tá rychlost souboru,
w_s	[m · s ⁻¹]	aritmetický průměr rychlostí souboru (střední rychlost).

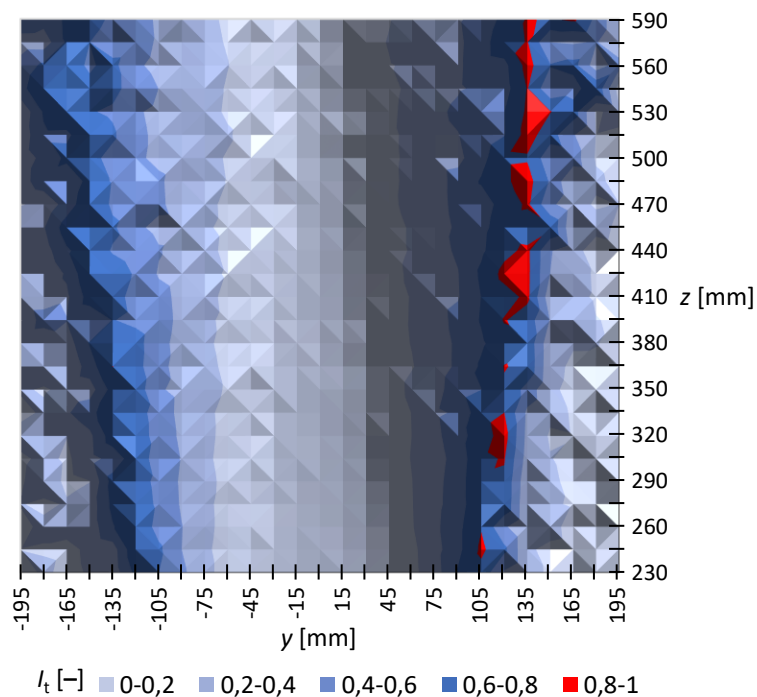
Čítec v rovnici (7) představuje statistickou směrodatnou odchylku a jmenovatel je střední rychlost proudění. U hrany dýzy je intenzita turbulence největší, kdežto uprostřed, v jádru volného proudu (viz podkapitola 1.3), je nejmenší. Oblast jádra proudu zasahuje do výšky $4 \cdot D_0$, přičemž D_0 je průměr konce dýzy. Pokud je uvažována i lehká deformace, pak průměr dýzy je roven 148 mm až 149 mm. Jádro proudu tedy dosahuje výšky 592 mm až 596 mm od konce dýzy.

Pro tuto úlohu je potřeba mít dostatečný počet vzorků, jelikož turbulence je náhodný (stochastický) jev, zároveň ale je třeba brát v potaz limity tabulkového procesoru Excel, který má (alespoň použitá aktuální verze) něco přes milion řádků. Bylo proto zvoleno 1500 vzorků na snímací pozici. [14]

2.3.2 Výsledky a vyhodnocení měření⁴

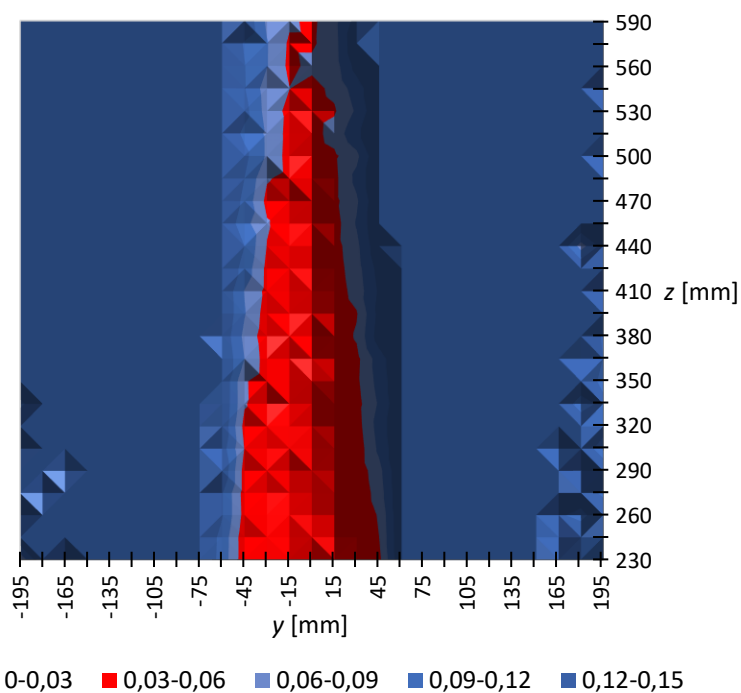
Volit rozdílné měřítko souřadnicových sítí se ukázalo jako chybný krok pro nemožnost spojení grafů sítí dohromady. Z nedostatku času ale toto měření nemohlo být zopakováno. Proto je přiložena pouze souřadnicová síť 3, která je nejzajímavější. Ostatní dvě se nacházejí na CD.

⁴ Detailní výsledky této úlohy je možno najít na přiloženém CD ve složce: \3_rezy\05.04.18\23ms_sitX, kde X je číslo souřadnicové sítě. Graf intenzity turbulence se nachází ve složce: \I_rychlostni_pole\04.11.18\50hz_krok10.



Obr. 2-10 Graf intenzity turbulence, krok 15 mm, řez rovinou $x = 0$

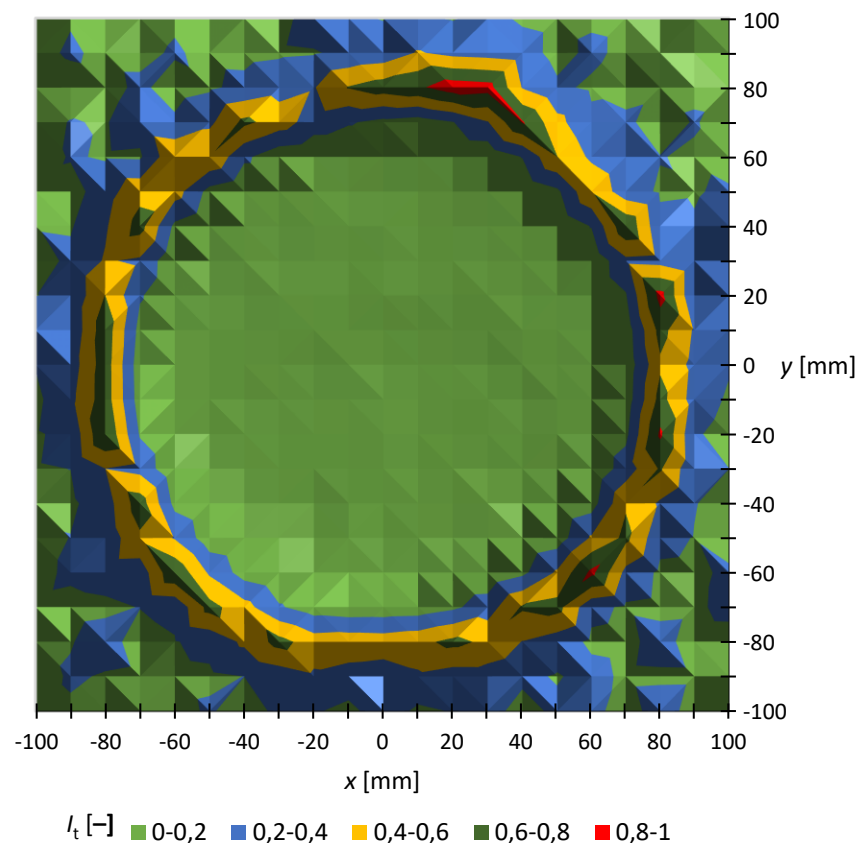
V grafu na Obr. 2-10 je vidět rozložení intenzity turbulence v souřadnicové síti 3. Patrná je smyková vrstva (směšovací pásmo) volného proudu. Intenzita turbulence zde dosahuje hodnot 0,6 až 0,8. Na pravé straně je o něco vyšší (červená oblast grafu), je to v oblasti kladné osy y , tzn. dále od dveří, kde je hrana dýzy lehce zdeformovaná, což je zdrojem vyšší intenzity turbulence.



Obr. 2-11 Detail grafu intenzity turbulence, krok 15 mm, řez rovinou $x = 0$

Druhý graf na Obr. 2-11 představuje stejný graf, jako je zobrazen na Obr. 2-10 s tím rozdílem, že jsou zobrazeny pouze malé hodnoty intenzity turbulence pro zobrazení jádra proudu. Jádro je zvýrazněno červenou barvou a v porovnání se smykovou vrstvou na Obr. 2-10 jsou zde desetinásobně menší hodnoty intenzity turbulence.

Poslední graf (Obr. 2-12) je měřen (jako v podkapitole 2.1) ve vodorovné rovině $z = 3$ mm, zobrazuje intenzitu turbulence v řezu rovinou $z = 3$ mm (těsně nad koncem dýzy). Nejvyšší hodnoty intenzity turbulence jsou vyznačeny červeně a potvrzují deformaci dýzy v kladných hodnotách osy y . Navíc je z grafu patrná hladká zelená oblast jádra proudu.

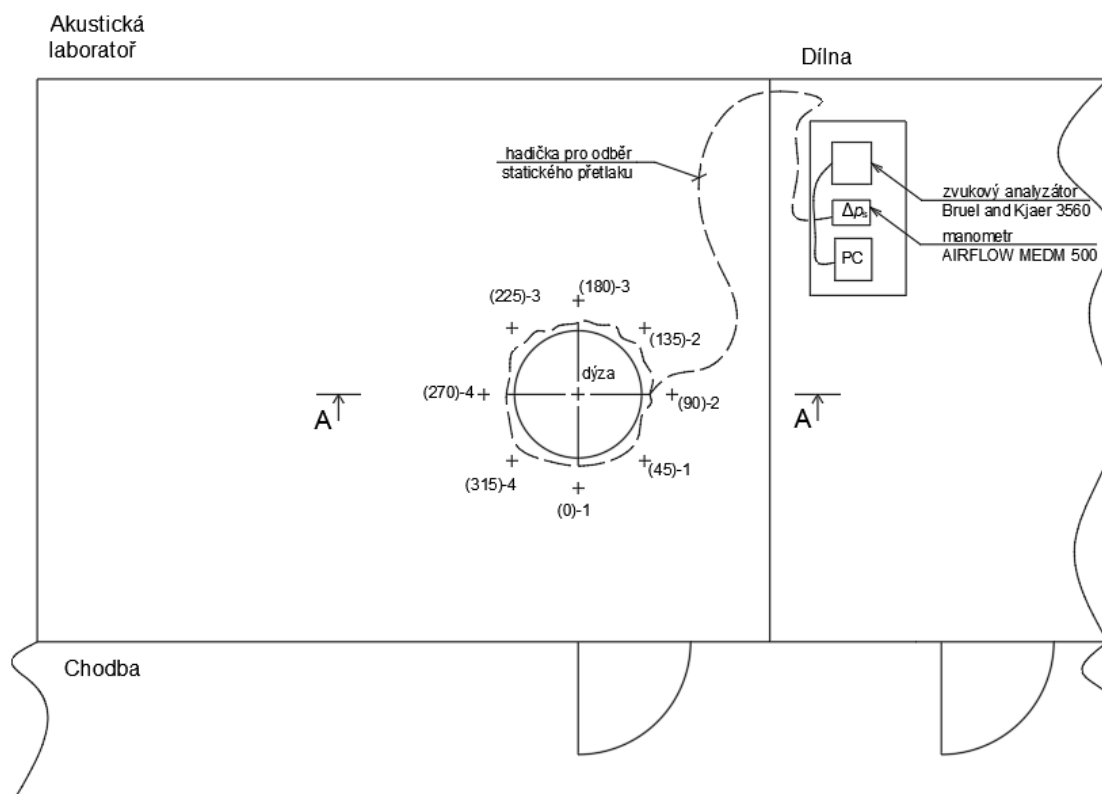


Obr. 2-12 Graf intenzity turbulence, krok: 10 mm, výška sondy nad dýzou: 3 mm

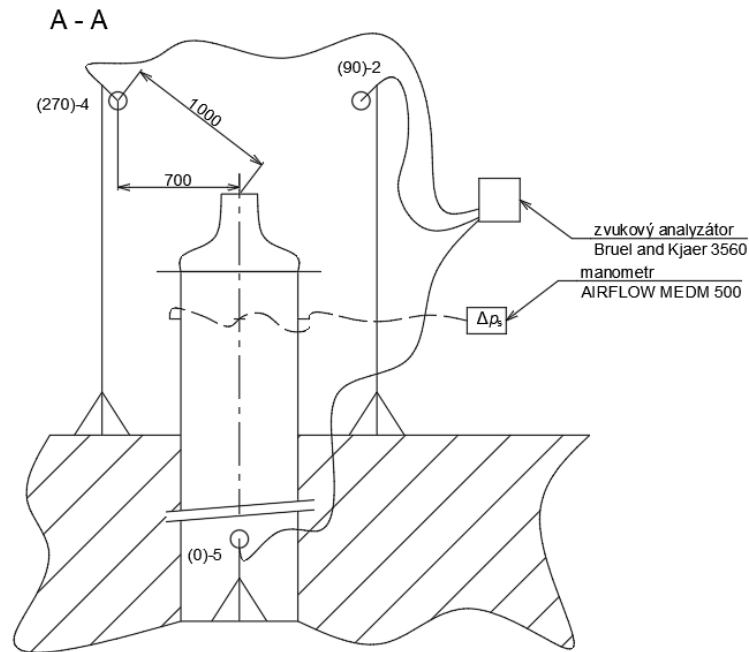
3 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN

Cílem této kapitoly je jednak změřit hluk experimentální trati a jednak vyhodnotit frekvenční závislost vyzařovaného hluku v různých výškách okolo dýzy. Měření proběhlo v poli přímých vln a oba způsoby jsou popsány v následujících odstavcích.

Pro **měření hluku trati** je k dispozici 5 kanálová měřicí aparatura (5 mikrofonů) PULSE od firmy Bruel & Kjaer. Čtyři mikrofony jsou rozestavěny okolo dýzy naproti sobě do kříže ve vzdálenosti 1 m od středu konce dýzy a pátý je umístěn dole ve vzduchotechnické trati pod dýzou (Obr. 3-3). Situace je znázorněna na Obr. 3-1 a Obr. 3-2. První čtyři mikrofony slouží k určení hluku dýzy, pátý mikrofon je určen pro zjištění velikosti hluku šířícího od ventilátoru a ze vzduchotechnické trati. Hlukové parametry jsou měřeny pro následující střední rychlosti proudění: {3, 6, 9, 12, 18, 23} m · s⁻¹. Tyto rychlosti jsou nastaveny pomocí statického přetlaku Δp_s odečítaného na manometru AIRFLOW MEDM 500. Odběr je řešen stejným způsobem, jako je popsán v podkapitole 2.2.1. Potřebná hodnota statického přetlaku je určena výpočtem přes tunelovou konstantu X_i zjištěnou v podkapitole 2.2. Mikrofony jsou propojeny se zvukovým analyzátelem Bruel & Kjaer 3560, který odesílá data do notebooku s programem pro vyhodnocení.



Obr. 3-1 Půdorysné schéma měření akustických parametrů trati



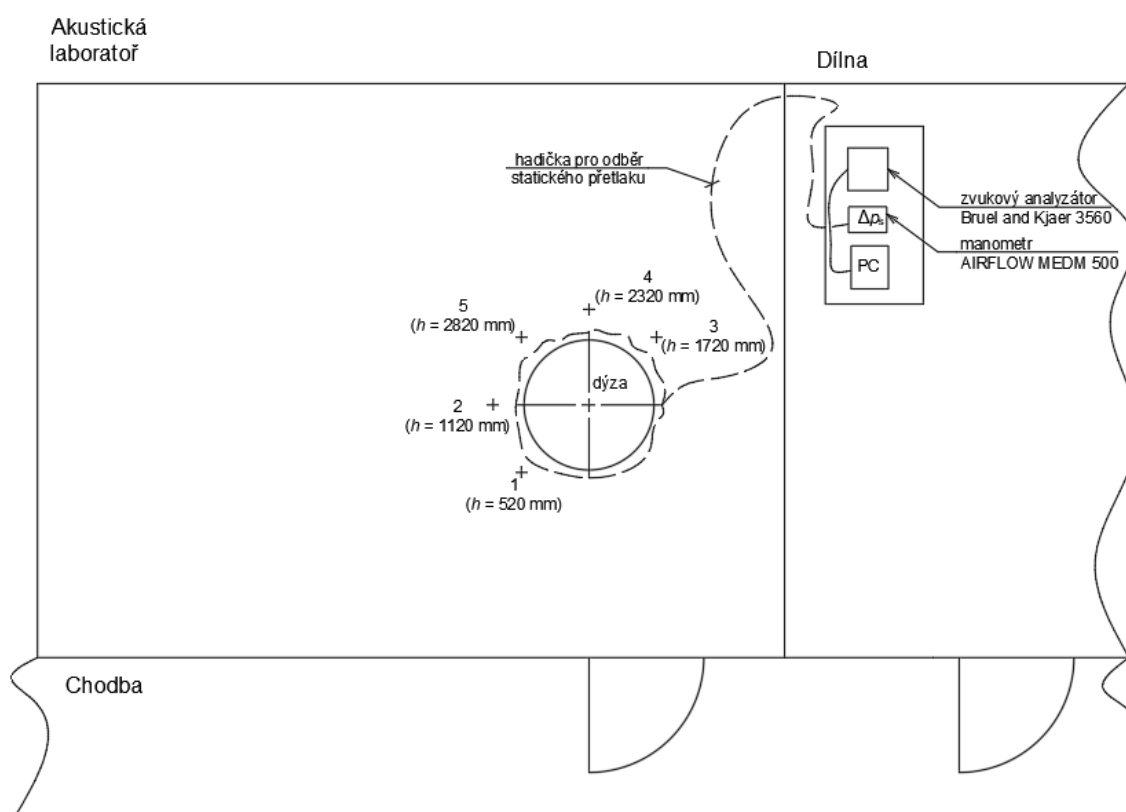
Obr. 3-2 Řez situací

Měření pro každou rychlost je provedeno dvakrát, po každém měření jsou posunuty čtyři mikrofony o 45° , aby bylo pokryto 8 měřících bodů pro danou rychlost. V závorce jsou stupně pro polohu mikrofonu okolo dýzy a za pomlčkou je číslo mikrofonu. Úhel pátého mikrofonu je značen podle prvního buď (0)-5 nebo (45)-5. Umístění mikrofonů prvního měření je tedy v bodech (0)-1, (90)-2, (180)-3, (270)-4, (0)-5 a druhého měření (45)-1, (135)-2, (225)-3, (315)-4 a (45)-5.



Obr. 3-3 Umístění pátého mikrofonu

U měření frekvenční závislosti hluku volného proudu je 5 mikrofonů rozmístěno okolo dýzy ve vzdálenosti 0,5 m od hrany dýzy. Výška mikrofonu od podlahy h je nastavena podle schématu na Obr. 3-4. Hrana konce dýzy je stejně jako mikrofon č. 3 ve výšce 1120 mm. Cílem je stanovit frekvenční rozložení signálu okolo dýzy. Podle teorie volného proudu prezentované v podkapitole 1.3 převažují u výše umístěných mikrofonů nízké frekvence, kdežto u níže umístěných mikrofonů (blíže k hraně dýzy) jsou zřetelnější vysoké frekvence.



Obr. 3-4 Schéma měření frekvenční závislosti volného proudu

V podkapitole 2.3 byla stanovena výška oblasti jádra proudu 592 mm až 596 mm. S přičtením výšky dýzy jádro proudu dosahuje do výšky 1712 mm až 1716 mm od podlahy. Nízké kmitočty v oblasti vyvinutého turbulentního proudění by měly být zaznamenány od výšky 2304 mm až 2312 mm od podlahy ($h = 8 \cdot D_0 + 1120$ mm). V Tab. 3-1 jsou tyto údaje shrnuty.

Tab. 3-1 Členění laboratoře na výšku

výška od podlahy [mm]	popis výšky oblasti vlivu hluku
0 až 1120	dýza
1120 až (1712÷1716)	oblast jádra proudu
(1712÷1716) až (2304÷2312)	přechodová oblast
(2304÷2312) až 3500 (strop laboratoře)	vyvinuté turbulentní proudění

V Tab. 3-2 je popsána výška jednotlivých mikrofonů a předpokládaná oblast vlivu hluku. Výška mikrofonu č. 5 je stanovena podle možností stativu. Ostatní mikrofony jsou přizpůsobeny tak, aby byly mezi sebou vzdáleny o výšku 500 mm.

Tab. 3-2 Výška mikrofonů

číslo mikrofonu	výška od podlahy h [mm]	oblast vlivu hluku
1	520	dýza
2	1120	oblast jádra proudu
3	1720	přechodová oblast
4	2320	vyvinuté turbulentní proudění
5	2820	vyvinuté turbulentní proudění

Mikrofony měří hladinu akustického tlaku L_p [dB]. Jedná se o stav prostředí v daném místě, tedy 1 m od dýzy. Další veličinou je hladina akustického výkonu L_W [dB], která udává vlastnost zdroje hluku. Zjistí se přepočtem z hladiny akustického tlaku L_p jako

$$L_W = L_p + 10 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{Q}\right), \quad (8)$$

kde je

- L_W [dB] hladina akustického výkonu,
 r [m] vzdálenost mikrofonu od zdroje zvuku,
 Q [-] činitel směrovosti.

Člen v závorce představuje povrch poloviny koule o poloměru r . Polovina z toho důvodu, že činitel směrovosti se rovná dvěma (zdroj vyzařuje pouze směrem vzhůru). Dýza je uvažována jako bodový zdroj. Hladiny L_p a L_W jsou přepočítány na hladiny korigované váhovým filtrem L_{pA} [dB] a L_{WA} [dB], což představuje zohlednění rozdílné (zkreslené) vnímavosti lidského ucha oproti měřicím přístrojům zvuku. Hodnoty váhového filtru A v třetinooktávovém pásmu zobrazuje Tab. 3-3.

Tab. 3-3 Hodnoty váhového filtru A [15]

f [Hz]	K_A [dB]	f [Hz]	K_A [dB]
20	-50,4	500	-3,2
25	-44,7	630	-1,9
31,5	-39,4	800	-0,8
40	-34,6	1000	0
50	-30,2	1250	0,6
63	-26,2	1600	1,0
80	-22,5	2000	1,2
100	-19,1	2500	1,3
125	-16,1	3150	1,2
160	-13,4	4000	1,0
200	-10,9	5000	0,5
250	-8,6	6300	-0,1
315	-6,6	8000	-1,1
400	-4,8	10 000	-2,5

Hladiny je potřeba korigovat na hluk pozadí, aby byl eliminován jeho vliv. Také z tohoto důvodu měření proběhlo v nočních hodinách.

Logaritmický průměr hladiny akustického tlaku/výkonu se stanoví ze vzorce

$$\bar{L} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_i} \right), \quad (9)$$

kde je

\bar{L} [dB] logaritmický průměr hladiny akustického tlaku/výkonu,

n [-] počet hodnot,

L_i [dB] i -tá hladina akustického tlaku/výkonu.

Korekce na hluk pozadí je vypočítána pomocí vztahu

$$L_p = 10 \cdot \log(10^{0,1 \cdot L_p} - 10^{0,1 \cdot L_{\text{pozadí}}}), \quad (10)$$

kde je

L_p [dB] hladina akustického tlaku pro danou frekvenci po korekci na hluk pozadí,

L_p [dB] hladina akustického tlaku pro danou frekvenci,

$L_{\text{pozadí}}$ [dB] hladina akustického tlaku pozadí pro danou frekvenci.

Zde dochází ke zdvojení názvu veličin, není ale třeba indexem tyto veličiny rozlišovat, jelikož v příložených souborech i zde, ve výsledcích, je explicitně napsáno, zda je uvažována korekce na hluk pozadí, či nikoliv.

Korekce hladiny akustického tlaku L_p váhovým filtrem A je provedena jako

$$L_{pA} = 10 \cdot \log[10^{0,1 \cdot (L_p + K_A)}], \quad (11)$$

kde je

L_{pA} [dB] hladina akustického tlaku po korekci váhovým filtrem A,

K_A [dB] váhový filtr A.

Vztahem (11) je možno spočítat také korigovanou hladinu akustického výkonu L_{WA} . Místo hladiny akustického tlaku L_p se dosadí hladina akustického výkonu L_W . Za hladiny L_p a L_W možno dosadit jak hladinu korigovanou, tak nekorigovanou hladinu na hluk pozadí. Celková hladina (akustického tlaku/výkonu, korigovaná/nekorigovaná) je pak spočítána ze vzorce

$$L = 10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_i} \right). \quad (12)$$

3.1 Měření hluku experimentální trati

3.1.1 Postup měření

- 1) Zjištění tepelně vlhkostních podmínek prostředí.
- 2) Rozestavění mikrofónů do pozic: (0)-1, (90)-2, (180)-3 a (270)-4.
- 3) Zapojení měření dle schématu na Obr. 3-1 a Obr. 3-2.
- 4) Změření hluku pozadí.
- 5) Zjištění potřebného statického přetlaku přes tunelovou konstantu.
- 6) Zapnutí ventilátoru a nastavení požadované frekvence (střední rychlosti proudění) dle statického přetlaku.
- 7) Změření hluku.
- 8) Posunutí mikrofónů do pozic: (45)-1, (135)-2, (225)-3, (315)-4. Mikrofón č. 5 zůstává na stejné pozici.

9) Změření hluku.

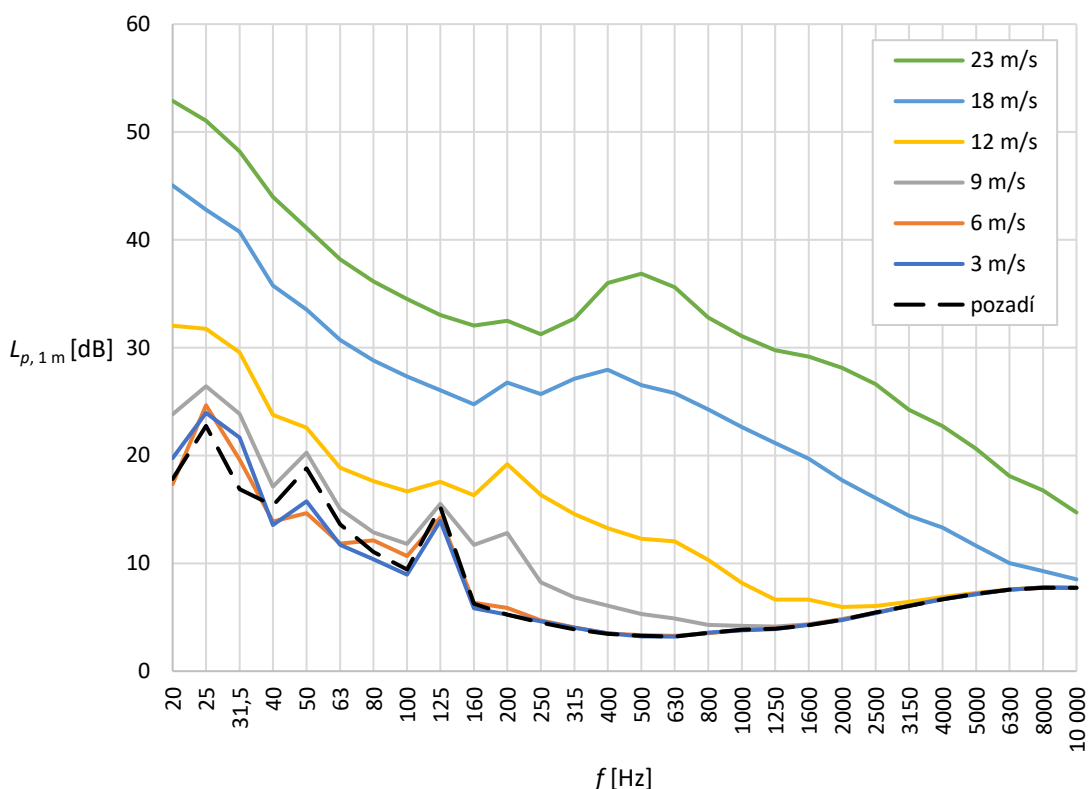
10) Změna rychlosti proudění přes frekvenční měnič, změřeni hluku, pootočení mikrofonů do původní polohy a proměření všech 6 rychlostí stejným postupem.

11) Vypnutí ventilátoru opětovné měření hluku pozadí.

3.1.2 Výsledky a vyhodnocení měření⁵

Z důvodu velkého množství dat jsou přiloženy nejzajímavější výsledky, a navíc také výčet dat z literatury [3] v Tab. 3-4 a Tab. 3-5 pro porovnání a ověření, zda došlo ke zlepšení hluku po rekonstrukci vzduchotechnické trati.

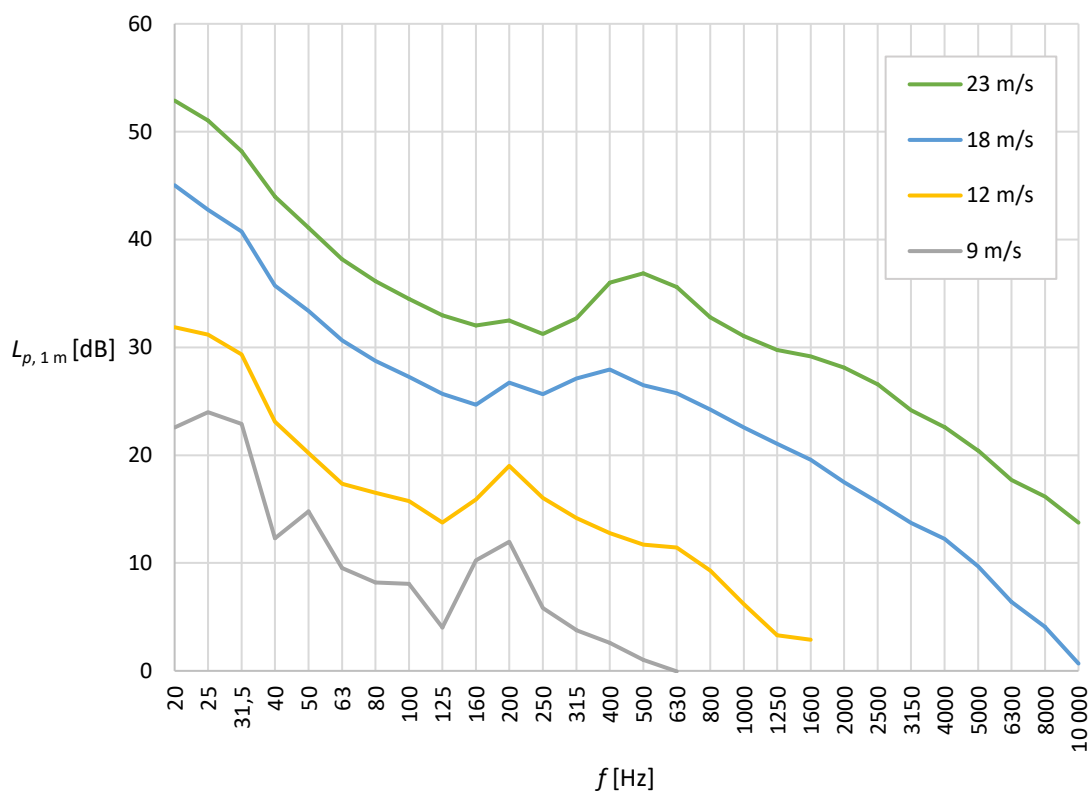
Při nízkých rychlostech proudění se běžně stala skutečnost, že po korekci na hluk pozadí vyšla hodnota hladiny akustického tlaku záporná nebo chybná (z důvodu větší hodnoty $L_{\text{pozadí}}$ než L_p). Tyto hodnoty byly smazány, aby byla vyčíslena správná celková hladina akustického tlaku. To samé bylo provedeno po korekci váhovým filtrem A.



Obr. 3-5 Graf hladiny akustického tlaku okolo dýzy bez korekcí

⁵ Detailní výsledky této úlohy je možno najít na přiloženém CD ve složce: \4_hluk\hluk. Soubor XXms_volny_proud.xlsx obsahuje výpočty hluku (XX je rychlost proudění). Záporné nebo chybné (z důvodu záporného argumentu logaritmu) hodnoty byly smazány a zvýrazněny oranžově pro správné vyhodnocení celkové hladiny. Ve složce \4_hluk\volny_proud\neupravene jsou tyto hodnoty nesmazané.

Na Obr. 3-5 je vyobrazena frekvenční závislost hladiny akustického tlaku bez korekcí ve vzdálenosti 1 m od osy konce dýzy. Barvy reprezentují průběhy rychlostí proudění. Je patrné, že hladiny pro rychlosti $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ kopírují průběh hladiny akustického tlaku pozadí (černá čárkovaná křivka) a u některých frekvencí jsou hodnoty dokonce nižší. To znamená, že v těchto místech se hluk trati a dýzy nijak neprojevoval. Lokální extrémy hluku pozadí je možno pozorovat na frekvenci 25 Hz, 50 Hz, 125 Hz. Od rychlosti $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ se začíná projevovat hluk dýzy s lokálním extrémem na frekvenci 200 Hz. Při nastavení nejvyšší rychlosti bylo subjektivně vnímáno narážení proudu vzduchu do stropu pokrytého mřížkou. Tento aerodynamický hluk vznikl při obtékání mřížky a je možné jej pozorovat v grafu na frekvencích 400 Hz až 630 Hz.



Obr. 3-6 Graf hladiny akustického tlaku okolo dýzy po korekci na hluk pozadí

Graf na Obr. 3-6 zobrazuje hladiny akustického tlaku po korekci na hluk pozadí. Je vidět, že u rychlosti $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ se lokální extrém na 50 Hz stále projevuje, nicméně nízké frekvence se velmi snadno přenáší prostředím a zdroj tohoto hluku nebyl vypátrán. Rychlosti $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nebyly vyhodnoceny z důvodu splynutí s hlukem pozadí. Pro rychlost $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ od 630 Hz výše je hluk na úrovni pozadí, pro rychlost $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je to od 1600 Hz.

Tab. 3-4 Hladiny akustického výkonu A dýzy

před rekonstrukcí trati [3]				
w_s [$m \cdot s^{-1}$]	6,4	9,2	12	18,3
L_{WA} [dB]	8,8	19,2	26,2	38,6
po rekonstrukci trati				
w_s [$m \cdot s^{-1}$]	6,0	9,2	12,0	18,0
L_{WA} [dB]	9,9	15,9	25,8	40,4

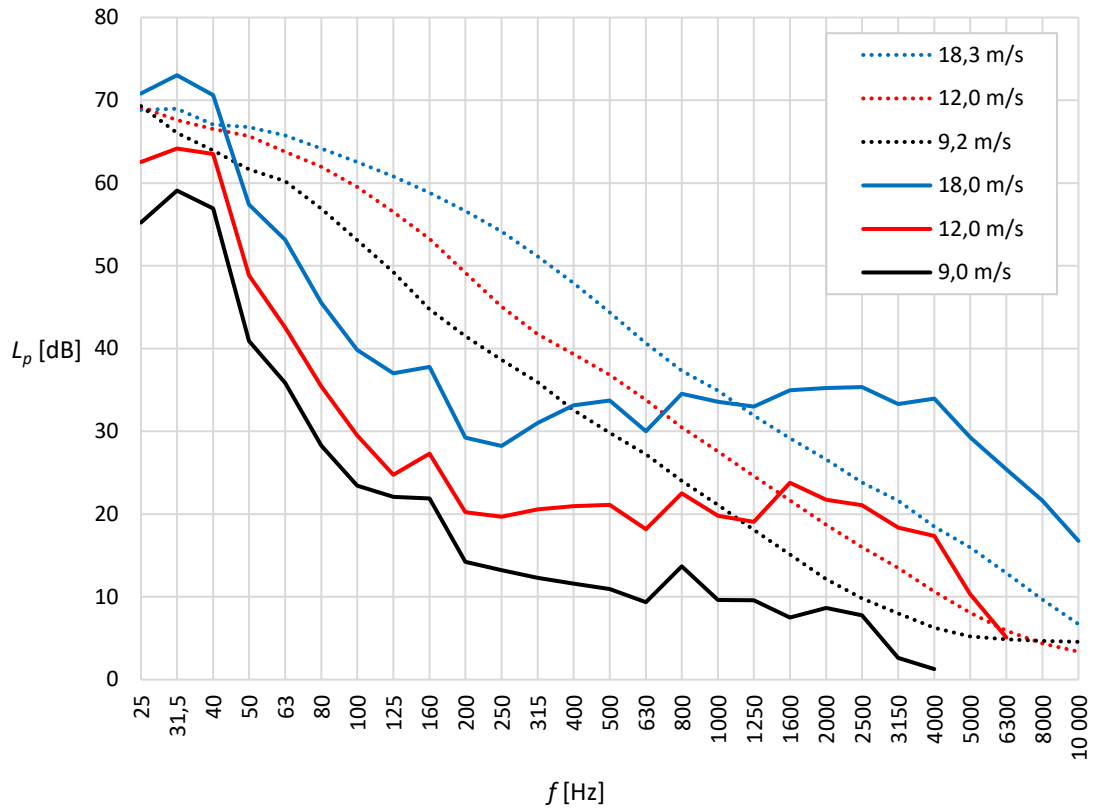
V Tab. 3-4 jsou závislosti hladin akustického výkonu A dýzy na střední rychlosti před rekonstrukcí trati a po ní. Hladiny jsou srovnatelné, což není překvapivé, jelikož dýza nebyla měněna, ani upravována.

Tab. 3-5 Hladiny akustického tlaku A v expanzní komoře

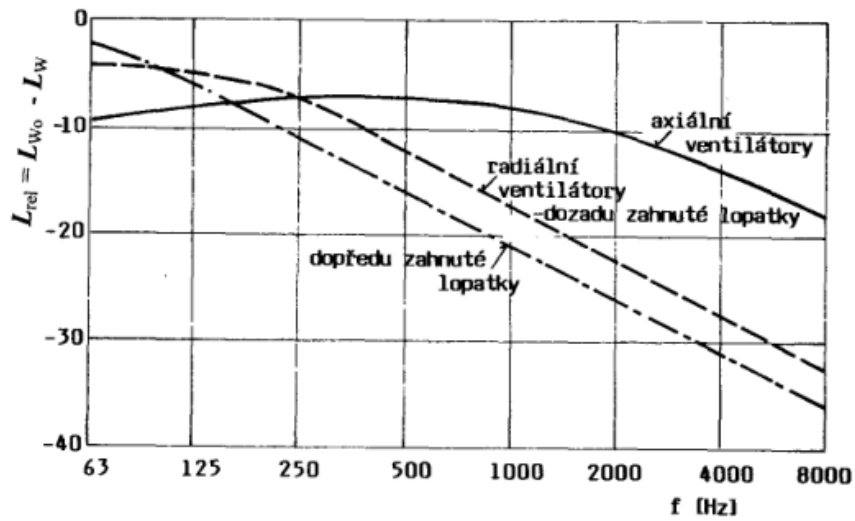
před rekonstrukcí trati [3]						
w_s [$m \cdot s^{-1}$]	3,9	6,4	9,2	12,0	18,3	pozadí
L_{pA} [dB]	23,6	34,0	42,8	48,8	54,3	16,4
po rekonstrukci trati						
w_s [$m \cdot s^{-1}$]	3,0	6,0	9,0	12,0	18,0	pozadí
L_{pA} [dB]	13,1	18,3	26,1	34,3	45,9	17,0

V Tab. 3-5 jsou vidět celkové hladiny akustického tlaku A měřeného v expanzní komoře v závislosti na střední rychlosti proudění vzduchu. Je patrné, že došlo ke snížení hluku po rekonstrukci. Hluk pozadí je srovnatelný.

Na Obr. 3-7 jsou zobrazeny průběhy akustického tlaku v expanzní komoře na frekvenčním spektru. Barevně jsou odlišeny rychlosti, přičemž tečkovaný průběh představuje situaci před rekonstrukcí. Při porovnání s Obr. 3-8 je na něm vidět typický průběh relativní hladiny pro radiální ventilátor, což značí, že před rekonstrukcí se hluk od ventilátoru značně projevoval. Po rekonstrukci jsou zaznamenány výraznější nízké frekvence, které se snadno přenáší prostředím, a proto je obtížné je utlumit. Pro rychlosti $12 m \cdot s^{-1}$ jsou v grafu znatelné vyšší hodnoty hladin od frekvence 1250 Hz. Zdrojem může být aerodynamický hluk od zúžené části potrubí před výtlačkem do expanzní komory (viz Obr. 1-1).



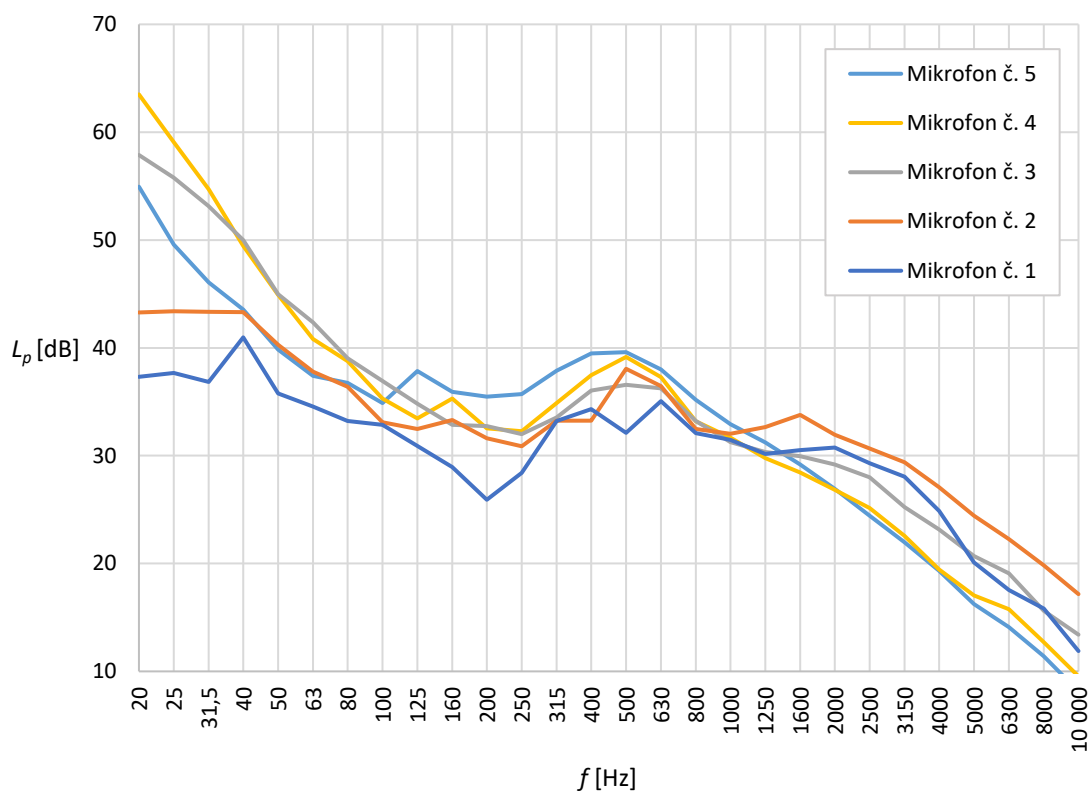
Obr. 3-7 Graf hladiny akustického tlaku v expanzní komoře po korekci na hluk pozadí (porovnání před a po rekonstrukci)



Obr. 3-8 Relativní spektrum ventilátorů [7]

3.2 Vyhodnocení frekvenční závislosti hluku volného proudu

3.2.1 Výsledky a vyhodnocení měření⁶



Obr. 3-9 Hladina akustického tlaku okolo dýzy po korekci na hluk pozadí

Na Obr. 3-9 je graf závislosti hladiny akustického tlaku na frekvenci pro jednotlivé mikrofony. Jejich výška od podlahy byla popsána v Tab. 3-2. Je patrné, že nejvíce se projevují vysoké frekvence u mikrofonu č. 2, který je situován ve výšce hrany konce dýzy. Mikrofon zaznamenal lokální extrém hladiny na frekvenci 500 Hz a 1600 Hz.

Nejvýraznější nízké frekvence jsou zaznamenány u mikrofonu č. 4, který je ve výšce 2320 mm nad podlahou.

U nejnižší položeného mikrofonu č. 5 je patrná tónová složka na frekvenci 125 Hz. U tohoto mikrofonu je dominantní pásmo od 125 Hz do 1000 Hz.

⁶ Detailní výsledky této úlohy je možno najít na příloženém CD ve složce: \4_hluk\volny_proud. Soubor XXms_volny_proud.xlsx obsahuje výpočty hluku (XX je rychlost proudění). Záporné nebo chybné (z důvodu záporného argumentu logaritmu) hodnoty byly smazány a zvýrazněny oranžově pro správné vyhodnocení celkové hladiny. Ve složce \4_hluk\volny_proud\neupravene jsou tyto hodnoty nesmazané.

Mikrofon č. 1, jenž je nejnižší (u paty dýzy), vykazuje nejmenší hodnoty akustického tlaku do frekvence 800 Hz. Poté (jako u mikrofonu č. 2) převažuje vliv vysokých frekvencí.

Mikrofony č. 1 a 2 (částečně i mikrofon č. 3) tedy nejvíce ovlivnila oblast jádra proudu a jsou u nich nejvýraznější vysoké kmitočty. Mikrofon č. 3 se nachází v přechodové oblasti a společně s mikrofonem č. 4, který je již v oblasti vyvinutého turbulentního proudění, dominují nízké kmitočty. Mikrofon č. 5 s největší pravděpodobností zaznamenal hluk šířící se od mřížky na stropě laboratoře, od níž vznikal aerodynamický hluk při obtékání proudem vzduchu.

4 ZÁVĚR

Byly proměřeny potřebné parametry nové vzduchotechnické experimentální trati z hydraulického i akustického hlediska. Pro měření se systémem CTA byl vypracován manuál, jenž by mohl posloužit jako vodítko pro další práce s tímto systémem. V rámci manuálu byl vytvořen program pro vyhodnocení dat získaných z měření tímto systémem. Nachází se na příloženém CD⁷. Součástí programu je návod pro práci s ním.

Při hydraulickém měření se projevovala deformace dýzy vyšší intenzitou turbulence. Jako zásadní pro měření rychlosti se ukázala volba uchycení sondy 55P11 zahnutým do 90°. Toto uchycení je zobrazeno na Obr. 2-5. V místě sevření do čelistí, které jsou připevněny k rameni 3osého polohovacího zařízení, je vhodné zvětšit průměr uchycení použitím izolační pásky z důvodu zajištění proti natáčení vlivem vibrací, jež vznikají při posouvání sondy. Důležité je před spuštěním samotného měření zapnout ventilátor v trati na maximální výkon a alespoň 10 min nechat vyrovnat tepelně vlhkostní parametry mezi akustickou laboratoří a sousední dílnou, v níž je umístěno sání vzduchotechnické trati. Pro zrovnoměnění proudu vzduchu by bylo vhodné jednak opravit nerovnost dýzy a jednak umístit do prodlužovacího dílu dýzy lamely, které svou strukturou připomínají tvar plástve.

Vzduchotechnická trať byla proměřována z hlediska akustiky na frekvenčním třetinooktávovém spektru od 20 Hz do 10 000 Hz. Oproti původnímu konceptu bylo dosaženo zlepšení celkové hladiny akustického tlaku A minimálně o 8,5 dB. Z grafu na Obr. 3-7 je patrné, že hluk ventilátoru byl rekonstrukcí utlumen, projevují se pouze nízké frekvence, které se obtížně tlumí, jelikož se snadno přenáší prostředím. Lidské ucho je ale méně citlivé na nižší frekvence a subjektivně nebyl v akustické laboratoři hluk těchto frekvencí registrován. Až při vyšších rychlostech proudění (od $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) se negativně projevoval aerodynamický hluk vyzařovaný při obtékání mřížky umístěné na stropě akustické laboratoře. Pro co největší potlačení hluku pozadí je potřeba provádět experiment v nočních hodinách mezi 24. a 4. hodinou. Nízké frekvence mohou pocházet také z přilehlých

⁷ Cesta: \1_rychlostni_pole\dantec.xlsm nebo \2_tunelova_konstanta\dantecXY.xlsm.

halových laboratoří a hluk se v tomto případě šíří konstrukcí. Řešením pro eliminaci tohoto hluku by mohlo být pružné uložení akustické laboratoře nazývané „místnost v místnosti“ (angl. Box in Box).

Práce se z časového nedostatku nezabývá vyhodnocením nejistot. Nicméně ověření přesnosti CTA bylo provedeno dalšími dvěma měřicími přístroji – vrtulkovým anemometrem testo 435 a termo-anemometrem AHLBORN ALMEMO 2890-9 a byla zjištěna odchylka 2,1 % při maximální rychlosti proudění. U hluku je v literatuře [3] počítáno s nejistotou měřicí aparatury PULSE ± 2 dB.

Pro práci tohoto rozsahu byl tabulkový procesor Microsoft Excel dostačující. Pro detailnější zobrazení grafů a kvalitnější práci s nimi (zvláště při zobrazování povrchových trojrozměrných grafů) by dalším krokem bylo nasnadě použít program MATLAB společnosti MathWorks. Zpracováno je obrovské množství dat, proto všechny výsledky nemohly být zpracovány v tištěné podobě práce, ale jsou k dispozici na příloženém CD.

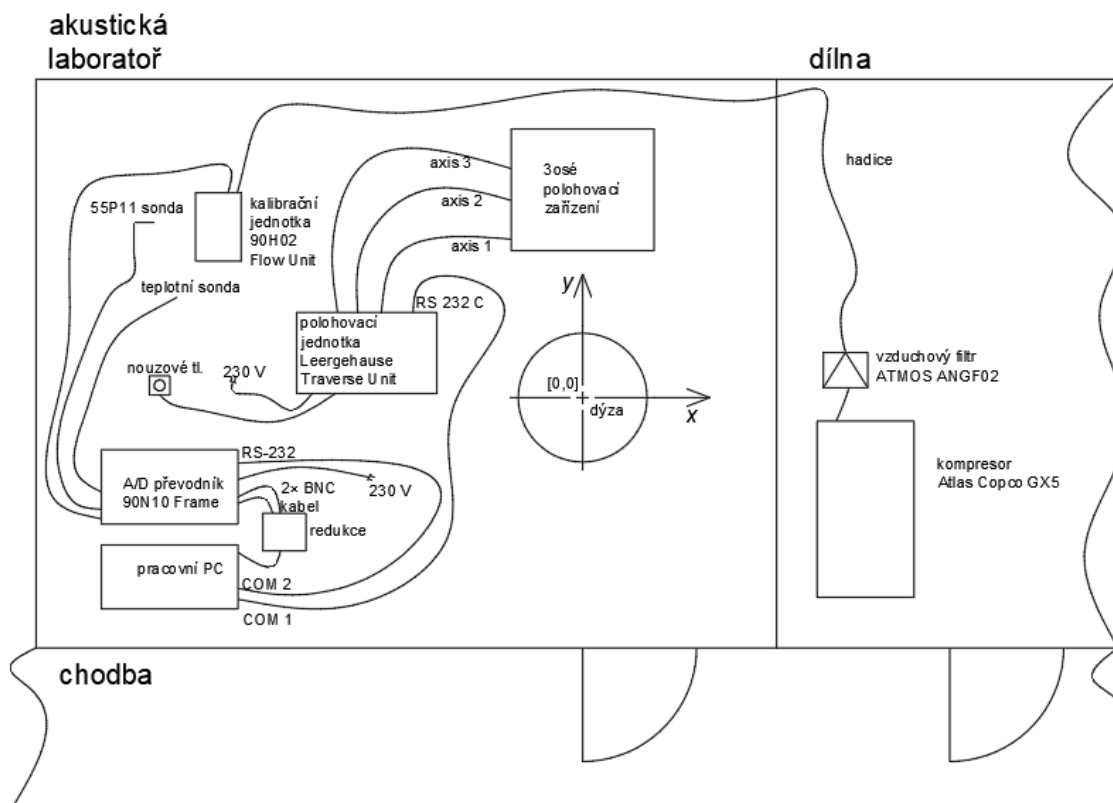
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Zdravotní účinky hluku. *Státní zdravotní ústav* [online]. Praha: QCM, c2007-2008 [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/zdravotni-ucinky-hluku>
- [2] Nařízení vlády č. 217/2016 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací
- [3] KRÁLÍČEK, J. *Hluk koncových elementů VZT*. Praha, 2014, 122 s. Diplomová práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [4] PUTTA, L. *Optimalizace distribuce vzduchu*. Praha, 2000, 156 s. Disertační práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [5] KUČERA, M. *Aerodynamické zdroje hluku při nízkých Machových číslech*. Praha, 2010, 167 s. Disertační práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [6] KRÁLÍČEK, J. *Hluk zařízení techniky prostředí*. Praha, 2016, 38 s. Studie pro disertační práci. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [7] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04847-9.
- [8] KRÁLÍČEK, J., KUČERA, M. Aerodynamický hluk lopatkové VZT mříže vs. kruhového válce. *Vytápění, větrání, instalace*. 2016, **25**(5), 268-273. ISSN 1210-1389.
- [9] NOVÝ, R. Aerodynamický hluk při extrémně nízkých rychlostech proudění vzduchu. *Vytápění, větrání, instalace*. 2012, **21**(4), 152-157. ISSN 1210-1389.
- [10] KAUSHIK, M., KUMAR, R., HUMRUTHA G. Review of Computational Fluid Dynamics Studies on Jets. *American Journal of Fluid Dynamics* [online]. 2015, **5**(A), 1-11 [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: <http://article.sapub.org/10.5923.s.ajfd.201501.01.html>
- [11] MATUŠKA, T. *Experimentální metody v technice prostředí*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2005, 200 s. ISBN 80-01-03291-4.
- [12] JØRGENSEN, F. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide*. Skovlunde, 2002, 56 s. Dostupné také z: <https://www.dantecdynamics.com/how-to-measure-turbulence-practical-guide>

- [13] GÁBOR, T. *Aerodynamická interakce dvou vozidel* [online]. Brno, 2010, 59 s. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/2676>. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.
- [14] JEŽEK, J., VÁRADIOVÁ, B., ADAMEC J. *Mechanika tekutin*. Dotisk 3. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 150 s. ISBN 80-01-01615-3.
- [15] JANOVSÝ, J. *Hluk a vibrace motorů motocyklů a jejich vliv na lidského činitele* [online]. Pardubice, 2009, 49 s. [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/33489>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.

PŘÍLOHOVÁ ČÁST

1 Zapojení měřicího zařízení CTA



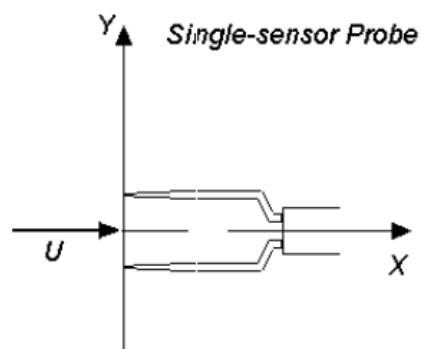
Obr. P-1 Schéma zapojení měřicího zařízení CTA

Na Obr. P-1 je vidět schéma pro zapojení systému CTA. Hlavní součástí jsou komponenty popsány v Tab. P-1.

Tab. P-1 Soupis hlavních komponent

název	označení
A/D převodník	90N10 Frame
polohovací jednotka	Leergehause Traverse Unit
3osé polohovací zařízení	
kalibrační jednotka	90H02 Flow Unit
pracovní PC	
kompresor	Atlas Copco GX5
vzduchový filtr	ATMOS ANGF02



Vzduchový filtr slouží proti vniknutí mazacího oleje, kapiček zkondenzované vody nebo jiných cizích částic do kalibrační jednotky. Tyto cizí částice by totiž mohly při kalibraci poškodit sondu anemometru. 1D sonda 55P11, která je využívána v této práci, je složená ze dvou hrotů, mezi nimiž je veden tenký žhavený drátek o průměru 5 μm . Proto je zapotřebí přistupovat k sondě obzvlášť opatrně. Musí se dbát především na to, aby se drátek nepřetrhl nárazem či jiným nedopatřením při manipulaci. Sonda je upnutá v držáku 55H20. Uchycení držáku je voleno tak, aby proud vzduchu směřoval zepředu kolmo na špičky hrotů podle Obr. P-2.



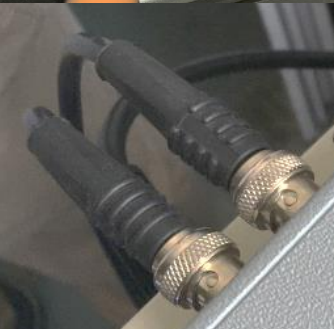




Obr. P-2 Směr proudícího vzduchu vůči sondě 55P11 [12]

Druhou používanou sondou je sonda teplotní. Obě jsou připojeny k A/D převodníku 90N10 Frame kabelem typu BNC. Soupis všech propojovacích kabelů a redukcí je uveden v Tab. P-2.







Tab. P-2 Soupis použitých propojovacích kabelů a redukcí

označení	popis	foto
9090B0012	propojení kalibrační jednotky s A/D převodníkem	
RS-232/COM 2	propojení A/D převodníku s PC	

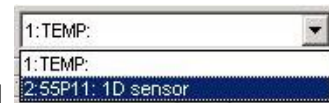
RS 232 C/COM 1	propojení polohovací jednotky s PC	
Concab kabel	propojení polohovací jednotky s polohovacím zařízením (oranžový kabel)	
BNC kabel	propojení A/D převodníku s redukcí k PC (šedá plechová krabice); připojení sond k A/D převodníku, sonda 55 P11 je propojena kabelem A1863 (4 m dlouhý)	
redukce k PC/AMP	šedá plechová krabice, na konektoru vyryto AMP	
nouzové tlačítko	připojení k polohovací jednotce	
napájecí kabel	napájení A/D převodníku, polohovací jednotky a PC	




Kalibrační jednotka a kompresor se vzduchovým filtrem je propojen vzduchovou hadicí.

2 Obsluha programu StreamWare







1. Otevřeme program StreamWare na pracovním PC.
2. Vytvoříme svůj projekt: „New Database“ .
 - a. Dle našich požadavků umístíme a pojmenujeme soubor, poté klikneme na tlačítko „Otevřít“.
 - b. Potvrdíme dialogové okno „This is an empty database...“.
 - c. V „New Project“ zadáme „Project ID Name“ a potvrdíme tlačítkem „OK“.
 - d. Potvrdíme dialogové okno „Setup indicates that no A/D board has been selected...“.
 - e. Zvolíme ovladač A/D převodníku: „National Instruments AT/PCI-M10-16E-1“.
 - f. Potvrdíme dialogové okno „Setup indicates that no probes...“.
 - g. Objeví se okno „Systém Configuration“.
 - i. V něm klikneme na „CTA Frame“  a vybereme správný sériový port „COM“ dle toho, ve kterém portu je A/D převodník připojen (možno dohledat – zezadu na PC je u každého ze dvou portů vyražené malé číslo).
 - ii. Klikneme na teplotní sondu „Temperature Probes“ .
 - iii. Klikneme na 1D sondu „1D Wire Probes“ , zvolíme model „55P11“ a klikneme na „Další“.
 - iv. V okně „Supports“ vybereme model „55H20“ a klikneme na „Další“.
 - v. V okně „Cables“ vybereme model „A1863“ a klikneme na „Dokončit“.
 - vi. Klikneme na tlačítko „Close“.
 - h. Potvrdíme dialogové okno „Would you like to initialize the hardware?“.
 - i. Systém se automaticky nastaví.
 - j. V okně „Hardware Setup“ klikneme na tlačítko „Set overheat...“, zkontrolujeme, zda v kolonce „CTA“ je zaškrtnutá možnost „Stand by“, klikneme na tlačítko „Auto balance“. Poté v kolonce „CTA“ zaškrtneme možnost „Operate“ a klikneme na „Start“ . Dle svého uvážení chvíli vyčkáme na ustálení a poté klikneme na „Stop“ . Klikneme na „Close“.

- k. Klikneme na „Save...“ a opět dle sebe pojmenujeme a potvrdíme tlačítkem „Yes“.
 - l. Klikneme na „Close“.
3. Pravým tlačítkem klikneme na nově vytvořenou položku „Hardware Setup“, která se nachází v levé části pracovní plochy a zvolíme „Set as default“. Obě dialogová okna potvrdíme a vyčkáme, až se systém nastaví.
 4. Nyní je potřeba nastavit polohovací zařízení. V položce „Configuration“ zvolíme „Devices“ a „Traverse drivers...“
 - a. Vybereme model a klikneme na „Setup...“.
 - b. V záložce „Connections“ zkontrolujeme, zda máme zvolený správný sériový port.
 - c. V záložce „Speed and Calibration“ nastavíme pro všechny souřadnice hodnoty na 25 mm/s a 80 pulsů/mm.
 - d. V záložce „Limits and Reference“ je vhodné z hlediska bezpečnosti nastavit limity pro jednotlivé souřadnice polohovacího zařízení.
 - e. Nabídku ukončíme kliknutím na „OK“ (2×).



5. V horní části pracovní plochy vybereme senzor 55P11  a klikneme na tlačítko „New velocity Calibration“ , kde nastavíme parametry pro kalibraci. Je vhodné nechat rezervu pro minimální a maximální rychlost, tzn. že pokud např. měříme maximální rychlostí $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, zvolíme rychlost pro kalibraci vyšší a stejně tak je to s minimální rychlostí, kde volíme rychlost pro kalibraci nižší. Potvrdíme tlačítkem „OK“.
 - a. Potvrdíme dialogové okno „For the range of velocities specified...“, které se ptá na typ vyústky (dýzy) kalibrační jednotky. V této práci je použita vyústka typu 1 (Nozzle number: 1), jež se dle údajů štítku na kalibrační dýze používá pro rychlosti do $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
 - b. Po chvilce automatického nastavování se objeví okno kalibrace. V kolonce „Auto calibration“ klikneme na „Start“ .
 - c. Ponecháme zaškrtnuté „All points“ a potvrdíme tlačítkem „OK“.
 - d. Systém se nyní bude kalibrovat.
6. Po kalibraci klikneme na tlačítko „OK“, zavřeme okno s tabulkou „55P11 Velocity calib. data-[UNTITLED]“, pojmenujeme kalibraci v políčku „Associated ID“

a uložíme tlačítkem „Yes“. Potvrdíme dialogové okno a opět klikneme na tlačítko „Yes a potvrdíme dialogové okno, které se nás ptá na to, zdali chceme nastavit aktuální data pro kalibraci jako výchozí.

7. Klikneme na „Traverse Grid“  a tlačítkem „Cancel“ zavřeme okno „Grid Setup“.
 - a. V souboru s názvem „dantec.xlsm“ (CD: \I_rychlostni_pole\dantec.xlsm) v listu „zadani“ vygenerujeme souřadnice pro polohovací zařízení, přičemž se řídíme návodem, který je v tomto sešitu také obsažen. Tento soubor pomocí flash disku přeneseme na pracovní PC s programem StreamWare. Zde si soubor otevřeme a souřadnice zkopírujeme.
 - b. V programu StreamWare v okně „Traverse-[UNTITLED]“ klikneme pravým tlačítkem na první buňku a zvolíme „Paste“.
 - c. Tabulka by se měla správně vyplnit souřadnicemi X, Y, Z a Angle.
 - d. Zavřeme tabulku se souřadnicemi, objeví se okno pro uložení sítě. Síť pojmenujeme a uložíme tlačítkem „Yes“.
8. V pracovní ploše klikneme na „Default setup“ .
 - a. Klikneme na „Scheduling“ , v kolonce „Number of iterations“ zaškrtneme „Grid dependent“ a tlačítkem „Load“ vybereme námi pojmenovanou síť pro polohovací zařízení, kterou jsme definovali v předchozím bodě 7. d. Nabídku potvrdíme tlačítkem „OK“.
 - b. Klikneme na „Probe Positioning“  a v kolonce „Action“ zaškrtneme „Move traverse directly to position specified in grid“. Potvrdíme tlačítkem „OK“.
 - c. Klikneme na „Data Acquisition“ , kde nastavíme „Sampling freq“ a „Num. samples“ a potvrdíme tlačítkem „OK“.
 - d. Nabídku „Define Default Setup“ zavřeme tlačítkem „OK“.
9. Nyní už jen spustíme měření tlačítkem „Run Default“  v horní části pracovní plochy, pojmenujeme jej a potvrdíme tlačítkem „OK“.
10. Po skončení měření okno s měřením můžeme zavřít a data exportovat v nabídce „File“ možností „Global Export“.
 - a. Klikneme na tlačítko „Options“ a v nabídce „Conversion levels“ zaškrtneme možnost „Velocity from calibration“. Dále zaškrtneme „Temperature

Correction“, nastavíme vhodný počet desetinných míst (5) a potvrdíme tlačítkem „OK“.

- b. V nabídce „Global Export“ zvolíme data pro export a potvrdíme tlačítkem „OK“.
- c. Nakonec vhodně soubor pojmenujeme a exportujeme jej nejlépe do textového souboru (.txt). S daty dále můžeme pracovat v souboru „dantec.xlsx“ podle návodu v souboru obsaženém.