



# CFD ANALÝZA PROUDĚNÍ V OTEVŘENÉM AERODYNAMICKÉM TUNELU

CFD FLOW ANALYSIS IN AN OPEN AERODYNAMIC TUNNEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

LUKÁŠ JURČA

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. TOMÁŠ ČENSKÝ, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Jurča	Jméno: Lukáš	Osobní číslo: 406427
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávající katedra/ústav:	Ústav letadlové techniky		
Studijní program:	Strojírenství		
Studijní obor:	Konstruování podporované počítačem		

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:  
**CFD analýza proudění v otevřeném aerodynamickém tunelu**

Název bakalářské práce anglicky:  
**CFD flow analysis in an open aerodynamic tunnel**

Pokyny pro vypracování:  
Pro vypracování proveďte:  
1. 3D parametrický model vzduchové cesty otevřeného aerodynamického tunelu  
2. CFD analýzu proudění tunelu  
3. Rozbor vstupních a výstupních částí tunelu, postprocessing

Seznam doporučené literatury:  
Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:  
**Ing. Tomáš Čenský Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce:

 Podpis vedoucí(ho) práce

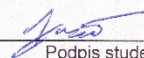
 Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

 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.

28.4.2017 Datum převzetí zadání

 Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem práci vytvořil sám bez cizí pomoci a použil jsem pouze uvedené zdroje a literaturu.

V Praze dne 25.5.2017

.....

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval za rady a poznatky při práci s programem ANSYS a pomoc při vypracování této práce panu Ing. Tomášovi Čenskému, Ph.D. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Jandovi za pomoc s tvorbou geometrie v programu Solidworks.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá aerodynamickými tunely, jejich historií, návrhem a konstrukcí. Tvorbou parametrického modelu vzduchové cesty otevřeného Eiffelova tunelu v CAD softwaru SolidWorks. Dále nastavením jednotlivých sekcí výpočtu v programovém rozhraní ANSYS, vedoucí k CFD analýze proudění v programu Fluent. Nakonec se zabývá zpracováním získaných dat z CFD analýzy, na jejichž základě je docíleno vyhovující geometrie vzduchové cesty.

## **Abstract**

The bachelor's thesis deals with aerodynamic tunnels, their history, design and construction. The thesis also deals with the creation of the parametric model of the flow path of an opened Eiffel tunnel in SolidWorks CAD software. This thesis continues to describe the setting of the individual calculation sections in the ANSYS program interface, leading to CFD flow analysis in Fluent. Finally, it deals with the processing of the obtained data from the CFD analysis, on the basis of which a satisfactory geometry of the air path is reached.

## **Klíčová slova**

Aerodynamický tunel, CFD analýza, Fluent, ANSYS

## **Keywords**

Aerodynamic tunnel, CFD analysis, Fluent, ANSYS

# Obsah

1	Úvod .....	7
2	Aerodynamický tunel .....	8
2.1	První experimenty a rotující rameno .....	8
2.2	První aerodynamický tunel .....	9
2.3	Uzavřený větrný tunel .....	13
3	Projekt a struktura tunelu .....	15
3.1	Části tunelu .....	15
3.2	Ventilátor .....	16
4	Návrh otevřeného aerodynamického tunelu .....	17
4.1	Geometrie vzduchové cesty .....	17
4.2	Korekce geometrie a tvorba sítě v programu ANSYS .....	19
5	CFD analýza .....	20
5.1	Nastavení fyzikálních veličin .....	21
5.2	Nastavení řešiče .....	25
5.3	Výsledky .....	27
6	Post processing .....	28
6.1	Korekce geometrie konfuzoru .....	28
6.2	Rozbor částí vzduchové cesty .....	31
7	Závěr .....	35
8	Bibliografie .....	36

# 1 Úvod

Aerodynamický tunel je měřicí experimentální zařízení pro řešení nejrůznějších aerodynamických problémů, od letových zkoušek prototypů letadel, obtékání nejrůznějších modelů v měřítku, přes balistické zkoušky zbraní až po subsonické, transsonické a supersonické proudění. Každé odvětví experimentů má své výhody a uplatnění, přičemž se nedá žádné vyzdvihovat oproti ostatním. (1)

Historie aerodynamických tunelů sahá od Leonarda da Vinci přes Isaaca Newtona až ke Gustavu Eiffelovi, kteří po řadě experimentů s prototypy létajících strojů, profilů křídel a geometrií lopatek dospěli k potřebě měření vlastností svých prototypů v měřicím tunelu. Díky testování prototypů, modelů v měřítku v aerodynamických tunelech, je experimentálně zjištěno jejich chování v daném prostředí a jejich slabiny a vady, měření vztlaku, odporu, stability a ovladatelnosti. Dnes je měření v aerodynamickém tunelu nezbytnou částí návrhu nových letadel.

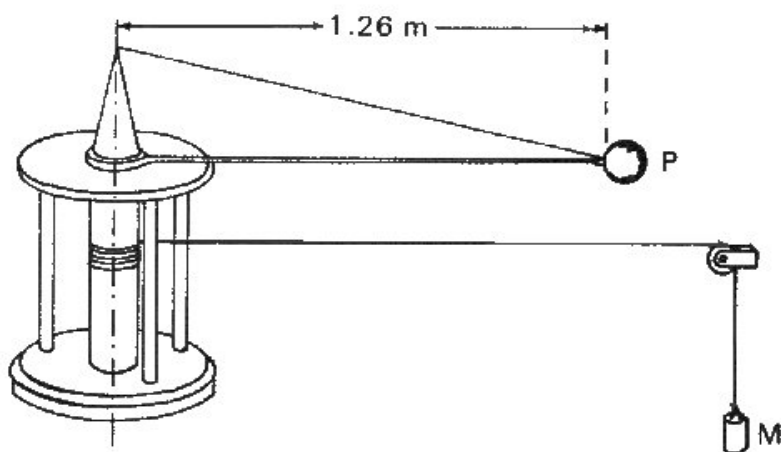
V práci se budeme zabývat odvětvím nízko-rychlostních otevřených aerodynamických tunelů, kde se maximální rychlost proudění pohybuje do  $130 \text{ ms}^{-1}$  neboli kde je zanedbatelná stlačitelnost. (1) Jedná se o otevřený tunel, kde je nasáván vzduch z okolního prostředí a nejedná se o cirkulující uzavřený systém. Pro správnou funkci tunelu požadujeme, aby v měřicí části tunelu bylo rovnoměrné rozložení rychlosti po celém průřezu. Proto je zcela nezbytné provést analýzu vzduchové cesty a získat tak data o navržené geometrii. K návrhu a otestování geometrie tunelu slouží CFD (Computational Fluid Dynamics) analýza proudění, kde pomocí MKP (Metoda Konečných Prvků) řešiče můžeme simulovat proudění a následně z výsledků analýzy upravovat geometrii tunelu.

## 2 Aerodynamický tunel

### 2.1 První experimenty a rotující rameno

Dnes jsou větrné tunely nejrozšířenější zařízení pro měření aerodynamických vlastností modelů ale tunel nebyl prvním testovacím zařízením. Už Leonardo da Vinci a Isaac Newton si uvědomovali že potřebují zařízení pro ustálení a kontrolování proudu vzduchu. Nechat pohybovat model požadovanou rychlostí ve vzduchu nebo nechat stojící model obtékat proudem vzduchu. Oba tyto přístupy byly použity v počátcích letectví pro zjištění aerodynamických vlastností. (2)

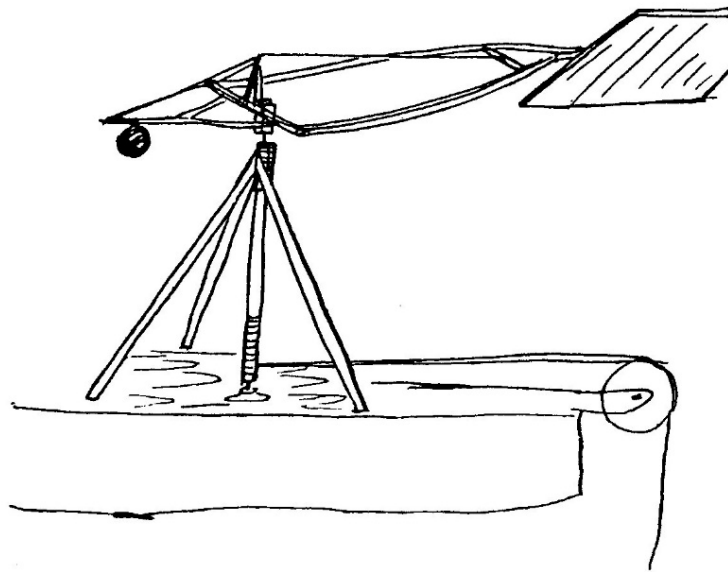
První venkovní zdroje ustáleného proudu vzduchu byl vítr, kdy se model upevnil nad návětrný hřeben nebo v ústí jeskyně. Kvůli nevyzpytatelné přírodě byla tato metoda neefektivní, a tak se přistoupilo k pohybu samotného modelu v bezvětří. Nejednodušší a nejlevnější řešení bylo připevnit model na rotující rameno. První, kdo představil rotující rameno neboli „whirling arm“ byl anglický matematik Benjamin Robins v první polovině 18. století, jehož zařízení bylo poháněné padajícím závažím, které roztáčelo rameno, jak můžeme vidět na Obr.2.1-1, konec ramene dosahoval malých rychlostí pohybujících se do 1 m/s. Na svém zařízení testoval různé tvary tupých pyramid, podlouhlých desek a dalších geometrií které připevnil na konec ramene a roztáčel je do různých směrů. Došel k závěrům, že i když má těleso stejnou plochu průřezu kolmou na směr proudění, tak má jiný odpor proti vzduchu nebo jiný tah, což bylo v rozporu s tím, co postuloval Newton a na čemž byly postaveny základy tehdejšího pohledu na letectví. (2)



Obr.2.1-1 Rotující rameno (3)



Na přelomu 19. století Sir George Cayley použil rotující rameno ve svých experimentech pro měření tahu, vztlaku pro různé profily křídel. Jeho zařízení je vidět na Obr.2.1-2. Na základě naměřených dat navrhl spoustu tipů kluzáků a prvních strojů těžších než vzduch. Jedním z jeho největších objevů byl nový pohled na letectví, až do teď vědci věřili že pohonný systém by měl generovat tah i vztlak ve stejnou dobu, jak tomu dělají ptáci. Ale Cayley byl jiného názoru, chtěl nechat motor generovat pohyb a pohyb vztlak pomocí křídel. Toto rozdělení hnacích a vztlakových funkcí od sebe bylo revoluční v pohledu na letectví. Člověk nemusí stavět letadla a mávat křídly. (2)



*Obr.2.1.-2 Cayleyho rotující rameno (3)*

## 2.2 První aerodynamický tunel

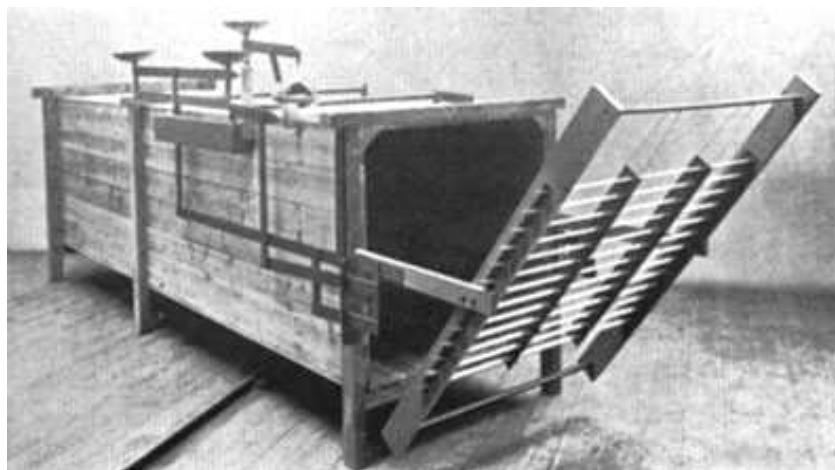
Data získaná metodou rotujícího ramene byli základem mnoha aerodynamických experimentů konce 19. století, mnoha létajících strojů a kluzáků. Problém byl, že metoda získávání dat o modelu připevněném na konci rotujícího ramene byla dosti komplikovaná a nepřesná. Při měření vznikala v okolí modelu velká turbulence, díky níž se nedařilo rozeznat skutečnou relativní rychlost mezi modelem a vzduchem. Dále bylo obtížné připevnit měřicí aparaturu na model rotující vysokou rychlostí. Bylo potřeba přijít s jiným řešením a tím byl větrný tunel. Tunel se skládá z uzavřeného průchodu, kterým proudí vzduch pomocí hnacího zařízení (ventilátoru). Srdcem tunelu je měřicí část, kde je umístěn model, který je obtékán ustáleným proudem vzduchu. Aerodynamické vlastnosti a proudové pole modelu jsou přímo měřeny a zaznamenávány pomocí měřicího zařízení.

Aerodynamických tunelů je mnoho ale svazuje je těchto pět základních vlastností, první je velký kontrolní objem vzduchu a rychlé efektivní měření. Druhou jsou lehce rozeznatelné a měřitelné síly a momenty působící na model. Tahové síly jsou ve směru proudění a dají se lehce reverzovat zpětným chodem ventilátoru. Třetí je ideální rozložení sil, vztahové a boční síly jsou kolmé na tahovou sílu. Třetí je referenční osový systém v měřicí části, který určuje směr blízkého se větrného ekvivalentu letové dráhy. Poslední vlastností je snadné měření aerodynamických sil vůči souřadnicovému systému na nehybném modelu v ustáleném proud vzduchu v měřicí části.

První návrh a konstrukce aerodynamického tunelu proběhla ve Velké Británii, za návrhem stál Frank H. Wenham a konstrukci nakonec zastřešila členská rada letecké společnosti Velké Británie a tak v roce 1871 byl v provozu první otevřený aerodynamický tunel. Měřicí část měla 3,5 m na délku a plochu  $0,5 \text{ m}^2$ , proud vzduchu proudil horizontálně. Vzduch byl hnán do měřicí části pomocí ventilátoru na konci tunelu, který by napájen parním strojem. (2)

Wenham vkládal do tunelu různé tvary a měřil vztahové a tahové síly vzniklé proudícím vzduchem. Z jednoduchého a prostého experimentu dostal zásadní data pro letectví, došel k závěrům, že malé změny úhlů náběhu  $5^\circ$  až  $15^\circ$  povrchů vůči proudícímu vzduchu, mají velký vliv na poměr vztahu a tahu součástí. Což nebylo tak optimistické jako v teorii od Isaaca Newtona. Každopádně tak velký poměr vztahu k tahu podporoval teorii Sira G. Cayleyho, že stačí dodávat pouze tah a ten nám generuje vztah přes křídla. Z výzkumů také vyplynulo, že křídla s úzkým dlouhým profilem mají mnohem větší vztah než mohutná se stejnou plochou. Proto jsou dlouhé a úzké profily křídel využívány u moderních větroňů. Myšlenka aerodynamického tunelu se začala velmi vyplácet. (2)

Další, kdo ustoupil od vířivého ramene a přešel ke konceptu tunelu, byl Hiram Maxim v druhé polovině 19. století, jehož aerodynamický tunel měl 3,7m na délku s měřicí částí o ploše  $0,9 \text{ m}^2$ . Tunel můžeme vidět na Obr.2.2-1. Dvojitý ventilátor vháněl vzduch do měřicí části o rychlosti 80,5 km/h. Díky svým experimentům jako první zjistil, že když je profil křídla prohnutý tak vyvíjí mnohem větší vztah než rovné křídlo. Také zjistil, že celkový tah konstrukce je větší než součet tahů jednotlivých dílců, čemuž se říká aerodynamická interference. Tento koncept demonstroval v roce 1894, když postavil obrovské letadlo, které při vzletu produkovalo tak velký vztah, že se vychýlilo z trati a roztrhlo na kousky. (3)



*Obr.2.2-1 Maximův tunel (3)*

Na začátku 18. století, Horatio Philips se pokusil o experimenty s aerodynamickým tunelem podobným Wenhamovu tunelu, jeho tunel byl čtvercového průřezu  $0,43 \times 0,43$  m a 1,8 m dlouhý, ale oproti Wenhamovu tunelu vyřešil problém s kolísáním proudu vzduchu. Vzduch se nasával přes zužující se vstup do měřicí oblasti stálého průřezu uprostřed tunelu, kde se snížila průtoková plocha, a tedy i zvýšila rychlost nasávaného vzduchu až na 66 km/h. (3)

Nedílnou součástí historie vývoje aerodynamického tunelu byl Francouz Gustave Eiffel, který si uvědomil, že na těleso, které se pohybuje danou rychlostí v klidném vzduchu působí stejné síly jako na stejné nehybné těleso obtékané vzduchem o dané rychlosti. Tento koncept relativního pohybu byl postulován už o 4. století dříve Leonardem Da Vincim a dále rozebírán Isaacem Newtonem a Jeanem le Rond d'Alembertem. Ale nikdo z nich neprovedl experiment, který by teorii potvrdil. Eiffel nepotvrdil, ale přijal teorii relativního pohybu a uvědomil si, že pro opakovatelnost a přesnost experimentů je potřeba tunel a tak v roce 1909 zprovoznil svůj aerodynamický tunel. Postavil ho hned u nohy Eiffelovy věže, využil tak napájení věže, ventilátor byl poháněn motorem o výkonu 50 kW. Ventilátor nasával vzduch skrz testovací část a poté vyfoukával vzduch skrz halu do hlavní místnosti budovy. V měřicí části vzduch dosahoval 20 m/s

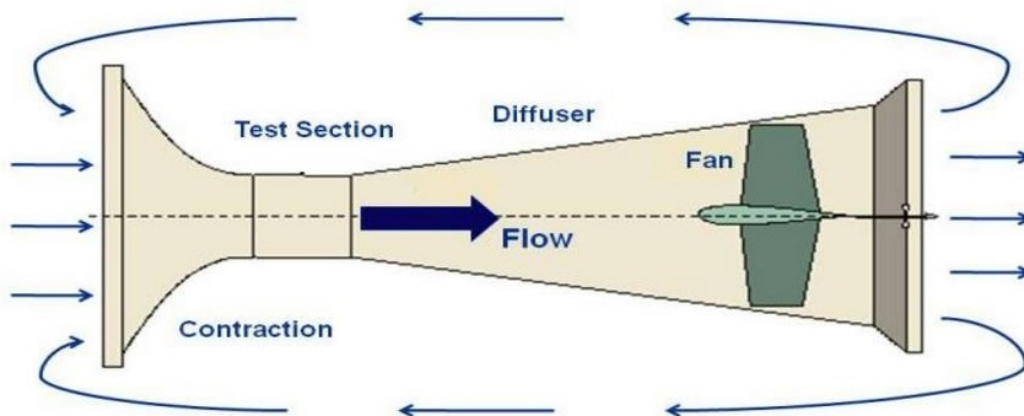
Jedinečnou součástí tohoto tunelu byla oproti předchozím konstrukcím uzavřená testovací oblast, což vedlo k ustálení proudu vzduchu v měřicí části a zamezení vnějším rušivým elementům. Vzduch proudil vstupním trychtýřem skrz stěnu do měřicí uzavřené místnosti a dále do výstupní části tunelu. Díky uzavřené měřicí části byly podmínky pro měření více ustálené než u předešlých tunelů, kde byl vždy měřicí prostor otevřený. Také měřicí přístroje byly odděleny mezizábranou od měřicí části s proudícím vzduchem, tak aby nedocházelo k rušení proudu vzduchu a měření bylo co možná nejpřesnější. Dnes je tento typ tunelu s uzavřenou

testovací částí znám jako Eiffelův aerodynamický tunel, tehdejší Eiffelův tunel můžeme vidět na Obr.2.2-2. (4)



*Obr.2.2-2 Eiffelův větrný tunel (4)*

Po spuštění svého aerodynamického tunelu v roce 1909, provedl řadu experimentů na tělesech a konečně potvrdil teorii relativního pohybu. Jeho model aerodynamického tunelu byl hlavním představitelem otevřeného aerodynamického tunelu, dnes znám jako Eiffelův typ větrného tunelu. Jedním z hlavních charakteristických prvků otevřeného Eiffelova tunelu je systém bez zpětné cirkulace vzduchu, vzduch je nasáván za pomoci ventilátoru z vnějšího prostředí a vyfukován na konci tunelu zpět, jak můžeme vidět na Obr.2.3-1. (5)

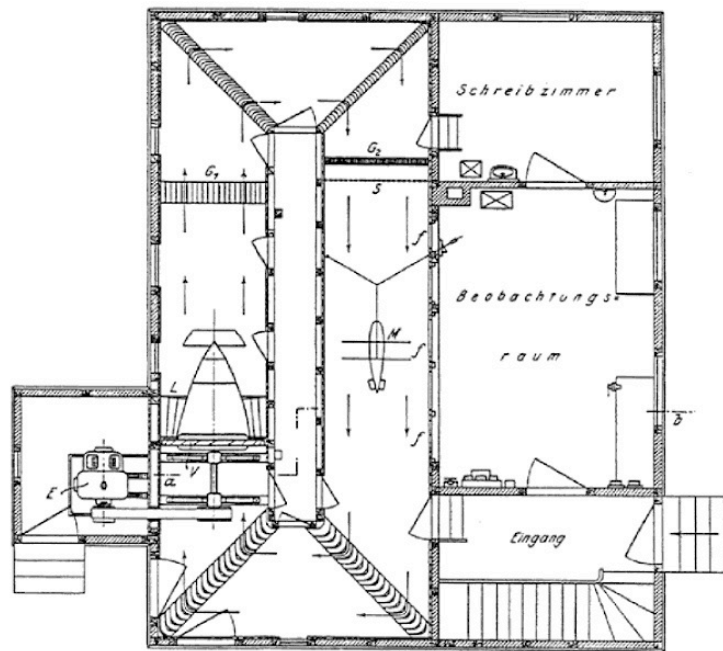


*Obr.2.3-1 Otevřený tunel (6)*

## 2.3 Uzavřený větrný tunel

Druhý tip větrného tunelu představil poprvé v roce 1906 v Německu Ludwig Prandtl. Ve společenství plánování poháněných letadel, Prandtl vedl práce zaměřené na měření tahu, tlaku a rychlosti přenášených na trupech letadel, přičemž představil dvě řešení těchto problémů: Eiffelův otevřený tunel nebo novinku kterou byl uzavřený větrný tunel. Uzavřený větrný tunel, který Prandtl navrhl, byl založen na rekuperaci energie, zatím co Eiffelův větrný tunel nasával

klidný vzduch a urychloval ho na požadovanou rychlost vždy znovu a znovu, uzavřený Prandtlův tunel měl uzavřený oběh vzduchu a tudíž se vzduch po rozběhu zpomaloval pouze geometrií tunelu a třením což vedlo k znatelné úspoře energie. Uzavřený Prandtlův větrný tunel se poprvé zprovoznil v roce 1908 v Göttigenu a byl prvním svého druhu v historii, Prandtlův náskres tunelu můžeme vidět na Obr.2.3-



Obr.2.3-3 Prandtlův větrný tunel (5)

2. Ventilátor byl umístěn v části

potrubí kruhového průřezu o průměru 2 m a plynule navazoval na rozsáhlé potrubí o čtvercovém průřezu 2x2 m uzavřené do smyčky zpět k ventilátoru. Ve čtyřech rozích tunelu byly rozmístěny vodící lopatky pro usměrnění proudu vzduchu. Technické zpracování tohoto tunelu bylo vskutku na vysoké úrovni, zařízení pro měření tahu, vztlaku, dokonce i momentu vůči těžišti letounu, většina měřicího zařízení byla od George Fuhrmanna. Na počátku první světové války se mnoho rozvojových ale i základních výzkumů provádělo na tomto prvním uzavřeném aerodynamickém tunelu. (5)

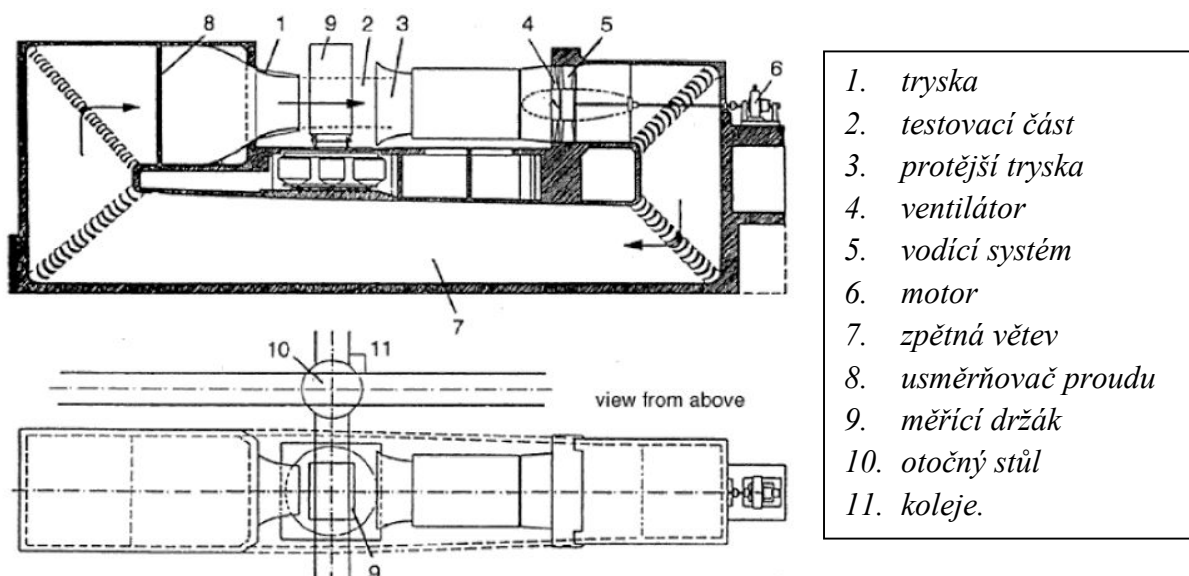
Po úspěšných experimentech měřených v tunelu, Prandtl seskupil závěry nejrůznějších pokusů a sepsal požadavky na větrný tunel, které zní:

1. Slouží k přímé praktické aplikaci a získávání žádaných dat.
2. Skrz řízenou řadu experimentů jsou objevovány zákony tahu.
3. Kontrola výsledků, porovnání s teorií.

4. Položení našich vlastních výsledků získaných na co nejpřesnějším základě pomocí pečlivého studování měření rychlosti, tlaku a třecích ztrát na stěnách tunelu, a porovnání těchto dat se skutečným modelem pomocí teorie podobnosti. (5)

Tyto cíle, které vytyčil Prandtl platí obrazně i dnes a jsou brány jako návod pro práci s větrnými tunely. Prandtl si také uvědomoval důležitost aerodynamického tunelu pro průmysl, letectví a hlavně výzkum v oblasti proudění tekutin. Do roku 1924 se v tunelu experimentálně testovaly balóny, síly působící na ploché a prohnuté profily, síly působící na křídla při letu u země, síly působící na dvojplášník, testy s vrtulovými modely, systematické výzkumy vyšetřující zákony tahu. (5)

Snaha o objevování zákonů tahu vedly Prandtla k zlepšení tunelu, navrhl přidání trysky před měřicí komorou a tím rapidně zvýšit rychlost v měřicí části, jak tomu bylo u Eiffelova tunelu v Paříži, kde se díky trysce maximální rychlost zvýšila z 10 m/s na 23 m/s. Tryska nejen že urychlila proud vzduchu v měřicí části, ale vedla i k jeho ustálení, což vedlo Pradtla k zlepšení vlastního uzavřeného tunelu. Návrh nového designu presentoval v roce 1911, ale díky první světové válce byl tunel zkonstruován až v roce 1917. Koncept, takzvaného tunelu Göttingenského typu, je dodnes modelem pro všechny subsonické, transsonické a supersonické větrné tunely. Prandtl sepsal a publikoval rozbor všech aspektů tohoto větrného tunelu: výběr typu větrného tunelu, design a kontrola chodu, konstrukce trysky, konstrukce difusoru a směrových lopatek. Na Obr.2.3-4 můžeme vidět Prandtlův tunel 2. generace s označením jednotlivých částí. (5)



Obr.2.3-4 Prandtlův tunel 2. generace. (5)

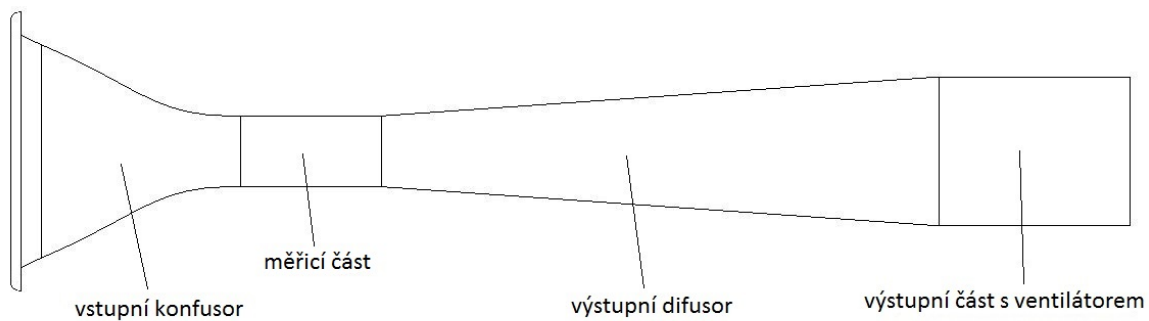
V tomto tunelu proběhlo mnoho fundamentálních modelových testů, nejčastěji pod záštitou leteckých společností. Byly testovány profily a geometrie křidel, trupy letadel a chladiče. Vznikly ještě další generace tunelů, „tunel I“ a „tunel II“ kde probíhaly experimenty v oblasti proudění tekutin až do roku 1948, kdy byly z rozkazů Britské okupace uzavřeny. Výsledky experimentů a výzkumů ve větrném tunelu nesly výsledky u letadel a celkově rozvoj znalostí proudění tekutin a obtékání těles.

## 3 Projekt a struktura tunelu

Tunel má sloužit k testům, za nichž se do proudu vzduchu mohou přidávat pevné i kapalné fáze. Jedná se o otevřený tunel Eiffelova typu, prosávaný, tedy s ventilátorem umístěným za výstupním difusorem. Požadavkem byla CFD (Computational Fluid Dynamics) analýza vzduchové cesty takového tunelu.

### 3.1 Části tunelu

Jedná se tedy o otevřený prosávaný tunel Eiffelova typu. Tunel se skládá z vstupního konfuzoru, měřicí části, výstupního difusoru a výstupní části s ventilátorem. Náčrtes geometrie v měřítku můžeme vidět na Obr.3.1-1.



*Obr.3.1-1 Hlavní části tunelu*

#### **vstupní konfuzor:**

Jedná se o „trychtýřovitou“ vstupní část tunelu, jejíž úkol je zajistit ustálení rychlosti v měřicí části a dosáhnout co nejideálnějšího rychlostního profilu. Je zde velmi důležité, aby nedocházelo k odtržení proudu vzduchu od vnitřních stěn konfuzoru, naopak k co

nejlepšímu přilnutí a kopírování profilu. Proto je návrh správné geometrie klíčový a bylo třeba zpětné korekce geometrie podle výsledků analýzy.

#### **Měřicí část:**

Zcela klíčová část pro kontrolu CFD analýzy proudění. Jedná se o kruhovou trubku konstantního průřezu. Pro měření je nezbytné, aby rychlost v této části tunelu měla ustálený rychlostní profil, nedocházelo zde k odtržení proudu a následným turbulencím, které by narušily měření.

#### **Výstupní difusor:**

Difusor je část kruhového průřezu, po délce s rozšiřujícím se průměrem. Konfusor má odvádět proud vzduchu z měřicí části tak, aby nejlépe vůbec nedocházelo k odtržení proudu vzduchu od stěn tunelu a tvorbě turbulence. K tomu bylo třeba navrhnout správnou délku a sklon difusoru.

#### **Výstupní část s ventilátorem:**

Výstupní část za difusorem je kruhového konstantního průřezu. Je zde umístěn ventilátor s tlumičem, ventilátor nasává vzduch přes vstupní konfusor skrz měřicí část a difusor.

### **3.2 Ventilátor**

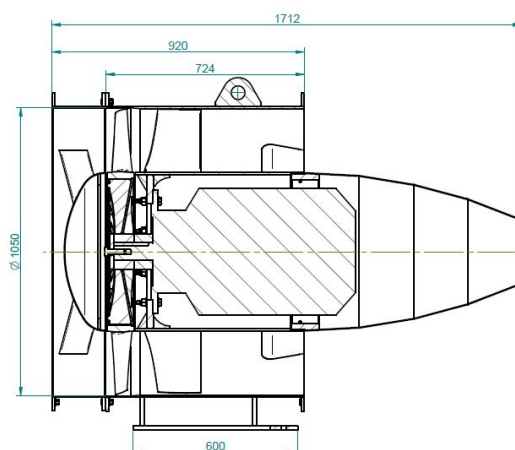
Zadavatelem bylo požadováno, aby byl ventilátor umístěn ve výstupní části tunelu, i s ohledem na tuhé a kapalné části v proudu vzduchu. Bylo nutné, aby proud vzduchu s pevnými i kapalnými částmi nebyl ovlivněn ventilátorem a dosáhlo se co nejvyšší kvality proudu v měřicí části, k čemuž by v případě vstupního ventilátoru nedošlo. Bylo by sice možné, pomocí usměrňovacích plechů na vstupu docílit usměrněného proudu vzduchu za ventilátorem, ale i tak bychom nedosáhli takové kvality proudu. Ze zkušeností zadavatele by ventilátor měl snést takové zatížení bez problému a schvaluje provoz s vodou a prachem.

Pro provoz v takovém prostředí byl zvolen axiální ventilátor. Radiální či radiálně axiální ventilátor není vhodný pro náš otevřený aerodynamický tunel, pevné části v proudu vzduchu by mohli snadno zanést prostor lopatek, v těchto ohledech je axiální ventilátor mnohem lepší varianta. Pro realizaci byl vybrán axiální ventilátor APH 1050, který můžeme vidět na Obr.3.2-1, základní rozměry z výkresové dokumentace jsou na Obr.3.2-2.





Obr.3.2-1 Ventilátor APH 1050



Obr.3.2-2 Základní rozměry

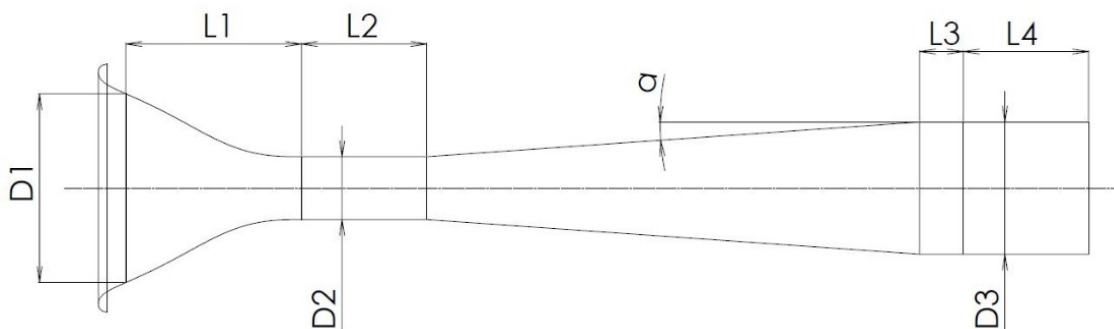
## 4 Návrh otevřeného aerodynamického tunelu

Před samotnou analýzou proudění v tunelu, bylo nutné vytvořit parametrický model vzduchové cesty, geometrii tunelu. Parametrický model z důvodů následného post processingu a korekce geometrie. Pro CFD analýzu byl zvolen výpočtový program ANSYS, kde v projektovém rozhraní Workbench bylo možné vytvořit výpočetní schéma. Pro náš problém bylo třeba provést korekci geometrie, ANSYS obsahuje CAD program DesignModeler v kterém byli provedeny úpravy. Následovala tvorba sítě a pak CFD Analýzu v programu Fluent. Obrázky geometrie vzduchové cesty, sítě a další jsou brány z již výsledné vyhovující geometrie, původní geometrií a jejími korekcemi se budeme zabývat v kapitole Post processing.

### 4.1 Geometrie vzduchové cesty

V návrhu modelu vzduchové cesty neboli objemu vzduchu procházející tunelem, bylo vycházeno z geometrie otevřeného Eiffelova tunelu, který byl blíže rozebrán v předešlé kapitole.

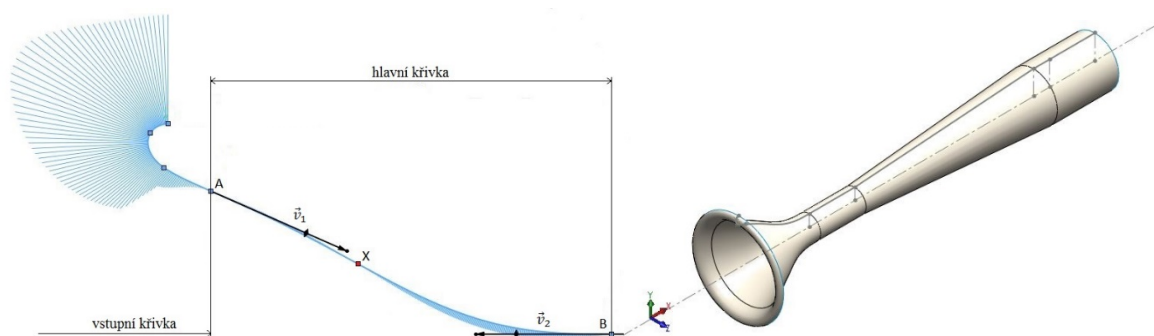
Nejdříve byl vytvořen 3D model vzduchové cesty v programu, pro jehož tvorbu byl zvolen CAD software SolidWorks. 3D model byl navržen jako tenkostěnný prvek tvořený křivkou. Prvotní rozměry modelu byly po diskusi odhadnuty s ohledem na proporcionalitu tunelu, poměry jednotlivých částí. Jedná se o parametrický model, lze tedy měnit základní rozměry jednotlivých částí pomocí proměnných kót, při korekci rozměrů není tedy nutné zasahovat přímo do modelu, stačí zadat požadovaný rozměr v tabulce rovnic a model se aktualizuje, jediná část modelu, u které bylo potřeba provést ruční korekci bylo zakřivení okraje vstupního konduktoru. Proměnné parametry modelu jsou uvedeny na Obr.4.1-2.



Obr.4.1-2 Proměnné parametry modelu

D1-vstupní průměr, D2-průměr měřicí části, D3-výstupní průměr, L1-délka konduktoru, L2-délka měřicí části, L3-délka prostoru pro tlumič, L4-délka prostoru pro ventilátor,  $\alpha$ -sklon difusoru

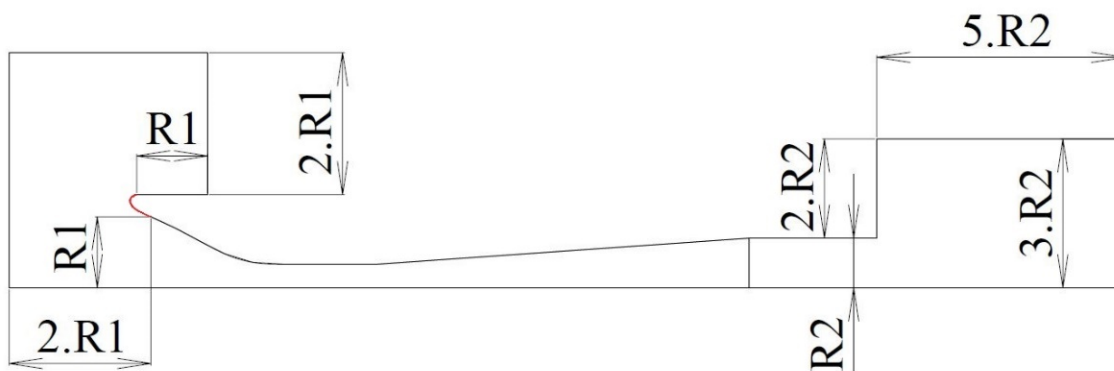
Problematická část geometrie vzduchové cesty je konfuzor. Konfuzor je „trychtýř“ tvořený křivkou, kterou můžeme vidět na Obr.4.1-3. Vstup konfuzoru, okraj „trychtýře“, je tvořen zakřivenou částí (vstupní křivka), ta přechází se stejnou křivostí v bodě A na křivku 1. stupně s jedním inflexním bodem X, na obrázku hlavní křivka. Dále navazuje na měřicí část v bodě B, kde má křivka nulovou derivaci. Křivost je znázorněna modře, pomocí tečných vektorů  $\vec{v}_1$  a  $\vec{v}_2$  můžeme měnit křivost hlavní křivky, čehož bylo využito v post processingu v korekcích geometrie.



Obr.4.1-3 Křivka tvořící konfuzor

Obr.4.1-4 3D parametrický model tunelu

Výsledný 3D parametrický model vzduchové cesty můžeme vidět na Obr.4.1-4. CFD analýza umožňuje využít symetrie modelu a tím znatelně zmenšit počet prvků sítě, což vede k rychlejšímu výpočtu. Z 3D modelu tedy stačilo použít pouze polovinu plochy, která vznikla řezem rovinou XY, výsledkem byla 2D plocha vzduchové cesty. K této ploše bylo nutné ještě přidat tzv. přidavné plochy, které budou charakterizovat okolní prostředí. Kompletní 2D model vzduchové cesty s přidavnými plochami je vidět na Obr.4.1-5, rozměry jsou uvedeny v poměru k vstupnímu nebo výstupnímu poloměru.



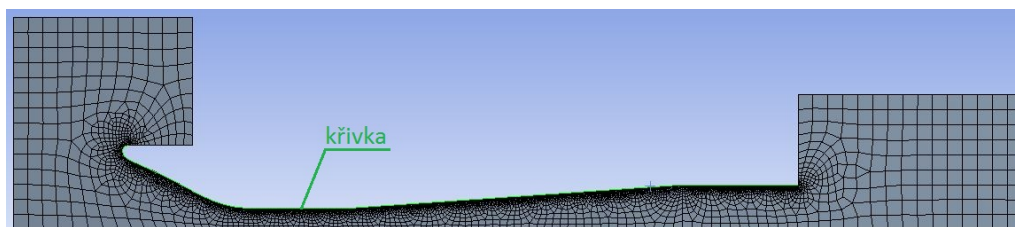
*Obr.4.1-5 2D model vzduchové cesty*

Výsledný 2D model byl plně závislý na rozměrech 3D modelu, jednalo se o sestavu navázanou na 3D model s přidáním plochami o daných rozměrech uvedených na Obr.4.1-5. Při změnách 3D modelu stačilo aktualizovat 2D model a rozměry se přizpůsobily, jediné co bylo potřeba vždy zkorrigovat bylo vstupní zaoblení konfuzoru, které je červeně zvýrazněno na Obr.4.1-5. 2D model vzduchové cesty byl následně vyexportován ve formátu IGES a mohlo se přikročit ke korekcím a tvorbě sítě v programu ANSYS.

## 4.2 Korekce geometrie a tvorba sítě v programu ANSYS

Po vytvoření základní geometrie bylo přistoupeno ke korekci geometrie v CAD programu DesignModeler (DM). V DM bylo třeba srovnat importovaný 2D model vzduchové cesty z programu SolidWorks se souřadnicovým systémem, nejlépe pro další operace bylo srovnat 2D geometrii do plochy XY kde směr proudění odpovídal směru osy Y.

Před CFD analýzou bylo potřeba zkorigovanou geometrii síťovat čtyřúhelníkovou sítí, pro síťování je v rozhraní WorkBench program Mesh, kde lze nastavit parametry sítě. Základní síť je tvořena 2D sítí s čtvercovými prvky. Zjemnění sítě je podél celé křivky tvořící geometrii vzduchové cesty. Výslednou síť se zvýrazněnou křivkou můžeme vidět na Obr.4.2-1.



*Obr.4.2-1 Síť*

Dalším důležitým krokem bylo pojmenování jednotlivých křivek, z kterých je složena plocha. Názvy křivek slouží k automatickému přiřazení okrajových podmínek jednotlivým částem, pro změny geometrie v post processingu, bylo zvolení správných názvů klíčové.



*Obr.4.2-2 Jednotlivé sekce*

Pojmenování jednotlivých částí je na Obr.4.2-2, kde A-tlak na vstupu (pressure-inlet), B a C-stěna tunelu (wall), D-osa symetrie modelu (symmetry), E-výstupní tlak (pressure-outlet), F-ventilátor, tlakový spád (fan). Nyní je výpočetní model vzduchové cesty připraven k CFD analýze.

## 5 CFD analýza

CFD (Computational Fluid Dynamics) analýza, je jedním ze základních kamenů numerického modelování. V našem případě se zabýváme analýzou proudění tekutiny (vzduchu) skrz vzduchovou cestu, jejíž geometrii byla navržena ve 4. kapitole. Z analýzy dostáváme řešení rychlostí, tlaků a turbulencí v navrženém modelu vzduchové cesty a lze vidět, zda je geometrie tunelu vhodná nebo zdali je potřeba upravit.

V programu ANSYS fluent bylo před samotným výpočtem třeba provést řadu nastavení jak fyzikálních veličin (setup), tak řešiče (solver). Některá nastavení bylo třeba korigovat po CFD analýzách, jak je dále rozebráno v kapitole Post processing. V této kapitole (CFD analýza) se jedná již o finální vyhovující nastavení.

## 5.1 Nastavení fyzikálních veličin

Jedná se o nastavení před samotným výpočtem, řešičem. Jde o předpoklady a základní parametry výpočtu, ve Fluentu jsou seskupeny do stromu, který si následně rozebereme.

Nastavení:

### Hlavní:

Jedná se o nastavení hlavních parametrů, které dále ovlivňují síť a řešič modelu.

- typ

Výběr řešení, můžeme řešit problém na základě tlaku (Pressure-based) nebo hustoty (Density-Based), pro náš případ bylo vhodné problém řešit na základě tlaku, kde budeme simulovat proudění pomocí algoritmu založeném na řešení Navier-Stokesových rovnic. (7)

- rychlost (Velocity Formulation)

Řešení rychlosti (Velocity Formulation), kde můžeme zvolit mezi absolutní a relativní rychlostí. Náš případ je nehybné těleso protékané tekutinou, jde tedy o absolutní rychlost (Absolute). (7)

- čas

Závislost řešení na čase, řešení ustálené, stacionární proudění nebo nestacionární. V našem případě řešíme proudění stacionární. (8)

- prostor (2D Space)

Poslední důležité nastavení v tomto bloku je nastavení prostoru (2D Space), toto nastavení se týká pouze 2D problémů. Pro řešení byl zvolen typ planárního prostoru (planar) což je vhodné pro 2D problémy. (8)

### Modely:

Zde se vybírá z obecných výpočetních modelů, které jsou podporovány ANSYS Fluent. Jedná se o:

- model vícefázového proudění
- energetický model
- viskózní model
- model záření

- model výměny tepla
- modely speciální
- diskretizovaný model
- model tavení
- akustický model
- EWF model

Pro náš případ jednorozměrného proudění vzduchu, kdy nás zajímalo chování tekutiny v měřicím prostoru. Díky symetrii řešíme pouze 2D problém proudění v jednom směru. Z toho věcně vyplývá, že pro náš případ mají smysl modely energetické a viskózní. Energetický model nebylo nutné řešit u našeho problému, přeměny energie v tunelu nás v tomto případě nezajímají. Proto byl zvolen viskózní model výpočtu.

Viskózní model pracuje s laminárním nebo turbulentním prouděním tekutiny. Přičemž obsahuje řadu nastavení, specifikací viskózních modelů. Je zde na výběr od tekutin s nepatrnou viskozitou (inviscid flow) přes laminární proudění až po mnoho modelů turbulentních. V našem případě jde zcela jistě o turbulentní proudění, a tudíž jako model výpočtu byl zvolen model  $k-\omega$  standardní.

Modely  $k-\omega$  jsou dvourovňové modely, které dobře predikují záporný tlakový spád, mezní vrstvy a odtržení proudění. Model standart je vhodný k řešení proudění pro nízká Reynoldsova čísla, stlačitelnost a smykové proudění. Je vhodný pro proudění v blízkosti stěny ale se vzdáleností od stěny, jeho přesnost klesá. Pro náš případ by měl být dostačující. (9)

Ostatní nastavení konstant, Prandlova čísla, atd. necháváme v defaultních hodnotách přednastavené Fluentem.

### **Materiály:**

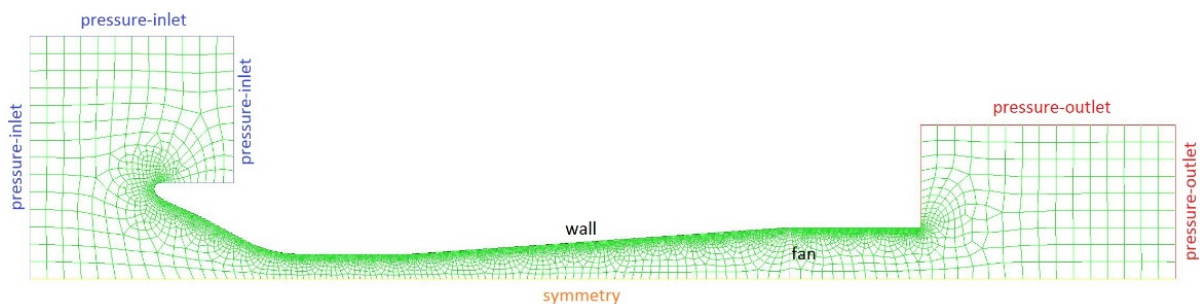
V nastavení materiálů se vybírá medium, s kterým budeme počítat. Je zde výběr z dvou základních skupin médií, tekutiny a pevné látky, obě odvětví obsahují již konkrétní materiály. Dají se přidávat a modifikovat vlastní materiály, pro náš případ volíme již v základu definovaný vzduch. Sice by se mělo zohlednit proudění pevných a kapalných fází, ale zadavatel nedefinoval konkrétní požadavky, takže je analýza provedena se vzduchem.

## Podmínky buněk sítě:

Zde přiřazujeme síti buněk vlastnosti, zda se jedná o tekutinu či pevnou látku. Vlastnosti buněk se odvíjí od zvoleného média v materiálech. V celém našem modelu bude proudit pouze vzduch, jiné materiály se nevyskytují.

## Okrajové podmínky:

Nastavení okrajových podmínek pro jednotlivé úseky našeho modelu. Díky chytrému pojmenování jednotlivých částí v kapitole 4.2, nám Fluent automaticky přiřadil typy podmínek dle názvů. Okrajové podmínky definují okraje, stěny tunelu (wall), symetrii modelu (symmetry), vstupní tlak (pressure-inlet) a výstupní tlak (pressure-outlet) na okrajích přidaných ploch, a tlakový spád na ventilátoru (fan). Je třeba kontrola přiřazených okrajových podmínek, zda sedí typ (type) který požadujeme. Přiřazené okrajové podmínky můžeme vidět na Obr.5.1-1.



Obr.5.1-1 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly přiřazeny k daným částem modelu, vlastnosti těchto částí byly defaultně přednastavené Fluentem. Některé podmínky bylo třeba změnit:

- tlak na vstupu (pressure-inlet)

V základním nastavení, se zabýváme parametry hybnosti (Momentum). Referenčním okrajem (Reference Frame), který necháváme jako absolutní, v našem případě se nejedná o pohyblivý okraj modelu. Nastavení základních hodnot tlaku necháváme defaultní, přednastavené Fluentem. Metoda volby směru (Direction Specification Method), určuje metodu, kterou použijeme k určení směru toku. Zvolili jsme směrový vektor (Direction Vektor), tedy definujeme počáteční vektor směru proudění, necháváme defaultní hodnoty vektoru. U nastavení turbulence, volíme metodu výpočtu (Specification Method), volíme metodu určující parametry turbulence podle odhadnutých hodnot intenzity a hydraulického průměru (Intensity and Hydraulic Diameter), zde je více možností volby, pro náš výpočet

jsme zvolili tuto metodu. Je třeba nastavit základní přibližné parametry této metody, intenzitu a hydraulický průměr. Intenzitu volíme odhadem 0,1 % a hydraulický průměr na základě vstupního průměru konfuzoru tedy 1,5 m. (7)

- tlak na výstupu (pressure-outlet)

U této okrajové podmínky jsou stejná nastavení jako u předchozího vstupního tlaku, opět zde nastavujeme referenční okraj (Reference Frame) jako absolutní (Absolute). U volby metody směru (Direction Specification Method) se po iteracích ověřilo zvolit metodu normály (Normal to Boundary) jako lepší řešení. Podobně tomu bylo u metody řešení turbulence (Specification Method), zde se vyplatilo použít model k- $\omega$  (K and Omega). Výchozí parametry pro výpočet turbulence u tohoto modelu se volí turbulentní kinetická energie k [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ] a míra disipace energie  $\omega$  [ $\text{s}^{-1}$ ], volíme  $k=20 \text{ m}^2/\text{s}^2$  a  $\omega=1 \text{ s}^{-1}$ . (7)

- ventilátor (fan)

U okrajové podmínky pro ventilátor je zcela nezbytné nastavit tlakový spád (Pressure Jump), aby došlo k proudění vzduchu. Správný směr proudění je dán souřadnicovým systémem, případně lze nastavit zpětný chod ventilátoru. Tlakový spád byl zadán konstantou, zpočátku 2 kPa. (7)

### **Dynamická síť (Dynamic Mesh):**

Jedná se o možnost nastavit tzv. dynamickou síť, kdy se jednotlivé buňky a jejich hranice mohou posouvat vzhledem k jiným hranicím. Síť se může měnit, stahovat, rozpínat, reagovat na zatížení v čase. Nebo se jedná i o pohybující rámy, modely jejichž stěny se pohybují nebo mění v čase. Naše geometrie se nemění v čase, síť a jednotlivé buňky se nehýbou, proto dynamickou síť nevyužijeme. (7)

### **Výchozí hodnoty (Reference Values):**

Nastavení výchozích hodnot, můžeme nastavit výpočet výchozích hodnot z okrajových podmínek zvolné části. Referenční hodnoty byly ponechány tak jak je defaultně nastavil Fluent. (8)



## 5.2 Nastavení řešiče

V této části bylo nastaveno řešení CFD simulace, jedná se o vícero poslopně jdoucích nastavení analýzy.

### Metody řešení (Solution Methods)

Jedná se o specifikace parametrů spojených s metodou řešení použitou při výpočtu. Nastavujeme schéma, kterým se bude výpočet řídit. Použily jsme jednoduché schéma pro řešení. Po výběru schématu následovalo nastavení prostorové diskretizace (Spatial Discretization), kde se nastavuje (8):

- gradient

Metoda výpočtu gradientu. Gradienty jsou potřeba pro konstrukci hodnot skalárních ploch na jednotlivých buňkách, také pro výpočet difuze a derivací rychlosti. Gradient dané proměnné se používá k diskretizaci konvekce a difuze v rovnicích zachování průtoku. Výpočet gradientů je ve Fluentu počítán z metod: Green-Gauss Cell-Based, Green-Gauss Node Based nebo Least Squares Cell-Based. Volíme metodu Least Squares Cell-Based. (7)

- tlak

Závisí na typu řešení v hlavním nastavení u fyzikálních veličin, zvolili jsme řešení na základě tlaku. Pro toto řešení potřebujeme vybrat diskretizaci, přesnost, vybrali jsme přesnost druhého řádu (Second Order). Jedná se o vhodné zpřesnění řešení problému na základě tlaku. (8)

- hybnost

Zde se jedná stejně jako v případě tlaku o diskretizaci, neboli přesnost daného řešení, výběr modelu pro řešení o dané přesnosti. Budeme řešit s přesností druhého řádu (Second Order Upwind). (8)

- turbulentní kinetická energie

Řešíme s přesností druhého řádu (Second Order Upwind).

- turbulentní disipace energie

Řešíme s přesností druhého řádu (Second Order Upwind).

### **Nastavení řešení (Solution Controls):**

Nastavení parametrů řešení, necháváme defaultní, přednastavené Fluentem. (8)

### **Monitoring (Monitors, Report Definitions, Report files, Report Plots):**

V těchto nastaveních můžeme nastavit nejruznější zprávy a zobrazení během řešení. Přednastavení od Fluentu, již zobrazování reziduí během výpočtu obsahuje, což je vše co potřebujeme. (8)

### **Inicializace řešení (Solution Initialization):**

Zde je na výběr mezi standardní a hybridní inicializací. Jedná se o inicializace řešení tokového pole. (8)

- Standardní

Umožňuje definovat hodnoty průtokových proměnných a inicializovat tokové pole na tyto hodnoty. (8)

- Hybridní

Jedná se o seskupení mezních interpolačních metod, kde proměnné jako teplota, turbulence a další jsou automaticky dosazeny na základě průměrných hodnot nebo částečných odhadů. (8)

Pro naše řešení jsme zvolili hybridní inicializaci, kdy jsou počáteční hodnoty řešení odhadnuty na základě interpolačních metod.

### **Výpočetní aktivity (Calculation Activities):**

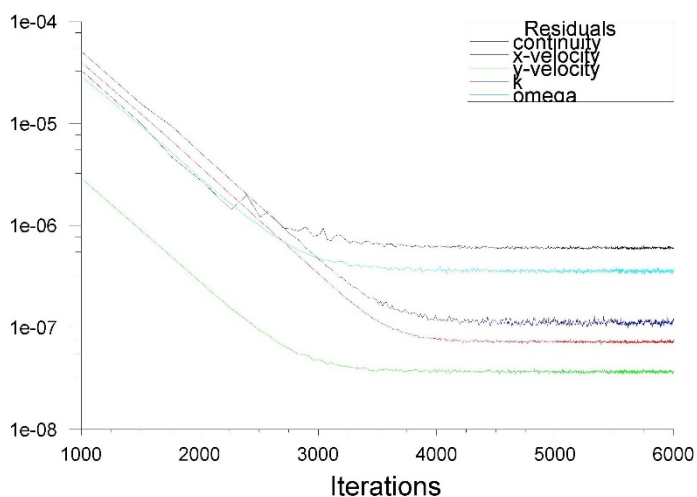
Nastavení různých aktivit, které můžeme provádět při výpočtu, jde o ukládání, exportování souborů, animování řešení a další. Necháváme defaultní nastavení. (8)

## Spuštění výpočtu

Finální nastavení před samotným zahájením výpočtu. Zde nastavujeme počet iterací ve výpočtu. Odhadneme počet iterací na tisíc a po spuštění sledujeme výpočet vykreslovaný do grafu, ten můžeme vidět na grafu

Graf 5.2-1 Iterace reziduí

5.2-1. Zobrazené iterace jednotlivých reziduí jsou: rychlost ve směru X a Y, hodnoty turbulentní kinetické energie  $k$  a disipace energie  $\omega$ . Z grafu vidíme, že po tisíci iteracích nám stále rezidua klesají. Iterace ve Fluentu se skládají za sebe, nedochází k přepsání, k tomu dojde pouze při nové inicializaci. Pokud tedy



při výpočtu nedojde k ustálení křivek, pak stačí provést další iterace, než se dostaneme k požadovanému výsledku. Snažíme se dojít k ustálení jednotlivých reziduí na stabilních hodnotách tak, aby nedocházelo k rapidním změnám výslednic. Proto pokračujeme v iteracích. Z grafu můžeme vidět, že rezidua přestala klesat až po třech tisících iteracích, na čtyřech tisících se již ustálily všechny rezidua na přibližně stálých hodnotách, provedli jsme ještě další dva tisíce iterací a jak je vidět, rezidua se již nemění a můžeme tedy považovat výpočet za ustálený. (8)

## 5.3 Výsledky

V této části stromu si můžeme zobrazit výsledky analýzy, výsledky se dají zobrazovat jak při běhu výpočtu, tak samozřejmě po dokončení. Z nabídky bylo pro vyhodnocení výsledků využito grafické vykreslení a pomocí grafu. (8)

### Grafika:

Můžeme zde zobrazovat výsledky analýzy graficky pomocí kontur, vektorů nebo směrových čar (path lines). Pomocí těchto prostředků si můžeme nechat vykreslit průběh tlaku, rychlosti, hustoty, turbulence, což je velmi užitečné pro korekci geometrie vzduchové cesty. (8)

### Grafy:

Zde byla využita možnost vykreslení XY grafu, kde je možné nastavit křivku z které program vykreslí graf. Čehož bylo využito pro kontrolu průběhu rychlostního profilu v měřicí části.

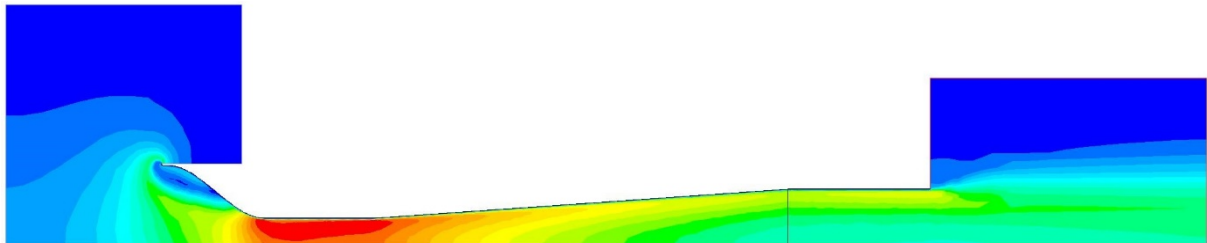
Samozřejmě jsou zde možnosti k vykreslení nejen rychlosti ale i tlaku, hustoty, turbulence, rezidují a dalších. (8)

## 6 Post processing

Výsledky analýzy bylo nutné zpracovat a vyhodnotit. Post processing se zabývá výsledky získanými z analýzy, v našem případě byly rozebrány výsledky CFD analýzy a jejich dopad na geometrii tunelu.

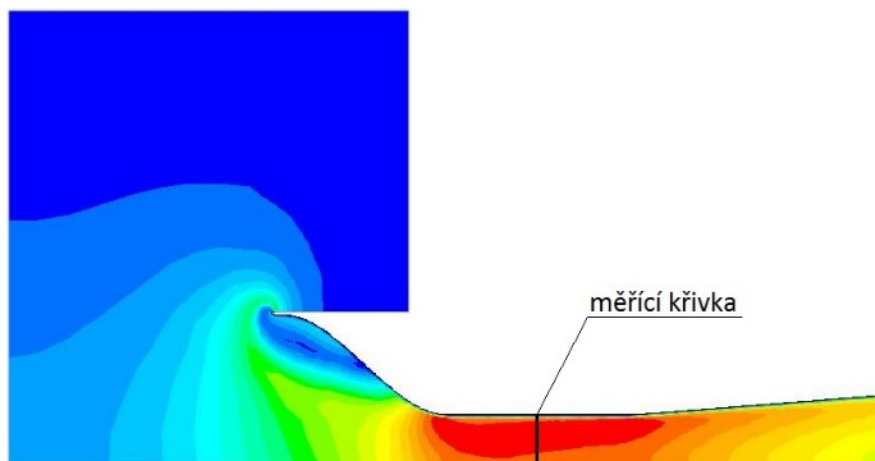
### 6.1 Korekce geometrie konfusu

Po první analýze první geometrie, bylo třeba zkorrigovat nastavení Fluentu, použít výpočetní model řešení, který bude nejlépe vyhovovat problému, tato nastavení byla probrána v 5. kapitole. Byly získány výsledky analýzy vzduchové cesty, rychlostní pole je na Obr.6.1-1. Jak



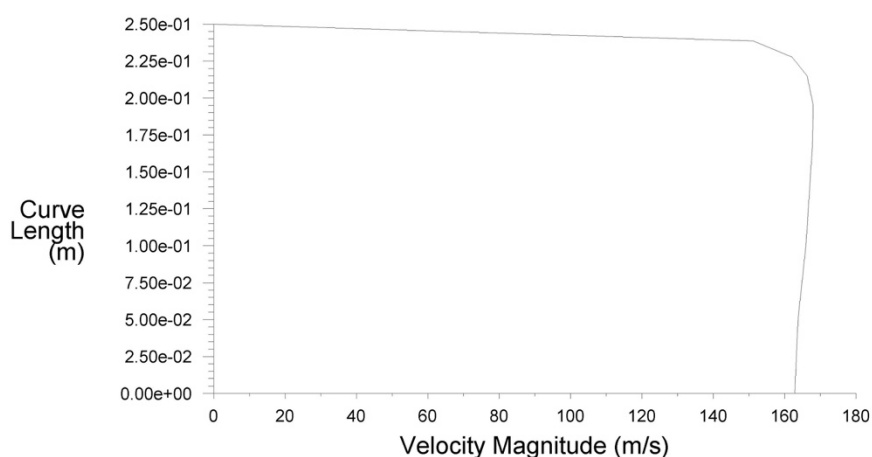
Obr.6.1-1 Průběh rychlosti po první analýze

je vidět z průběhu rychlosti, geometrie vzduchové cesty nevyhovovala. V oblasti konfusu docházelo k tvorbě vírů. Víry narušovali proud vzduchu a došlo k jeho odtržení od stěny konfusu. Detail víření můžeme vidět na Obr.6.1-2. Víry měly za následek odtržení proudu vzduch od stěny a zhoršení kvality proudu v měřicí části. Z rychlostního profilu zobrazeném na grafu 6.1-1 je vidět, že rychlostní profil není ideální, rychlost v blízkosti stěny se příliš liší



Obr.6.1-2 Detail víření v konfusu

Graf 6.1-1 Rychlostní profil

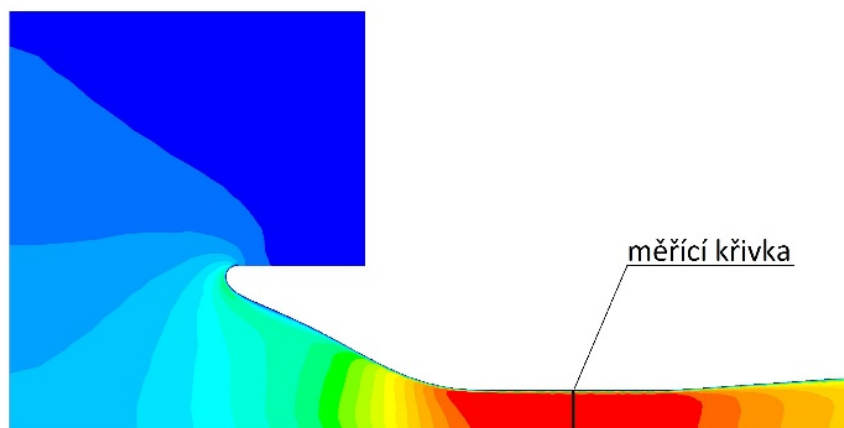


od rychlosti uprostřed. Je třeba lépe usměrnit proud vzduchu. Jak bylo již zmíněno v kapitole 5.3, rychlostní profil je vykreslen podél měřicí křivky zobrazené na Obr.6.1-2, jedná se o polovinu profilu (symetrie). Pro zlepšení usměrnění nasávaného vzduchu bylo třeba lépe zakřivit konfuzor, aby došlo ke zmenšení vírů, a tudíž srovnání proudnic v rychlostním profilu.

Po třech korekcích zakřivení konfuzoru bylo zjištěno, že lépe vyhovuje menší křivost křivky tvořící konfuzor a pozvolnější přechod na zaoblenou výstupní část.

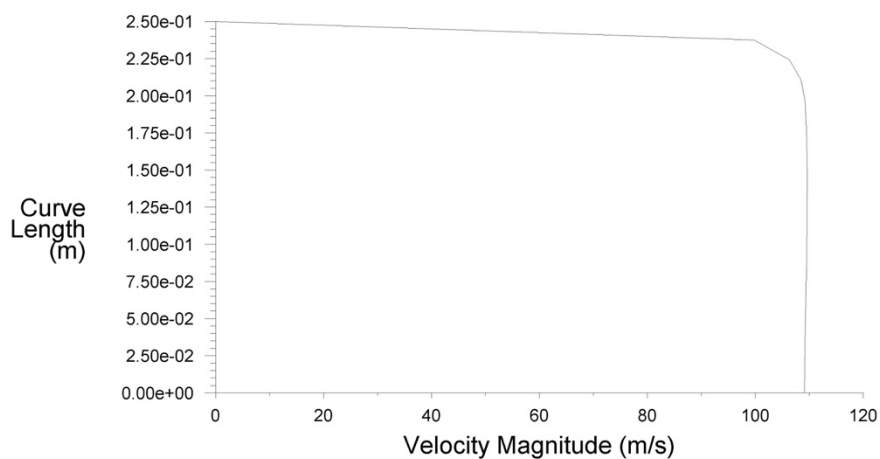
K získání vyhovující geometrie vedlo celkem sedm iterací se sedmi rozdílnými geometriemi, u těchto geometrií bylo experimentováno s délkou a vstupním průměrem konfuzoru a délkou difusoru. Jak se ukázalo, největší efekt měla křivost hlavní křivky konfuzoru a navazující výstupní zaoblení. Prodloužení celého konfuzoru též dosti zmírnilo turbulenci.

Podařilo se téměř zbavit turbulence u stěny konfuzoru, jak je vidět na obrázku Obr.6.1-5. Což znatelně zlepšilo rychlostní profil v měřicí části, Graf 6.1-2. Ustálený průběh rychlosti

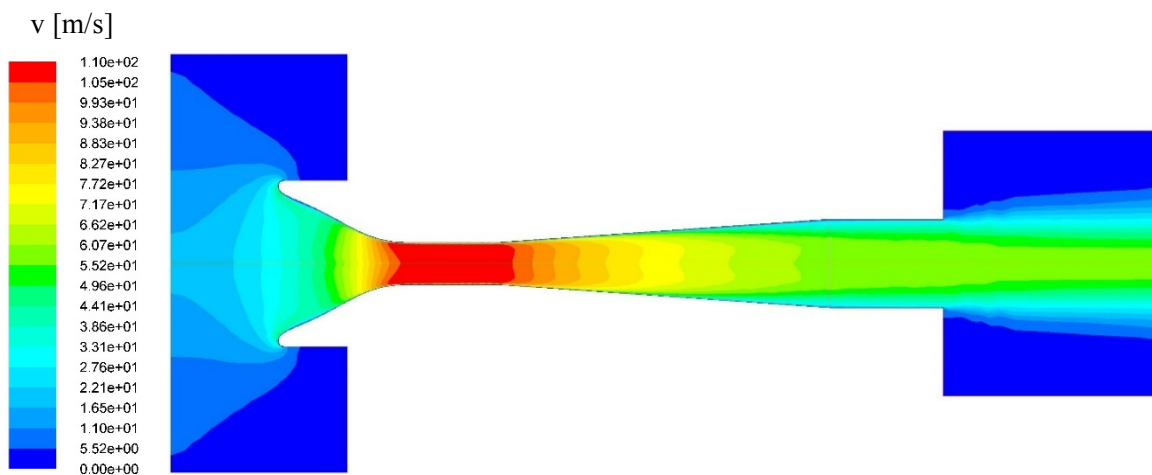


Obr. 6.1-5 Detail konfuzoru po korekci

Graf 6.1-2 Výsledný rychlostní profil



napříč měřicí částí je takřka ideální. Maximální rychlost pro tlakový spád 2 kPa na ventilátoru je 110 m/s, výsledný průběh rychlosti v celé geometrii tunelu včetně symetrie je vyobrazen na Obr.6.1-4.



Obr.6.1-4 Výsledný průběh rychlosti

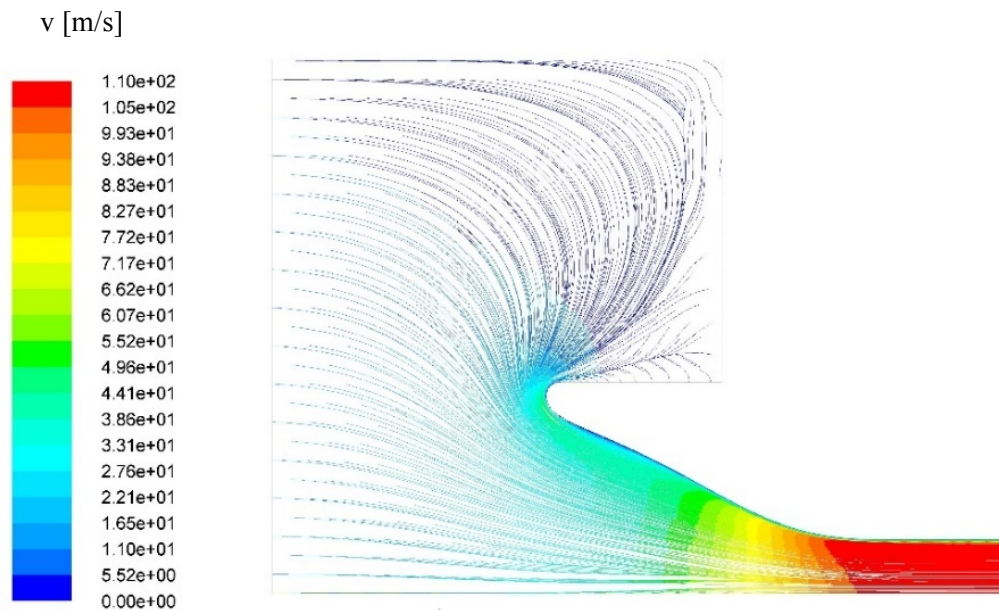
Mohli jsme tedy zkorigovanou geometrii prohlásit za vyhovující a podrobněji se podívat na jednotlivé části vzduchové cesty a výsledky analýzy.

## 6.2 Rozbor částí vzduchové cesty

V minulé kapitole bylo dosaženo ideální geometrie, u které již nebyla nutná další geometrická korekce. Geometrie byla otestována v dalších analýzách pro řadu tlakových spádů: 1,5 kPa, 1 kPa a 0,5 kPa. Rychlostní a turbulentní pole vyhovovalo ve všech případech, rychlostní profil v měřicí části byl až na jiné rychlosti totožný. Dále bude podrobně rozebráno zejména turbulentní pole v jednotlivých částech tunelu pro tlakový spád 2 kPa.

### Vstupní konfuzor

Geometrie, která zabrala nejvíce iterací, než se dosáhlo vyhovující geometrie. Na Obr.6.2-1 můžeme vidět vykreslené proudnice nasávaného vzduchu vstupním konfuzorem spolu s rychlostní škálou  $v$ , proudnice kopírují vstupní profil bez viditelných vírů. Přesto, po vykreslení turbulence (turbulentní kinetické energie  $k$ ) na Obr.6.2-2, můžeme spatřit, že u stěny stále dochází k turbulenci, ačkoli minimální oproti původní geometrii. Dalo by se dále pokračovat v korekcích vstupní geometrie a docílit tak ještě menších vstupních turbulencí ale na průběh rychlostního profilu v měřicí části by to mělo minimální vliv.



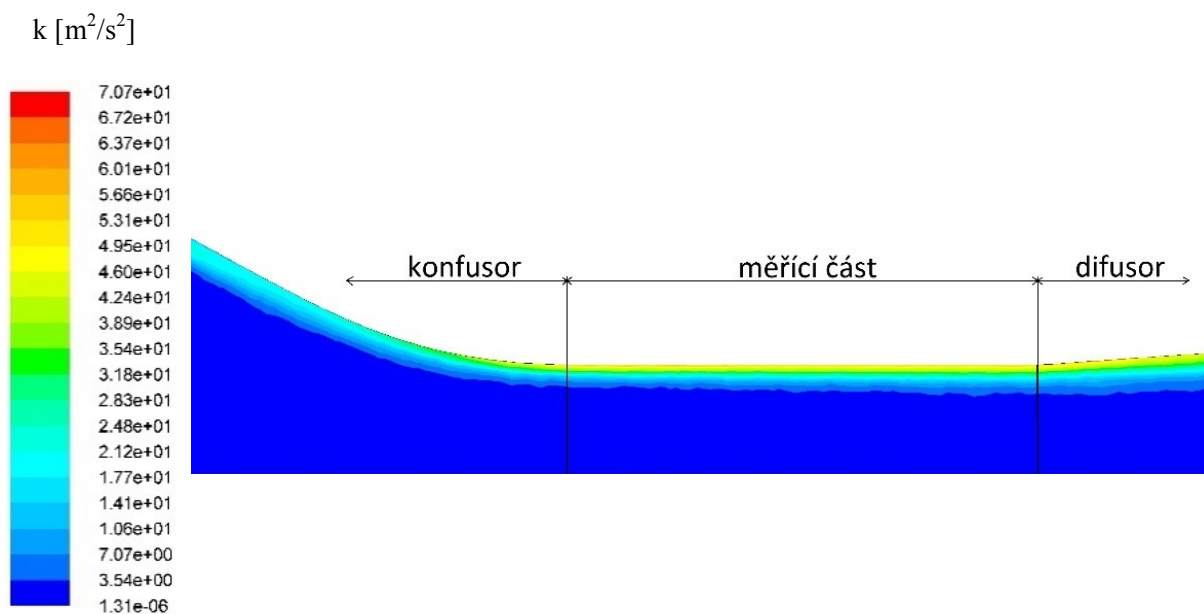
Obr.6.2-1 Vykreslení vstupních proudnic



*Obr.6.2-2 Turbulentní profil konfuzoru*

### Měřicí část

Tato část neprošla výraznými změnami geometrie, proud vzduchu zde závisel na geometrii konfuzoru. Díky dobrému ustálení proudu vzduchu a eliminaci turbulence v konfuzoru bylo docíleno téměř ideálního rozložení rychlosti v měřicí části. Turbulence byla snížena na minimum, turbulentní profil můžeme vidět na Obr.6.2-3 spolu se škálou turbulentní kinetické energie  $k$ .

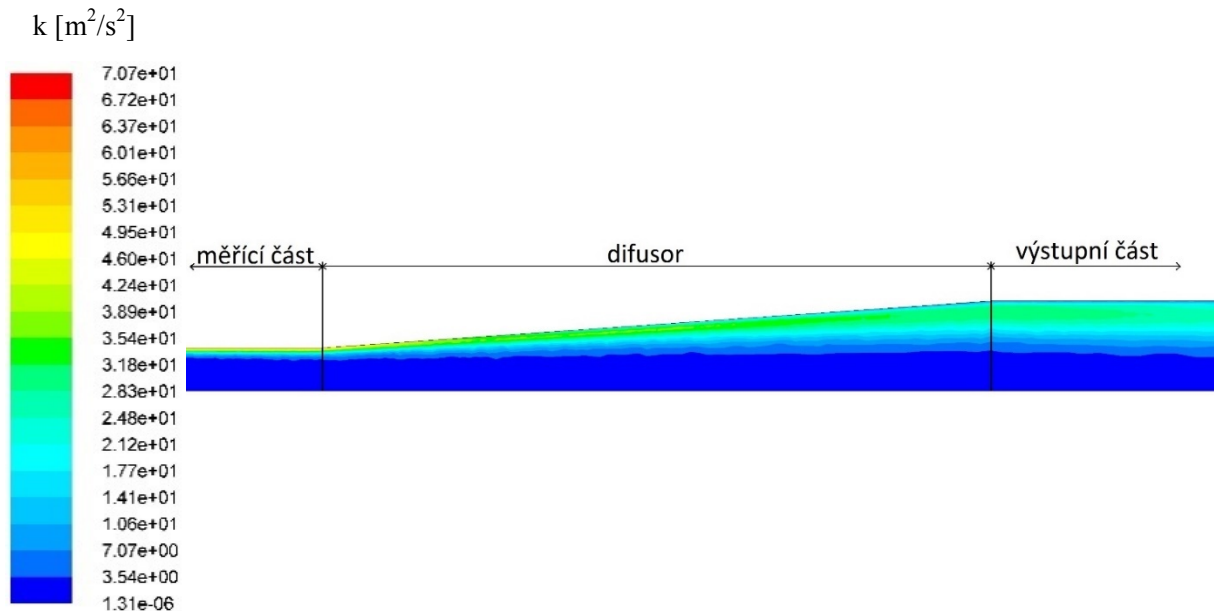


*Obr.6.2-3 Turbulentní profil měřicí části*



## Výstupní difusor

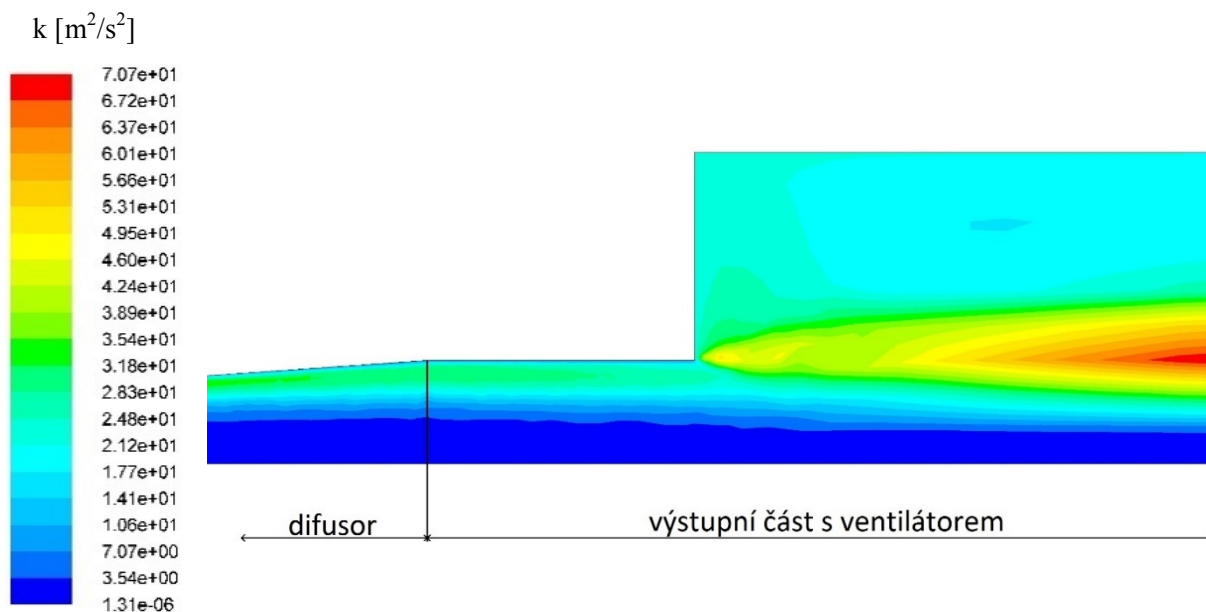
Zde došlo jen k mírným úpravám délky, jinak původní geometrie zcela vyhovovala. Turbulentní profil je vyobrazený na Obr.6.2-5 spolu se škálou turbulentní kinetické energie  $k$ , turbulence je podél celé stěny difusoru, ale je ve vyhovujících mezích.



Obr.6.2-5 Turbulentní profil difusoru

## Výstupní část s ventilátorem

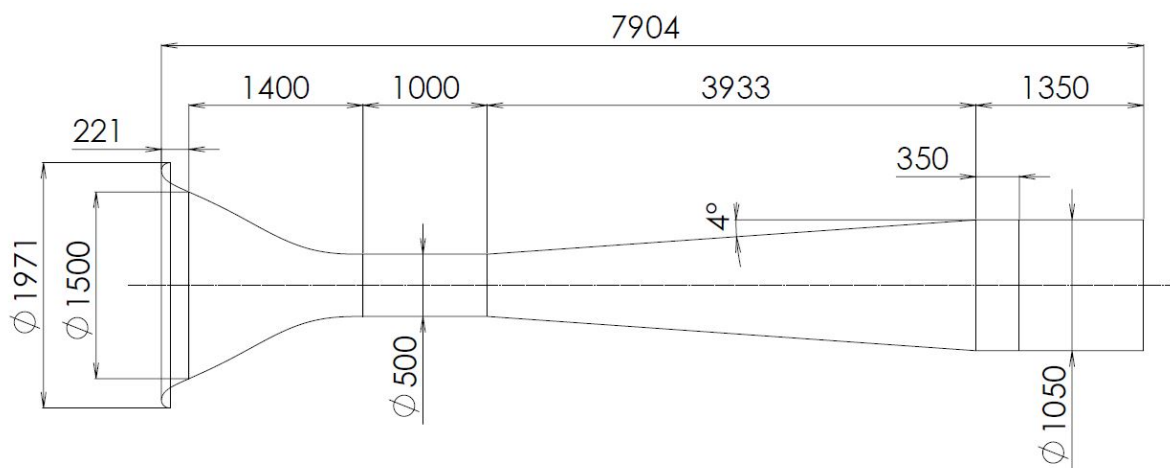
Nebyly zapotřebí žádné korekce oproti původnímu návrhu. Turbulentní profil je vyobrazen na Obr.6.2-6 spolu se škálou turbulentní kinetické energie  $k$ , je zde vidět výrazná turbulence začínající u hrany konce tunelu, je způsobena ostrou hranou přestupu mezi koncem tunelu a vymezenou oblastí (okrajovou podmínkou) vyfukovaného vzduchu. Jedná se o výpočetní chybu, která by šla eliminovat vytvořením radiusu a tím zmírnit přechod na okrajovou výstupní hranu ale na návrh geometrie tunelu by to nemělo žádný vliv.



Obr.6.2-6 Turbulentní profil výstupní části

### Konkrétní hlavní rozměry vyhovující geometrie

Na Obr.6.2-7 jsou zakótovány hlavní rozměry vyhovující geometrie Eiffelova otevřeného aerodynamického tunelu.



Obr.6.2-7 Hlavní rozměry vyhovující geometrie

## 7 Závěr

Tématem této bakalářské práce byla CFD analýza proudění v otevřeném aerodynamickém tunelu. Po získání základního povědomí o účelu a konstrukci větrných tunelů, vedla práce k návrhu parametrického modelu vzduchové cesty otevřeného aerodynamického tunelu. Samotná parametrizace modelu byla velmi podstatným prvkem pro úspěšnou analýzu proudění, bez funkční parametrické korekce geometrie vzduchové cesty by dosažení výsledků bylo takřka nemožné. Vytvořený model vzduchové cesty byl zkorigován v programu ANSYS, síťován a následně analyzován ve Fluentu. K dosažení výsledné geometrie vedlo celkem sedm iterací s korekcemi geometrie modelu. Výsledky analýzy vyhovující geometrie jsou rozebrány v 6. kapitole. Hlavní rozměry vzduchové cesty by byly použitelné pro následný návrh přesných konstrukčních rozměrů otevřeného aerodynamického tunelu dle zadaných požadavků (viz. 3. kapitola). Vytvořený výpočetní model je díky parametrizaci použitelný i pro jiné projekty a návrhy otevřených tunelů tohoto typu.

Parametrizace, propojení jednotlivých výpočetních prvků v programu ANSYS, od geometrie přes tvorbu sítě po CFD analýzu ve Fluentu není dokonalé, největším problémem je import geometrie, kde i po sebelepších expotech z CAD softwarů je vždy třeba korekce v ANSYS DM (Design Modeler) a následně v Mesh (tvorba sítě) programu, minimálně znovu pojmenovat hranice tunelu. Nastavení analýzy ve Fluentu zůstává, a se změnou geometrie se pouze aktualizuje na nový model, což funguje bez problémů. Plná parametrizace všech operací, abychom po změně geometrie dostali výsledky analýzy bez jakýchkoli korekcí je velmi obtížná. Návaznost formátů CAD softwarů s výpočetním rozhraním ANSYS není velká a tvorba parametrického modelu přímo v Design Modeleru je velmi omezená. Pro korekci geometrie v této práci stačilo sedm iterací pro získání vyhovujícího modelu, což není nezvladatelný počet pro manuální korekci. Avšak při představě složité geometrie s mnoha iteracemi by byla korekce touto metodou dosti zdlouhavá až nemožná. Řešení takových výpočetních modelů by bylo možné pomocí otevřených výpočetních programů (opensource), kde můžeme zasahovat do jádra programu a za pomoci trochu programování dosáhnou vyšší parametrizace všech operací.

## 8 Bibliografie

- (1) POPE, Alan a John HARPER. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. New York: Wiley, 1966.
- (2) BENSON, Tom, ed. *Whirling Arms and the First Wind Tunnels* [online]. 2014 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/WindTunnel/history.html>
- (3) RUMERMAN, Judy, ed. *The First Wind Tunnels* [online]. b.r. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: [http://www.centennialofflight.net/essay/Evolution\\_of\\_Technology/first\\_wind\\_tunnels/Tech34.htm](http://www.centennialofflight.net/essay/Evolution_of_Technology/first_wind_tunnels/Tech34.htm)
- (4) LEE, James. *Eiffel 1903 Drop Test Machine and 1912 Wind Tunnel* [online]. 2005, **200** [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <https://www.asme.org>
- (5) HIRSCHL, Ernst-Heinrich., Horst PREM a Gero MADELUNG. *Aeronautical research in Germany: from Lilienthal until today*. New York: Springer-Verlag, 2004. ISBN 35-404 0645-X.
- (6) HALL, Nancy, ed. *Open Return Wind Tunnel* [online]. 2015 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>
- (7) ANSYS, FLUENT. *ANSYS FLUENT Theory Guide* [online]. 2013. USA: ANSYS, Inc 2013 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <https://uiuc-cse.github.io/me498cmfa15/lessons/fluent/refs/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf>
- (8) *ANSYS FLUENT User's Guide*. Release 17. ANSYS, Inc., 2016.
- (9) VLČEK, Petr. *MODELOVÁNÍ TURBULENTNÍHO PROUDĚNÍ*. Technická 4, 166 07 Praha 6, 2013. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní zpracovatelské techniky.