



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MĚŘENÍ NA TURBÍNOVÉ MŘÍŽI MEASUREMENTS ON TURBINE CASCADE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MAREK VONDRA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN FIEDLER, Dr.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Marek Vondra

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: Energetické inženýrství (2301T035)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Měření na turbínové mříži

v anglickém jazyce:

Measurements on Turbine Cascade

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

K vyšetření problémů proudění v turbíně s axiálním lopatkováním se používají tzv. ploché lopatkové mříže. V rámci diplomové práce mají být určeny charakteristiky axiální turbínové mříže. Jedná se o úhel proudění na výstupu z mříže a hodnotu celkového tlaku.

Jedná se o mříž VT stupně parní turbíny. Vyšetřování problému bude probíhat experimentálně i pomocí počítačové simulace.

Cíle diplomové práce:

Diplomovou práci zpracujte v rozsahu:

- měření obtékání média za turbínovou mříží pomocí pneumatické sondy
- měření rozdělení tlaku po profilu
- numerická simulace proudění v turbínové mříži
- závěr: interpretace a porovnání experimentálních a numerických výsledků

Seznam odborné literatury:

Fiedler, J.: Parní turbíny - Návrh a výpočet, CERM- Brno 2004

Kadrnožka, J.: Tepelné turbíny a turbokompresory, CERM- Brno, 2007

Krbek, J. Polesný, B. Fiedler, J.: Strojní zařízení tepelných centrál, PC-DIR, 1999

Skripta TU- Wien: Termischen Turbomaschinen

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Fiedler

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 10.11.2014



J. Pospíšil

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

J. Katolický

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je měření na turbínové mříži. V první části se jedná o měření charakteristik proudění za turbínovou mříží pomocí tříotvorové pneumatické sondy, ve druhé části pak měření tlaku po profilu lopatky. Obě měření jsou provedena jak experimentálně, tak pomocí počítačové simulace v programu Ansys a výsledky jsou vzájemně porovnány. Součástí práce je soubor, obsahující počítačovou simulaci provedenou v programu CFX.

Abstract

The Aim of this Diploma thesis is the measurement on turbine cascade. The first part is focused on measurement of the flow characteristics of the turbine cascade using a three-hole pressure probe. The second part includes the blade profile pressure measurement. Both measurements are performed both experimentally and by computer simulation in Ansys and the results are compared. Part of the work is also file containing the computer simulation, which was carried out in CFX program.

Klíčová slova

Turbínová mříž, pneumatická sonda, rozložení tlaku, experimentální měření, CFD.

Key words

Turbine cascade, pressure probe, blade profile pressure, experimental measurement, CFD.

Bibliografická citace

VONDRA, M. *Měření na turbínové mříži*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 102 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma: *Měření na turbínové mříži* zpracoval samostatně, s využitím odborných konzultací a literatury. Veškerá literatura a zdroje informací jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Jméno a příjmení: Bc. Marek Vondra

Podpis:.....

V Brně, dne 20.5.2015.

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr. a Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhardu Willingerovi za poskytnutí vhodného zadání diplomové práce, odborné konzultace a za pomoc při řešení jednotlivých problémů souvisejících se zpracováním naměřených dat. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Volavému a Ing. Radovanu Rumanovi za pomoc při vytváření výpočetního modelu a zpracování získaných výsledků. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině za podporu během celé doby studia.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Úvod do proudění tekutin.....	12
2.1	Dělení podle kinematických hledisek.....	12
2.1.1	Základní rovnice popisující proudění.....	13
2.2	Dělení podle fyzikálních vlastností tekutiny.....	14
2.2.1	Turbulentní proudění skutečných kapalin.....	14
2.3	Mezní vrstva vznikající při obtékání těles.....	15
2.4	Metody modelování turbulentního proudění.....	16
2.5	Statistické modely turbulence.....	16
2.6	Obtékání profilů.....	17
2.7	Úplav.....	19
2.8	Průběh tlaku po profilu lopatky.....	20
3	Měřicí aparatura.....	21
3.1	Definice jednotlivých tlaků v proudícím médiu.....	21
3.2	Provedení pneumatických sond.....	21
3.3	Výhody a nevýhody měření pneumatickými sondami.....	25
4	Měření obtékání lopatky za turbínovou mříží.....	25
4.1	Popis aerodynamického tunelu.....	25
4.2	Popis lopatkové mříže.....	27
4.3	Popis měřícího zařízení.....	28
4.4	Postup měření.....	29
5	Řešení pomocí počítačové simulace.....	31
5.1	Vyhodnocení experimentu.....	31
5.2	Výpočet veličin před vstupem do lopatkové mříže.....	33
5.3	Stanovení tlaků za lopatkovou mříží.....	33
5.4	Stanovení rychlosti a úhlu vybočení sondy.....	37
5.5	Vytvoření 3D modelu.....	40
5.6	Postup simulace proudění v programu Ansys/CFX.....	40
5.7	Vytvoření výpočetní sítě.....	42
5.7.1	Teorie sítě.....	42
5.7.2	Metoda konečných objemů.....	42
5.7.3	Kvalita sítě.....	43
5.7.4	Vytvořená výpočetní síť.....	43
5.7.5	Tloušťka mezní vrstvy.....	44
5.8	Numerický výpočet proudění.....	47

5.8.1	Nastavení domény a vlastností vzduchu	47
5.8.2	Nastavení okrajových podmínek	48
5.8.3	Inicializace a nastavení řešiče	51
5.8.4	Vlastní výpočet	52
5.8.5	Konvergence úlohy	53
5.9	Zobrazení výsledků	53
5.9.1	Vytvoření vyhodnocovacích entit	54
5.9.2	Získání vypočítaných hodnot jednotlivých veličin	54
5.10	Zhodnocení výsledků a jejich porovnání	59
5.11	Korekce a změna nastavení řešiče pro CFD výsledky	60
5.11.1	Úpravy vedoucí ke změně výsledku rychlosti a celkového tlaku	60
5.11.2	Úpravy vedoucí ke změně výsledku úhlu β_2^+ a statického tlaku	64
6	Měření rozdělení tlaku po profilu lopatky	69
6.1	Postup měření	70
6.2	Analytické řešení	72
6.3	Numerické řešení	73
6.4	Zhodnocení a porovnání výsledků a jejich korekce	76
7	Závěr	81
	Seznam použité literatury	82
	Seznam použitých zkratk a symbolů	84
	Seznam obrázků	87
	Seznam tabulek	89
	Seznam grafů	90
	Seznam použitých rovnic	91
	Přílohy	93

1 Úvod

Energetický průmysl je dnes již nedílnou součástí každého vyspělého státu. Jeho potřeba je dána neustále se zvyšující poptávkou po elektrické a tepelné energii. Důležitou roli v tomto ohledu zauímají lopatkové stroje – konkrétně pak parní turbína, jakožto prostředek k získání elektrické energie. Pro určení ideálního tvaru lopatkové mříže a tvaru lopatek je důležité porozumění zákonitostem aerodynamiky v lopatkových strojích, u velkých turbín totiž může mít každé nepatrné zlepšení tvaru lopatky výrazný přínos pro účinnost stroje.

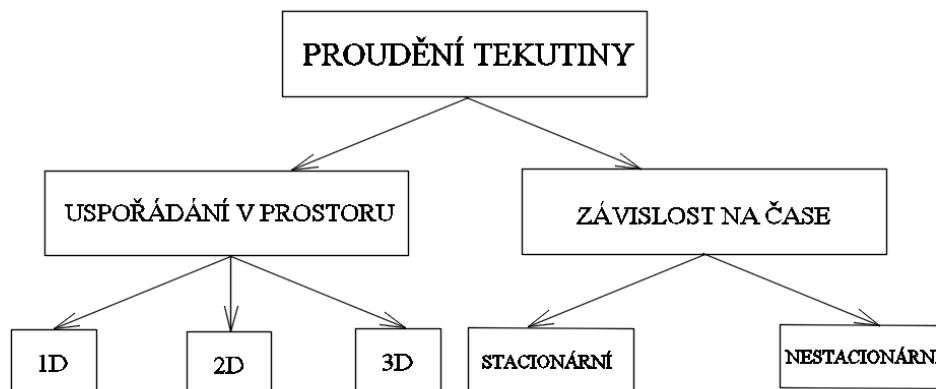
Následující diplomová práce se zabývá měřením na turbínové mříži. Jedná se celkem o dvě měření, která byla provedena v experimentální laboratoři na Technické univerzitě ve Vídni. V první části se jedná o měření charakteristik proudění za turbínovou mříží a to pomocí tříotvorové pneumatické sondy, známé také jako typ kobra. Souběžně s vyhodnocováním naměřených dat byla prováděna CFD simulace v programu CFX, tak aby bylo možné oba výsledky průběžně kontrolovat a v případě neshody provést nové měření.

Ve druhé části je pak uvedeno měření rozložení tlaku po profilu lopatky, které bylo prováděno pomocí 38 odběrů statického tlaku umístěných na lopatce. Stejně jako u prvního měření byly i v tomto případě oba výsledky podrobně rozebrány, porovnány a následně byly provedeny korekce nezbytné k získání přesnějších hodnot.

2 Úvod do proudění tekutin

Proudění kapalin se obvykle rozděluje podle kinematických hledisek na proudění dle uspořádání v prostoru a proudění v závislosti na čase a podle fyzikálních vlastností tekutiny na proudění ideální (dokonalé) tekutiny a proudění skutečné (vazké) tekutiny [1].

2.1 Dělení podle kinematických hledisek



Obr. 1: Dělení proudění podle kinematických hledisek [1].

Dělení proudění dle uspořádání v prostoru

- *Proudění jednorozměrné (1D)*
Příkladem je proudění v potrubních systémech. Předpokládá se závislost počítaných veličin na poloze na křivce $v = v(s)$.
- *Proudění dvourozměrné (rovinné – 2D)*
Závisí na poloze v rovině, rovinné proudění je charakterizováno veličinami, jako je např. rychlost $v = v(x, y)$.
- *Proudění třírozměrné (prostorové – 3D)*
Pokud veličiny, např. rychlost jsou závislé pouze na poloze v prostoru, pak mluvíme o tzv. prostorovém proudění $v = v(x, y, z)$ [1].

Dělení proudění podle závislosti na čase

- *Proudění ustálené (stacionární)*
Proudění nezávisí na čase $v \neq v(t); \frac{\delta}{\delta t} = 0$.
- *Proudění neustálené (nestacionární)*
Jedná se o proudění, u něhož jsou veličiny závislé na čase $v = v(x, y, z, t); v = v(s, t); v = v(t)$ [1].

2.1.1 Základní rovnice popisující proudění

Základní rovnice popisující proudění vycházejí ze základních zákonů zachování (zákon zachování hmoty, hybnosti a energie). Vyjadřují je Navier–Stokesovy rovnice spolu s rovnicí kontinuity a popisují laminární i turbulentní režim proudění. Uvažujeme-li případ nestacionárního neizotermního proudění, pak mají rovnice následující tvar [1]:

Rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

kde u , v a w jsou složky rychlosti. Tato rovnice reprezentuje pouze konvektivní (nelineární) změnu toku hmoty, která musí být nulová vzhledem k tomu, že vytkneme-li v tekutině libovolný objem, pak musí množství tekutiny, které do objemu jejím povrchem vteče, v tom samém okamžiku také vytéct.

Navier–Stokesovy rovnice:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \end{aligned} \quad (2)$$

kde t je čas, p je tlak, ρ je hustota, ν je kinematická viskozita a $f_{x,y,z}$ označuje složky vnější objemové síly. Při popisu jednotlivých členů rovnice vyjadřuje první člen zrychlení tekutiny, další tři členy reprezentují konvektivní (nelineární) zrychlení, které při vyšších Reynoldsových číslech způsobuje nestabilitu rovnice, čili náhodnost. První člen na pravé straně rovnice reprezentuje gradient tlaku a poslední člen představuje smyková napětí tekutiny způsobené její viskozitou. Právě smyková napětí jsou příčinou deformace kapaliny [2].

V hydromechanice byla rovnice Navier-Stokesova odvozena ze silové rovnováhy na element tekutiny:

$$\sum F = 0 \rightarrow F_s + F_t + F_o + F_v = 0, \quad (3)$$

kde F_s je síla setrvačná, F_t síla tlaková, F_o je síla objemová a F_v síla viskózní.

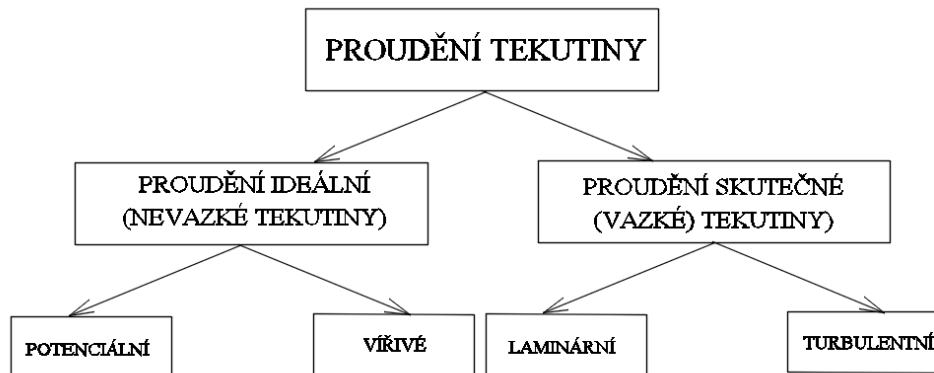
Poslední rovnicí je rovnice vedení tepla reprezentující zákon zachování energie:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} &= \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + 2\alpha \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + \\ &+ \alpha \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

kde T je termodynamická teplota, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ je součinitel teplotní vodivosti, λ je součinitel tepelné vodivosti, ρ je hustota a c_p je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku [1, 2].

Při popisu jednotlivých členů rovnice představuje první člen akumulaci tepla v kapalině. Další tři členy reprezentují přestup tepla v důsledku proudění kapaliny, čili konvekci. Na pravé straně rovnice reprezentuje první člen vedení tepla v tekutině, tedy kondukcí. Poslední členy představují teplo vyvolané deformací a pohybem tekutiny.

2.2 Dělení podle fyzikálních vlastností tekutiny



Obr. 2: Dělení proudění podle fyzikálních vlastností tekutiny [1].

Proudění ideální (dokonalé) tekutiny

- *Potenciální proudění (nevířivé)*

Při tomto proudění dochází k pohybu částic tekutiny přímočaře nebo křivočaře tak, že se vůči pozorovateli neotáčejí kolem vlastní osy. Do této kategorie se řadí i tzv. potenciální vír.

- *Vířivé proudění*

Při vířivém proudění se již částice vůči pozorovateli natáčejí kolem vlastních os [1].

Proudění skutečné (vazké) tekutiny

- *Laminární proudění*

Vyznačuje se pohybem částic tekutiny v tenkých vrstvách bez dalšího přemísťování se po průřezu.

- *Turbulentní proudění*

U turbulentní rychlosti je charakteristické, že částice tekutiny obsahují kromě podélné rychlosti i rychlost turbulentní (fluktuální). Dochází zde navíc již i k přemísťování částic po průřezu [1].

2.2.1 Turbulentní proudění skutečných kapalin

Jako turbulentní se obecně nazývá proudění, jestliže jeho proměnné vykazují chaotické fluktuace jak v prostoru, tak v čase. Turbulentní proudění sestává z prostorových struktur, často nazývaných „eddies“ (turbulentní víry.) Dochází k rozpadu velkých vírů obsahujících energii na menší a jejich následné disipaci na teplo.

Turbulentní víry lze charakterizovat délkovým měřítkem l (charakteristický rozměr) a rychlostním měřítkem u . Tekutina, ve které se vyskytuje turbulence je charakterizována kinematickou viskozitou ν . Pro uvedené parametry lze zavést Reynoldsovo číslo [1]:

$$\text{Re} = \frac{u \cdot l}{\nu} = \frac{l^2}{\frac{\nu}{u}} = \frac{T_v}{T_t}, \quad (5)$$

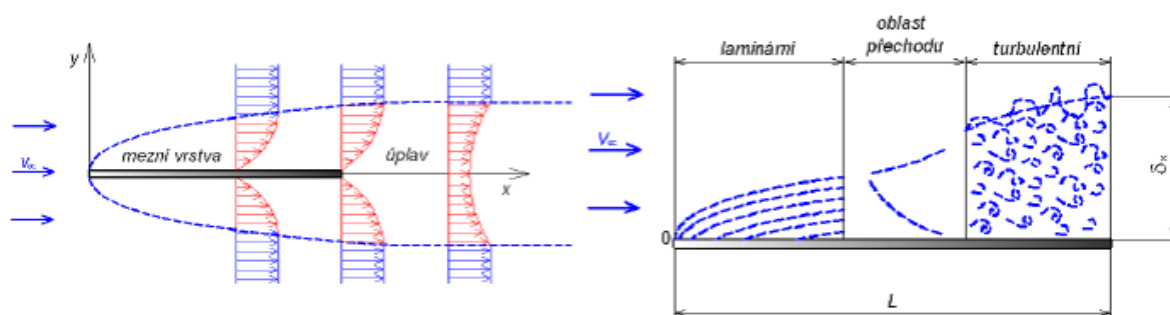
kde: T_t označuje časové měřítko přenosu turbulentních vírů o velikosti l , T_v označuje časové měřítko molekulární difúze a ν je kinematická viskozita.

Vlastnosti turbulentního proudění jsou:

- **náhodnost** – turbulentní režim se vyznačuje náhodným charakterem,
- **disipace** – disipativní proces má za následek zvýšení přeměny kinetické energie v teplo,
- **vířivost** – turbulentní proud obsahuje náhodně rotující víry,
- **nelinearita** – je zodpovědná za stále se zesilující odchylky vedoucí k chaosu
- **difuzní efekt** – schopnost turbulence značně zvýšit hodnotu toku hmoty a energie v proudovém poli [2].

2.3 Mezní vrstva vznikající při obtékání těles

Na základě experimentálních měření bylo zjištěno, že na stěnách obtékaného tělesa vzniká tzv. laminární podvrstva. Jedná se o vrstvu kapaliny o tloušťce několik desetin milimetrů s laminárním pohybem. Další oblastí turbulentního proudu je přechodová vrstva. Ta tvoří společně s laminární podvrstvou turbulentní mezní vrstvu, která se vyznačuje tím, že její tloušťka je u náběžné hrany nulová a na odtokové hraně maximální. Poslední oblastí turbulentního proudu je turbulentní jádro. Okamžitá hranice turbulentní mezní vrstvy se s časem mění [1].



Obr. 3: Mezní vrstva při obtékání tělesa [1].

Pro vztah (5) platí:

$T_v \ll T_t$ tj. $\text{Re} \ll 1$ **laminární proudění** – turbulentní víry zanikají,

$T_v \gg T_t$ tj. $\text{Re} \gg 1$ **turbulentní proudění** – turbulentní víry přetrvávají,

$T_v \gg T_t$ tj. $\text{Re} \gg 1$ **plně vyvinutá turbulence** – turbulentní víry jsou téměř neviskózní,

$T_v \approx T$ tj. $Re \approx 1$ **přechodový stav** – proudění se zpočátku stává periodické, při zvyšování Reynoldsova čísla se vytvářejí další nestability, až se proudění stane plně turbulentní.

U jednorozměrného proudění určuje přechod k turbulenci experimentálně určené Reynoldsovo číslo Re , pro které platí vztah:

$$Re = \frac{v_s d}{\nu}, \quad (6)$$

kde v_s je střední rychlost v potrubí, d je průměr potrubí a ν je kinematická viskozita [1].

Opakované experimenty dokázaly, že při $Re \leq Re_{krit}$ dochází k laminárnímu proudění, přičemž kritická hodnota Reynoldsova čísla Re_{krit} pro potrubí kruhového průřezu činí 2320. Při velikosti $Re \geq Re_{krit}$ v rozmezí $Re = 2320$ až $Re = 5000$ případně $Re = 6000$ se vyskytuje tzv. přechodová oblast a při ještě vyšších hodnotách Reynoldsova čísla dochází k proudění turbulentnímu a tedy neuspořádanému pohybu částic tekutiny všemi směry [3].

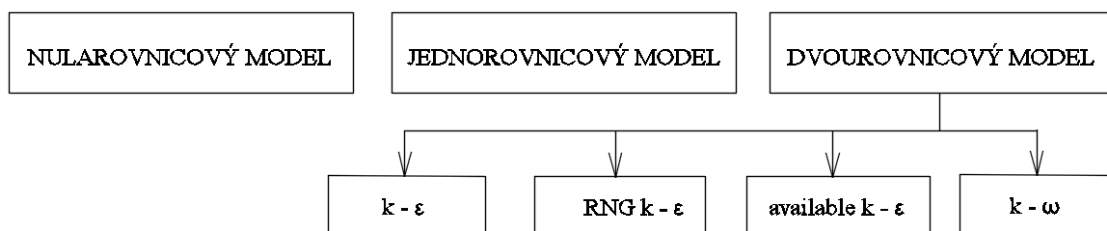
2.4 Metody modelování turbulentního proudění

V principu existují tři teoreticky odlišné přístupy:

- **metoda přímé simulace** (DNS – Direct Numerical Simulation) – velké nároky na kapacitu počítače z důvodu velmi jemné sítě,
- **metoda velkých vírů** (LES – Large Eddy Simulation) – modelování velkých vírů, jako prostorových útvarů závislých na čase, které lze zachytit sítí,
- **metoda časového středování** (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) – nejpoužívanější nástroj pro většinu inženýrských úloh turbulentního proudění, protože ačkoliv se turbulentní proudění vyznačuje náhodným charakterem, je statisticky stabilní a takové proudění lze řešit pomocí Navierových–Stokesových rovnic.

2.5 Statistické modely turbulence

Problémem výpočtu turbulentního smykového napětí je přítomnost Reynoldsova napětí v rovnicích popisujících střední pohyb tekutiny. V tom případě není systém rovnic uzavřen, jako je tomu u laminárního proudění. Modelem turbulence nazýváme soubor přídavných rovnic a empirických vztahů, které tvoří společně s pohybovými rovnicemi řešitelný systém rovnic [1].



Obr. 4: Schéma metod řešení proudění [1].

Dvourovnicový k – ε model

Tento model určuje turbulentní viskozitu pomocí dvou transportních rovnic pro turbulentní kinetickou energii k a rychlost disipace ε [1]. Rychlost disipace ε popisuje rozpad a zánik turbulentních vírů [2]. Model využívá Boussinesquovu hypotézu o vírové (turbulentní) viskozitě a vztahuje ν_t ke k , ε a C_μ :

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

kde C_μ je empirická konstanta. Tento model je ověřen u úloh s velkým Reynoldsovým číslem ($Re \geq 200000$) a nehodí se k řešení problémů při obtékání křivočarých těles. Jedná se především o bod odtržení a velikost zavíření. Naopak ale poměrně dobře počítá plně vyvinuté proudění volného proudu, v oblastech blízko pevné stěny však přesnost modelu klesá [2]. Tento turbulentní model bude použit dále při počítačovém modelování proudění.

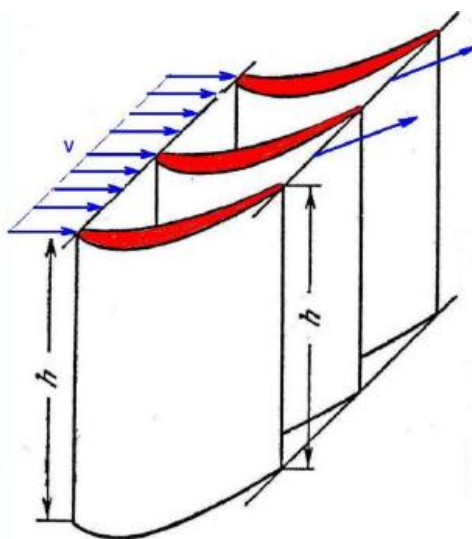
Dvourovnicový k – ω model

Podobně jako k – ε model řeší i k – ω model dvě dodatkové diferenciální rovnice. Zatímco rychlostní měřítko u turbulence je stejně jako u předchozího modelu řešeno pomocí turbulentní kinetické energie k , délkové měřítko l řeší nová veličina zvaná vířivost ω . Jedná se o veličinu vyjadřující míru rotace kapaliny v daném bodě proudového pole.

Tento model je vhodný především pro proudění s nízkými Reynoldsovými čísly ($Re \leq 200000$) a také u úloh s přechodovým režimem proudění, kde není plně vyvinuta turbulence. Velká citlivost na podmínky ve volném proudu je hlavní nevýhodou tohoto modelu. Model je tedy vhodný především pro proudění v blízkosti stěny, ve volném proudu jeho přesnost klesá. Jeho přesnost je tedy opačná než u k – ε modelu [2].

2.6 Obtékání profilů

Obtékáním řad několika profilů vzniká profilová mříž, jejíž uplatnění je u lopatkových strojů jako například u parních a spalovacích turbín.

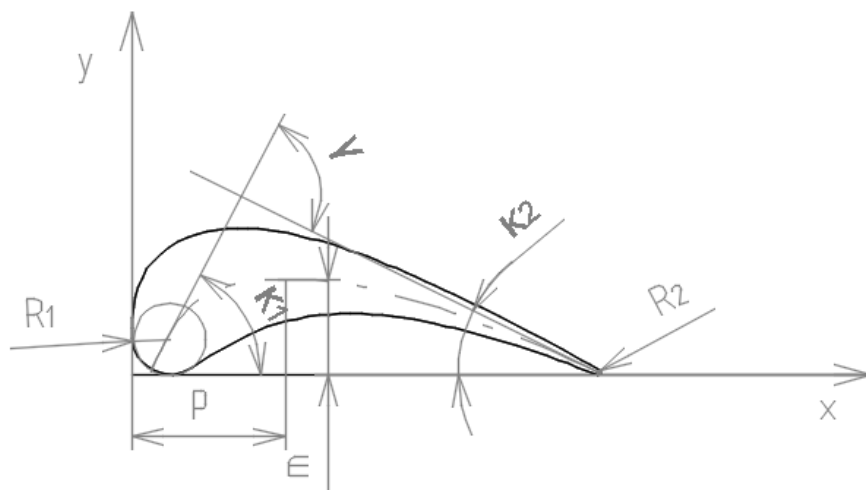


Obr. 5: Profilová mříž [4].

Tvar profilu je dán rychlostním trojúhelníkem a aerodynamickým výpočtem. Mezi základní charakteristiky profilu lze řadit poloměr náběžné hrany r_1 , střední čáru profilu a , délku tětivy s , polohu maximálního prohnutí p , maximální prohnutí $m = y_{max}$, úhly střední čáry profilu κ_1 , κ_2 , prohnutí střední čáry profilu $\nu = \kappa_1 + \kappa_2$ a rozteč lopatkové mříže t [5]. Tvary profilu dělíme podle:

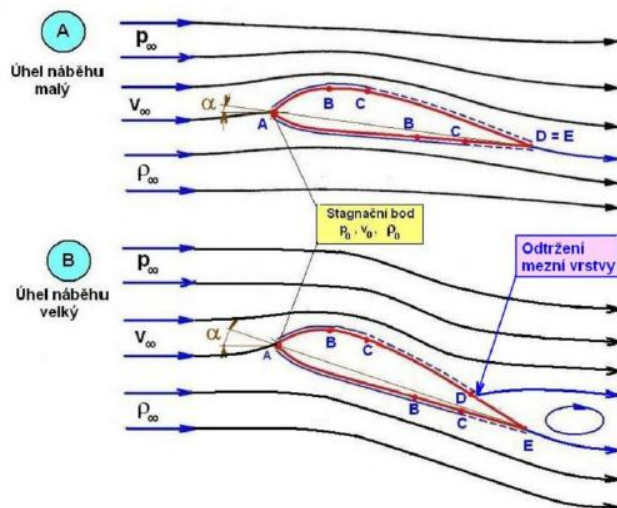
- průběhu střední čáry profilu na profily souměrné a nesouměrné,
- podle spodní hrany profilu na rovné, vyduté, vypuklé a S–profily,
- podle geometrických charakteristik na profily klasické, laminární, nadzvukové a další.

Platí, že při vzrůstající rychlosti nebo při rostoucím Machovu číslu se tvar profilu mění (při vyšších rychlostech se profil zeštíhluje) [4].



Obr. 6: Tvar profilu lopatky [5].

Obtékání profilu je patrné z obr. 7. Částice tekutiny v nulté proudnici dosáhne stagnačního bodu A, kde dojde k „rozdělení“ proudu na dvě části. Obě části se musí setkat ve stejném čase v bodě E. Tedy částice tekutiny na horní ploše profilu se pohybují větší rychlostí (zároveň je zde nižší tlak) než částice na spodní části profilu. V bodech B je dosaženo maximální rychlosti a nejmenšího tlaku. Od tohoto momentu rychlost klesá a tlak roste, v bodě C je dosaženo Re_{krit} a proudění přechází z laminárního na turbulentní. Mezi body C a D pak rychle narůstá tloušťka mezní vrstvy. Při malém úhlu náběhu se bod D posouvá až k odtokové hraně k bodu E, což je ideální stav.



Obr. 7: Schéma obtékání profilu [4].

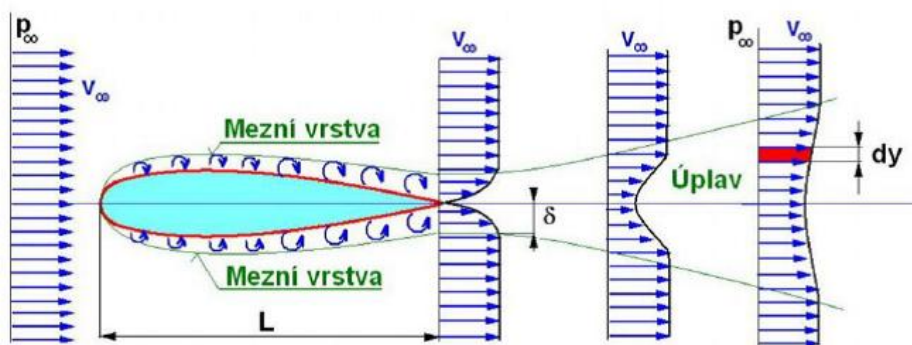
Naopak při velkém úhlu náběhu je v bodě D nulová rychlost, dojde k odtržení mezní vrstvy a vlivem záporné rychlosti dochází ke zpětnému proudění. To spolu s odtrženým proudem vytváří víry, které přechází do úplavu, kde se nachází nižší tlak než před profilem [4].

2.7 Úplav

Úplav je tvořen jednak zpomalenými částicemi v mezní vrstvě a jednak částicemi z odtrženého proudu. Platí, že s rostoucí vzdáleností od tělesa se úplav vlivem přenosu impulzů mezi částicemi rozšiřuje a vyplňuje, přičemž při turbulentní mezní vrstvě nastává daný jev ještě rychleji.

Při obtékání tělesa bez odtržení mezní vrstvy je úplav tvořen částicemi, jež prošly mezi vrstvou tělesa a jejich rychlost je zmenšena. V úplavu nejsou zpětná proudění, naopak úplav za tělesy, které jsou obtékány s odtržením, se chová rozdílně. Podtlak, který je na zadní straně tělesa se v úplavu za tělesem vyrovnává hodnotě tlaku ve vnějším proudu. Úplav je tvořen víry, které se tvoří za tělesem a které jsou odnášeny proudem tekutiny.

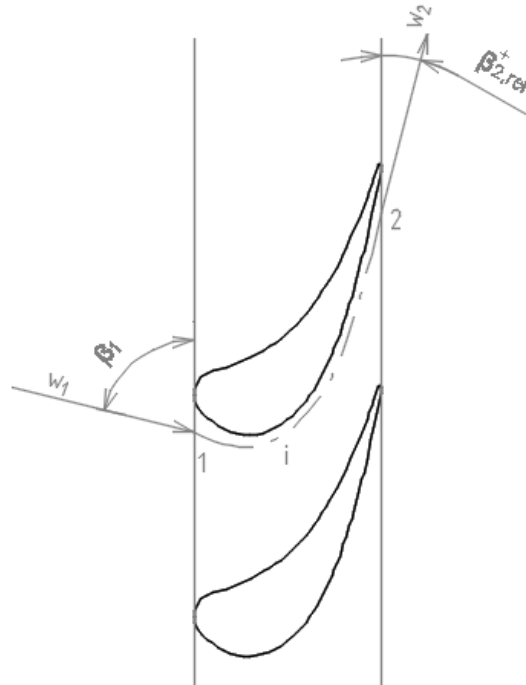
Vlivem proměření rychlosti v úplavu je možno určit profilový odpor tělesa bez měření rozložení tlaků na povrchu obtékaného tělesa a počítání tření mezní vrstvy. Předpokladem je však měření rychlostního profilu v takové vzdálenosti za tělesem, kde je statický tlak vyrovnán a má stejnou hodnotu, jako před tělesem.



Obr. 8: Úplav za obtékaným tělesem [5].

2.8 Průběh tlaku po profilu lopatky

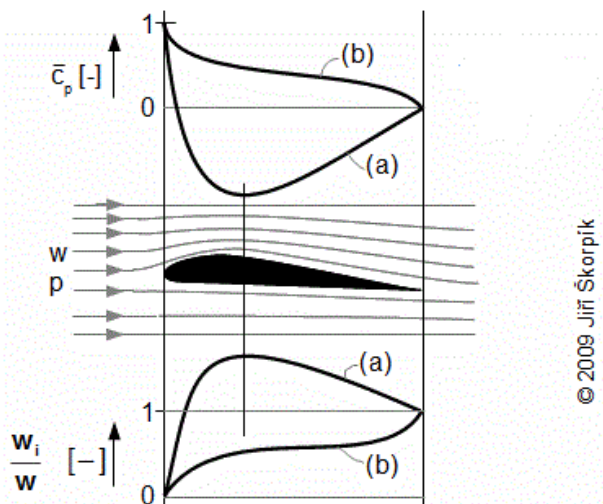
Při proudění se průběh tlaku po délce profilu mění. Stranu profilu s vyšším tlakem nazýváme přetlaková, stranu s nižším tlakem sací strana lopatky. Vlivem rozdílného tlaku na přetlakové a sací straně vzniká síla působící na lopatku od proudu tekutiny. Průběh tlaku se určuje měřením pomocí otvorů pro odběr statického tlaku umístěných v profilu, při nestlačitelném proudění lze však určit trend tlakových změn a to pomocí Bernoulliho rovnice pro nestlačitelné proudění [6].



Obr. 9: Změna tlaku po profilu lopatky [6].

$$\bar{c}_p = \frac{p_i - p_1}{\frac{1}{2} \rho \cdot w_1^2} = 1 - \left(\frac{w_i}{w_1} \right)^2 \quad (8)$$

kde: p_1 je statický tlak, w relativní rychlost, β úhel relativní rychlosti, ρ hustota tekutiny. Lze uplatnit pro proudové vlákno dostatečně daleko od mezní vrstvy pro ideální tekutinu. Veličina c_p je bezrozměrná. Je dána tvarem profilu a jeho nastavením vůči směru střední aerodynamické rychlosti (úhel náběhu) a popisuje, jak se mění tlak statický na úkor dynamického. Maximální hodnota, kterou může veličina c_p dosahovat je jedna, protože platí $p_{i\max} = p_1 + 0,5 \cdot \rho \cdot w_1^2$, k čemuž dochází pouze v nátokové hraně lopatky [6].



Obr. 10: Změna tlaku podél osamoceneného profilu [6].

Křivka **a** udává průběh veličiny c_p nad osamoceneným profilem, křivka **b** průběh veličiny c_p pod profilem. Z průběhu je patrné, že na horní straně profilu je tlak nižší (sací strana) než na spodní části profilu (přetlaková hrana) [6].

Dobře obtékané profily mají při malých rychlostech malý odpor tvarový a velký odpor třecí. Velký vliv na velikost odporu má úhel náběhu i , s jeho nárůstem dosahují gradienty tlaku větších hodnot a může dojít k odtržení mezní vrstvy a tedy zvětšení odporu [4].

3 Měřicí aparatura

3.1 Definice jednotlivých tlaků v proudícím médiu

Za normálních podmínek, jedná-li se o kapalinu v klidu, je pod pojmem tlaku chápána střední aritmetická hodnota složek normálního napětí. Odpovídající hodnota v proudícím médiu se označuje jako statický tlak p . Je-li proudění izentropicky zpomalováno až na nulovou rychlost, vzroste tlak až na maximální hodnotu, která se nazývá celkový tlak, dále označovaný p_t . Rozdíl mezi celkovým a statickým tlakem se nazývá dynamický tlak p_d a platí pro něj vztah [8]:

$$p_d = p_t - p \quad (9)$$

Dynamický tlak je mírou rychlosti proudění. Připustíme-li chybu dynamického tlaku 1 %, lze pro Machova čísla do $Ma = 0,2$ použít rovnici [8]:

$$p_d = \rho \frac{w^2}{2} \quad (10)$$

3.2 Provedení pneumatických sond

Sondy na měření celkového tlaku

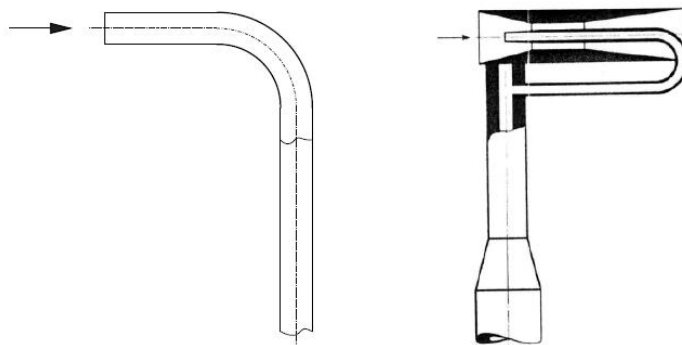
- *Pitotova trubice*

Nejjednodušší formou sondy je zahnutá trubice ve tvaru háku, jejíž ústí směřuje proti směru proudění a výstup je připojen na zařízení měřící tlak.

Pitotova trubice slouží k měření celkového tlaku. Geometrie hlavy sondy významně ovlivňuje citlivost zařízení na odklon od směru proudu. Při jednoduchém válcovitém tvaru hlavy sondy, je přípustný odklon $\pm 10^\circ$.

- *Kielova sonda*

K měření celkového tlaku se používá i tzv. Kielova sonda. Tato sonda se vyznačuje malou citlivostí na směr proudění. Přípustný odklon sondy od směru proudu činí zhruba $\pm 40^\circ$ [8].



Obr. 11: Sondy na měření celkového tlaku, zleva: Pitotova trubice a Kielova sonda [8].

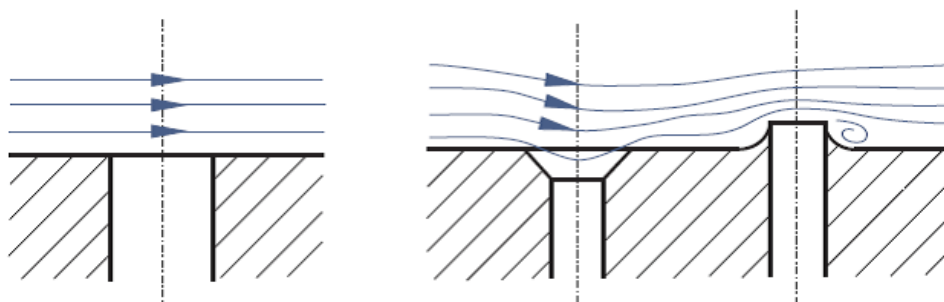
Sondy na měření statického tlaku

- *Odběry statického tlaku ve stěnách potrubí*

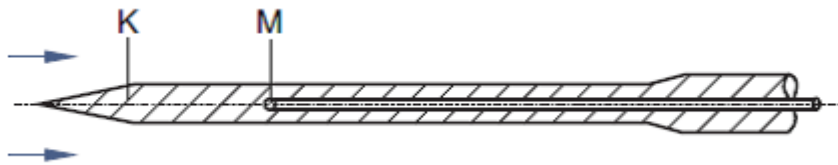
Při laminárním proudění (bez zakřivení proudnic) je tlak ve směru kolmém na směr proudění konstantní. V tom případě se ve směru kolmém na stěnu neočekává tlakový gradient a statický tlak se měří pomocí odběrů tlaku na stěně potrubí. Osa děr by přitom měla být co nejvíce kolmá ke stěně potrubí a hrany by měly být pokud možno co nejvíce ostrohranné. Otřepy či zaoblení mohou způsobovat odtržení či nahromadění proudu, které vede k systematickým chybám [8].

- *Trubice na měření statického tlaku*

Tato sonda se liší tím, že se její měřicí otvor nenachází v přední kuželovité části sondy, nýbrž na boku válcovité stěny. Tvar kuželovité špičky a umístění měřicího otvoru mají významný vliv na přesnost měření. V porovnání s Pitotovou trubicí je citlivost statické sondy na směr proudění větší. Je-li odklon proudu od osy trubice v rozmezí $\pm 5^\circ$, je potřeba počítat se systematickou chybou o velikosti do 1 % [8].



Obr. 12: Příklad správně (vlevo) a nevhodně (vpravo) provedené sondy [8].

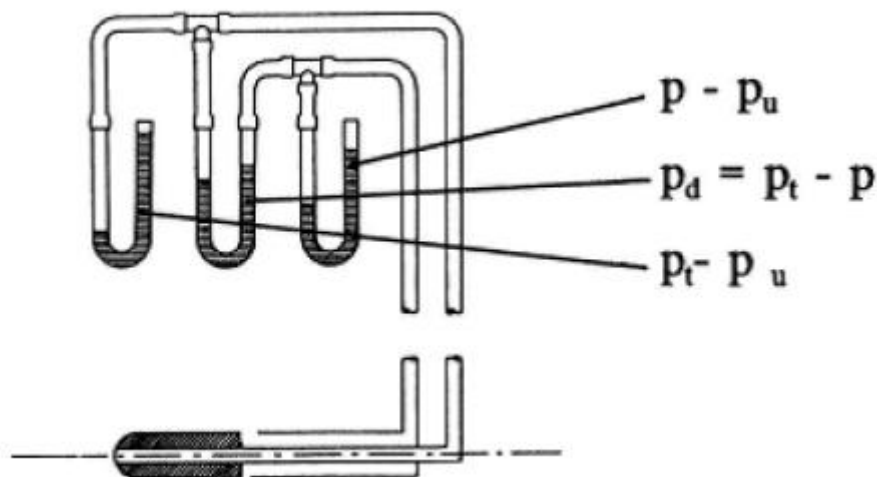


Obr. 13: Trubice na měření statického tlaku [8].

Sondy na měření dynamického tlaku

- Prandtlova trubice

U Prandtlovy trubice je zachycen celkový tlak v přední části trubice a tlak statický na stěně válcovitého tvaru, a poté jsou oba tlaky vedeny do U-manometru, kde jsou vyhodnoceny na základě rozdílu tlaků. Statický tlak je zachycen buď v prstencové mezeře umístěné za hlavou trubice, nebo v tlakových odběrech po obvodu stěny a leží ve vzdálenosti přibližně tří průměrů od přední části trubice. Je to místo, ve kterém jsou poruchy způsobené přední částí trubice a tělesem sondy již vyrovnány. Stejně jako u Pitotovy trubice je i u Prandtlovy trubice citlivost na směr proudění ovlivněna především tvarem přední částí trubice. Relativně vhodné řešení pak vykazuje provedení špičky sondy ve tvaru polokoule. Jak celkový, tak i statický tlak se snižují s rostoucím úhlem zakřivení proudu. Při odklonu proudu do rozmezí $\pm 17^\circ$ ale jednotlivé rozdíly téměř zaniknou, takže systematická chyba v tomto rozmezí činí $< 1\%$ [8].



Obr. 14: Prandtlova trubice s připojeným U-manometrem [8].

Sondy měřící směr proudění

Protože se u rychlosti proudění jedná o vektorovou veličinu, musí být k jejímu úplnému popisu určena nejen její hodnota, ale i směr v prostoru. U těchto sond rozlišujeme sondy, které slouží pouze k určení směru proudění (směrové dvouotvorové sondy) a sondy, které mimo směr proudění určují i její velikost (víceotvorové sondy) [8].

- *Směrové sondy dvouotvorové*

U sond na měření celkového tlaku platí, že při malých změnách úhlu proudění nedochází k ovlivnění naměřeného tlaku. To ovšem neplatí při úhlech větších. V tom případě je možné pro měření směru proudění použít dvě symetrické trubice umístěné šikmo ke směru proudění. Takzvaná dvouotvorová sonda slouží k určení směru proudění při proudění rovinném [8].



Obr. 15: Dvouotvorová sonda [8].

- *Tříotvorové sondy pro měření rovinného proudění*

Tyto sondy obsahují obvykle tři odběry, díky kterým měříme tlaky. Proto se tyto sondy často označují jako tzv. tříotvorové sondy [9]. Podle provedení špičky sondy rozlišujeme mezi válcovou a lichoběžníkovou sondou.

Princip měření tříotvorovou sondou je patrný z obrázku č. 20. Předpokladem je, že se jedná o rovinné proudění, přičemž toto proudění je kolmé na tělo sondy. Z toho vyplývá, že vektor rychlosti leží v rovině 2–1–3. Při libovolném nastavení sondy naměříme následující rozdíly tlaků [8]:

- $p_2 - p_3$
- $p_1 - p_2$
- $p_1 - p_u$

kde p_u označuje tlak okolí. Následně je možné sondou otáčet tak dlouho, dokud nedosáhneme stejné hodnoty tlaků na levé i pravé straně $p_2 - p_3 = 0$. Tím je sonda ustavena a úhel $\Delta\beta$ odpovídá požadovanému úhlu [9]. Vektor rychlosti leží ve směru odběru „1“ a tlak p_1 odpovídá celkovému tlaku. Známe-li tlak okolí, můžeme z rozdílu tlaků $p_1 - p_u$ určit celkový tlak $p_t = p_1$. Statický tlak není možné měřit přímo a je určován pomocí rozdílu tlaků $p_1 - p_2$ z kalibrační charakteristiky. Kalibrační charakteristika je určována vždy pro konkrétní sondu při volném proudu danou rychlost, je tedy možné předpokládat, že je rychlost známa [9]. Pro koeficient dynamického tlaku platí:

$$k_d = \frac{p_1 - p_u}{p_1 - p_2} \quad (11)$$

Koeficient dynamického tlaku je závislý na rychlosti proudění (přesněji řečeno na Reynoldsově číslu sondy). Statický tlak lze spočítat z rovnice č. 11 [8].

3.3 Výhody a nevýhody měření pneumatickými sondami

Pneumatické sondy představují důležitý nástroj k měření tlaků, příp. rychlostí v proudícím médiu. Oproti použití žárového anemometru (CTA), popř. laserového anemometru (LDA), vykazuje měření pneumatickými sondami následující výhody:

- Pneumatické sondy jsou lehce smontovatelné a v porovnání s CTA velmi robustní.
- Pořizovací náklady pneumatických sond včetně měřící techniky tlaku jsou v porovnání s CTA a především LDA výrazně nižší.
- Na rozdíl od LDA vzniká u pneumatických sond souvislý signál, který může být dále relativně snadno zpracován.
- Pro určení ztrát vznikajících při proudění je zapotřebí měřit statický tlak. Na rozdíl od pneumatických sond není ani u CTA ani LDA možné měření tlaků [8].

Naopak nevýhody pneumatických sond jsou následující:

- Oproti LDA je u pneumatických sond patrná rušící složka vznikající při samotném měření. Ke snížení vlivu rušivé složky je zapotřebí neustálého snižování (miniaturizace) velikosti sond.
- Kvůli konečným rozměrům sond vznikají při měření systematické chyby a to jak u rychlostních polí, tak i při měření v blízkosti stěny.
- Další nevýhodou pneumatických sond jsou obvykle nestejnoroelé podmínky mezi kalibrací a vlastním měřením (Machovo číslo, Reynoldsovo číslo, intenzita turbulence).
- U pneumatických sond se obvykle jedná o tzv. stacionární měření. Turbulentní proudění se vyznačují stochastickými (nahodilými) rychlostními fluktuacemi (výkyvy). Skrze setrvačnost daného objemu mezi měřicími otvory a zařízením na měření tlaku jsou tyto výkyvy tlumeny a měříme časové střední hodnoty. Získané výsledky jsou pak pro technické a inženýrské aplikace obvykle dostačující [8].

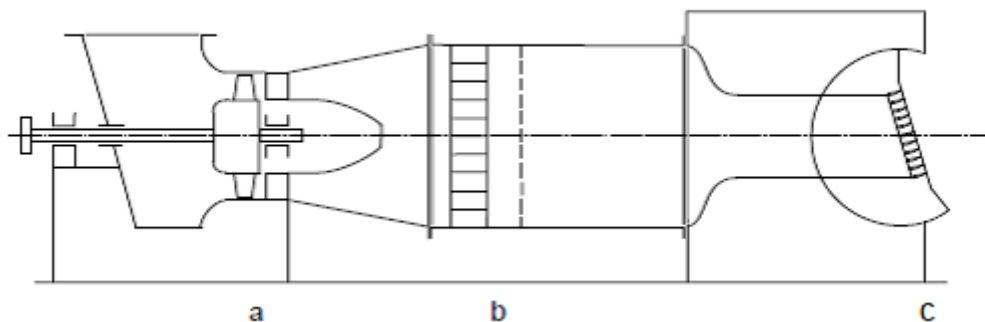
4 Měření obtékání lopatky za turbínovou mříží

4.1 Popis aerodynamického tunelu

První měření bylo prováděno na Technické univerzitě ve Vídni pod vedením Prof. Willingera a to v laboratořích Ústavu energetických zařízení a termodynamiky. Samotné zařízení pro měření charakteristik lopatkových mříží pracuje v tlakovém provozu. Vzduch je nasáván z vnějšku budovy a postupně stlačován v uzavřeném kanále, který přivádí vzduch do lopatkové mříže při přesně daném směru proudění. K obstarání vzduchu slouží axiální ventilátor s představitelnou přední řadou lopatek poháněný trojfázovým motorem. Ventilátor vykazuje následující parametry:

- vnější průměr $D_a = 630$ mm,
- objemový tok $\dot{V} = 2,7$ m³.s⁻¹,
- zvýšení tlaku $\Delta p = 15$ mbar..

Na axiální ventilátor je připojen difuzor, na jehož konci proudí vzduch skrze usměrňovač a polopropustné turbulentní síto do uklidňovací komory o průměru 1200 mm. Následně proudí vzduch skrze přechodovou část, kde se mění průřez z kruhového na čtvercový. Plocha čtvercového průřezu činí $B \times H = 150$ mm \times 540 mm = 81000 mm². Kvůli prudkému zrychlení proudění (poměr průřezů činí přibližně 1:14) je na celé lopatkové mříži dosaženo rovnoměrného proudění. Lopatková mříž je vestavěna do speciální kolébky z plexiskla. Kolébka je uložena na válečcích tak, že lze nastavit libovolný úhel vstupního proudění. K uzpůsobení spodního a horního ohraničení kanálu vzhledem k otočné kolébce slouží přestavitelné kusy z plexiskla [8].



Obr. 16: Schéma aerodynamického tunelu (a axiální ventilátor s difuzorem, b usměrňovač a turbulentní síto, c kolébka s lopatkovou mříží).



Obr. 17: Aerodynamický tunel s připojenou měřicí aparaturou.

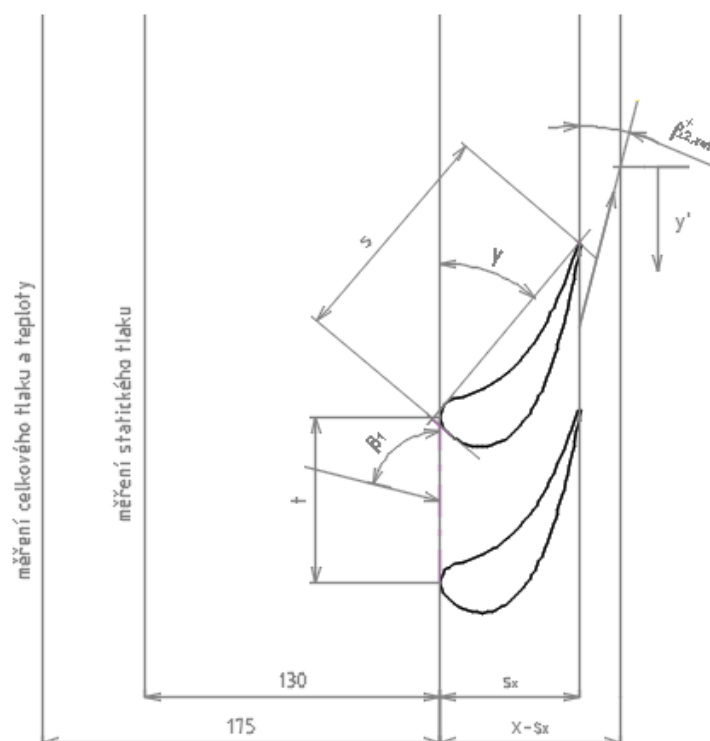
4.2 Popis lopatkové mříže

Geometrie lopatkové mříže je schematicky zobrazena na obr. 18. Profil lopatek vznikl jako řez oběžnou řadou lopatek plynové turbíny. Nezkroucené lopatky s konstantní délkou tětivy byly vyrobeny frézováním z hliníku. Na jedné straně je každý z šesti čepů pevně spojen s postranní stěnou kanálu. Mezi lopatkou a stěnou kanálu je možné dosahovat různě velkých mezer. Pro změřený rovinného proudění je mezera nastavena na nulovou hodnotu [8]. Celkem je v mříži upevněno devět lopatek.

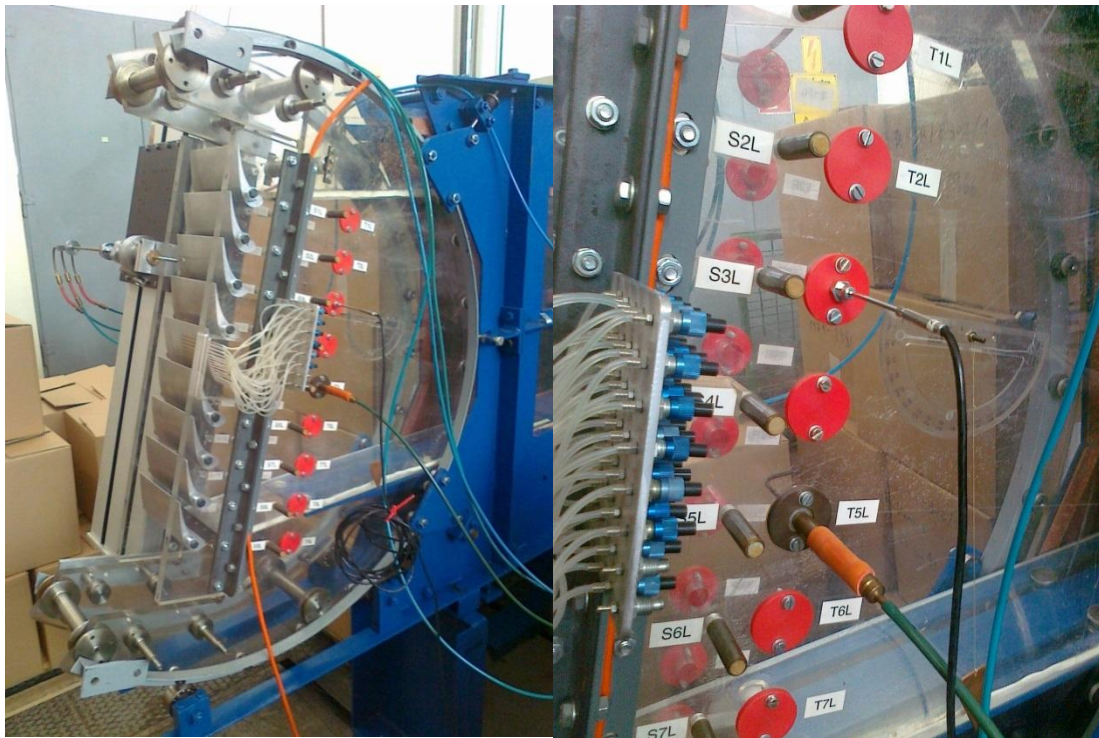
V literatuře je tento typ mříže známý pod jménem Perdizziho turbínová mříž podle Prof. Perdizziho, který se mimo jiné zabýval experimentálním vyšetřováním prostorového proudění v turbínové mříži při tzv. off-design stavu [10].

Tab. 1: Geometrie lopatkové mříže

Délka tětivy	$s = 100 \text{ mm}$
Délka lopatky	$h = 150 \text{ mm}$
Mezera mezi lopatkou a stěnou	$\tau = 0 \text{ mm}$
Rozteč lopatkové mříže	$t = 73 \text{ mm}$
Úhel nastavení	$\gamma = 39,9^\circ$



Obr. 18: Geometrie lopatkové mříže s jednotlivými rozměry.

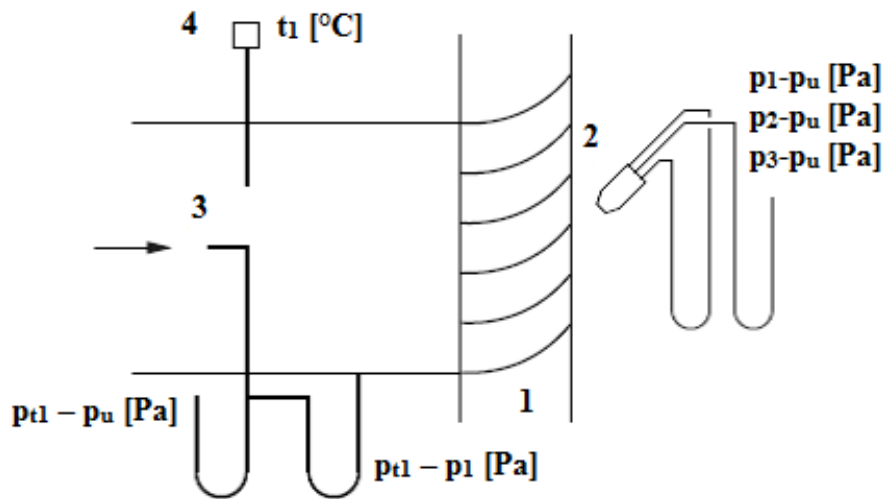


Obr. 19: Experimentální zařízení a umístění měřících sond.

4.3 Popis měřícího zařízení

Popis zařízení je znázorněn na obr. 20. K určení charakteristiky proudění na vstupu do lopatkové mříže poslouží jednak tlakové odběry ve stěnách – pro určení statického tlaku a jednak Pitotova trubice – pro určení tlaku celkového. Jedná se o typ 3/1, tedy rozměr vnějšího a vnitřního průměru sondy je po řadě 3 mm a 1 mm. Teplota je měřena pomocí odporového teploměru PT100. Měření za turbínovou mříží je prováděno pomocí tříotvorové sondy [8]. Tato sonda je někdy pro svůj typický tvar nazývána jako typ kobra. Její výhodou je, že při jejím natáčení zůstává zachován měřící bod. To je důvod, proč je možné sondu v tunelu směřovat a určit úhel nabíhajícího proudu vyrovnáním tlakových odběrů na levé i pravé straně ve směru osy otáčení sondy. Následně je možné určit daný úhel pomocí mechanického odečtu [10]. Traverzovací zařízení umožňuje posun sondy paralelně s čelem lopatkové mříže. Držák sondy umožňuje požadované natočení sondy [8]. Aerodynamický tunel se zapne jednu hodinu před měřením kvůli zahřátí a ustálení hodnot.

Princip měření teploty a celkového tlaku je patrný z obrázku 19 a 20 (snímač teploty je umístěn na pozici T3L, Pitotova trubice na pozici T5L), měření statického tlaku je umístěno na opačné straně kolébky a je proto v obrázku skryto. Sonda pohybující se po traverze je umístěna na výstupu z lopatkové mříže [8].



Obr. 20: Schéma měřícího zařízení [8].



Obr. 21: Tříotvorová sonda typu kobra.

4.4 Postup měření

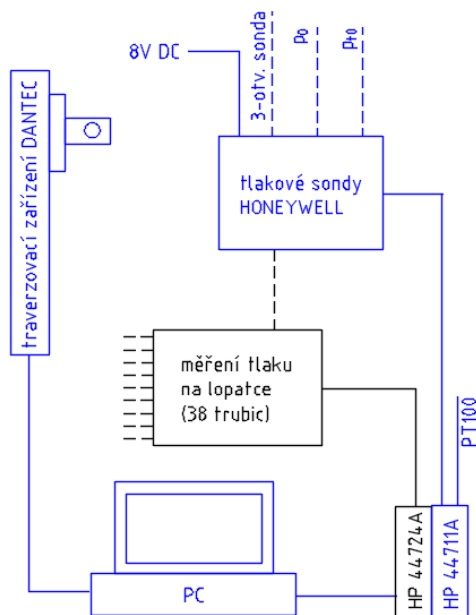
1. Zaznamenání hodnoty okolního tlaku p_u a teploty okolí t_u
2. Ověření uspořádání měřících prvků a nastavení parametrů určených k měření (úhel relativní rychlosti na vstupu do mříže β_l , vzdálenost sondy od okraje lopatkové mříže $x - s_x$).
3. Spuštění zkušebního stanoviště.
4. Čekání, až dojde k ustálení stavu. Teplota t_l před lopatkovou mříží by se neměla měnit (před zapnutím ventilátoru je teplota t_l přibližně 20 °C, po zapnutí pak téměř 30 °C, proto je třeba počkat na ustálení teploty).
5. Měření veličin před lopatkovou mříží (úhel relativní rychlosti na vstupu do mříže β_l , rozdíl tlaků $p_{t1} - p_u$ a $p_{t1} - p_1$ a rychlost proudění na vstupu do mříže w_l).

6. Najetí s tříotvorovou sondou do výchozí polohy.
7. Naměření tlaků ($p_1 - p_u$, $p_2 - p_u$, $p_3 - p_u$) pomocí kobra sondy, měření probíhalo celkem ve 41 bodech [8].

Specifika měření

1. Úhel relativní rychlosti na vstupu do mříže β_1 byl měřen pomocí úhloměru umístěného na boční stěně kolébky (obr. 19).
2. Nastavení sondy v horizontálním směru proběhlo tak, aby osa sondy byla pokud možno ve vodorovném směru a pomocí otočné stupnice umístěné na boku sondy byla nastavena referenční hodnota úhlu relativní rychlosti $\beta_{2,ref}^+ = 15^\circ$, měřeného ze záporného směru y' .
3. Naměření hodnoty teploty t_1 a rychlosti na vstupu do mříže w_1 proběhlo celkem 50 krát a z výsledků se vypočetla střední hodnota, která se následně zaznamenala.
4. Měření tlaků pomocí otvorů ve stěně a Pitotovy trubice ($p_{t1} - p_u$ a $p_{t1} - p_1$) proběhlo pouze jedenkrát.
5. Měření rozdílů tlaků pomocí sondy kobra začalo ve výchozí poloze $z = 0$ mm, kde proběhlo celkem 50 měření. Z těch se následně získala střední hodnota, kterou počítač uložil, následně se sonda posunula pomocí traverzovacího zařízení o vzdálenost $\Delta y' = 1,825$ mm a měření proběhlo nanovo.

Schéma měřicí aparatury pro měření pneumatickou sondou je znázorněno na obrázku 22 modrou barvou.



Obr. 22: Měřicí aparatura [21].

Tab. 2: Naměřené hodnoty okolního vzduchu.

Tlak okolního vzduchu	$p_u = 988,6$ mbar
Teplota okolního vzduchu	$t_u = 21,7$ °C

Tab.3: Naměřené hodnoty před lopatkovou mříží.

Úhel relativní rychlosti	$\beta_1 = 76,1^\circ$
Rozdíl tlaků	$p_{t1} - p_u = 3012 \text{ Pa}$
Teplota na vstupu do mříže	$t_1 = 29,1 \text{ }^\circ\text{C}$
Rozdíl tlaků	$p_{t1} - p_1 = 202 \text{ Pa}$
Nátoková rychlost	$w_1 = 18,56 \text{ m/s}$

Tab.4: Naměřené hodnoty za lopatkovou mříží.

Referenční úhel relativní rychlosti, měřený ze záporného směru y'	$\beta_{2,\text{ref}}^+ = 15^\circ$
Vzdálenost sondy od lopatkové mříže	$x - s_x = 18,15 \text{ mm}$
Počet měřených bodů	$n = 41$
Krok posuvu traverzovacího zařízení	$\Delta y' = 1,825 \text{ mm}$

5 Řešení pomocí počítačové simulace

Numerické řešení začíná naměřenými hodnotami pomocí pneumatické sondy v měřící laboratoři. Naměřené hodnoty rozdílu tlaků jsou uvedeny v tab. 9.

5.1 Vyhodnocení experimentu

Přesné vyhodnocení experimentu vykonávaných na rovinných mřížích se uskutečňuje pomocí tzv. impulsové věty. Impulsová věta je aplikována na dvě roviny rovnoběžné s mříží a to před a za lopatkovou mříží. Protože se jedná o nízkorychlostní aerodynamický tunel, leží Machova čísla pod hodnotou 0,2, a tedy hustota je konstantní (bude dále ověřeno). Proto je možné považovat vzduch za nestlačitelný.

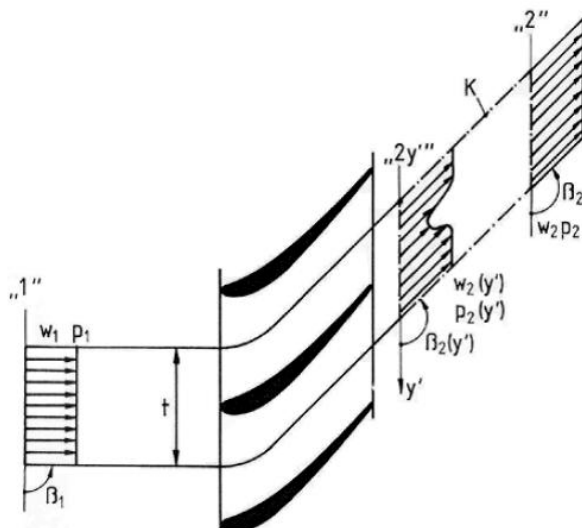
Pro vyhodnocení je nezbytné měření tří veličin nejméně podél rozteče lopatkové mříže, a to před i za mříží. Měřenými veličinami jsou:

- statický tlak,
- směr rychlosti proudění,
- velikost rychlosti proudění.

Protože se dá ve vzduchovém kanálu před lopatkovou mříží očekávat konstantní rozdělení těchto tří veličin, stačí je změřit pouze na jednom vhodném místě před mříží. V uvedeném případě se tak děje ve vzdálenosti 175 mm před mříží pro celkový tlak a 130 mm před mříží pro tlak statický (obr. 18). Měření směru proudění před mříží není nezbytné, protože je dáno osou kanálu. Za mříží následuje bodové měření v malých intervalech ($\Delta y' = 1,825 \text{ mm}$) v rovině rovnoběžné s mříží.

Bezprostředně za mříží nejsou jednotlivé veličiny v bodech měření sondou konstantní. K tomu, aby bylo možné získat výsledky měření nezávislé na umístění měřící roviny za lopatkovou mříží, je nezbytné zjišťované veličiny přepočítat na homogenní rovnoběžné proudění, tak jak by tomu bylo při velké vzdálenosti za lopatkovou mříží.

K vyšetření veličin homogenního proudění lze využít hmotnostní bilanci a impulsovou větu, která se aplikuje na kontrolní objem K . Tento kontrolní objem tvoří dvě proudnice, které jsou vzájemně ve vzdálenosti rozteče lopatkové mříže t a dále měřící roviny $2y'$ a roviny 2, která leží v takové vzdálenosti od mříže, kde se již vyskytuje homogenní proudění [8].



Obr. 23: Vyhodnocení proudění za mříží a kontrolní objem K [8].

Rovnice pro hmotnostní bilanci zní:

$$\rho w_2 \sin \beta_2 = \rho \frac{1}{t} \int_0^t w_2 \sin \beta_2 \, dy' \quad (12)$$

Impulsová věta aplikovaná na rovinu kolmou na čelo mříže:

$$p_2 + \rho w_2^2 \sin^2 \beta_2 = \rho \frac{1}{t} \int_0^t w_2^2 \sin^2 \beta_2 \, dy' + \frac{1}{t} \int_0^t p_2 \, dy' \quad (13)$$

a impulsová věta pro rovinu rovnoběžnou s čelem mříže:

$$\rho w_2^2 \sin \beta_2 \cos \beta_2 = \rho \frac{1}{t} \int_0^t w_2^2 \sin \beta_2 \cos \beta_2 \, dy' \quad (14)$$

Měření pomocí impulsové věty vyžaduje řešení systému uvedených rovnic, jakož i provedení vícero numerických integrací, proto se použil zjednodušující vyhodnocovací proces s určitými předpoklady:

- 1) Úhel relativní rychlosti na výstupu z mříže je podél rozteče lopatkové mříže konstantní $\beta_2' = \beta_2 = \text{konst.}$ Tento předpoklad je o to lépe splněn, čím dále od lopatkové mříže měřící rovina leží.
- 2) Statický tlak je podél rozteče lopatkové mříže konstantní a odpovídá tlaku okolí $p_2(y') = p_u = \text{konst.}$ Tento předpoklad je zdůvodněn tím, že v případě proudění za mříží se jedná v podstatě o volný proud. Ve volném proudu je statický tlak vždy roven tlaku okolí [8].

Jedinou měnící se veličinou tedy zůstává velikost rychlosti w_2 .

$$w_1 = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t w_2^2 \, dy'} \quad (15)$$

5.2 Výpočet veličin před vstupem do lopatkové mříže

Hodnotu celkového tlaku p_{t1} lze vypočítat z naměřeného rozdílu tlaků $p_{t1} - p_u = 3012$ Pa, přičemž hodnota naměřeného tlaku okolí p_u činila $p_u = 988,6$ mbar, což odpovídá hodnotě 98860 Pa. Hodnotu statického tlaku p_1 lze opět zjistit z rozdílu tlaků $p_{t1} - p_1 = 202$ Pa.

Z tohoto vyplývá, že hodnota celkového a statického tlaku je po řadě:

- $p_{t1} = 101872$ Pa
- $p_1 = 101670$ Pa

Dalšími počítanými veličinami byli:

$$\text{- hustota } \rho = \frac{p_1}{r \cdot T_1} = 1,172 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (16)$$

$$\text{- rychlost na vstupu do mříže (pro kontrolu) } w_1 = \sqrt{\frac{2(p_{t1} - p_1)}{\rho}} = 18,57 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad (17)$$

$$\text{- rychlost zvuku na vstupu do mříže } a_1 = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T_1} = 349,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad (18)$$

kde: κ je izotropický exponent, jeho hodnota pro vzduch za normálních podmínek činí $\kappa = 1,41$, r je měrná plynová konstanta vzduchu, jejíž hodnota je za normálních podmínek $r = 287,06$ J/kg.K a T je termodynamická teplota.

$$\text{- Hodnota Machova čísla na vstupu do mříže je rovna } Ma_1 = \frac{w_1}{a_1} = 0,053, \quad (19)$$

$$\text{- střední teplota vzduchu v tunelu } t_s = \frac{t_u + t_1}{2} = 25,4 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (20)$$

$$\text{- kinematická viskozita (pomocí interpolace) } \nu(25,4 \text{ } ^\circ\text{C}) = 1,56 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^{-1}}. \quad (21)$$

Z výsledků je patrné, že vypočtená rychlost na vstupu do mříže $w_1 = 18,57$ m/s je téměř shodná s rychlostí naměřenou při experimentu $w_1 = 18,56$ m/s, dále byla vypočítána hodnota Machova čísla na vstupu do mříže, protože je jeho hodnota $Ma = 0,053 \leq 0,2$, lze proudění považovat za nestlačitelné. V dalších výpočtech bude používána hodnota rychlosti naměřená při experimentálním měření $w_1 = 18,56$ m/s.

5.3 Stanovení tlaků za lopatkovou mříží

Aby bylo možné zjistit hodnoty tlaků za mříží, musí být nejprve stanoveny hodnoty tlaků p_1 , p_2 a p_3 z experimentálně sondou naměřených tlaků $p_1 - p_u$, $p_2 - p_u$ a $p_3 - p_u$ (tab. 9). Pro získání daných tlaků tedy stačí přičíst k jednotlivým hodnotám naměřených tlaků tlak okolí. Získali jsme tlaky p_1 , p_2 , p_3 (tab. 10).

Před samotným měřením bylo nejprve potřeba sondu kalibrovat. Jak již bylo zmíněno, může být tříotvorová sonda použita k měření směru proudění a dále k měření celkového a statického tlaku. Vztah mezi těmito veličinami a úhlem vybočení $\Delta\beta$ je popsán kalibračními koeficienty.

Existuje vícero definicí těchto koeficientů, ovšem v této práci se zaměřím na definici od Treaster a Yocum [12], podle které je koeficient celkového tlaku k_t , koeficient statického tlaku k_s a směrový koeficient k_β redukován na podmínky u třítvorové sondy [13].

Vztahy pro výpočet koeficientů jsou následující:

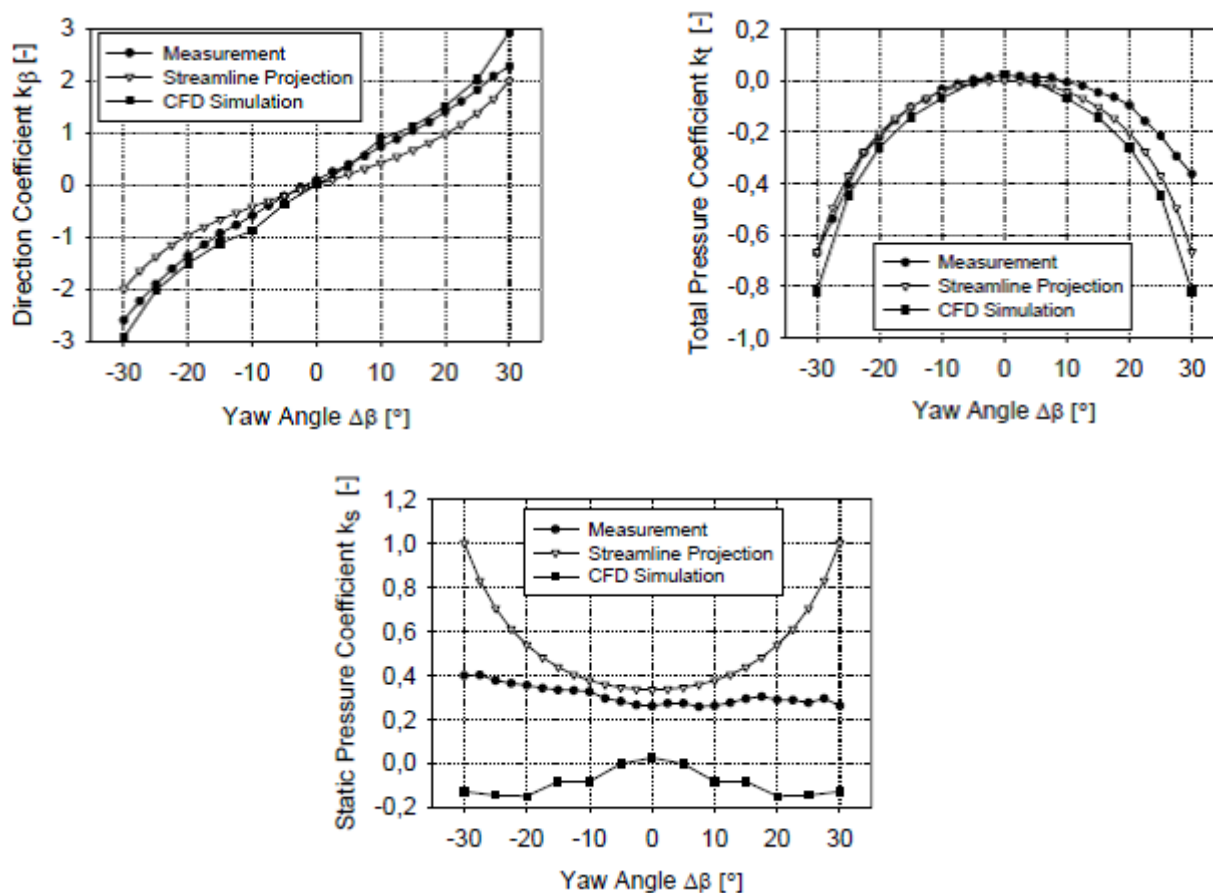
$$k_\beta = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p} \quad k_t = \frac{p_1 - p_t}{p_1 - p} \quad k_s = \frac{\bar{p} - p}{p_1 - p} \quad (22)$$

kde: \bar{p} je střední hodnota tlaku. Jeho hodnotu lze spočítat jako:

$$\bar{p} = \frac{p_2 + p_3}{2} \quad (23)$$

Aby bylo možné spočítat hodnoty jednotlivých kalibračních koeficientů, je nutné znát kalibrační charakteristiky, ty zjišťoval experimentálně a ověřoval analyticky pomocí modelu Willinger (tab. 9) [13].

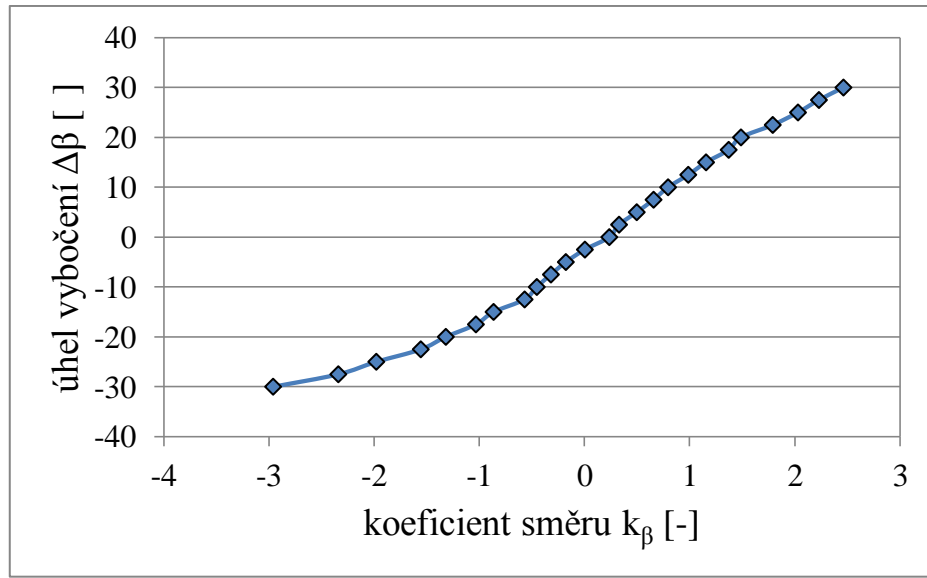
Z průběhu hodnot jednotlivých koeficientů (obr. 24) je patrné, že u koeficientu směru k_β byly zjištěné hodnoty získané měřením a CFD simulací relativně stejné, to stejné platilo i pro koeficient celkového tlaku k_t . Naopak hodnoty zjištěné u koeficientu statického tlaku k_s se u jednotlivých metod (měření, CFD simulace) značně lišily.



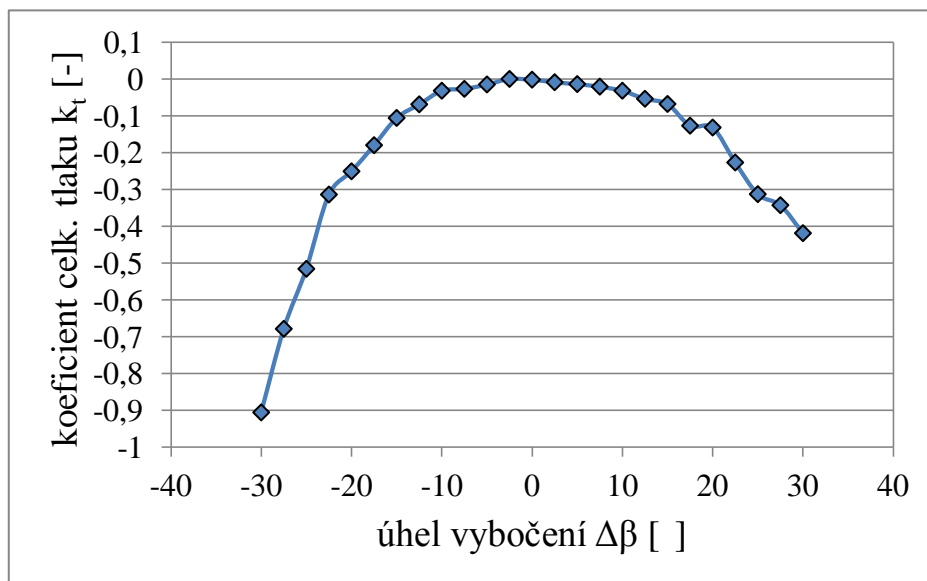
Obr. 24: Kalibrační charakteristiky [13].

Z naměřených hodnot získaných z kalibračních křivek pro Reynoldsovo číslo sondy $Re_d = 11300$ a různé hodnoty úhlu vybočení sondy $\Delta\beta$ dodaných Willingerem byly tedy pomocí vztahů (22) a (23) určeny po řadě hodnoty celkového tlaku p_{t2} a statického tlaku p_2 pro všechny experimentálně naměřené body, které jsou spolu s vypočtenými korekčními součiniteli uvedeny v tab. 10 a zobrazeny v grafech 1 až 5. Přesné hodnoty jednotlivých veličin byly zjištěny pomocí interpolace.

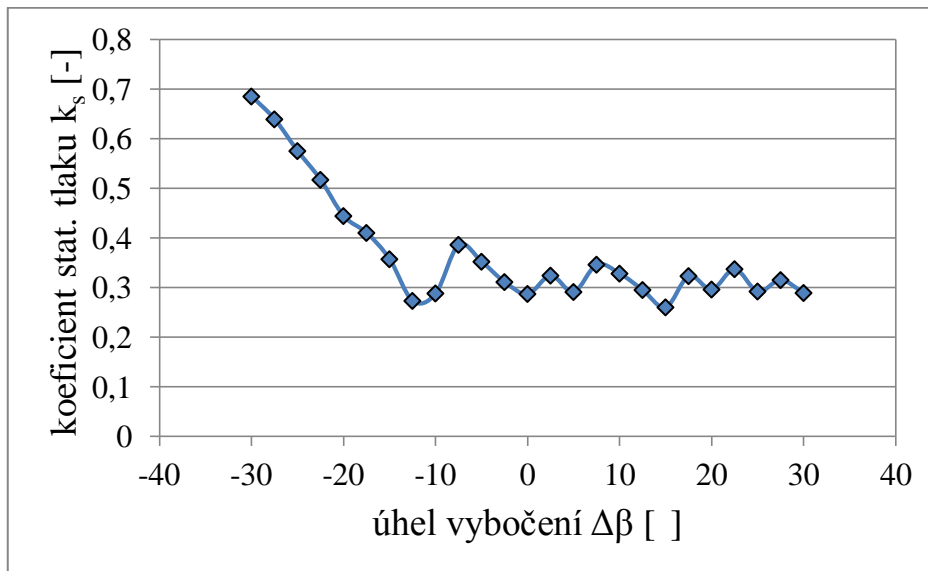
Z výsledků je patrné, že vypočtené hodnoty statického tlaku p_2 téměř odpovídají tlaku okolí p_u , tak jak bylo předpokládáno.



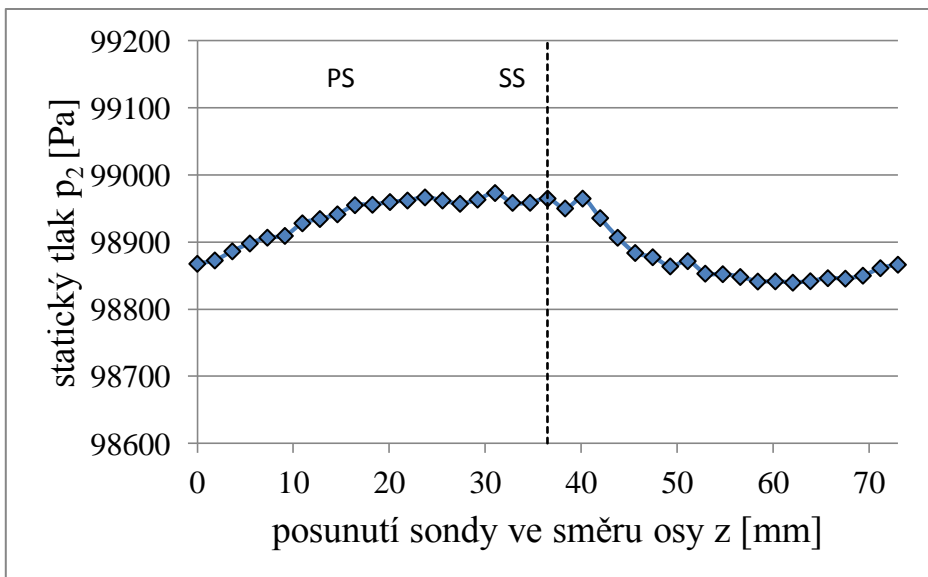
Graf 1: Koefficient směru k_β



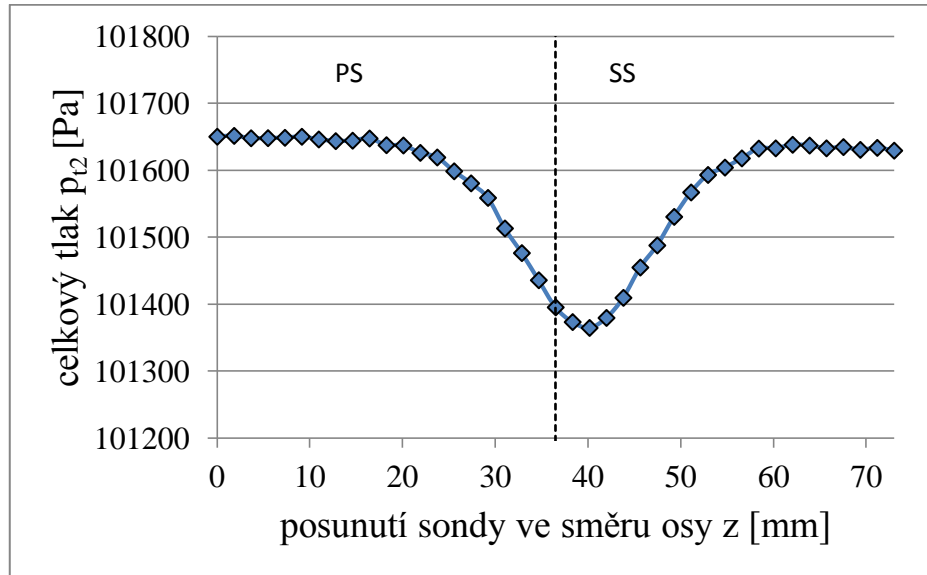
Graf 2: Koefficient celkového tlaku k_t .



Graf 3: Koeficient statického tlaku k_s .



Graf 4: Průběh statického tlaku na výstupu z mříže.



Graf 5: Průběh celkového tlaku na výstupu z mříže.

Dále bylo potřeba prověřit, zda je maximální hodnota Machova čísla na výstupu z mříže $Ma \leq 0,2$ a proudění lze tedy považovat za nestlačitelné v celé oblasti výpočtu:

$$Ma_{2, \text{stř}} = \frac{w_{2, \text{stř}}}{a_{2, \text{stř}}} = \frac{w_{2, \text{stř}}}{\sqrt{\kappa \cdot r \cdot T_{2, \text{stř}}}} = 0,196 \quad (24)$$

kde: $T_{2, \text{stř}}$ je střední termodynamická teplota na výstupu z mříže pro maximální rychlost w_2 .

$$T_{2, \text{stř}} = \frac{p_{2, \text{stř}}}{r \cdot \rho} = 294 \text{ K} \quad (25)$$

Střední hodnota rychlosti vzduchu $w_{2, \text{stř}}$ a tlaku $p_{2, \text{stř}}$ na výstupu z mříže byly získány jako:

$$w_{2, \text{stř}} = \sqrt{\frac{\Delta y'}{t} \sum_{i=1}^{40} \left(\frac{w_2^2 \text{ } i+1 + w_2^2 \text{ } i}{2} \right)} = 67,49 \frac{m}{s} \quad (26)$$

$$p_{2, \text{stř}} = \sqrt{\frac{\Delta y'}{t} \sum_{i=1}^{40} \left(\frac{p_2^2 \text{ } i+1 + p_2^2 \text{ } i}{2} \right)} = 98906 \text{ Pa} \quad (27)$$

Podmínka pro nestlačitelné proudění je tedy splněna.

5.4 Stanovení rychlosti a úhlu vybočení sondy

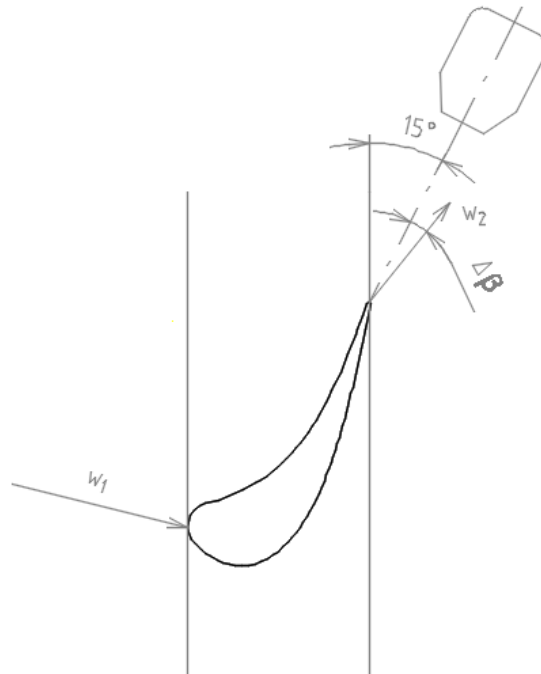
Zbývá ještě spočítat rychlost w_2 na výstupu z lopatkové mříže v jednotlivých bodech měření. Jejich hodnotu lze získat z rovnice:

$$w_2 = \sqrt{\frac{2(p_{t1} - p_1)}{\rho}} \quad (28)$$

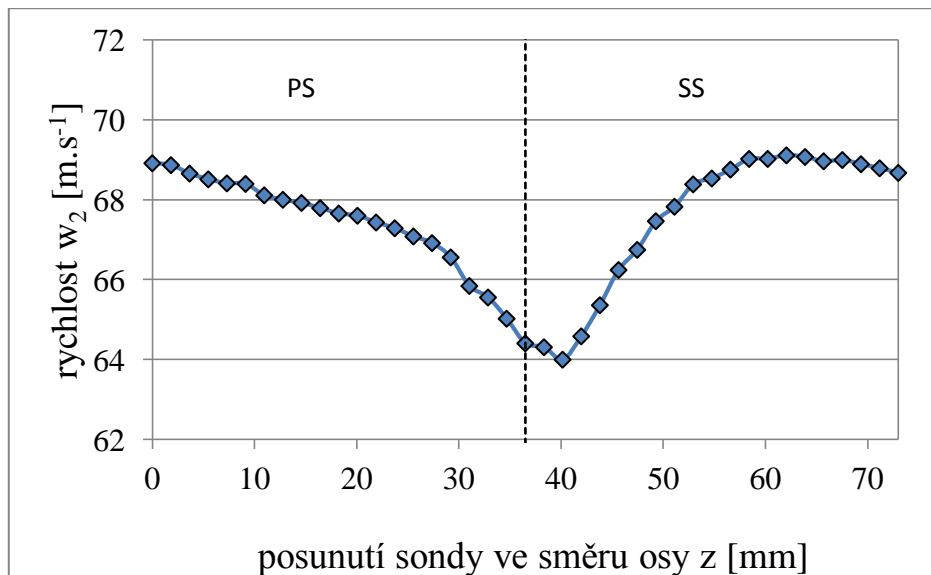
Úhel relativní rychlosti, měřený ze záporného směru y' β_2^+ lze získat ze vztahu:

$$\beta_2^+ = 15^\circ + \Delta\beta \quad (29)$$

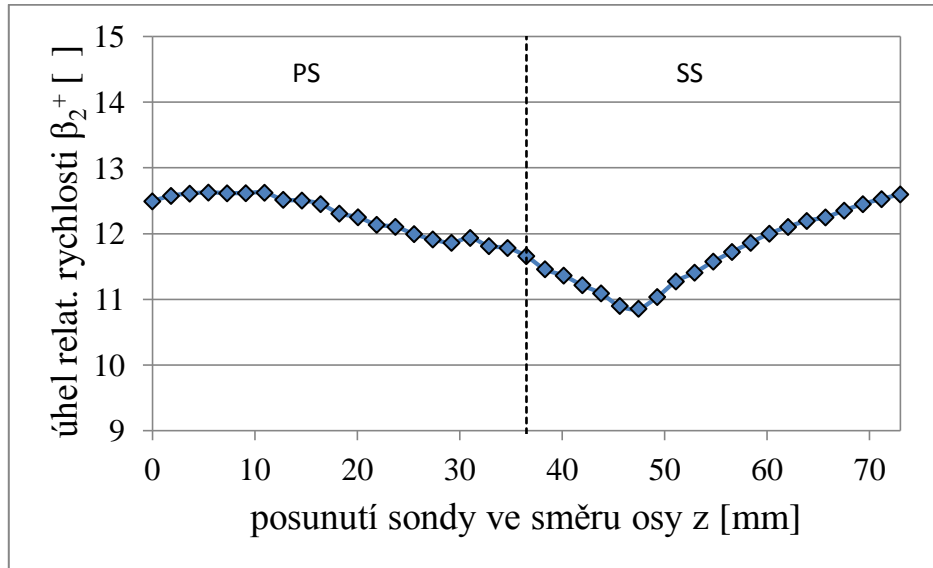
kde úhel $\Delta\beta$ značí úhel vybočení získaný při kalibraci tříotvorové sondy a kde $\beta_{2,ref}^+ = 15^\circ$.
Získané hodnoty rychlosti a úhlu vybočení jsou uvedeny v tab. 11.



Obr. 25: Úhel $\Delta\beta$ při měření rychlostní sondou s rozměrem sondy $d = 2,4$ mm [13].



Graf 6: Průběh rychlosti na výstupu z mříže.



Graf 7: Úhel relativní rychlosti měřený ze záporného směru y' .

Ověření správnosti analytických výsledků lze dosáhnout porovnáním poměrů rychlostí na vstupu a výstupu do a z lopatkové mříže:

$$\frac{w_{2, \text{stř}}}{w_1} = 3,64 \quad (30)$$

a poměrů jednotlivých rychlostí, získaných pomocí goniometrických funkcí z rychlostního trojúhelníka:

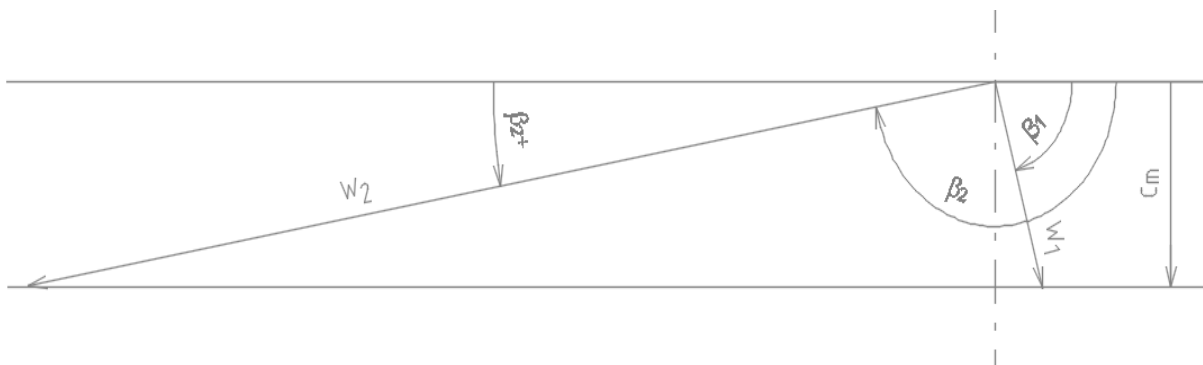
$$\sin \beta_1 = \frac{c_m}{w_1} \quad \sin \beta_2^+ = \frac{c_m}{w_{2, \text{stř}}},$$

kde je po úpravě:

$$w_1 \cdot \sin \beta_1 = w_{2, \text{stř}} \cdot \sin \beta_2^+, \quad (31)$$

$$\frac{w_{2, \text{stř}}}{w_1} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2^+} = 3,75,$$

kde: c_m je tzv. meridiánová rychlost. V ideálním případě by se sobě oba výsledky měly rovnat. Tento případ však nenastal, což naznačuje chybu měření, viz dále.

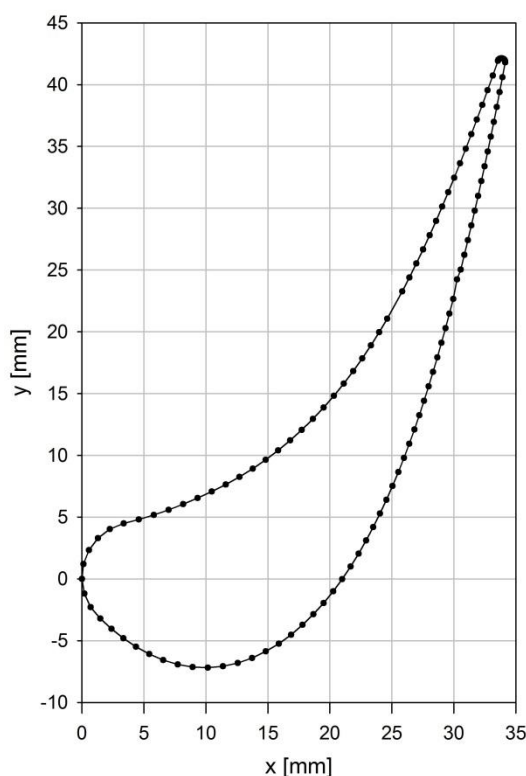


Obr. 26: Schematické znázornění rychlostního trojúhelníka [dle Willingera].

Znázornění jak tříotvorové sondy, tak i rychlostního trojúhelníku je pouze schematické a jeho rozměry tedy nemusí odpovídat skutečným hodnotám.

5.5 Vytvoření 3D modelu

K vytvoření modelu měřeného kanálu byl použit program Autodesk Inventor Professional. Samostatná lopatka byla vytvořena pomocí 113 bodů přesně definujících celý její profil. Ačkoliv se v případě měření proudění v aerodynamickém tunelu jedná o 2D problém (sonda se při měření tlaků pohybuje po přímce) byl vytvořen 3D model, přičemž šířka kanálu byla pouze $b = 2$ mm a byla tedy vzhledem k její délce zanedbatelná. Dané řešení lze tedy považovat za rovinné. Celková délka modelu činila 316 mm (obr. 29). Výkres aerodynamického tunelu a lopatkové mříže byl vytvořen v programu Autodesk AutoCAD 2015.



Obr. 27: Body definující profil lopatky.

Úhel vybočení sondy je podle zadání $\beta_{2,ref}^+ = 15^\circ$. Při modelování byl však tento úhel $14,5^\circ$, přičemž se vycházelo z měření, které provedl Perdichizzi a Dossena [10]. Změna úhlu nemá vzhledem k následně použitým korekčním charakteristikám na výpočet vliv.

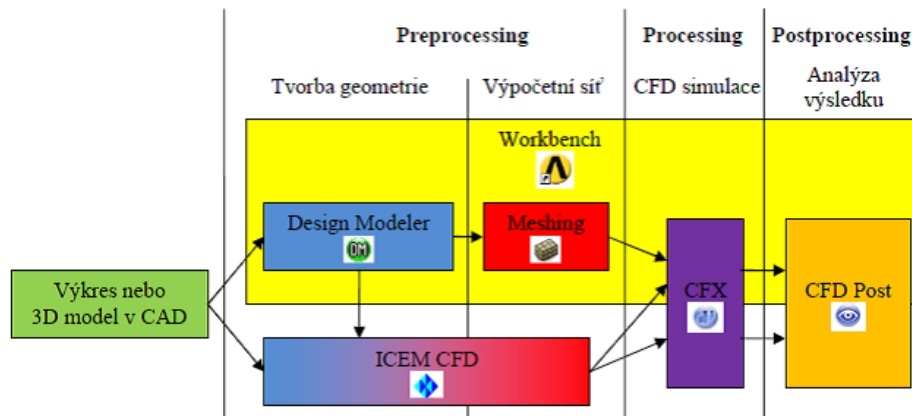
5.6 Postup simulace proudění v programu Ansys/CFX

Proces numerické simulace sestává ze tří kroků:

- **preprocessing** – je přípravnou fází numerické simulace, sestává z vykreslení geometrie a její úpravy, dále sem patří vytvoření výpočetní sítě,

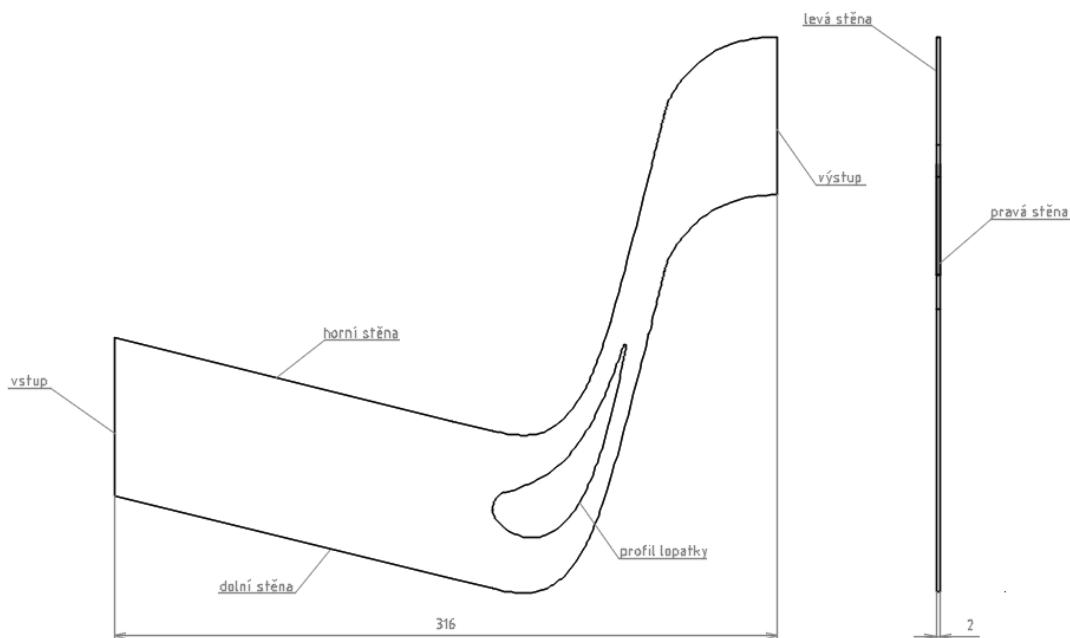
- **processing** – je fází definování a řešení simulace, v tomto kroku se nastavují všechny okrajové podmínky a parametry řešení nezbytné k úspěšnému výpočtu,
- **postprocessing** – je fází analýzy výsledků simulace, je možné zde vytvářet grafické výstupy a získávat důležité parametry.

Nejrozsáhlejším krokem je preprocessing, kde je nutno precizně připravit geometrii. Jednotlivé kroky numerické simulace jsou prováděny v základních programech, viz obr. 28 [2].



Obr. 28: Schéma postupu při numerické simulaci [2].

Model vytvořený v programu Autodesk Inventor byl po dokončení načten v programu Design Modeler, který se nachází v nabídce Ansys Workbench 14.5, který slouží jako univerzální rozhraní pro celou řadu programů [16]. Spolu s geometrií byl do programu Design Modeler, sloužícímu na vytváření či změnu geometrie 3D těles, importován i kartézský souřadnicový systém s počátkem v náběhovém bodě lopatky [2]. Pojmenování jednotlivých ploch je uvedeno na obr. 29.



Obr. 29: Pojmenování ploch včetně souřadnicového systému.

5.7 Vytvoření výpočetní sítě

5.7.1 Teorie sítě

Výpočtová oblast pokrytá sítí je základem matematického modelování. Jedná se o systém rozdělení výpočtové oblasti na dílčí na sebe navazující 2D buňky ve dvoudimenzionálním nebo 3D buňky ve třídimeznionálním prostoru. Vzhledem k náročnosti na výkon výpočetní techniky platí, že výpočet je o to náročnější:

- čím více rovnic je v rámci matematického modelu do výpočtu zahrnuto,
- čím více má výpočtová oblast buněk,
- čím méně kvalitní je síť výpočtové oblasti.

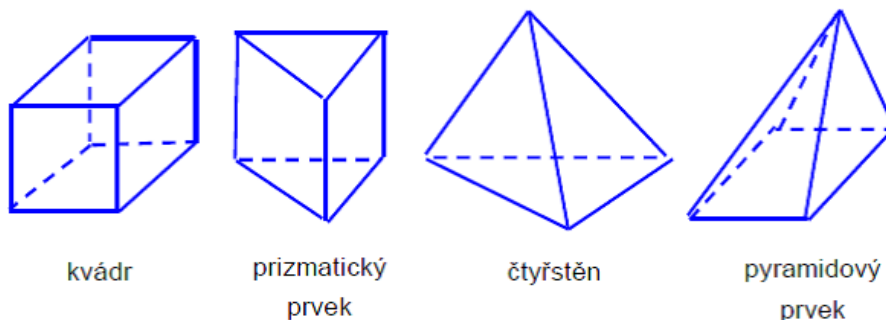
K hlavním limitujícím faktorům současného matematického modelování patří tedy počet buněk, jejichž obrovský nárůst představuje vytváření mezních vrstev. Minimalizování kvality buněk by však nikdy nemělo být prováděno na úkor kvality sítě.

Jako kvalitní síť lze pak označit takovou síť, která je složena z na sebe navazujících geometricky pravidelných elementů, které jsou přibližně stejně velké a rozložené pravidelně po celé výpočtové oblasti. Důležitá je i přiměřená velikost elementů. V praxi se kvůli náročnosti na výpočetní hardware používá tzv. zhušťování sítě v místech, která jsou z hlediska proudění tekutin zajímavá, nebo pro výpočet stěžejní. Zhušťování buněk by mělo být vždy plynulé, jinak by mohlo docházet k problémům s konvergencí úlohy a chybnému výsledku v daném místě výpočtové oblasti [1].

5.7.2 Metoda konečných objemů

Je založena na vytvoření systému nepřekrývajících se elementů, konečných objemů. Ve dvourozměrném případě se jedná o obdélníky a křivočaré čtyřúhelníky, v trojrozměrném případě o kvádry a obecně šestistěny.

Síť pak může být buď strukturovaná, kdy platí, že hranice prvků musí sousedit s jedinou hranicí sousedního elementu (síť tedy nelze libovolně zhušťovat), nebo nestrukturovaná, která se začíná prosazovat v současné době. Výsledná výpočtová oblast u strukturované sítě je kvádr a obdélník, u nestrukturované sítě jsou to 3D kvádr, čtyřstěn, prizmatický a pyramidový prvek. Protože každá úloha je svým způsobem univerzální, nelze obecně určit, která výpočetní síť je tzv. ideální, vždy existuje více způsobů vytvoření vhodné sítě. V poslední době se však čím dál více prosazuje kombinace sítě strukturované a nestrukturované [1].



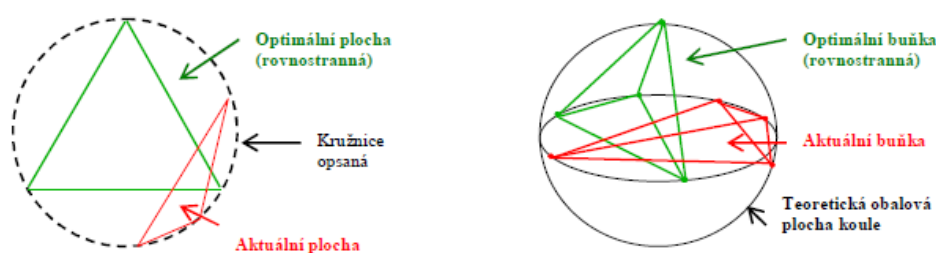
Obr. 30: Tvar konečného objemu [1].

5.7.3 Kvalita sítě

Posuzuje se podle:

- velikosti buněk,
- vhodnosti uspořádání buněk v prostoru,
- kvality buněk (nesouměrnost – Skewness, poměr hran (ploch) prvků – Aspect Ratio)

Pro posouzení kvality buněk je nejvýznamnějším kritériem nesouměrnost (angl. Skewness), která udává, jak moc se buňka svým tvarem blíží ideálnímu geometrickému tvaru. Kvalita buněk se vyjadřuje bezrozměrným číslem v rozsahu 0 (ideální tvar) až 1 (nevhodný tvar).



Obr. 31: Princip posuzování kvality 2D a 3D buněk.

Míru deformace buňky lze také určit analyticky, jako podíl rozdílu optimálního a skutečného rozměru buňky k optimálnímu rozměru buňky (pro 2D i 3D buňky) [1].

$$\text{míra_deformace_2D} = \frac{S_{\text{optimální}} - S_{\text{skutečné}}}{S_{\text{optimální}}} \quad (32)$$

$$\text{míra_deformace_3D} = \frac{V_{\text{optimální}} - V_{\text{skutečné}}}{V_{\text{optimální}}} \quad (33)$$

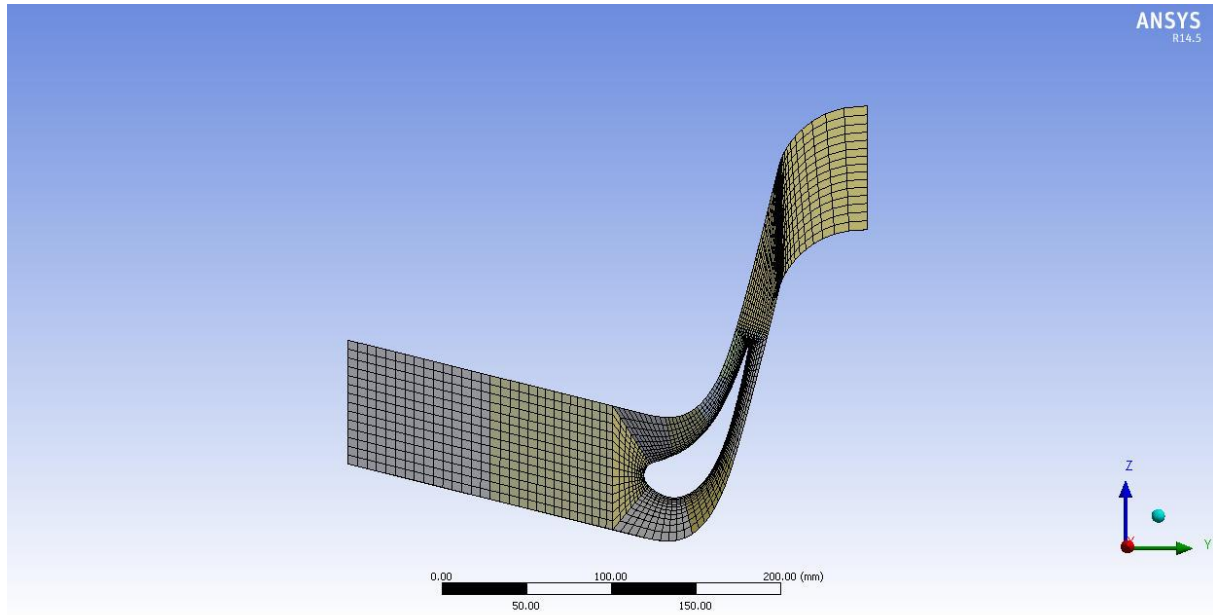
kde: S označuje plochu dané buňky a V její objem.

Maximální nesouměrnost by měla mít u trojúhelníku hodnotu 0,85, u čtyřúhelníku je to pak 0,9. Poměr nejdelší hrany k hraně nejkratší (Aspect Ratio) by měl být v ideálním případě roven jedné (rovnostranný trojúhelník nebo čtverec). Důležitá je také pozvolná změna velikosti sousedních buněk, přičemž poměr velikosti sousedních buněk by neměl překročit 20 %, což bylo u dané úlohy splněno volbou možnosti „Growth Rate“ = 1,2 [21].

5.7.4 Vytvořená výpočetní síť

Poté co byl importován a vhodně upraven 3D model lopatkové mříže, byl model otevřen v programu Meshing, nacházejícím se taktéž v rozhraní Workbench. Program Meshing slouží k vytváření a úpravě výpočetní sítě před samotným zahájením výpočtu v programu CFX.

Výpočetní síť byla vytvářena postupně, přičemž důležitými body pro vytvoření vhodné sítě byla strukturovanost sítě, vhodný geometrický tvar buněk bez náznaků deformace, dostatečná hustota sítě v oblasti měření pneumatickou sondou a v mezní vrstvě lopatky.



Obr. 32: Vytvořená výpočetní síť.

5.7.5 Tloušťka mezní vrstvy

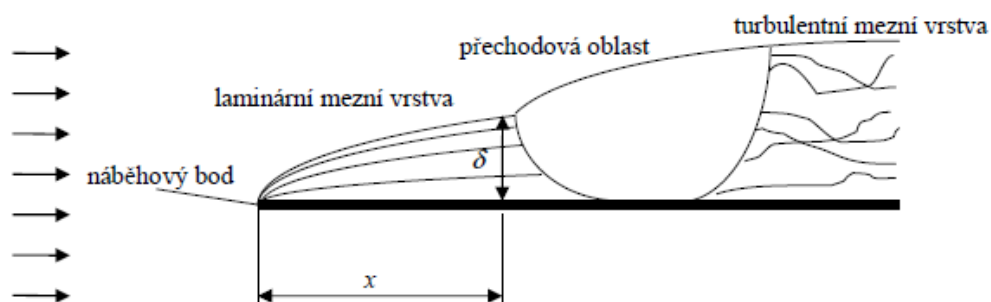
Mezní vrstva je oblast v blízkosti pevné stěny, kde je proudění dominantně ovlivněno viskozitou kapaliny. Tloušťka mezní vrstvy závisí na hodnotě Reynoldsova čísla. Jak již bylo řečeno, lze u mezní vrstvy rozlišovat tři základní typy [2]:

- laminární mezní vrstvu,
- přechodovou oblast,
- turbulentní mezní vrstvu.

Tloušťka mezní vrstvy je vzdálenost od desky, při které rychlost dosáhne smluvní velikosti, obvykle 99 % rychlosti v_∞ , přičemž rychlost v mezní vrstvě se od stěny blíží k rychlosti vnějšího proudu asymptoticky [4].

Tloušťku turbulentní mezní vrstvy lze odhadnout z jednoduchého vztahu, protože její tloušťka je konstantní:

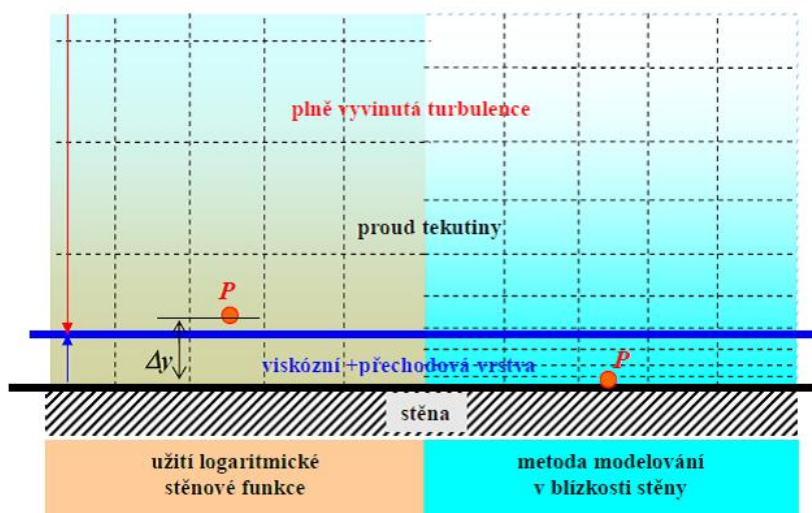
$$\delta_{turb} = Re^{-\frac{1}{5}}. \quad (34)$$



Obr. 33: Znázornění mezní vrstvy [2].

Pro proudění v blízkosti stěny lze využít dvě metody vycházejících z teorie Laundera a Spaldinga. Jedná se o soubor poloempirických vztahů a funkcí umožňujících propojení řešené proměnné v buňce v blízkosti stěny s danou hodnotou na stěně:

- **užití stěnové funkce** (wall function) – kdy se překlene oblast laminární podvrstvy i přechodové vrstvy, kde se uplatňuje molekulární a turbulentní viskozita,
- **modelování proudění u stěny** (near-wall modelling) – zjemnění sítě v oblasti viskózní a přechodové vrstvy.



Obr. 34: Odlišný přístup k modelování proudění u stěny [1].

Při vytváření sítě v oblasti mezní vrstvy lopatky byl využit model modelování v blízkosti stěny. Pro vytvoření „ideální“ sítě je důležité zjistit vzdálenost y první buňky od okraje lopatky. K jejímu určení slouží následující vzorec, přičemž nejprve je však potřeba zjistit hodnotu Reynoldsova čísla pro dané proudění:

$$Re = \left(\frac{w_{2, stř} \cdot s}{\nu} \right) = 431599 > Re_{krit}, \quad (35)$$

kde: $w_{2, stř}$ je experimentálně získaná hodnota střední rychlosti na výstupu z mříže, s je délka tětiny lopatky a ν je kinematická viskozita.

Dále je možné spočítat koeficient tření C_f [22]:

$$C_f \equiv \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2}, \quad (36)$$

$$C_f = 2 \log_{10}(Re) - 0,65^{-2,3} = 0,004 \text{ pro } Re < 10^9,$$

kde: τ_w je smykové napětí a v_∞^2 je rychlost nenarušeného proudění v dostatečné vzdálenosti od lopatky. Smykové napětí τ_w je podle Schlichtinga rovno [17]:

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 = 0,881 \text{ Pa}. \quad (37)$$

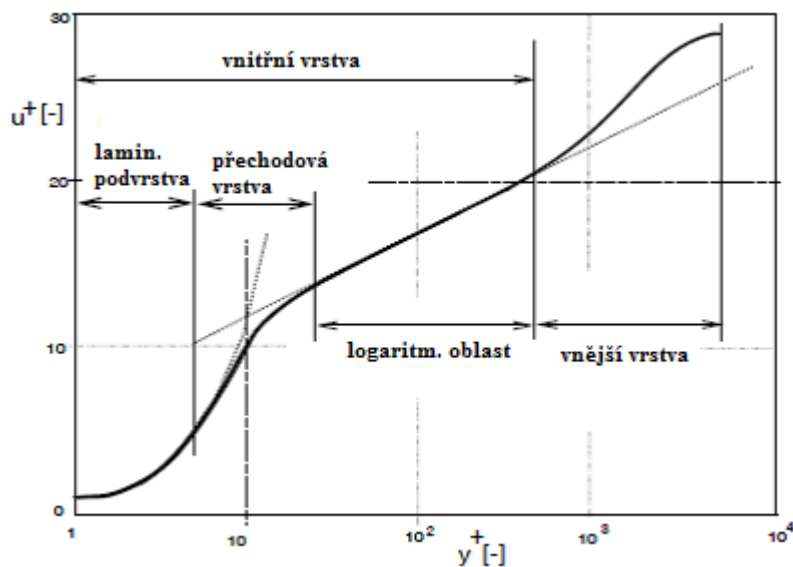
Rychlost smykového napětí lze spočítat jako [22]:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = 0,867 \frac{m}{s} . \quad (38)$$

Pak pro vzdálenost první buňky od kraje lopatky platí:

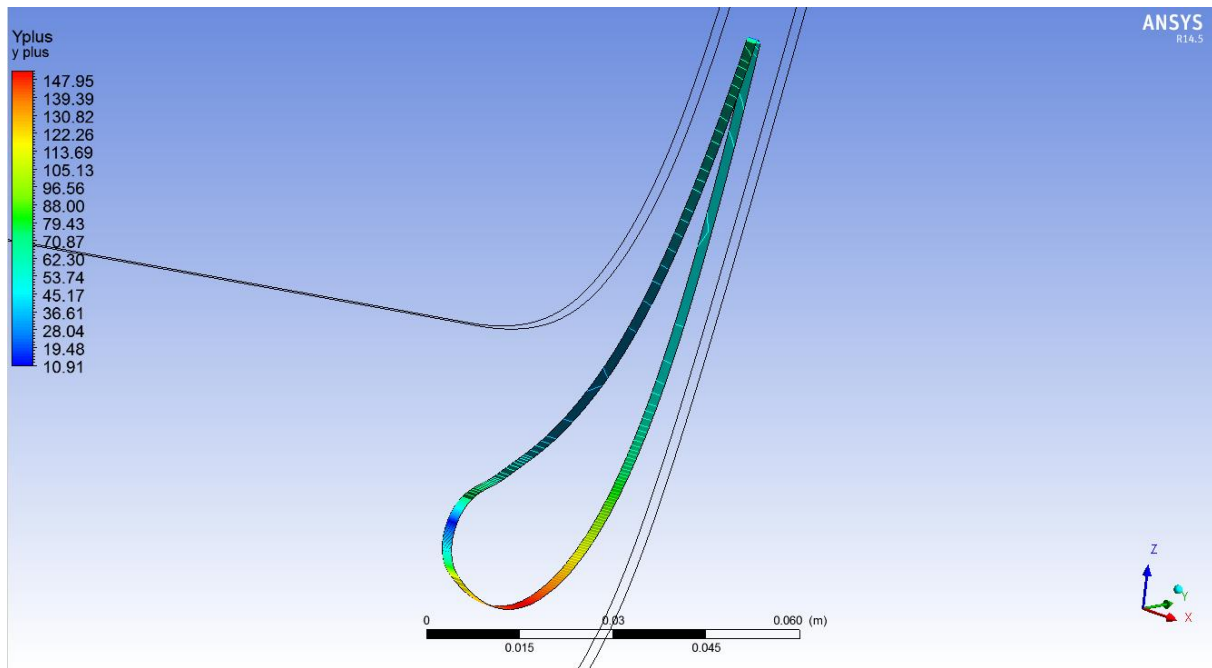
$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \Rightarrow y = \frac{y^+ \nu}{u_\tau} = 0,54 \text{ mm} \quad (39)$$

kde: y^+ je tzv. bezrozměrná vzdálenost od stěny. Její hodnota by měla ležet mezi hodnotami $30 \leq y^+ \leq 700$, kde se nachází tzv. logaritmická oblast (obr. 35), při které je numerický výpočet přesný. Při modelování proudění v turbulentní mezní vrstvě lopatky by měla být tato hodnota dokonce $30 \leq y^+ \leq 100$ [18]. Pro daný výpočet byla zvolena hodnota $y^+ = 30$.



Obr. 35: Rozdělení oblasti v blízkosti stěny [18].

Jak naznačuje obr. 36, činila minimální a maximální hodnota y^+ po řadě $y^+ = 10,91$ a $y^+ = 147,95$. Ačkoliv je hodnota $y^+ < 30$ lze podle Willingera tuto hodnotu stále ještě považovat za vyhovující a uvedená síť může být použita k výpočtu.



Obr. 36: Bezrozměrná vzdálenost od stěny y^+ .

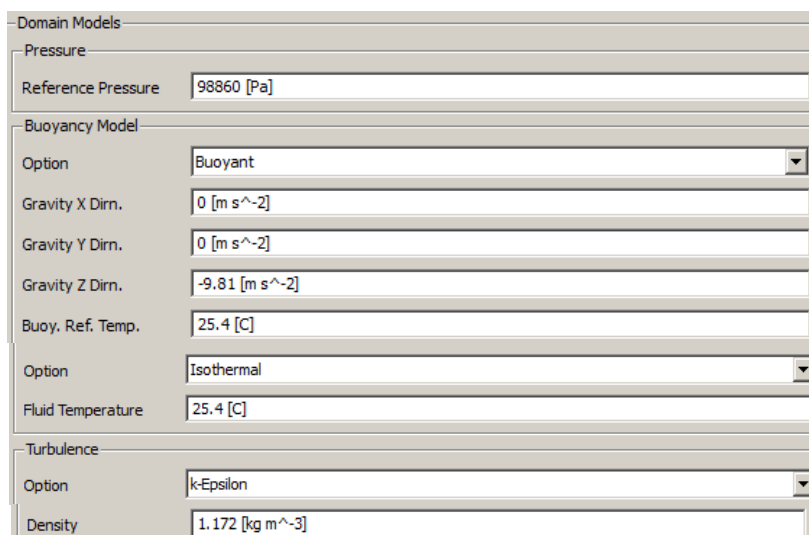
5.8 Numerický výpočet proudění

Následující krok spočívá ve vytvoření CFD simulace. K tomu slouží program Ansys CFX, který lze rozdělit do dvou částí a to:

- CFX-Pre, který slouží pro přípravu simulace, nastavení okrajových a počátečních podmínek,
- CFX-Solver, který slouží pro samotné řešení úlohy připravené v CFX-Pre metodou konečných objemů [7].

5.8.1 Nastavení domény a vlastností vzduchu

Nejprve je potřeba nadefinovat automaticky vytvořenou doménu. Jako typ domény byl zvolen vzduch při 25 °C (Air at 25 °C), vlastnosti vzduchu byly dále upřesněny podle naměřených hodnot. Jako referenční tlak byl použit tlak okolního prostředí p_u naměřený v laboratoři, o hodnotě 98860 Pa. V položce zahrnutí vztlaku (Buoyancy) byly nastaveny parametry gravitačního zrychlení $z = -9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Dále byla v položce zahrnutí přestupu tepla (Heat Transfer) nastavena teplota vzduchu 25,4 °C, která odpovídá střední teplotě vzduchu v aerodynamickém tunelu při experimentálním měření. Hodnota teploty je ovšem vzhledem k faktu, že nebyl řešen přestup tepla, irelevantní. Na závěr byla nastavena výpočtená hustota vzduchu $\rho = 1,172 \text{ kg.m}^{-3}$ (viz obr. 37).

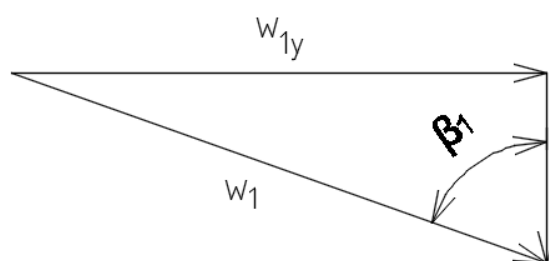


Obr. 37: Nastavení domény a vlastností vzduchu.

5.8.2 Nastavení okrajových podmínek

Vstupní okrajová podmínka (INLET) – jedná se o plochu, případně více ploch výpočtové oblasti, kterými vstupuje tekutina do výpočtové oblasti.

Nastavení pro vstupní okrajovou podmínku bylo následující: protože hodnota vypočteného Machova čísla činí $Ma_1 = 0,053$, bylo v režimu proudění zvoleno proudění podzvukové (Subsonic). Vstupní rychlost $w_1 = 18,56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byla pomocí základních goniometrických funkcí rozložena na jednotlivé složky rychlosti, jejichž velikosti byly:



$$w_{1y} = w_1 \cdot \sin \beta_1 = 18,02 \frac{m}{s} \quad (40)$$

$$w_{1z} = w_1 \cdot \cos \beta_1 = 4,46 \frac{m}{s}$$

Obr. 38: Rozložení nátokové rychlosti na jednotlivé složky.

Protože se jedná o turbulentní model ($Re > Re_{krit} = 2320$), bylo potřeba rovněž nastavit parametry turbulentního modelu. Jako turbulentní model byl zvolen model $k-\epsilon$, přičemž pro turbulentní kinetickou energii k pak platilo:

$$k = \frac{3}{2} u \cdot Tu^2, \quad (41)$$

kde: u je rychlost na vstupu do mříže $w_1 = 18,56 \text{ m/s}$ a Tu je tzv. intenzita turbulence, jejíž velikost na vstupu se obvykle pohybuje mezi hodnotami $Tu = 0,01 \div 0,1$. V případě této diplomové práce byla použita hodnota turbulence $Tu = 0,04$, převzatá od Mijailovice [19], který se zabýval měřením proudění v lopátkové mříži pomocí žárového anemometru a mimo jiné zkoumal intenzitu turbulence.

Rychlost disipace ε se stanovila pomocí turbulentní kinetické energie k a turbulentního délkového měřítka l :

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (42)$$

kde: C_{μ} je dále empirická konstanta, pro kterou platí $C_{\mu}=0,09$ [12], délkové měřítko je pak rovno $l=0,01t=0,00073m$.

Po dosazení všech hodnot vyšly po řadě velikost turbulentní kinetické energie a rychlost disipace na vstupu do kanálu: $k = 0,827 \text{ J.kg}^{-1}$ a $\varepsilon = 169,2 \text{ J.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

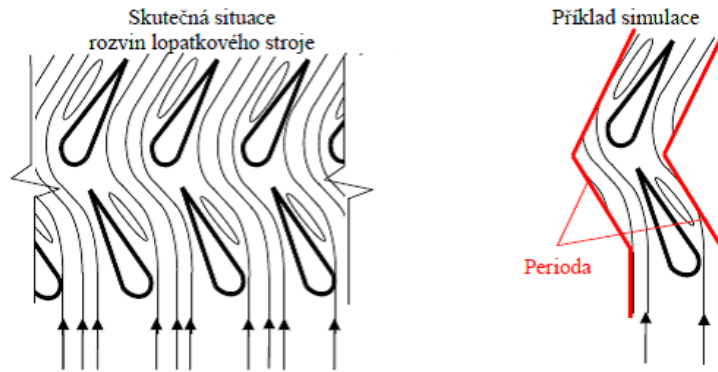
Výstupní okrajová podmínka (OUTLET) – jedná se o plochu, či plochy výpočtové oblasti, kterou vystupuje tekutina z oblasti. Nastavení pro výstupní okrajovou podmínku bylo následující: u režimu proudění bylo zvoleno proudění podzvukové, protože $Ma_2 \leq 0,2$. Ve fyzikálních vlastnostech byl zvolen průměrný statický tlak (Average Static Pressure), jeho relativní hodnota činí 0 Pa, což znamená, že je rovna naměřenému tlaku okolí $p_u = 98860 \text{ Pa}$.

Symetrická okrajová podmínka (SYMMETRY) – Okrajová podmínka symetrie je zvláštním druhem okrajové podmínky, která slouží jako dělicí rovina v případě, že výpočtová oblast obsahuje jednu nebo více rovin symetrie. V uvedeném případě není nutné řešit celou oblast, ale například jen její polovinu [2]. Jelikož byl výpočet definován jako 2D, bylo nutné definovat dvě boční stěny představující plochy, jimiž byla výpočtová oblast oddělena ze skutečné reálné 3D oblasti. U této okrajové podmínky jsou všechny gradienty rovny nule a není zde možné žádné nastavení [16].



Obr. 39: Příklad využití okrajové podmínky symetrie [2].

Periodická okrajová podmínka „PERIODIC INTERFACE“ – jedná se o zvláštní druh okrajové podmínky, kterou musí tvořit vždy identické plochy v páru. S výhodou se periodické podmínky používají např. u lopatkových strojů, kde se cyklicky opakuje proudové pole. Periodická podmínka může být buď rotační, nebo translační, podle toho, o jaký typ úlohy se jedná. Vždy je nutné nastavit osu rotace. U této okrajové podmínky také není možné nic definovat, protože jsou informace periodicky předávány a okrajová podmínka kopíruje výpočet [2].

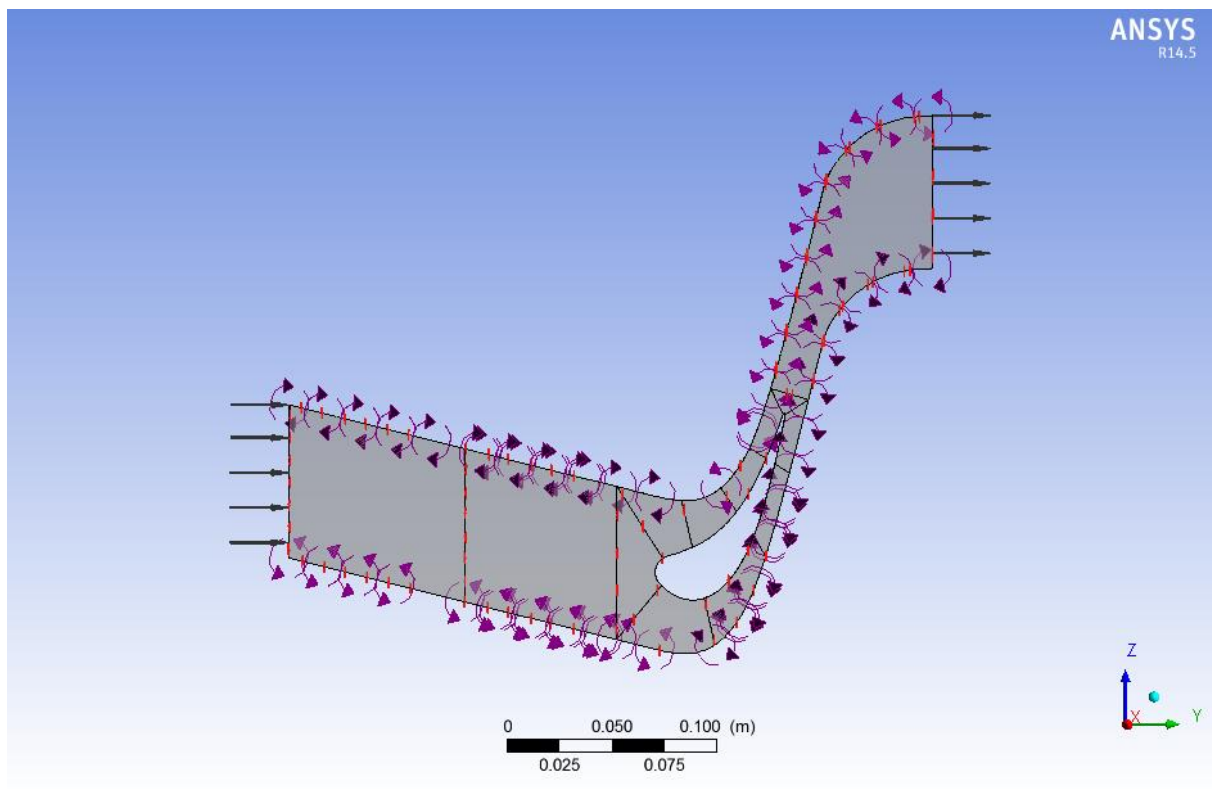


Obr. 40: Příklad použití periodické podmínky.

V případě řešení proudění v kanálu byla nastavena okrajová podmínka „periodicity“ na horní a spodní straně lopatkového kanálu. Jedná se o styk kapalina – kapalina, kde periodická podmínka byla nastavena jako translační (Translational Periodicity). Důležité u této podmínky je konstantní výška rovinného kanálu po celé jeho délce. V tomto konkrétním případě byla výška kanálu rovna $t = 73$ mm.

Stěnová okrajová podmínka „WALL“ – jedná se o plochu, či plochy výpočtové oblasti, kterými nemůže protékat kapalina, příp. reprezentující pevný povrch. A dále se jedná o dokonale nepropustné stěny. Stěnová okrajová podmínka navíc předpokládá, že kapalina ulpívá na jejím povrchu a tedy rychlost je tam nulová.

V daném případě se jedná o všechny zbývající stěny, které nebyly jinak definovány (lopátka turbíny). Daná plocha je definována jako hladká stěna (Smooth Wall) bez smykových sil (No Slip Wall).



Obr. 41: Výsledné nastavení všech okrajových podmínek.

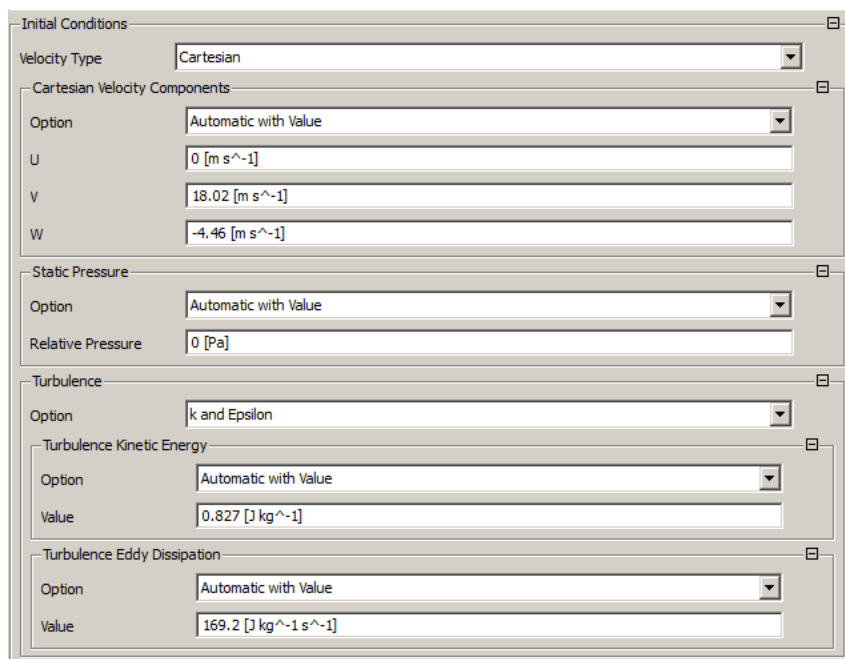
5.8.3 Inicializace a nastavení řešiče

Před samotným výpočtem je nutné každou úlohu nejprve inicializovat, tedy definovat počáteční podmínku nezbytnou pro spuštění úlohy. Je nezbytné inicializovat všechny počítané veličiny a to buď číselně, nebo vzorcem [16]. Pro danou úlohu je nastavení počátečních podmínek patrné z obr. 42 a odpovídá hodnotám nastaveným na vstupu a výstupu do a z výpočetního modelu.

Dále bylo provedeno nastavení řešiče a to následovně (Obr. 43):

- jako typ advekčního schématu byla zvolena výchozí možnost „High Resolution“ (druhý řád),
- u turbulence byla ponechána možnost „First Order“ – 1. řád (rovněž implicitně nastaveno),
- jako maximální počet iterací bylo zvoleno 1000,
- u nastavení konvergence byla chyba výpočtu definována střední kvadratickou odchylkou, byla tedy zvolena možnost RMS a přesnost výpočtu byla ponechána na hodnotě $1E-4$, která se používá pro běžné inženýrské úlohy.

Řád přesnosti úlohy souvisí s výběrem interpolačního schématu. Složky rychlosti a skalární veličiny jsou vždy ukládány v geometrických středech konečných objemů definovaných sítí. Potřebné hodnoty těchto veličin jsou získány interpolací a to z výpočtového důvodu na hranicích konečných objemů, proto například u úloh, kde vystupují velké změny tlaků, či průtoku, je vhodné úlohu spočítat nejprve s nejnižším řádem přesnosti a po několika iteracích využít řád přesnosti vyšší [1]. Pro první odhad výsledků však postačí nastavení defaultní.



Obr. 42: Nastavení počátečních podmínek.



Obr. 43: Nastavení řešiče.

5.8.4 Vlastní výpočet

K řešení úlohy slouží program CFX–Solver, který je opět jedním z podprogramů v Ansys Workbench. Po spuštění řešení úlohy probíhá výpočet, který je ukončen při dosažení požadované přesnosti, v daném případě $1E-4$, nebo po provedení nastaveného počtu iteračních kroků (1000). Každá iterace přitom sestává z několika kroků (obr. 44):

- pohybové rovnice pro neznámé složky rychlosti jsou řešeny s užitím hodnot tlaků tak, aby došlo k aktualizaci rychlostního pole,
- protože rychlost určené v předchozím bodě nemohou splňovat rovnici kontinuity, určují se tzv. tlakové korekce a následně i korekce rychlostního pole,
- dále se pomocí nových hodnot rychlostí řeší rovnice pro turbulentní kinetickou energii k a rychlost disipace ε ,
- řešení dalších rovnic pro určení teploty a dalších skalárních veličin,
- aktualizace fyzikálních vlastností kapalin,
- kontrola konvergence [1].



Obr. 44: Diagram algoritmu řešení [1].

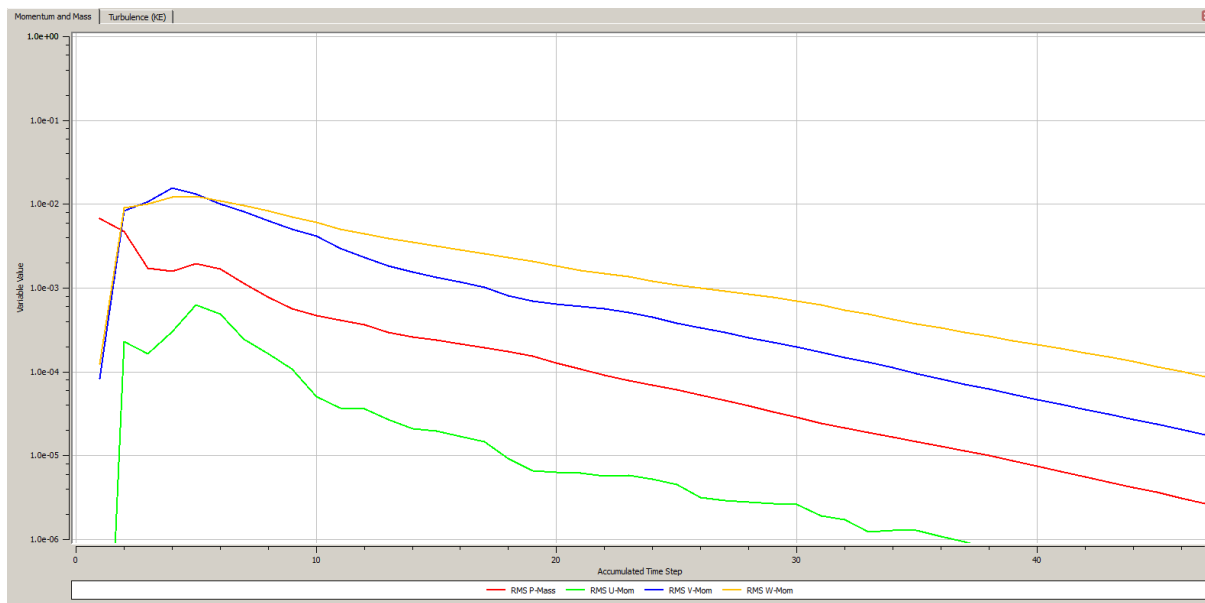
Charakteristiky výpočtu jsou uvedeny v tabulce 5. Výpočet probíhal na výpočetní stanici s procesorem 2,30 GHz a nainstalovanou pamětí 4 GB. Vzhledem k faktu, že je úloha řešena de facto jako rovinná, proběhl výpočet poměrně rychle.

Tab. 5: Charakteristiky výpočtu.

počet uzlů	7 527
počet elementů	4 646
doba výpočtu	63 sekund
počet iterací	47

5.8.5 Konvergence úlohy

Míru konvergence reprezentují reziduály, které představují maximum rozdílu dvou odpovídajících si veličin ve stejném bodě sítě ve dvou po sobě následujících iteracích. Reziduály jsou vyhodnocovány v každém kroku iterace pro všechny počítané veličiny a lze je znázornit graficky. Snahou je získat snižující se hodnotu reziduálů, což svědčí o dobře konvergující úloze [1]. Průběh konvergence daného řešení reprezentuje obr. 45.



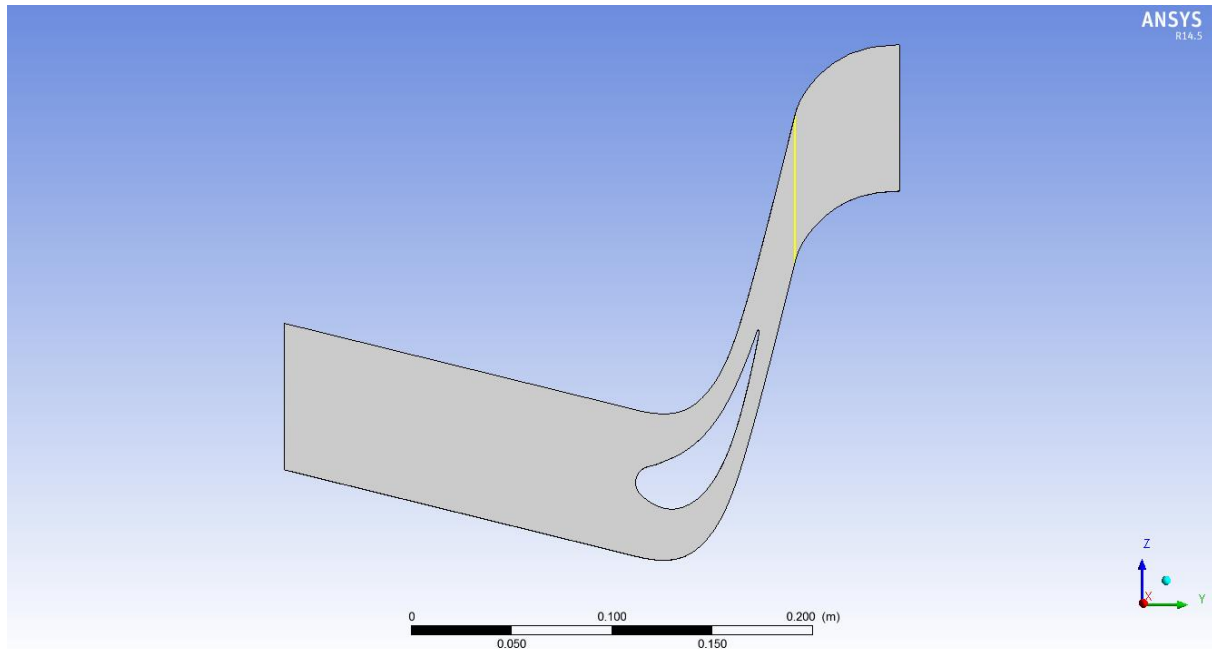
Obr. 45: Průběh reziduálů.

5.9 Zobrazení výsledků

Zobrazení výsledků probíhalo v programu CFX-Post, který je výstupem programu CFX-Solver. Program umožňuje mimo jiné vytvářet konturované obrázky, vektorová pole proudnic, grafy a analýzy důležitých parametrů [2].

5.9.1 Vytvoření vyhodnocovacích entit

Pro vyhodnocení výsledků poslouží přímka rozdělená na celkově 41 bodů, které reprezentují měřící body pneumatické sondy využití při experimentálním měření v laboratoři. Pro názornost byla vytvořena také rovina $x = 0$, která posloužila pro lepší představu průběhu vyhodnocovacích veličin. Na obr. 46 je přímka, na které jsou měřeny jednotlivé body, znázorněna žlutou barvou.

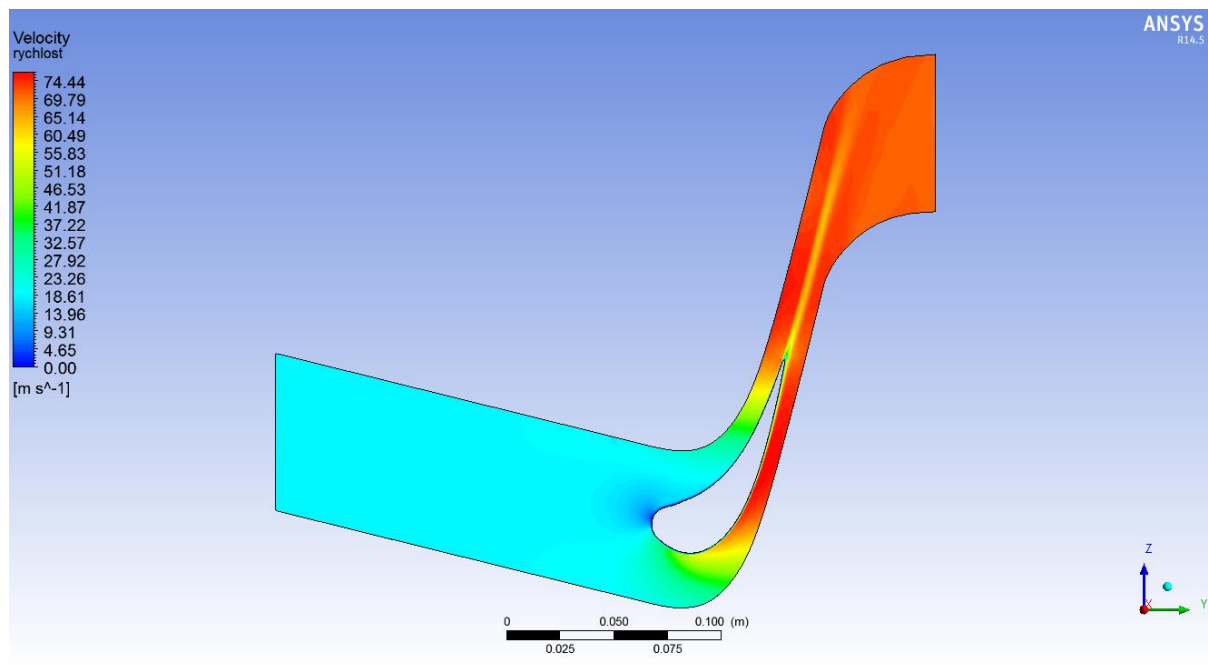


Obr. 46: Vyhodnocovací přímka (žlutá) a rovina (šedá).

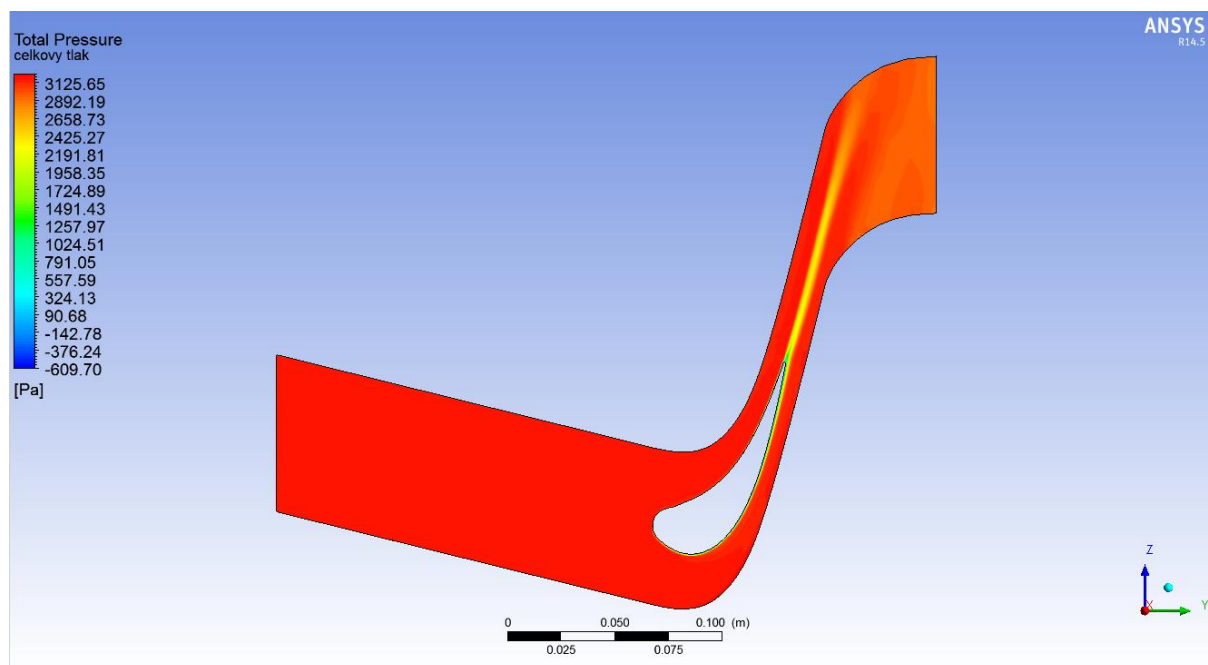
5.9.2 Získání vypočítaných hodnot jednotlivých veličin

Před samotným vyhodnocením výsledků získaných počítačovou simulací a porovnáním výsledků s hodnotami získanými pomocí experimentu, byly nejprve vykresleny průběhy veličin po celé ploše reprezentující aerodynamický tunel, tak aby bylo na první pohled patrné, zda jsou dané výsledky po fyzikální stránce správné a zda v některých místech nedochází k dějům, které by mohly naznačovat chybný výpočet. Jedná se o průběh následujících veličin:

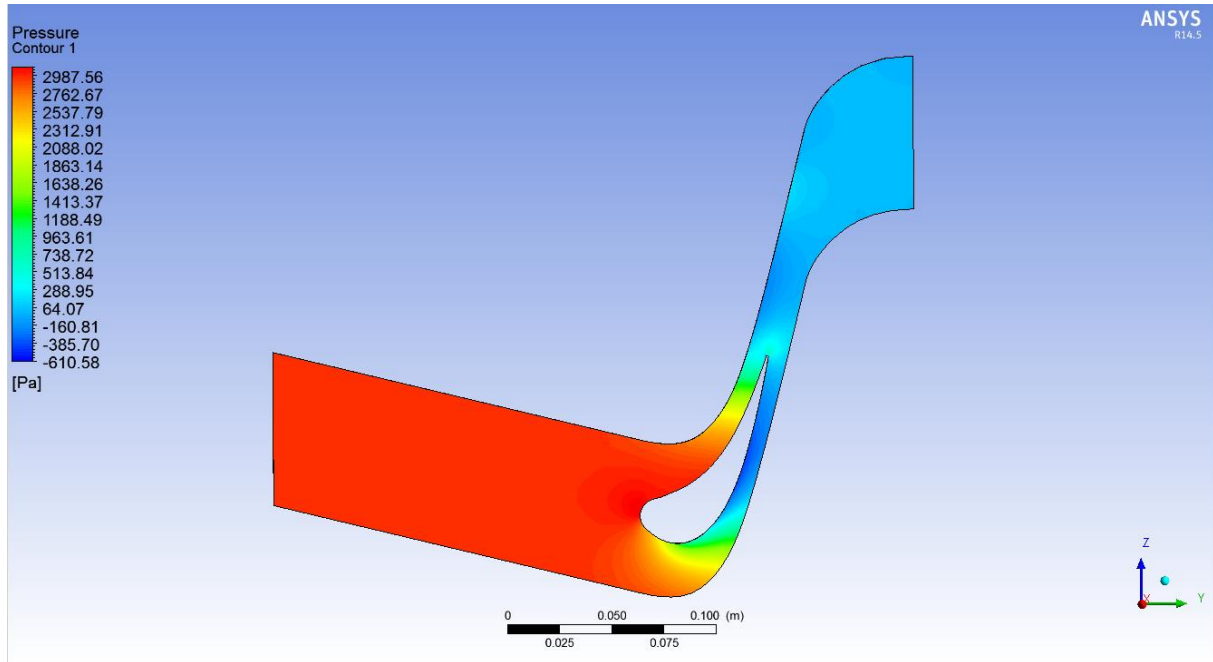
- pole střední rychlosti w_2 ,
- totální (celkový tlak) p_{t2} ,
- statický tlak p_2 .



Obr. 47: Pole střední rychlosti.



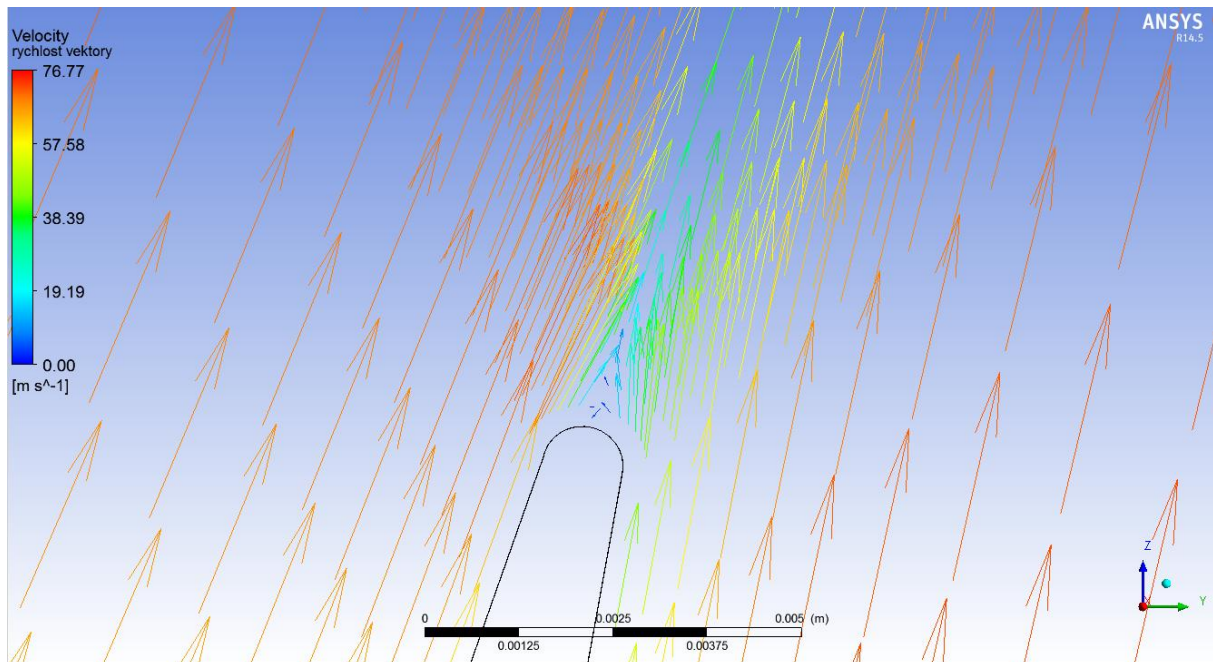
Obr. 48: Pole celkového tlaku.



Obr. 49: Pole statického tlaku.

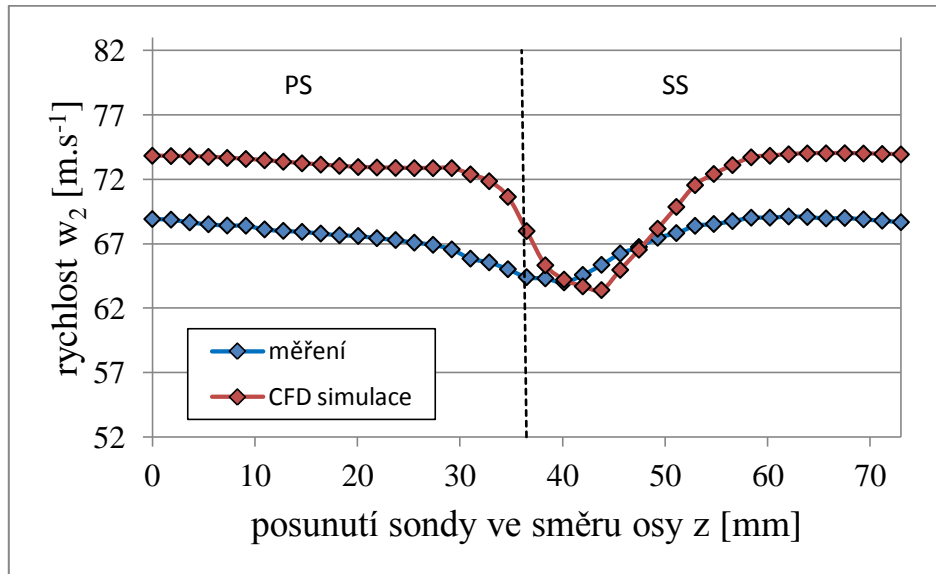
U průběhu statického tlaku je snadno odlišitelná sací strana od přetlakové strany lopatky. Tomu odpovídá průběh střední rychlosti, kde vlivem Bernoulliho rovnice musí být v místech s vyšším tlakem nižší rychlost a obráceně.

Na obrázku 50 je dobře patrné odtrhávání proudu, což má spolu se zpomalenými částicemi v mezní vrstvě za následek vznik úplavu se zpětným vířením. Je zřejmé, že s rostoucí vzdáleností od hrany lopatky se úplav nepatrně rozšiřuje a vyplňuje (zvyšuje se rychlost proudu v úplavu). Při turbulentní mezní vrstvě je pak rozšiřování a vyrovnání úplavu rychlejší. Jak u průběhu rychlosti tak především u průběhu celkového tlaku je z průběhu dané veličiny za měřicí sondou patrné ovlivnění proudění sousední lopatkou.

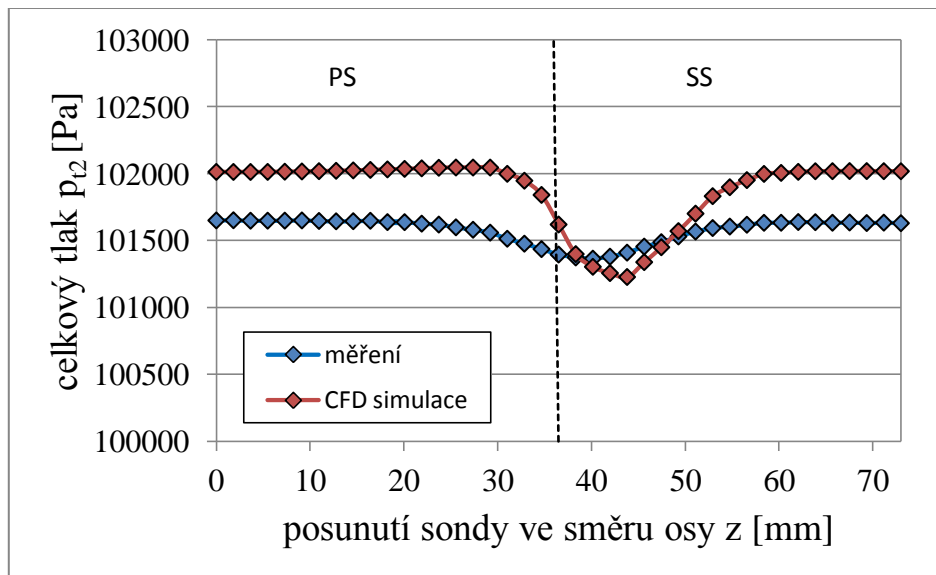


Obr. 50: Úplav spolu se zpětným vířením za odtokovou hranou lopatky.

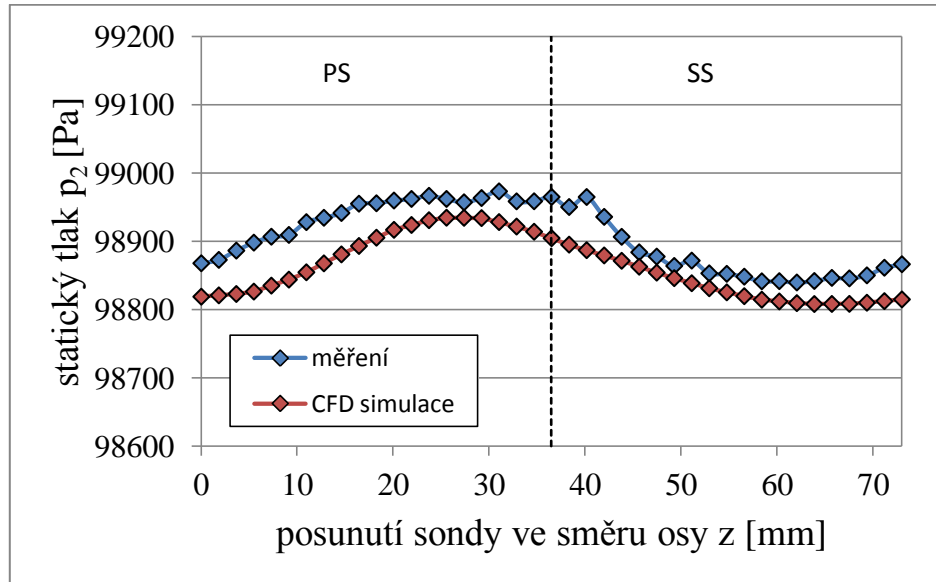
Následně bylo v programu CFX Post pro všechny uvedené veličiny zaznamenáno všech 41 bodů na přímce reprezentující měřicí sondu. Příslušné hodnoty (tab. 12) byly exportovány do programu Microsoft Excel, kde byla data vyhodnocena a následně porovnána s experimentálně získanými hodnotami.



Graf 8: Průběh odtokové rychlosti w_2 .



Graf 9: Průběh celkového tlaku p_{12} .



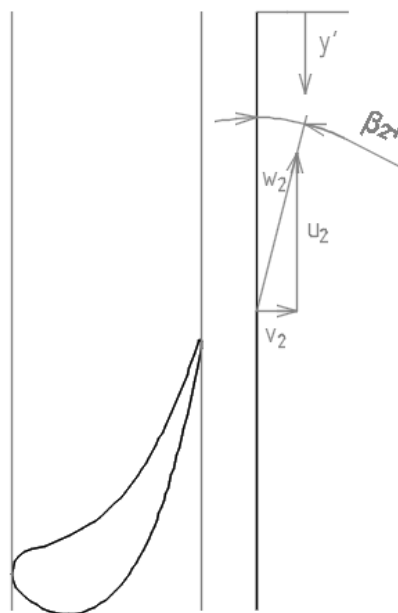
Graf 10: Průběh statického tlaku p_2 .

Průběh úhlu relativní rychlosti β_2^+ měřeného ze záporného směru y' není možné zjistit pomocí simulace v programu CFX přímo, ale je zjišťován pomocí goniometrických funkcí z vektorových složek relativní rychlosti w_{2y} a w_{2z} (tab. 12). Úhel β_2^+ lze tedy získat ze vzorce:

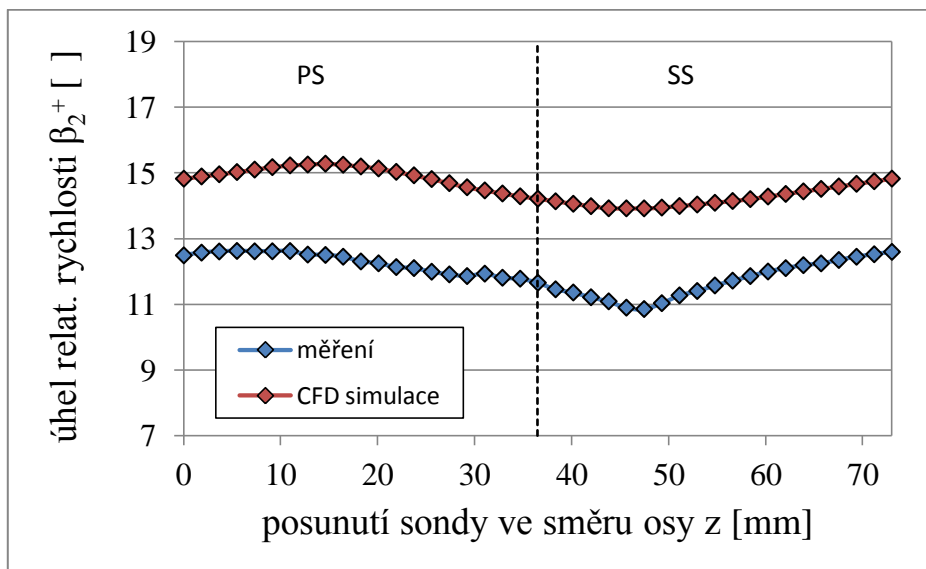
$$\tan \beta_2^+ = \frac{w_{2y}}{w_{2z}} \quad (43)$$

$$\beta_2^+ = \arctan\left(\frac{w_{2y}}{w_{2z}}\right)$$

kde: w_{2y} a w_{2z} jsou po řadě složky relativní rychlosti na výstupu z mříže w_2 v ose y a z .



Obr. 51: Rozložení odtokové rychlosti w_2 na složky w_{2y} a w_{2z} .



Graf 11: Úhel relativní rychlosti β_2^+ měřený ze záporného směru y' .

5.10 Zhodnocení výsledků a jejich porovnání

Do této doby bylo obsahem této práce určení charakteristik proudu vzduchu procházejícího turbínovou lopatkovou mříží, a to za pomoci experimentálního měření a počítačové simulace. V následujícím kroku byly jednotlivé výsledky vyhodnoceny a průběh jednotlivých veličin byl zakreslen do grafů.

V další části následovalo porovnání obou odlišně získaných hodnot jednotlivých veličin a postupná aplikace odlišných korekcí na dosavadní výsledky tak, aby sobě výsledky získané experimentálním měřením a CFD simulací pokud možno co nejvíce odpovídaly.

Rychlost w_2

Z průběhu odtokové rychlosti w_2 (Graf 8) je na první pohled patrný rozdíl v naměřených a numericky získaných výsledcích. Jedná se především o vzájemné posunutí průběhu jednotlivých grafů ve svislém směru a to asi o hodnotu přibližně 5 m.s^{-1} . Dále se jedná o výrazný sinusoidní průběh křivky grafu u výsledků získaných počítačovou simulací a to v oblasti narušeného proudění přibližně v rozmezí $z = 30 - 60 \text{ mm}$, přičemž u CFD výsledků je patrný posuv této oblasti více doprava. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou grafu je v případě výsledků získaných počítačovou simulací přibližně 10 m.s^{-1} , v případě výsledků získaných pomocí experimentu přibližně 5 m.s^{-1} . Dalším sporným místem je výraznější sklon křivky u CFD výsledků na sací straně. Na grafu 6 je rovněž patrný mírný pokles rychlosti ve vzdálenosti přibližně $z = 7 \text{ mm}$ a $z = 65 \text{ mm}$, který je způsoben mezní vrstvou vyskytující se na sací a přetlakové straně lopatky.

Celkový tlak p_{t2}

Průběh celkového tlaku p_{t2} je na první pohled velmi podobný průběhu rychlosti w_2 , kdy je opět vidět, že v oblastech nenarušeného proudění za přetlakovou (PS) a sací stranou (SS) jsou si sobě oba odlišně získané výsledky podobné. Rozdíl mezi experimentálními a CFD výsledky není tak velký, jako tomu bylo u průběhu rychlosti a činí přibližně 350 Pa . Opět zde však zůstává charakteristická změna v průběhu grafu u CFD výsledků v oblasti narušeného proudění, značící snížení celkového tlaku v úplavu za odtokovou hranou lopatky. Tato oblast je navíc opět více vychýlena do oblasti značící průběh za sací stranou lopatky.

Statický tlak p_2

Průběh statického tlaku se na první pohled vyznačuje výrazným sinusoidním charakterem (Graf 10). Celkově jsou si obě křivky znázorňující průběh statického tlaku, pro různé metody získávání výsledků, velmi podobné. Nepatrný rozdíl je pouze u výsledků z experimentu, a to především na levé straně grafu, značícího průběh dané veličiny za přetlakovou hranou lopatky. Jedná se však o rozdíl pouhých přibližně 60 – 70 Pa, což odpovídá odchylce méně než 0,1 %, která může být způsobena systematickou chybou daného měřicího zařízení. Další nepatrný rozdíl je v rozmezí $z = 30 - 50$ mm, kde se vyskytují nepřesnosti ve výsledku hodnot vlivem tzv. chyby gradientu.

Úhel relativní rychlosti β_2^+ měřený ze záporného směru y'

Poslední veličinou, jejíž průběh bylo důležité zjistit, byl úhel β_2^+ (Graf 11). Podobně jako u statického tlaku, je i zde patrný sinusoidní průběh veličin značící měření v oblasti narušeného proudu vlivem vzniklého úplavu za odtokovou hranou lopatky. Nejpatrnější rozdíl je opět ve vzájemném posunutí obou křivek přibližně o hodnotu $2^\circ - 3^\circ$ a dále podobně, jako tomu bylo u statického tlaku, výkyvem hodnot přibližně mezi hodnotami $z = 30 - 50$ mm, způsobeným vlivem chyby gradientu.

5.11 Korekce a změna nastavení řešiče pro CFD výsledky

5.11.1 Úpravy vedoucí ke změně výsledku rychlosti a celkového tlaku

Protože existuje matematická závislost mezi celkovým tlakem p_{t2} a výtokovou rychlostí w_2 (rov. 44), projeví se změna rychlosti na vstupu do mříže w_1 na výsledcích obou jmenovaných veličin. Pro zpřehlednění byl proto další postup omezen pouze na korekci průběhu rychlosti na výstupu z lopatkové mříže w_2 a na závěr byly všechny provedené korekce aplikovány rovněž na průběh celkového tlaku p_{t2} .

$$w_2 = \sqrt{\frac{2 p_{t2} - p_2}{\rho}} \quad (44)$$

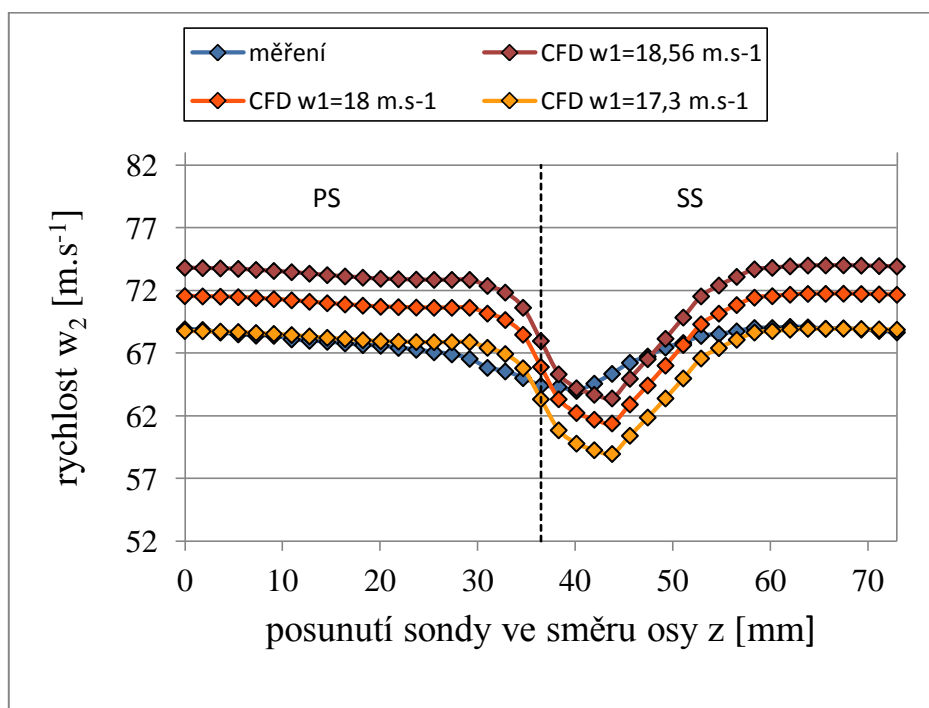
Změna rychlosti na vstupu do mříže w_1

Nejpatrnějším rozdílem v obou získaných výsledcích zůstává posun průběhů rychlostí o hodnotu přibližně $w_1 = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Prvním předpokladem získání rozdílných výsledků u CFD simulace bylo umístění Pitotovy trubice mimo měřenou oblast proudění u experimentu tak, aby se zamezilo ovlivnění proudu při jejím obtékání, což však mohlo mít naopak za následek získání nepatrně rozdílných výsledků z důvodu měření mimo vyhraněnou oblast měření, kde se již mohou vyskytovat nepatrně odlišné podmínky.

Pro ověření provedl Willinger několik dalších zkušebních měření, při kterých se ukázalo, že hlavním důvodem nebylo umístění Pitotovy trubice mimo oblast měření, nýbrž náhodná chyba měřicího zařízení, které při stejných podmínkách vykazovalo při každém měření rozdílné výsledky v rychlostech na vstupu do mříže w_1 , které se měnily v rozsahu $w_1 = 15 - 19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

V dalším kroku byla tedy rychlost na vstupu do mříže w_1 upravena tak, aby sobě průběhy obou rozdílně získaných hodnot pokud možno co nejvíce odpovídaly. Jako nejvhodnější se ukázala rychlost $w_1 = 17,3 \text{ m.s}^{-1}$. Všechny naměřené hodnoty pro různé rychlosti w_1 jsou uvedeny v tab. 13.



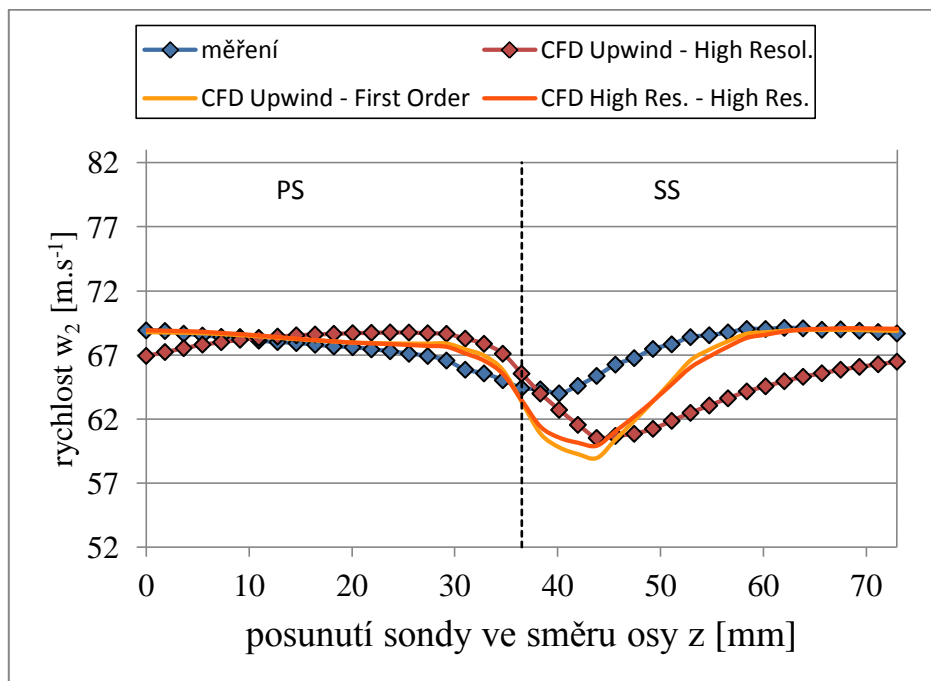
Graf 12: Průběh rychlosti w_2 pro různé hodnoty nátokové rychlosti w_1 .

Úprava řádu turbulence a typu advekčního schématu

Další možností, jak získat ještě přesnější výsledky, je změna v nastavení řádu turbulence a typu advekčního schématu. V prvotním nastavení byly použity automaticky definované parametry – jako řád turbulence byla ponechána možnost *High Resolution*, jako typ advekčního schématu pak *First Order*. Pro zjištění kombinace nejvhodnějšího nastavení byla použita všechna čtyři možná nastavení, viz graf 13, kde uvedené nastavení odpovídá hodnotám *řád turbulence* – *řád advekčního schématu*:

- Upwind – First Order
- Upwind – High Resolution
- High Resolution – First Order
- High Resolution – High Resolution

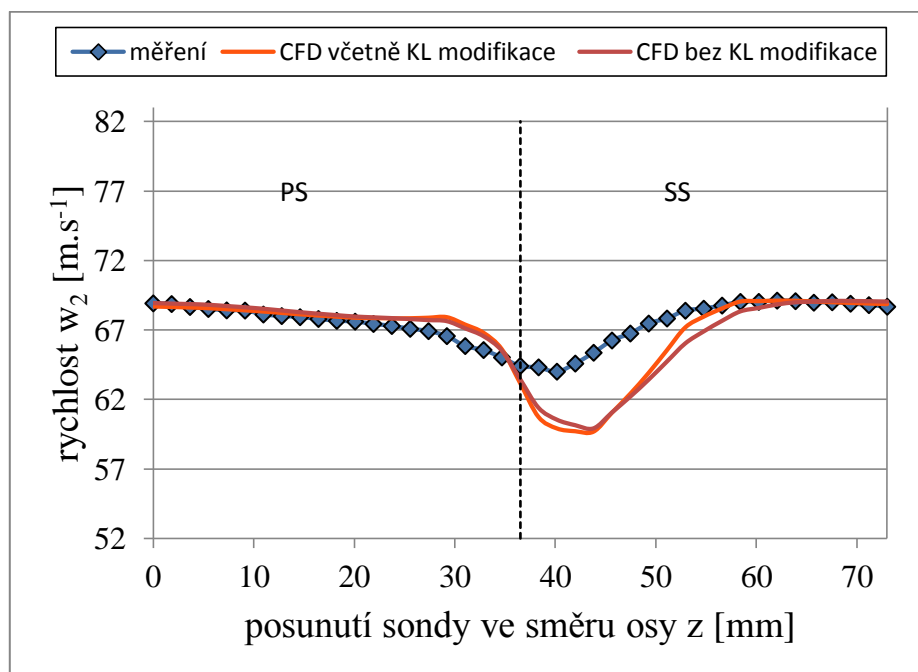
Jak již bylo uvedeno v kap. 5.8.3, souvisí řád přesnosti úlohy s výběrem interpolačního schématu, přičemž obvykle vyšší řád přesnosti zaručuje získání přesnějšího výsledku, což se prokázalo rovněž na dané úloze, kdy se jako nejvhodnější varianta ukázala možnost *High Resolution* – *High Resolution* (tab. 13). Při tomto nastavení odpovídal průběh rychlosti w_1 pro výsledky získané CFD simulací nejlépe výsledkům z experimentu, a proto byl použit i u dalších změn. Naopak při použití nižšího řádu přesnosti (konkrétně možnost *Upwind* u nastavení řádu turbulence) byly získané výsledky nejméně přesné a takřka vůbec neodpovídaly výsledkům z experimentu.



Graf 13: Průběh rychlosti w_2 pro různé řády turbulence a typy advekčních schémat.

Kato-Lauder modifikace

Další zpřesnění výsledků umožnila modifikace pomocí Kato–Lauder metody. Jedná se především o nesouměrnost pravé a levé strany grafu reprezentující průběh CFD výsledků vůči její ose, kdy průběh grafu na pravé straně klesá pod větším úhlem. Tato nepřesnost je způsobena tzv. anomálií stagnačního bodu, vyskytujícího se u $k-\varepsilon$ turbulentního modelu všude tam, kde je proudění prudce zrychlováno, nebo zpomalováno. Příkladem toho je právě proudění před stagnačním bodem turbínové lopatky, kde je rychlost proudění prudce zpomalena a následně dochází k rychlému nárůstu zrychlení na její přetlakové straně. To má za následek zvýšení hodnoty turbulentní kinetické energie k . Uvedený turbulentní model v takovém případě počítá s mnohem vyšší turbulencí, než ve skutečnosti nastává. Daná nesouměrnost je pak vlastně deficitem rychlosti, který je způsoben mezní vrstvou na přetlakové a sací straně lopatky, což rovněž souvisí s tzv. ztrátovým součinitelem celkového tlaku ζ , který je v podstatě mírou profilových ztrát. Hodnota uvedeného ztrátového součinitele je za lopatkou vysoká a odvíjí se od zvoleného turbulentního modelu, kdy největší odchylky mezi hodnotami získanými experimentálním měřením a CFD simulací vykazuje právě standartní $k-\varepsilon$ model [18] (zhruba 50 %). Průběh rychlosti w_2 při zahrnutí Kato–Lauder metody reprezentuje graf 14, získané hodnoty jsou uvedeny v tab. 13.



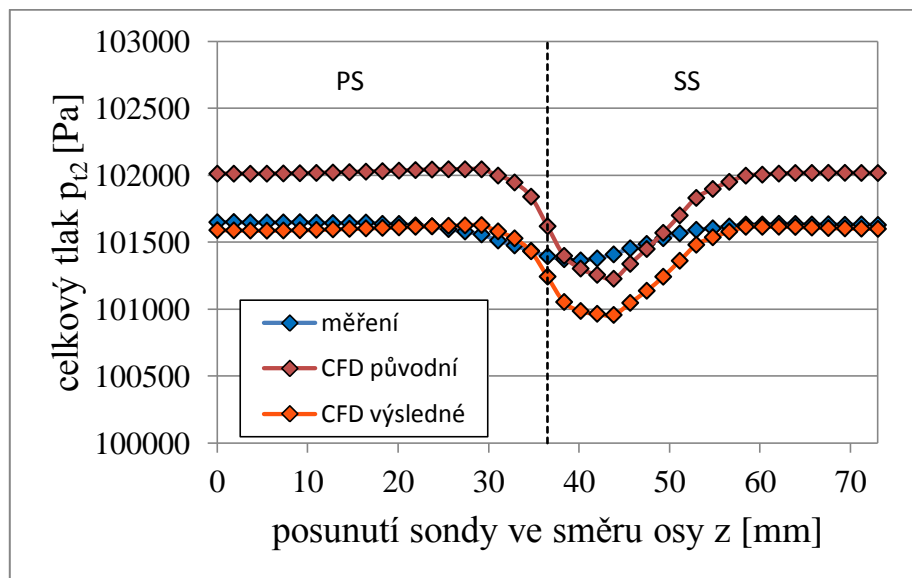
Graf 14: Průběh rychlosti w_2 při použití Kato–Launder modifikace.

Při výpočtu se zahrnutím Kato–Launder modifikace docházelo k problémům s konvergencí, kdy se hodnoty jednotlivých po sobě jdoucích iterací značně lišily a výsledek nebyl přesný. Pro dosažení konvergence byla proto použita relaxace, která redukuje změny každé proměnné v každé iteraci.

Každá nová hodnota $\zeta_{P,i+1}$ v konečném objemu obsahujícím bod P závisí na staré hodnotě z předešlé iterace $\zeta_{P,i}$, vypočtené změně ζ_P a relaxačním parametrem $\alpha \in \langle 0,1 \rangle$ a to následovně: $\zeta_{P,i+1} = \zeta_{P,i} + \alpha \Delta \zeta_P$. Relaxační parametr je možné nastavit pro všechny, nebo jen pro jednotlivé proměnné. Je přitom vhodné během výpočtu tyto hodnoty měnit a tím urychlovat konvergenci a to zvláště u náročných úloh s dlouhým výpočtem. Jestliže jsou změny reziduálů při přechodu z jedné iterace na druhou velké, nastaví se relaxační faktor malý a obráceně. V tomto případě byl nastaven relaxační parametr (Time Scale Factor) $\alpha = 0,6$ pro všechny počítané proměnné a daná hodnota byla vzhledem k relativně krátké době výpočtu ponechána po celou dobu výpočtu konstantní. Při daném nastavení úloha bez problému zkonvergovala.

Posledním odlišným znakem v průběhu rychlosti w_1 pro případ počítačové simulace oproti průběhu rychlosti získaného z výsledků experimentu zůstává průběh v oblasti narušeného proudění vlivem úplavu a posunutí této oblasti více do oblasti za sací stranou lopatky. Nejpravděpodobnějším důvodem tohoto jevu je již zmíněná anomálie stagnačního bodu pro případ simulace s $k-\epsilon$ turbulentním modelem, který počítá s příliš vysokou turbulencí. Ta má za následek nárůst hodnoty ztrátového součinitele celkového tlaku ζ a snížení rychlosti za odtokovou hranou lopatky. Durbin [11] zabývající se touto anomálií zjistil, že použití daného modelu má za následek výpočet tak vysoké hodnoty turbulentní kinetické energie k ve stagnačním bodě, že může dokonce ovlivnit celý výpočet proudění počítačové simulace. Proudění kolem turbínové lopatky je pro tento jev ideálním příkladem [21].

Pro všechny uvedené korekce a změny v nastavení výpočtu počítačové simulace proudění v kapitole 5.11.1 pak vypadá průběh celkového tlaku následovně (tab. 14):



Graf 15: Průběh celkového tlaku p_{t2} po změně všech nastavení.

Jak je vidět v grafu 15, odpovídá průběh celkového tlaku p_{t2} v oblasti nenarušeného proudění za sací a přetlakovou stranou získaný CFD výpočtem velmi dobře výsledkům získaným z experimentu, podobně jako tomu bylo u průběhu nátokové rychlosti w_1 . Naopak v oblasti narušeného proudění vlivem vznikajícího úplavu dosahuje průběh celkového tlaku p_{t2} pro CFD výsledky nižších hodnot, než tomu bylo u výsledků získaných experimentem. Nejpravděpodobnějším důvodem pro tento jev je opět užití $k-\varepsilon$ turbulentního modelu, kdy vlivem anomálie stagnačního bodu dochází ke zvýšené ztrátě celkového tlaku za odtokovou hranou lopatky.

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.1, je celkový tlak tvořen součtem statického a dynamického tlaku. V kapitole 5.9.2 byl prokázán velmi přesný výpočet průběhu statického tlaku p_2 pomocí CFD výpočtu, kdy tyto výsledky velmi dobře odpovídaly výsledkům z experimentu. Naopak u rychlosti w_2 byly hodnoty z CFD modelování mnohem nižší než tomu bylo u experimentu. Z toho důvodu byla příliš nízká i hodnota dynamického tlaku, což mělo za následek snížení celkového tlaku a tedy nárůst hodnoty součinitele celkového tlaku ζ .

Toto potvrdili také Walters and Leylek, kteří při jejich experimentu porovnávali rozdíl mezi tlakovými ztrátami zjištěnými u experimentu se ztrátami získanými CFD modelováním pro různé turbulentní modely. Přitom zjistili, že standardní turbulentní model může vykazovat proti experimentálním výsledkům až o 54 % vyšší ztrátu celkového tlaku. Naopak mnohem lepší výsledky byly dosaženy při použití jiných turbulentních modelů, jako např. RNG $k-\varepsilon$, nebo RKE turbulentního modelu, které se lišily pouze o 26 %, resp. 2 % [21].

5.11.2 Úpravy vedoucí ke změně výsledku úhlu β_2^+ a statického tlaku

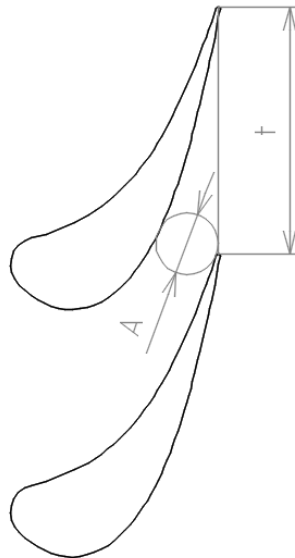
Z grafu 11 je na první pohled zřejmý rozdíl mezi experimentálně naměřenými a pomocí počítačové simulace získanými hodnotami úhlu relativní rychlosti β_2^+ a to o hodnotu přibližně $2 - 3^\circ$. Nejprve je třeba zjistit, který z obou výsledků je přesnější. Ke zjištění „ideální“ velikosti úhlu β_2^+ lze využít rov. 45, kdy lze získat danou veličinu jako poměr průtočného průřezu A a rozteče lopatkové mříže t [6].

Willinger se daným problémem zabýval a zjistil, že při různých velikostech rozteče lopatkové mříže ($t = 72,15^\circ - 75^\circ$) a různých kritických průřezích ($A = 15,5 \text{ mm} - 20 \text{ mm}$) byla velikost úhlu β_2^+ rovna $\beta_2^+ = 12,8^\circ - 15,5^\circ$.

Pro veličiny platné pro danou lopatkovou mříž, kdy $A = 18,5$ mm a $t = 73$ mm je pak úhel relativní rychlosti, měřený ze záporného směru y' roven [20]:

$$\sin \beta_2^+ \approx \frac{A}{t} \quad (45)$$

$$\beta_2^+ \approx \arcsin\left(\frac{A}{t}\right) \doteq 14,68^\circ$$



Obr. 52: Průtočný průřez A.

Je tedy patrné, že přesnější výsledek je ten, který byl vypočten pomocí CFD simulace a u kterého, jak již bylo zmíněno v kap. 5.11.1, mají chyby způsobené CFD simulací, zvláště pak anomálie stagnačního bodu, která značně ovlivnila průběh rychlosti w_2 a celkový tlak p_2 , na průběh statického tlaku p_2 jen malý vliv.

Zaměříme-li se tedy na experimentálně získané výsledky, pak je daná nepřesnost ($2^\circ - 3^\circ$) způsobena nepřesným nastavením měřící aparatury. Jednalo se o:

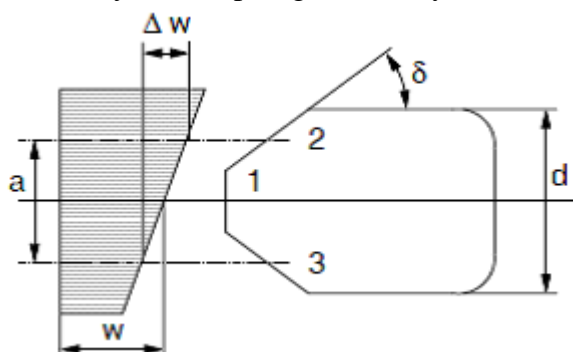
- nepřesné nastavení tříotvorové sondy, kdy byl chybně nastaven úhel relativní rychlosti β_2^+ (viz obr. 21) na otočné stupnici sondy, jehož hodnota měla činit 15° , dále měla být měřící špička sondy umístěna přesně v polovině kanálu ve vzdálenosti 75 mm od stěny měřícího zařízení a především měla být osa sondy ve vodorovném směru. Toto bylo ověřováno ručně pomocí vodováhy a je tedy zároveň zdrojem největší chyby. V součtu se jednalo o chybu měření přibližně $1^\circ - 2^\circ$.
- Dalším zdrojem chyby bylo nepřesné ustavení pohyblivé kolébky, ve které je na válečkových ložiscích umístěna lopatková mříž a která umožňuje libovolné nastavení úhlu vstupní rychlosti před lopatkovou mříží. Zde byl pomocí klasického úhloměru, na němž je pomocí tenkého provázku připevněno závaží, měřen úhel relativní rychlosti na vstupu do mříže $\beta_1 = 76,1^\circ$. Vzhledem k relativní jednoduchosti měřícího zařízení zde vznikla systematická chyba o velikosti přibližně 1° .

- V neposlední řadě pak ještě nepřesné nastavení úhlu lopatkové mříže ($39,9^\circ$), při které vznikla systematická chyba $0,5^\circ$.

Součet všech tří uvedených chyb pak přesně odpovídá rozdílu mezi experimentálně naměřenými a pomocí CFD výpočtu získanými výsledky.

Chyba gradientu

Chyba gradientu ovlivňuje analytické řešení a souvisí s tzv. proudnicovou projekční metodou, která je založena na předpokladu, že rychlost volného proudu se promítne na každém ze tří měřících otvorů sondy. Složka rychlosti kolmá na povrch sondy vyústí v dynamický tlak, který je přičten ke statickému tlaku volného proudu. Tuto metodu lze mimo jiné použít pro přibližné určení vlivu gradientu rychlosti na tzv. „flow angle error“ $\Delta\varepsilon$ tříotvorové sondy [13]. Tuto metodu lze využít jak u analytického, tak numerického řešení. Na obr. 53 je tříotvorová sonda vystavena poli gradientu rychlosti.



Obr. 53: Tříotvorová sonda vystavená poli gradientu rychlosti [13].

Směr proudu je rovnoběžný s osou sondy a vzdálenost mezi otvory 2 a 3 je veličina a . Kvůli snaze vyrábět měřící špičku sondy co nejmenší, je možné rychlostní pole považovat za lineární a gradient rychlosti K (graf 16) lze zapsat v bezrozměrném tvaru jako [13]:

$$K = \frac{dp_i}{dy} \frac{2a}{\rho w^2} = \frac{dw}{dy} \frac{2a}{w}, \quad (46)$$

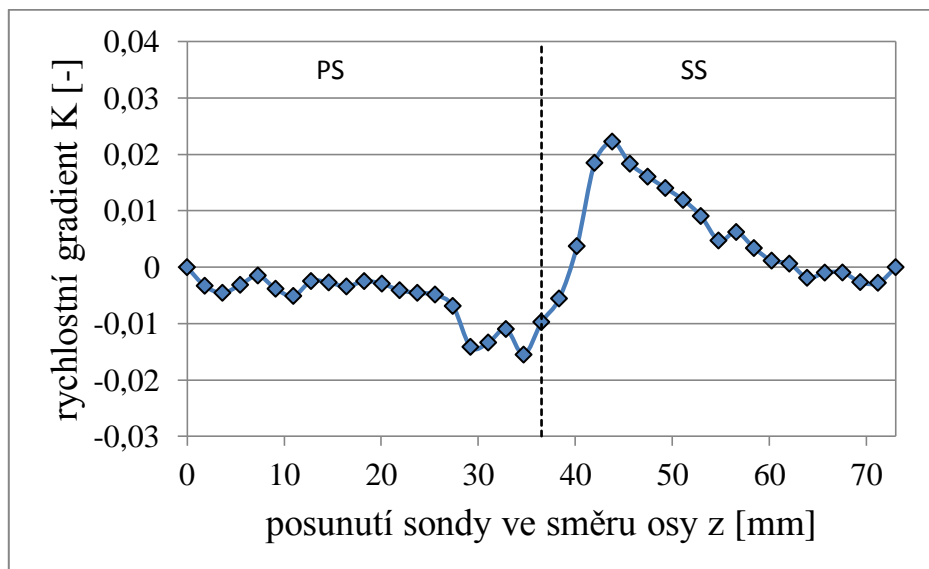
$$K_i = \frac{2a}{w_i} \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2\Delta y},$$

kde $a = 1,6 \text{ mm}$ a $\Delta y = 1,825 \text{ mm}$. Po dosazení všech veličin byly získány hodnoty gradientu rychlosti ve všech bodech měřící sondy.

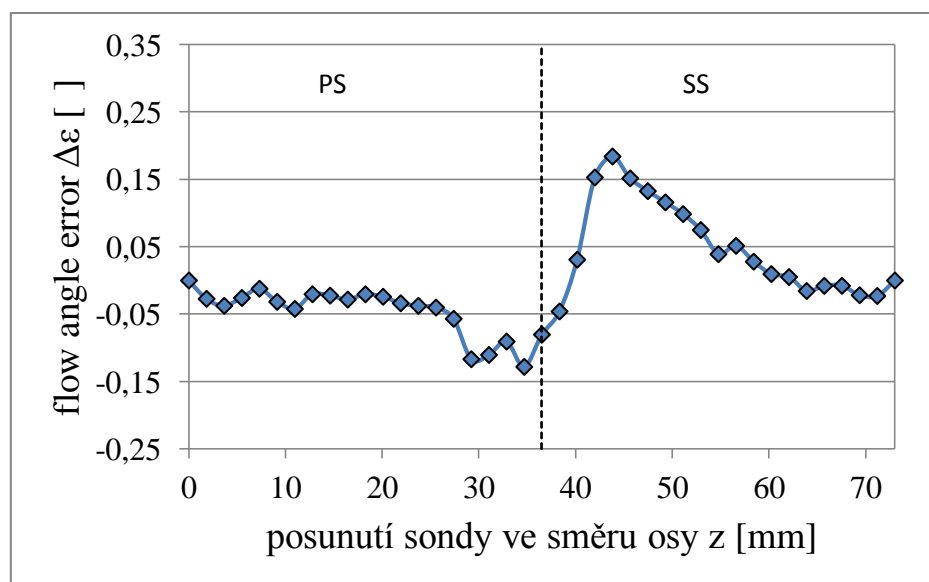
Gradient rychlosti dále indukují rozdíl tlaků mezi otvory „2“ a „3“ sondy, který je popisován jako „flow angle error“ $\Delta\varepsilon$ (graf 17). Platí pro něj [13]:

$$\Delta\varepsilon = K \frac{45^\circ}{\pi} \tan \delta \quad (47)$$

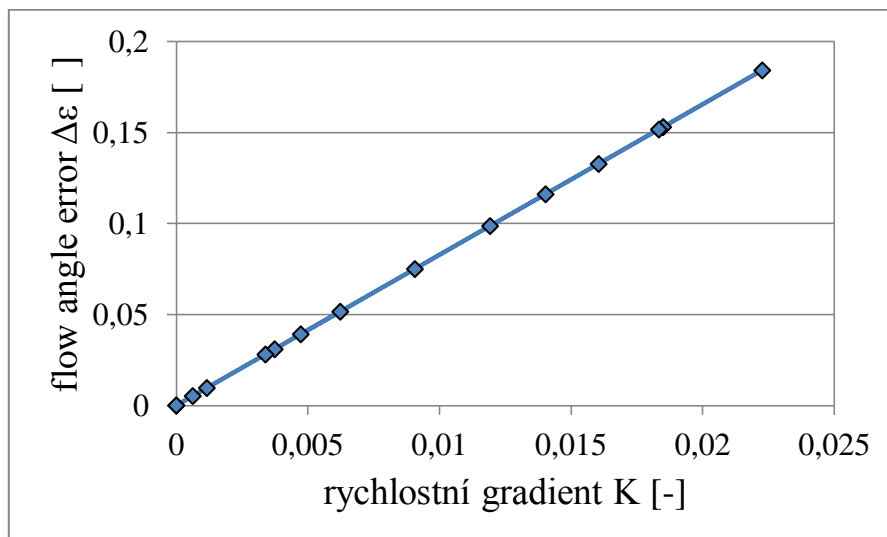
Z uvedené rovnice je zřejmé, že proudnicová projekční metoda udává lineární závislost mezi „flow angle error“ $\Delta\varepsilon$ a bezrozměrným rychlostním gradientem K [13]. Všechny získané hodnoty jsou uvedeny v tab.11. Z grafu 18 je pak patrná lineární závislost obou veličin ($\Delta\varepsilon/K = 8,27$).



Graf 16: Bezrozměrný rychlostní gradient K .



Graf 17: Flow Angle Error $\Delta\epsilon$.



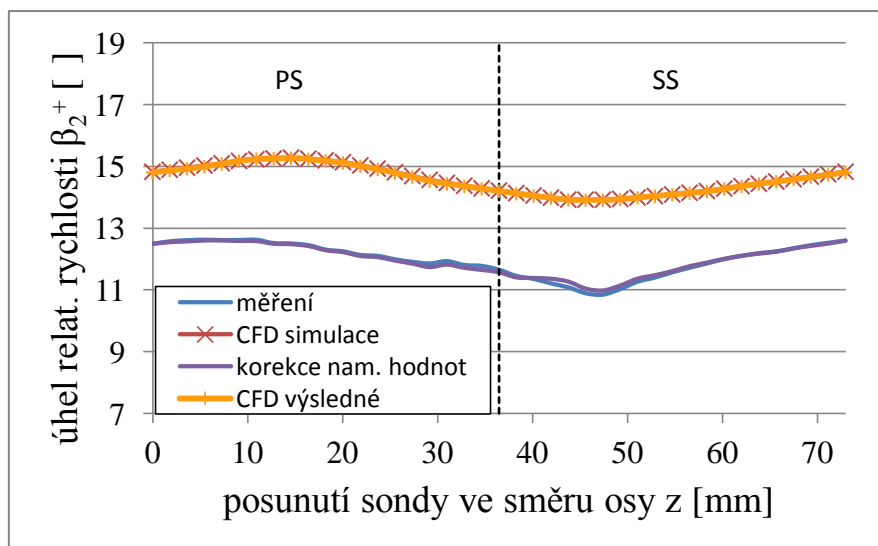
Graf 18: Lineární závislost veličin $K-\Delta\varepsilon$.

Následně jsou využity výsledky flow angle error na korekci úhlu vybočení $\beta_{2, kor}^+$. Jak je vidět na grafu 19, objevují se u experimentálně naměřených hodnot, přibližně β_2^+ v rozmezí $z = 30 - 50$ mm, velké výkyvy způsobené chybou gradientu rychlosti. Pokud je aplikována korekce gradientu (rov. 48), jsou výkyvy vyhlazeny a úhel vybočení vykazuje mnohem rovnoměrnější rozložení po délce lopatky. V grafu byly rovněž vykresleny obě hodnoty získané numerickým řešením – jak hodnoty původní pro $w_2 = 18,56$ m/s, tak hodnoty po úpravách uvedených v kapitole 5.5.1. Je patrné, že zmíněné korekce neměly na výsledek prakticky žádný vliv.

$$\beta_{2, kor}^+ = \beta_2^+ + \Delta\varepsilon \quad (48)$$

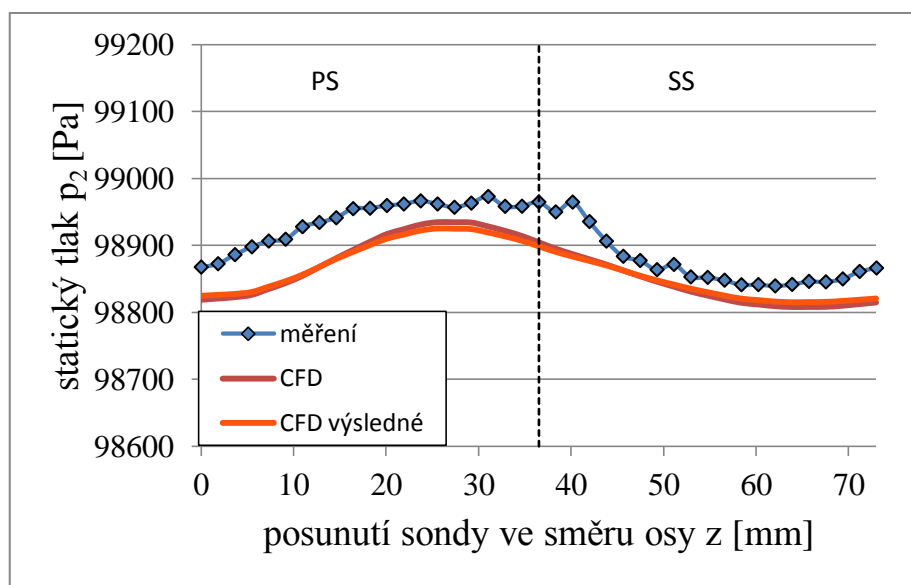
Roli sehrál i fakt, že kalibrační hodnoty sondy použité při výpočtu úhlu β_2^+ byly získány na odlišném měřicím zařízení a za jiných podmínek ($Re_d = 11300$). Pro dané podmínky měření je Reynoldsovo číslo rovno:

$$Re_s = \frac{w_2 \cdot d}{\nu} = 10358 \quad (49)$$



Graf 19: Úhel relativní rychlosti po korekci naměřených hodnot.

Poslední pozorovanou veličinou je statický tlak p_2 . Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.10, je průběh křivek získaných experimentálním měřením a počítačovým modelováním téměř shodný, nepatrný rozdíl je pouze na začátku a na konci grafu a činí méně než 0,1 %. Další téměř zanedbatelný rozdíl je v oblasti $z = 30 - 50$ mm, kde se u analytického řešení vyskytují výkyvy hodnot vlivem chyby gradientu. Zde činí maximální rozdíl asi 300 Pa. V grafu 19 je vidět průběh statického tlaku získaný numerickým výpočtem po zahrnutí všech nastavení uvedených v kapitole 5.5.1. Tato nastavení neměla na výslednou hodnotu prakticky žádný vliv, viz tab. 14.



Graf 20: Průběh statického tlaku p_2 po provedení všech korekcí.

6 Měření rozdělení tlaku po profilu lopatky.

Druhá část měření probíhala rovněž v laboratořích Ústavu energetických zařízení a termodynamiky na Technické univerzitě ve Vídni. Základní geometrie lopatkové mříže zůstala stejná jako při prvním měření. Rovněž zařízení na měření statického, celkového tlaku a teploty se nezměnily. Jediný rozdíl byl v měřeném rozdílu tlaků na vstupu do mříže, kde byla oproti tlakové diferencii měřené v první části této práce ($p_{t1} - p_1$) nově měřena diference tlaků ($p_1 - p_u$) a dále v naměřených parametrech okolního vzduchu (tab. 6) a vzduchu vstupujícího do lopatkové mříže (tab. 7). Měřenou veličinou bylo tentokrát rozdělení tlaku po profilu turbínové lopatky.

Tab. 6: Naměřené hodnoty okolního vzduchu.

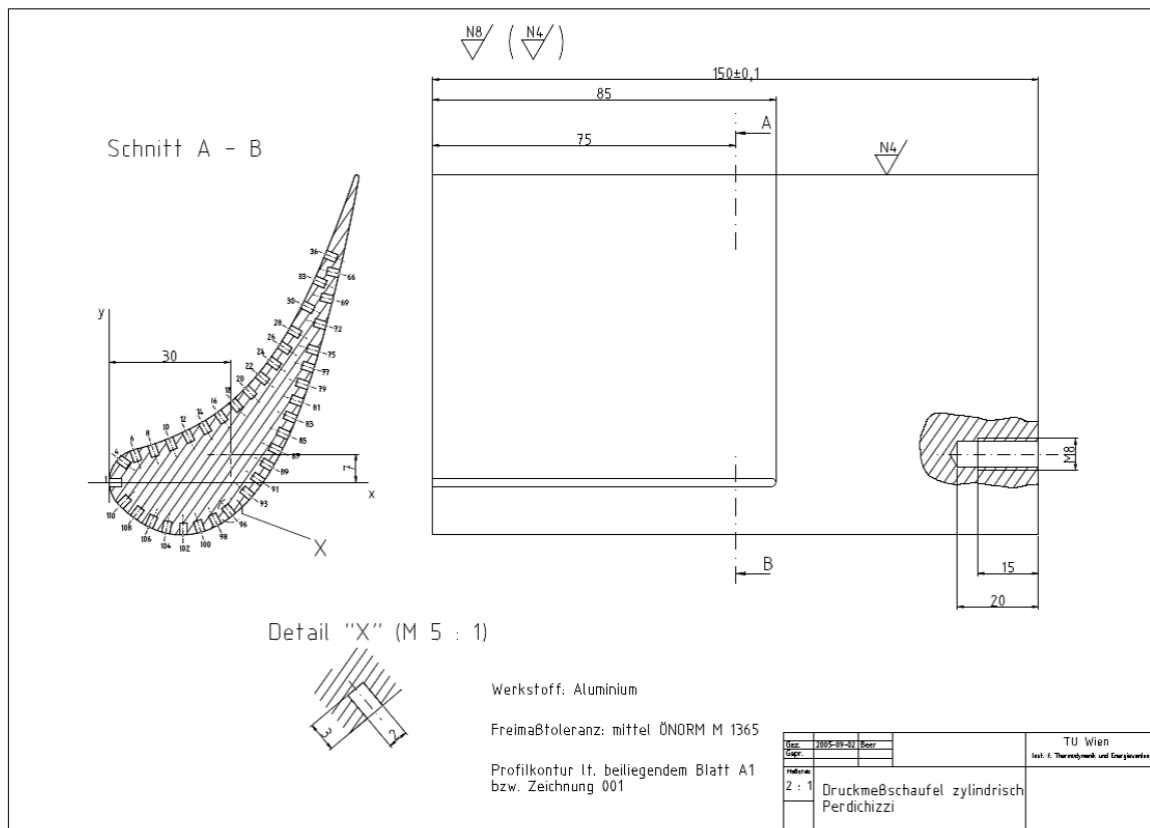
Tlak okolního vzduchu	$p_u = 989,6$ mbar
Teplota okolního vzduchu	$t_u = 18,3$ °C

Tab. 7: Naměřené hodnoty před lopatkovou mříží.

Úhel relativní rychlosti	$\beta_1 = 76,1$ °
Rozdíl tlaků	$p_{t1} - p_u = 2921$ Pa
Teplota	$t_1 = 18,5$ °C
Rozdíl tlaků	$p_1 - p_u = 2720$ Pa
Nátoková rychlost	$w_1 = 18,19$ m/s

6.1 Postup měření

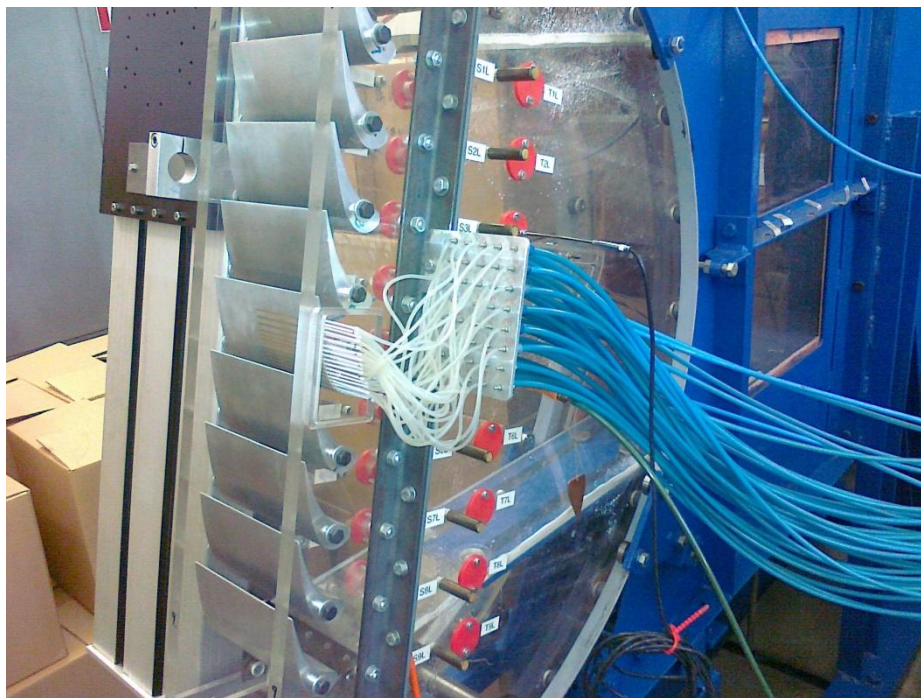
Samotný postup měření je velmi podobný měření v kap. 3 s tím rozdílem, že namísto měření charakteristických veličin za turbínovou mříží pomocí pneumatické sondy, bylo měřeno rozložení tlaku po profilu lopatky pomocí 38 odběrů statického tlaku umístěných v drážkách o délce 85 mm a šířce 2 mm. Na obr. 52 je umístění těchto tlakových odběrů znázorněno. Je zřejmé, že jejich umístění není po profilu lopatky rovnoměrné a například na odtokové hraně lopatky měřicí otvory zcela chybí.



Obr.54: Výkres lopatky s 38 odběry statického tlaku [21].

Postup měření rozložení tlaku po profilu byl následující:

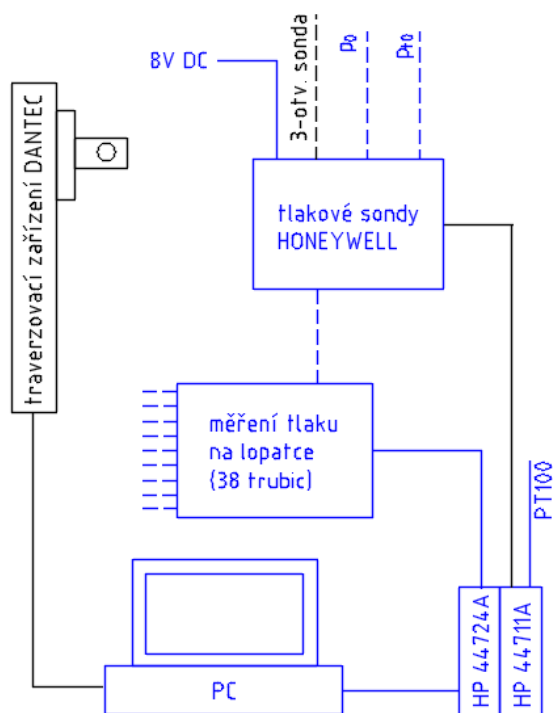
1. Zaznamenání hodnoty okolního tlaku p_u a teploty okolí t_u .
2. Ověření uspořádání měřících prvků a jejich správného nastavení.
3. Spuštění zkušebního stanoviště.
4. Čekání, až dojde k ustálení stavu. Teplota t_1 před lopatkovou mříží by se neměla měnit (před zapnutím ventilátoru je teplota t_1 přibližně 20 °C, po zapnutí ventilátoru téměř 30 °C, proto je třeba počkat na ustálení teploty).
5. Měření veličin před lopatkovou mříží (úhel relativní rychlosti na vstupu do mříže β_1 , rozdíl tlaků $p_{t1} - p_u$ a $p_l - p_u$, kde p_u je tlak okolí, p_{t1} celkový tlak a p_l statický tlak na vstupu do mříže, poslední měřenou veličinou je rychlost proudění na vstupu do mříže w_1).
6. Naměření tlaků pomocí odběrových tvorů na lopatce ($p_L - p_u$), měření probíhalo celkem v 38 bodech [8].



Obr. 55: Odběr statického tlaku ve všech 38 měřených bodech.

Poznámka k průběhu měření:

1. Úhel relativní rychlosti na vstupu do mříže β_1 je měřen pomocí malého závaží připevněného na provázku a úhloměru umístěného na boční stěně natáčivé kolébky.
2. Naměření hodnoty teploty t_1 a rychlosti na vstupu do mříže w_1 proběhne celkem 50 krát a z výsledků se vypočte střední hodnota, která byla zapsána počítačem.
3. Měření tlaků pomocí otvorů ve stěně a Pitotovy trubice ($p_{t1} - p_u$ a $p_1 - p_u$) probíhá pouze jedenkrát.
4. Měření tlaku pomocí otvorů umístěných na profilu lopatky probíhá tak, že nejprve, proběhne celkem 50 měření v prvním bodě, z nichž se vypočte střední hodnota, kterou počítač uloží a následně probíhá měření v následujícím bodě, celkem se jedná o 38 měřících bodů.



Obr. 56: Měřící aparatura [21].

6.2 Analytické řešení

Hodnoty naměřených tlaků ($p_L - p_u$) byly exportovány do programu MS Excel. Rozložení tlaku je obvykle znázorňováno pomocí bezrozměrné veličiny c_p , která popisuje, jak se mění statický tlak na úkor dynamického, viz kapitola 2.8. Pro výpočet této veličiny, je nutné nejprve zjistit hustotu vzduchu:

$$\rho = \frac{p_1}{r \cdot T_1} = 1,215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (50)$$

Z rovnic 51 a 52 lze pak dokázat, že se jedná o nestlačitelné proudění ($Ma_1 < 0,2$), a proto lze hustotu vzduchu považovat za konstantní.

$$a_1 = \sqrt{\kappa r T_1} = 343,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad (51)$$

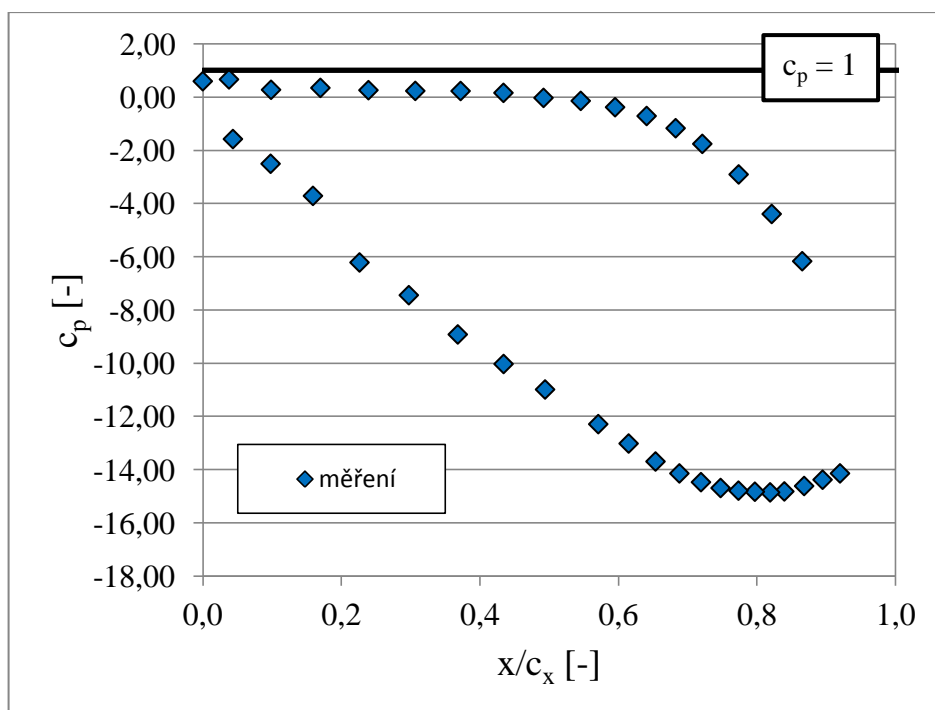
$$Ma_1 = \frac{w_1}{a_1} = 0,053. \quad (52)$$

Veličinu c_p lze tedy vyjádřit jako:

$$c_p = \frac{p_i - p}{\frac{1}{2} \rho w_1^2}, \quad (53)$$

kde p_i vyznačuje statický tlak kdekoli v proudovém vlákne mezi vstupem a výstupem.

Vzhledem k tomu, že se počáteční podmínky oproti podmínkám při měření pneumatickou sondou změnily jen nepatrně, dá se i bez výpočtu Reynoldsova čísla předpokládat, že proudění v lopatkovém kanále bude opět turbulentní. Experimentálně naměřené hodnoty všech 38 bodů jsou uvedeny v tab. 15 a průběh veličiny c_p po profilu je vykreslen v grafu 21. Zde je velmi dobře rozlišitelná přetlaková od sací strany lopatky. Je vidět, že na přetlakové straně se až do vzdálenosti $\frac{x}{c_x} \approx 0,5$ hodnota statického tlaku příliš nemění a jeho hodnota je přibližně $p \approx 101750 Pa$, dále již pak jeho velikost výrazně klesá a zvyšuje se rychlost proudu. Na sací straně naopak statický tlak nejprve klesá (roste rychlost) a to až na minimální hodnotu $p = 98695,5 Pa$ a poté se začne zvyšovat, rychlost proudu klesá.



Graf 21: Rozložení c_p po profilu – měření.

6.3 Numerické řešení

Pro numerické řešení bylo nezbytné nejprve nastavit všechny nezbytné veličiny v Pre-processingu tak, aby mohl být zahájen výpočet. Vycházelo se při tom z nastavení použitého při měření pneumatickou sondou. Samotná výpočetní síť zůstala rovněž stejná a tedy jedinými veličinami, které se změnily, byli:

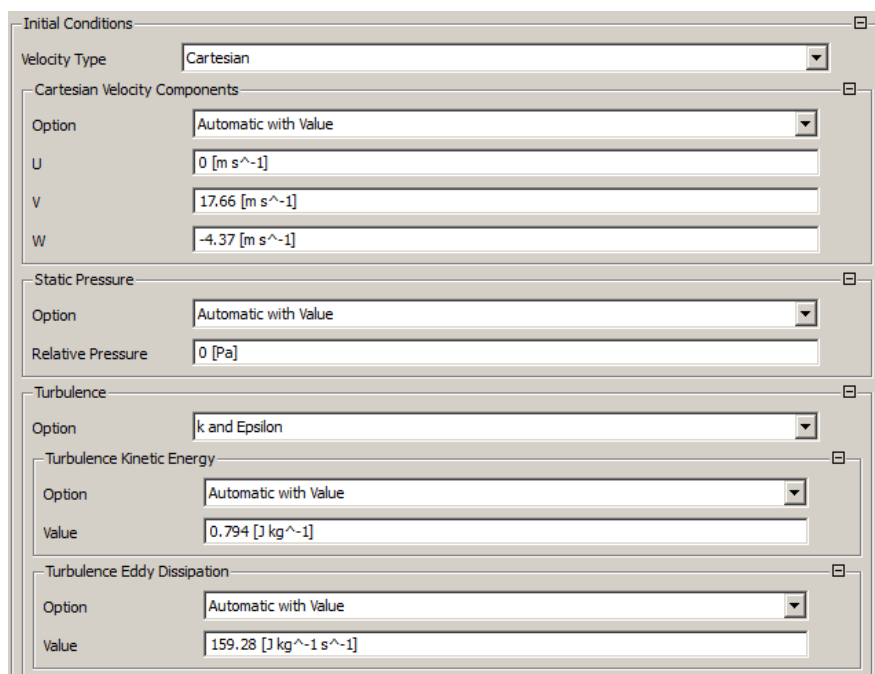
- referenční tlak, jeho velikost je rovna velikosti tlaku okolí ($p_u = 98\,960 Pa$),
- rychlost proudu vstupujícího do kanálu, jehož naměřená hodnota činila $18,19 m.s^{-1}$, tato rychlost byla opět rozložena na rychlost ve směru y a z ($w_{1y} = 17,66 m.s^{-1}$) a $w_{1z} = -4,20 m.s^{-1}$),
- hustota vzduchu, jejíž hodnota byla vypočtena v předchozí kapitole a která byla rovna $\rho = 1,215 kg.m^{-3}$,

- střední teplota vzduchu byla rovna $t_s = \frac{t_1 + t_2}{2} = 18,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ (54)

- turbulentní kinetická energie $k = \frac{3}{2}(u \cdot Tu)^2 = 0,794 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$, (55)

- turbulentní disipace $\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l_m} = 159,28 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{s}}$. (56)

Při tomto řešení byli řád turbulence a typ advekčního schématu ponechány implicitně nastavené, tzn. řád turbulence = High Resolution, typ advekčního schématu = First Order a rovněž zde nebyla využita korekce dle Kato–Lauder.

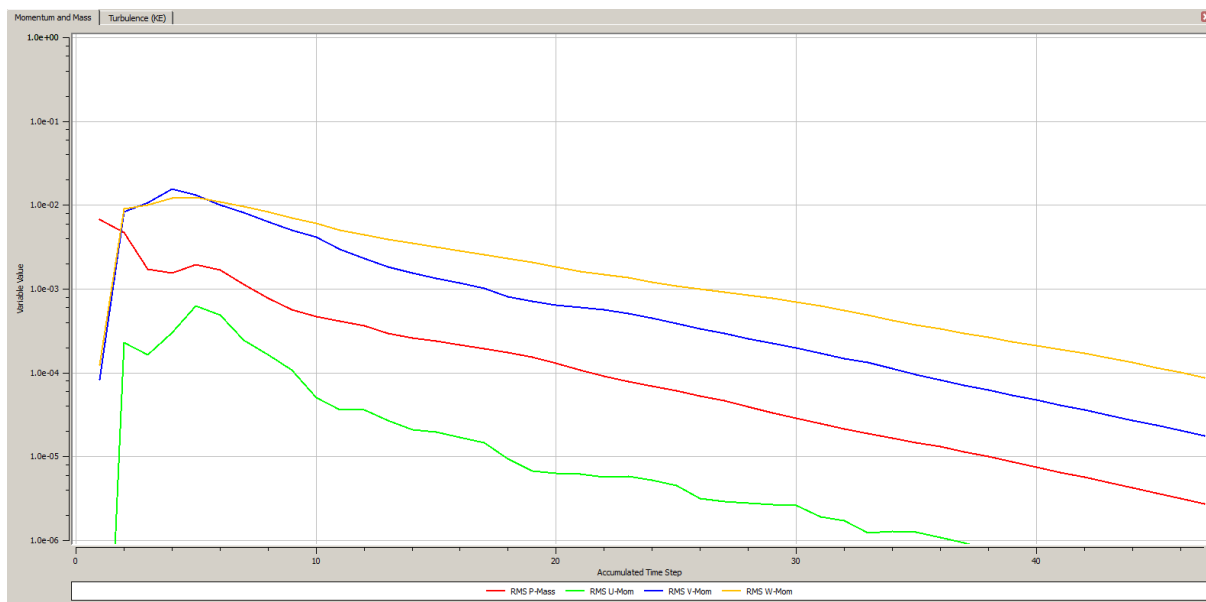


Obr. 57: Nastavení počátečních podmínek.

Na obrázku 57 je znázorněn průběh reziduí při řešení dané úlohy. Úloha opět velmi dobře konvergovala, výpočet byl proveden na výpočetní stanici s procesorem 2.30 GHz a nainstalovanou pamětí 4 GB. Délka výpočtu činila 81 sekund.

Tab. 8: Charakteristiky výpočtu.

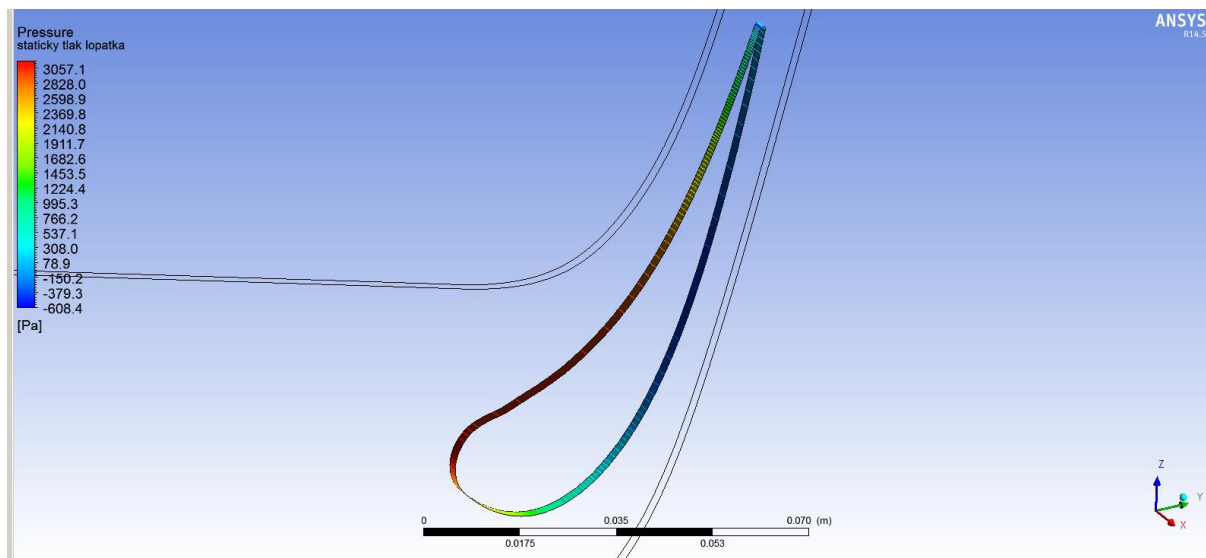
počet uzlů	7 527
počet elementů	4 646
doba výpočtu	81 sekund
počet iterací	47



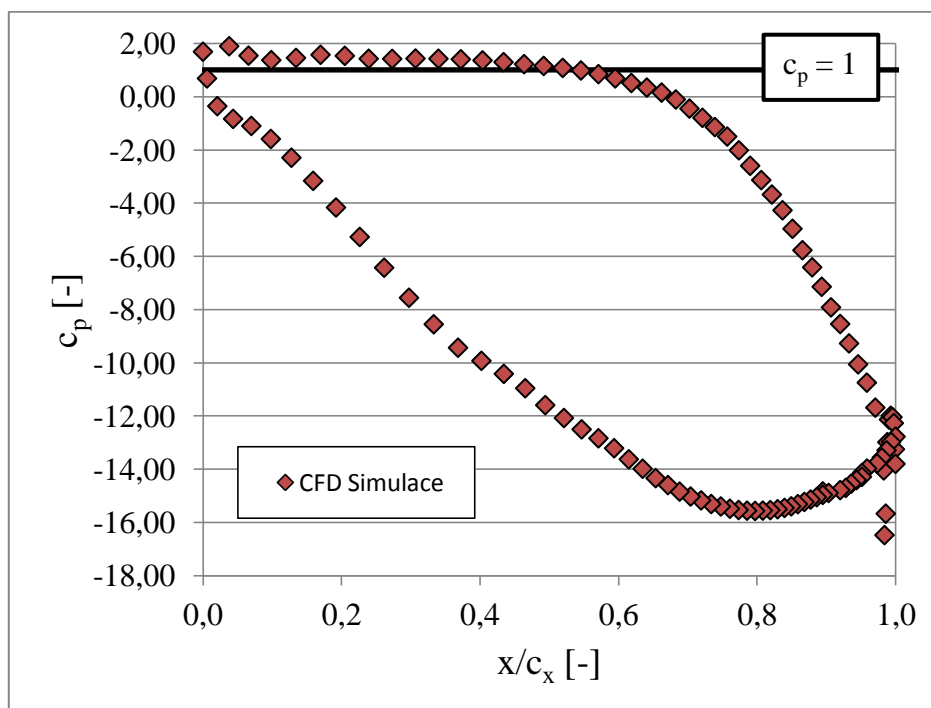
Obr. 58: Průběh reziduí.

Po úspěšném ukončení daného výpočtu byl spuštěn program CFX-Post. Pro prvotní kontrolu získaných výsledků bylo vykresleno rozdělení statického tlaku po profilu lopatky a to ve všech 113 bodech lopatky (obr. 59). V takovém případě bylo možné zobrazit průběh tlaku po celém profilu lopatky. Z uvedených měřených bodů byla nejvyšší naměřená hodnota statického tlaku rovna $p = 102121 \text{ Pa}$. Nejednalo se však o celkově nejvyšší tlak na lopatce. Ten měl hodnotu $p = 102132 \text{ Pa}$ a nacházel se v náběhovém bodě lopatky. Nejnižší hodnoty statického tlaku o velikosti přibližně $p \approx 98550 \text{ Pa}$ se pak nacházely na sací straně lopatky ve vzdálenosti $\frac{x}{c_x} \approx 0,8$, kde byla dosažena nejvyšší rychlost proudění a rovněž na odtokové hraně lopatky.

Následně byly hodnoty statických tlaků v jednotlivých bodech exportovány do programu MS Excel. Po zpracování dat byl vykreslen graf 22. Všechny hodnoty jsou uvedeny v tab. 16.



Obr. 59: Rozložení statického tlaku po profilu lopatky.



Graf 22: Rozložení c_p po profilu – CFD modelování.

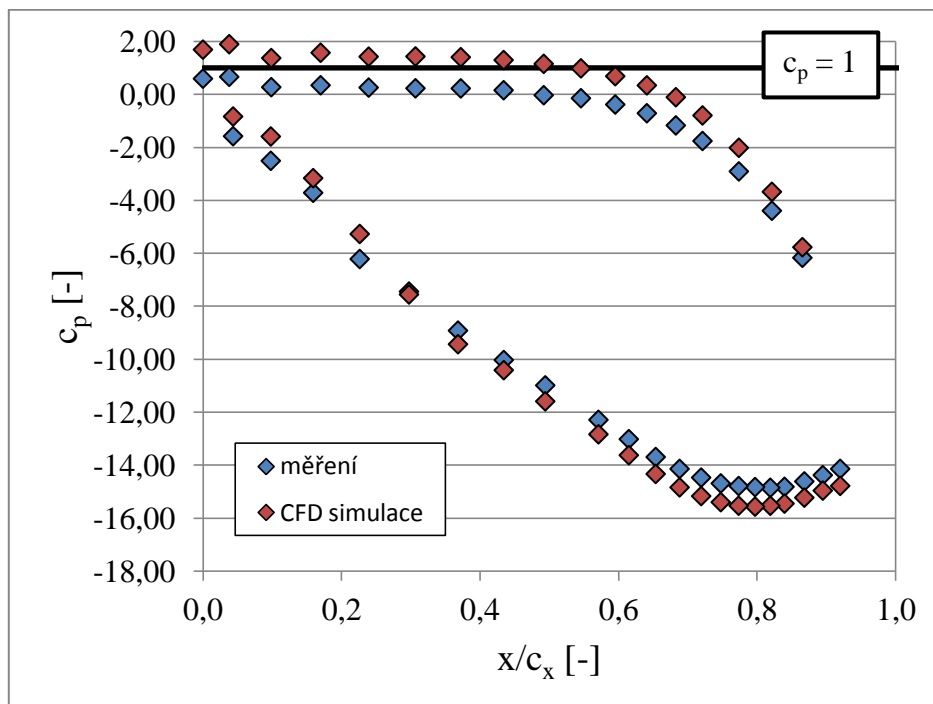
6.4 Zhodnocení a porovnání výsledků a jejich korekce

Podobně jako u první části měření pomocí pneumatické sondy, byla i u měření rozdělení statického tlaku po profilu lopatky důležitá kontrola a porovnání obou výsledků – experimentu a CFD simulace.

Zatímco u osamocenému profilu (obr. 10), kde nedochází ke změně směru proudění, je v nátokové hraně $c_p = 1$ a na výstupu z mříže $c_p = 0$, v případě obtékání zadaného profilu, který je součástí turbínové mříže, již dochází k ohybu proudu, poklesu tlaku a c_p musí být nutně na výstupu z mříže menší než 0. V grafu 23 je srovnání průběhu koeficientu statického tlaku pro obě metody – experiment a CFD výpočet a to v bodech lopatky, využitých při experimentálním měření.

Teoreticky by měl mít v obou případech koeficient statického tlaku ve stagnačním bodě hodnotu $c_p = 1$, což v žádném z daných případů nenastalo. U experimentálních výsledků byla nejvyšší hodnota koeficientu statického tlaku rovna $c_p = 0,67$. Jednalo se o měřicí bod číslo „4“ se souřadnicemi $y = 2,34$ mm a $z = 5,97$ mm. Při počítačové simulaci byla v tom samém bodě naměřena hodnota $c_p = 1,90$, což není fyzikálně možné. Jak již bylo uvedeno v kap. 1.8, je maximální hodnota, kterou může veličina c_p dosahovat rovna jedné, což vyplývá z rovnice $P_{i\max} = p_1 + 0,5 \cdot \rho \cdot w_1^2$, k čemuž dochází pouze v nátokové hraně lopatky.

Důvodem, proč nebyla u experimentálních výsledků dosažena hodnota $c_p = 1$ je fakt, že se přímo v nátokové hraně lopatky nenachází žádný z měřených bodů. U výsledků z CFD simulace se vyskytuje příliš vysoká hodnota c_p , která v náběhovém bodě činila dokonce $c_p = 2,25$ a která byla způsobena pravděpodobně, již v kapitole 5.11.1, zmíněnou náhodnou chybou měřicího zařízení a rovněž použitým turbulentním modelem $k-\epsilon$, který poměrně dobře počítá plně vyvinuté proudění volného proudu, v oblastech blízko pevné stěny však přesnost modelu klesá. Svůj vliv zde samozřejmě sehrála rovněž již několikrát zmíněná anomálie stagnačního bodu, kdy $k-\epsilon$ počítá s mnohem vyšší turbulencí, než ve skutečnosti nastává.

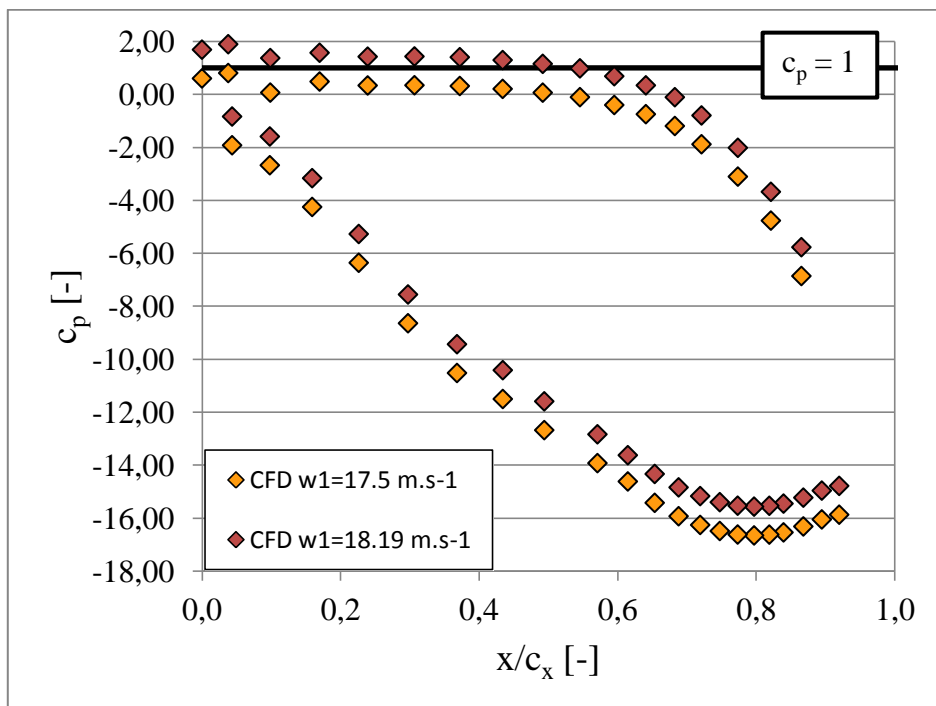


Graf 23: Porovnání hodnot c_p na profilu lopatky měřením a CFD modelováním.

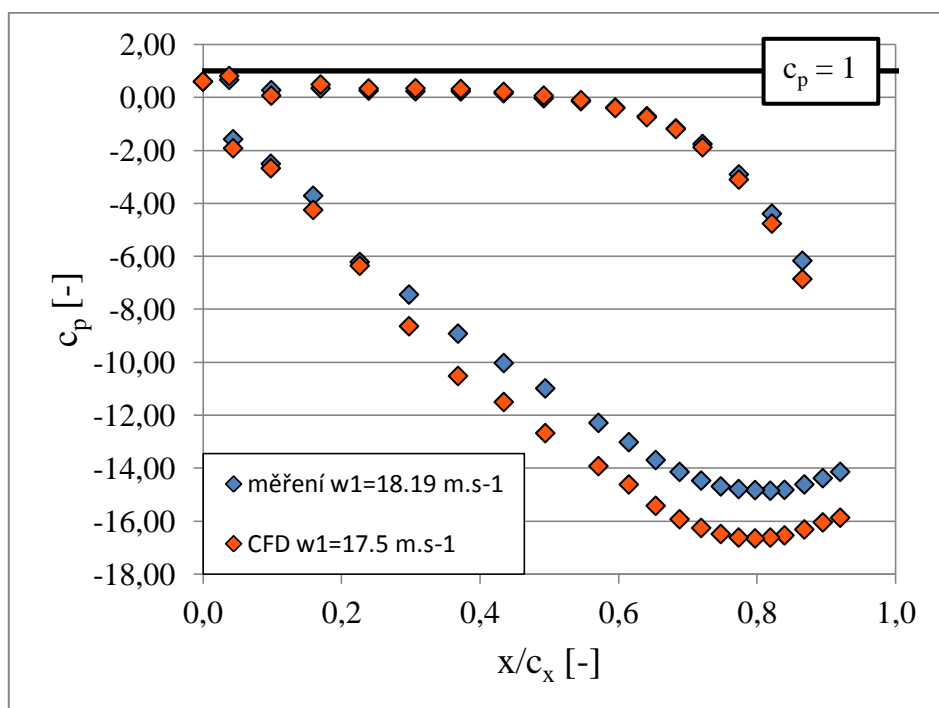
Změna rychlosti na vstupu do mříže w_1

Z výsledků získaných CFD simulací je zřejmé, že hodnoty koeficientu statického tlaku c_p nezcela odpovídají reálným hodnotám, což je patrné především na přetlakové straně lopatky, kde je $c_p > 1$. Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.11.1, vlivem náhodné chyby měření vykazuje měřicí zařízení vyšší rychlost proudění, než ve skutečnosti nastává a to až o hodnotu $\Delta w_1 = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

V dalším kroku byla tedy v programu CFX-Pre provedena změna rychlosti na vstupu do mříže w_1 a to na hodnotu $w_1 = 17,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V takovém případě došlo ke snížení koeficientu statického tlaku na sací straně lopatky o hodnotu přibližně $\Delta c_p \approx 1$ (graf 24). Ve výsledku pak nově získané hodnoty na přetlakové straně lopatky mnohem lépe odpovídaly výsledkům získaným během experimentu, nepatrný rozdíl byl pouze v oblasti zvýšeného nárůstu rychlosti $\frac{x}{c_x} = 0,77 - 0,87$, kde CFD výpočet přinesl nižší hodnoty, než bylo pozorováno při experimentu (graf 25). Na sací straně se pak rozdíl mezi oběma výsledky zvýšil a to v oblasti minimálního tlaku $\frac{x}{c_x} = 0,80 - 0,84$ na hodnotu přibližně $\Delta c_p \approx 1,8$ ($\Delta p \approx 108 \text{ Pa}$).



Graf 24: Průběh veličiny c_p při změně nátokové rychlosti w_1 u CFD výsledků.



Graf 25: Porovnání hodnot c_p obou výsledků pro uvedené rychlosti.

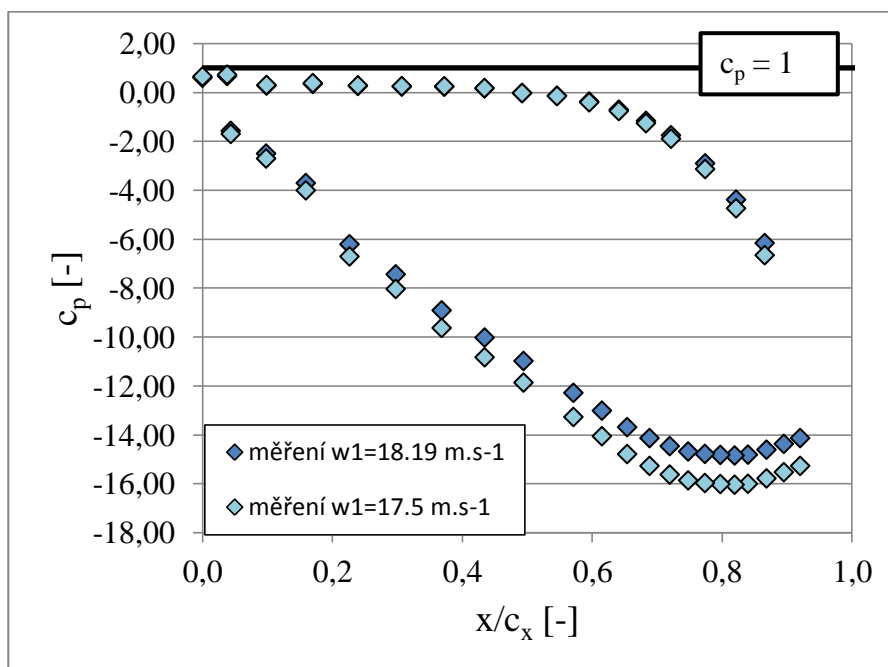
Zajímavé je také porovnání koeficientu c_p za předpokladu, že by došlo ke snížení vstupní rychlosti w_I na rychlost $w_I = 17,5 \text{ m.s}^{-1}$ rovněž u experimentálně získaných výsledků (graf 26). V takovém případě se velikost koeficientu statického tlaku c_p na sací straně oproti původnímu řešení snížila a to nejvýrazněji v oblasti $\frac{x}{c_x} = 0,49 - 0,92$ o hodnotu přibližně

$$\Delta c_p \approx 1,1.$$

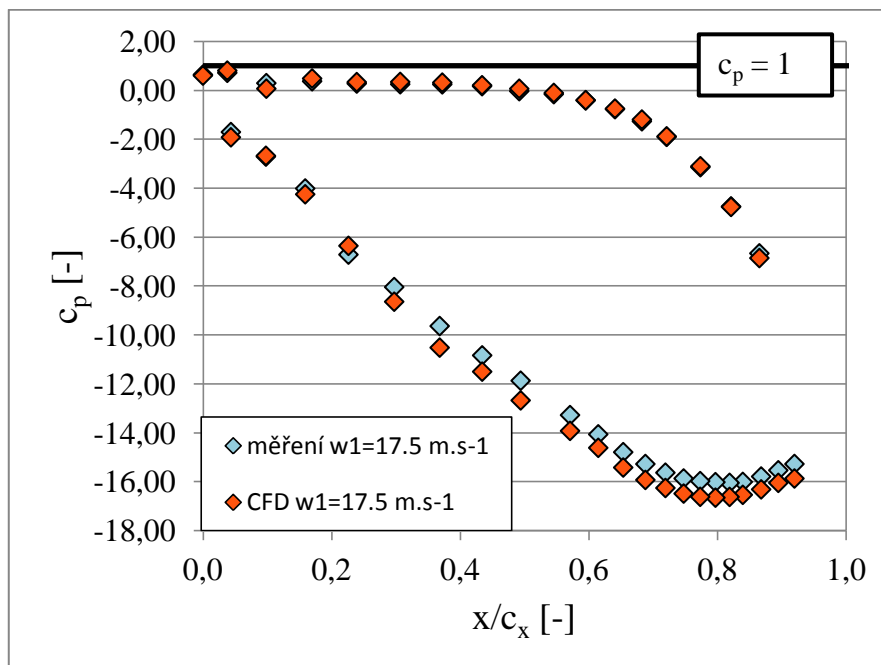
Při následném srovnání experimentálních výsledků a výsledků získaných počítačovou simulací pro rychlost na vstupu $w_I = 17,5 \text{ m.s}^{-1}$ pak byly získány téměř totožné výsledky (graf 27).

Nepatrný rozdíl byl pouze na sací straně lopatky, kde CFD výpočet přinesl nižší hodnoty c_p , než bylo pozorováno při experimentu. Tento rozdíl však činil v oblasti $\frac{x}{c_x} = 0,30 - 0,92$ pouhých $\Delta c_p \approx 0,6$ a byl způsoben pravděpodobně zvoleným turbulentním

modelem ($k-\epsilon$), který počítal s mnohem vyšší turbulencí a jehož přesnost výpočtu v oblastech blízko pevné stěny není ideální. Pro přesnější výpočet by tak mohl být zvolen například model $k-\omega$, který je pro výpočty proudění v blízkosti stěny ideální. Svůj vliv na vzniklé nepřesnosti má pravděpodobně i použitá výpočetní síť, která byla optimalizována na podmínky aplikované při simulaci měření pneumatickou sondou a při níž panovaly odlišné počáteční podmínky.



Graf 26: Průběh veličiny c_p při změně nátokové rychlosti w_I u experimentálních výsledků.



Graf 27: Porovnání hodnot c_p obou výsledků pro uvedené rychlosti.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo měření na turbínové mříži. Samotné měření probíhalo v experimentální laboratoři na Technické univerzitě ve Vídni a skládalo ze dvou částí – měření obtékání lopatky za turbínovou mříží pomocí tříotvorové pneumatické sondy a měření rozdělení tlaku po profilu lopatky pomocí odběrů statického tlaku.

Při prvním měření byli zkoumanými veličinami rychlost, statický a celkový tlak a úhel relativní rychlosti, měřený ze záporného směru y' na výstupu z lopatkové mříže. Současně s měřením probíhalo CFD modelování v programu CFX a poté byly oba odlišným způsobem získané výsledky porovnány. Na závěr byly použity korekce, nebo změny v nastavení v programu CFX tak, aby byly získány co možná nejpřesnější výsledky.

Ukázalo se, že jak experimentální měření, tak CFD modelování bylo ovlivněno mnoha vnějšími parametry, z nichž největší vliv měla vznikající náhodná chyba měřicího zařízení a dále zvolený turbulentní model při simulaci proudění, při kterém hodnoty rychlosti a celkového tlaku vykazovaly po fyzikální stránce příliš vysoké hodnoty. Při měření úhlu relativní rychlosti pak byly nejvíce ovlivněny výsledky z experimentu a to systematickými chybami způsobenými při ručním ustavení měřicí aparatury. Nejlépe pak dopadly výsledky statického tlaku, kdy jeho průběh získaný při CFD modelování velmi dobře odpovídal výsledkům z experimentu.

Ve druhé části měření byl pak určován průběh rozložení statického tlaku po profilu lopatky. V daném případě byly na první pohled patrné příliš vysoké hodnoty statického tlaku u výsledků z CFD simulace, kdy na přetlakové straně lopatky dosahovala hodnota koeficientu statického tlaku vyšší hodnoty než $c_p = 1$. Toto bylo opět způsobeno náhodnou chybou měřicího zařízení, které udává příliš vysoké hodnoty rychlosti na vstupu do mříže. Získání přesnějších hodnot bylo následně dosaženo snížením vstupní rychlosti v nastavení simulace. Dále byly výsledky CFD simulace nepatrně ovlivněny již zmíněným použitým turbulentním modelem.

Pro případné další měření by bylo vhodné použít přesnější měřicí zařízení a dbát na vhodné ustavení všech měřících prvků tak, aby byl minimalizován vliv chyb měření. Protože se daný turbulentní model ($k-\epsilon$) neukázal jako nejvhodnější při řešení obtékání křivočarých těles, bylo by při dalším vyhodnocení užitečné zvolit pro výpočet turbulentní model jiný, jako např. $k-\omega$, nebo RKE, které by pro daný typ měření měly poskytnout přesnější průběh zkoumaných veličin.

Seznam použité literatury

- 1) KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin: FLUENT*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, c2008, poslední revize 7.1.2009 [cit.2015–3–20]. Dostupné z <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.
- 2) BLEJCHAR, Tomáš. *Turbulence-Modelování proudění: CFX*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, c2010, poslední revize 21.1.2011 [cit.2015–3–25]. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf>.
- 3) ŠKORPÍK, Jiří. Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny, *Transformační technologie*, 2010-12, [last updated 2015-04]. Brno: Jiří Škorpík, [online] [cit.2015–3–26], ISSN 1804-8293. Dostupné z: <<http://www.transformacni-technologie.cz/vznik-tlakove-ztraty-pri-proudeni-tekutiny.html>>.
- 4) JANALÍK, J. – ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, poslední revize 29.1.2009 [cit.2015–3–26]. Dostupné z <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>>.
- 5) ŠKORPÍK, Jiří. Geometrie lopatkových strojů, *Transformační technologie*, 2009-10, [last updated 2014-10]. Brno: Jiří Škorpík, [online] [cit. 2015–3–28], ISSN 1804-8293. Dostupné z <<http://www.transformacni-technologie.cz/geometrie-a-materialy-lopatek-ve-strojich.html>>.
- 6) ŠKORPÍK, Jiří. Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží, *Transformační technologie*, 2009-10, [last updated 2013-04]. Brno: Jiří Škorpík, [online] [cit. 2015–3–28], ISSN 1804-8293. Dostupné z <<http://www.transformacni-technologie.cz/zaklady-aerodynamiky-profilu-lopatek-a-lopatek-ve-strojich.html>>.
- 7) ŠKORPÍK, Jiří. Vztah mezi obvodovou a vnitřní prací stupně lopatkového stroje, *Transformační technologie*, 2009-10, [last updated 2013-04]. Brno: Jiří Škorpík, [online] [cit. 2015–3–28], ISSN 1804-8293. Dostupné z <<http://www.transformacni-technologie.cz/vztah-mezi-obvodovou-a-vnitri-praci-stupne-lopatek-ve-strojich.html>>.
- 8) WILLINGER, R. – BENONI, A. *Unterlagen zur Laborübung: „Strömungsmessung mit pneumatischen Sonden“*. Wien: Technische Universität Wien, 2010. 24 s.
- 9) PICK, Petr. *Calibration of Five Hole Probe and Calibration Data Processing*. c2011, poslední revize 7.10.2011 [cit.2015–3–30]. Dostupné z <http://www.it.cas.cz/files/DT2011/Pick_F.pdf>.
- 10) PERDICHIZZI, A. – DOSSENA, V. Incidence Angle and Pitch–Chord Effects on Secondary Flows Downstream of Turbine Cascade. *Journal of Turbomachinery* [online]. July 1993, vol. 115 / 383. [cit. 2015–3–30]. Dostupné z <<http://turbomachinery.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1464311>>.
- 11) DURBIN, P. A. On the k/ϵ stagnation point anomaly. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1996, vol. 17, s. 89–90.

- 12) TRESTER, A. – YOCUM, A. The Calibration and Application of Five-hole Probes. *ISA Transactions*. 1979, vol. 18, iss. 3. [cit. 2015–3–30].
- 13) WILLINGER, Reinhard – HASELBACHER, Hermann. A three-hole pressure probe exposed to velocity gradient effects: experimental calibration and numerical investigation. In *The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies Budapest, Hungary, September 3 – 6, 2003*. Vienna: Vienna University of Technology. Institute of Thermal Turbomachines and Powerplants, 2003.
- 14) WILLINGER, Reinhard. *Thermische Turbomaschinen: Skriptum zur Vorlesung..* Wien: Technische Universität Wien, 2014. 167 s.
- 15) *Výpočetní síť – obecné principy: metoda konečných objemů*. poslední revize 1.10.2009 [cit.2015–4–2]. Dostupné z <https://vscht.cz/uchi/ped/cfd/cfd.zaklady_sitovani.pdf>.
- 16) BLEJCHAR, Tomáš. *Návody do cvičení: „Modelování proudění“ – CFX*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 138 s. ISBN 978–80–248–2050–7.
- 17) SCHLICHTING, Hermann. *Boundary–Layer Theory*. 7th ed. New York: McGraw–Hill, 1979, 817 s. ISBN 0–07–055334–3.
- 18) WILLINGER, Reinhard. *Numerische Methoden für thermische Energiesysteme: Skriptum zur Vorlesung..* Wien: Technische Universität Wien, 2011. 90 s.
- 19) MIJAILOVIC, P. *Messung der Zuströmung im Schaufelgitterwindkanal mittels 3D–Hitzdrahtanemometrie*. Wien: Technische Universität Wien. Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften. Institut für Energietechnik und Thermodynamik, 2013. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ao. Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Reinhard Willinger.
- 20) WILLINGER, Reinhard. *Numerische Strömungsberechnung von thermischen Turbomaschinen: Skriptum zur Vorlesung..* Wien: Technische Universität Wien, 2012. 88 s.
- 21) BEER, W. *Optimization of a Compound Lean Turbine Blade in a Linear Cascade*. Wien: Technische Universität Wien. Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften. Institut für Thermodynamik und Energiewandlung, 2008. 112 s. Vedoucí disertační práce Ao. Univ. Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Reinhard Willinger.
- 22) *Skin friction coefficient*, poslední revize 23.9. 2011 [cit.2015–5–15]. Dostupné z http://www.cfd-online.com/Wiki/Skin_friction_coefficient.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
a	[mm]	střední čára profilu
a	[m.s ⁻¹]	rychlost zvuku
a	[mm]	vzdálenost mezi tlakovými odběry sondy 2 a 3
A	[mm]	průtočný průřez
B	[mm]	šířka čtvercového průřezu měřicího tunelu
c _m	[m.s ⁻¹]	meridiánová rychlost
c _p	[J.K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
c _p	[-]	koeficient statického tlaku
C _f	[-]	koeficient tření
C _μ	[-]	empirická konstanta
d	[mm]	šířka sondy
d	[mm]	průměr potrubí
D _a	[mm]	vnější průměr ventilátoru
f _{x,y,z}	[N]	složky vnější objemové síly
F _s	[N]	setrvačná síla
F _t	[N]	tlaková síla
F _o	[N]	objemová síla
F _v	[N]	viskózní síla
h	[mm]	délka lopatky
H	[mm]	výška čtvercového průřezu měřicího tunelu
i	[°]	úhel náběhu
k	[J.kg ⁻¹]	turbulentní kinetická energie
k _d	[-]	koeficient dynamického tlaku
k _s	[-]	koeficient statického tlaku
k _t	[-]	koeficient celkového tlaku
k _β	[-]	směrový koeficient
K	[-]	bezrozměrný gradient rychlosti
l	[mm]	délkové měřítko
m	[mm]	maximální prohnutí
Ma	[-]	Machovo číslo
n	[-]	počet měřených bodů
n	[min ⁻¹]	jmenovité otáčky motoru
p	[mm]	poloha maximálního prohnutí
p	[Pa]	statický tlak
p _d	[Pa]	dynamický tlak
p _L	[Pa]	lokální tlak
p _t	[Pa]	celkový tlak
p _u	[Pa]	tlak okolí
p _{stř}	[Pa]	střední hodnota statického tlaku
p _{1,2,3}	[Pa]	relativní tlaky naměřené pneumatickou sondou
\bar{p}	[Pa]	střední hodnota tlaku
Δp	[mbar]	zvýšení tlaku po průchodu ventilátorem
P	[kW]	výkon motoru
r	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]	měrná plynová konstanta vzduchu
r ₁	[mm]	poloměr náběžné hrany
Re	[-]	Reynoldsovo číslo

Re_d	[-]	Reynoldsovo číslo sondy, při které byly naměřeny kalibrační hodnoty
Re_{krit}	[-]	kritická hodnota Reynoldsova čísla
Re_x	[-]	Reynoldsovo číslo pro danou měřicí sondu
s	[m]	vzdálenost
s	[mm]	délka tělivy lopatky
s_x	[mm]	vzdálenost mezi náběžnou a odtokovou hranou lopatky v axiálním směru tunelu
S	[m ²]	obsah výpočetní buňky
t	[s]	čas
t	[mm]	rozteč lopatkové mříže
t_s	[°C]	střední teplota vzduchu v lopatkové mříži
t_u	[°C]	teplota okolí
T	[K]	termodynamická teplota
T_s	[K]	střední termodynamická teplota
T_t	[s]	časové měřítko přenosu turbulentních vírů
Tu	[-]	intenzita turbulence
T_v	[s]	časové měřítko molekulární difúze
u	[m.s ⁻¹]	rychlostní měřítko
u	[m.s ⁻¹]	rychlost v ose x
u_τ	[m.s ⁻¹]	rychlost smykového napětí
v	[m.s ⁻¹]	rychlost v ose y
v_s	[m.s ⁻¹]	střední rychlost v potrubí
v_∞	[m.s ⁻¹]	rychlost nenaruš. proudu v dostatečné vzdálenosti od lopatky
V	[m ³]	objem výpočetní buňky
\dot{V}	[m ³ .s ⁻¹]	objemový tok u aerodynamického tunelu
w	[m.s ⁻¹]	rychlost v ose z
w	[m.s ⁻¹]	relativní rychlost
$w_{y,z}$	[m.s ⁻¹]	složky relativní rychlosti
$w_{stř}$	[m.s ⁻¹]	střední hodnota relativní rychlosti
w_1	[m.s ⁻¹]	nátoková rychlost
w_2	[m.s ⁻¹]	odtoková rychlost
x	[mm]	osa v kartézském souřadnicovém systému
y	[mm]	osa v kartézském souřadnicovém systému
y	[mm]	vzdálenost první buňky od kraje lopatky
y^+	[-]	bezrozměrná vzdálenost od stěny
$\Delta y'$	[mm]	krok posuvu traverzovacího zařízení
z	[mm]	osa v kartézském souřadnicovém systému
α	[m ² .s ⁻¹]	součinitel teplotní vodivosti
α	[-]	relaxační parametr
β	[°]	úhel relativní rychlosti, měřený z kladného směru y'
β^+	[°]	úhel relativní rychlosti, měřený ze záporného směru y'
β^+_{kor}	[°]	korigovaný úhel relativní rychlosti, měřený ze záporného směru y'
β^+_{ref}	[°]	výchozí hodnota úhlu relativní rychlosti, měřený ze záporného směru y'
γ	[°]	úhel nastavení
δ	[°]	úhel sklonu špičky sondy
δ_{turb}	[mm]	tloušťka turbulentní mezní vrstvy
$\Delta\beta$	[°]	úhel vybočení sondy

$\Delta\varepsilon$	[°]	flow angle error
ε	[J.kg ⁻¹ .s ⁻¹]	turbulentní disipace
ζ	[-]	ztrátový součinitel celkového tlaku
ζ_P	[-]	hodnota iterace v konečném objemu obsahujícím bod P
κ	[°]	úhel střední čáry profilu
κ	[-]	izoentropický exponent
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
ν	[°]	prohnutí střední čáry profilu
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
τ	[mm]	mezera mezi lopatkou a stěnou tunelu
τ_w	[Pa]	smykové napětí
ω	[s ⁻¹]	vířivost

CFD	Computer Fluid Dynamics (výpočtové dynamiky tekutin)
CFX	program na vytváření a vyhodnocování CFD modelování
CTA	Constant temperature anemometry (žárový anemometr)
DNS	Direct Numerical Simulation (metoda přímé simulace)
LDA	Laser Doppler Anemometry (laserová anemometrie)
LES	Large Eddy Simulation (metoda velkých vířů)
RANS	Reynolds Averaged Navier–Stokes Equations (metoda časového středování)
RMS	Root mean square (efektivní hodnota)
RNG	Re–Normalisation Group (metoda renormalizačních grup)
RKE	Realizable k – ε model

Seznam obrázků

Obr. 1: Dělení proudění podle kinematických hledisek	12
Obr. 2: Dělení proudění podle fyzikálních vlastností tekutiny	14
Obr. 3: Mezní vrstva při obtékání tělesa	15
Obr. 4: Schéma metod řešení proudění	16
Obr. 5: Profilová mříž	17
Obr. 6: Tvar profilu lopatky	18
Obr. 7: Schéma obtékání profilu	19
Obr. 8: Úplav za obtékaným tělesem	19
Obr. 9: Změna tlaku po profilu lopatky.....	20
Obr. 10: Změna tlaku podél osamoceného profilu.....	21
Obr. 11: Sondy na měření celkového tlaku	22
Obr. 12: Příklad správně a nevhodně provedené sondy	22
Obr. 13: Trubice na měření statického tlaku	23
Obr. 14: Prandtlova trubice s připojeným U–manometrem	23
Obr. 15: Dvouotvorová sonda	24
Obr. 16: Schéma aerodynamického tunelu.....	26
Obr. 17: Aerodynamický tunel s připojenou měřicí aparaturou.....	26
Obr. 18: Geometrie lopatkové mříže s jednotlivými rozměry.....	27
Obr. 19: Experimentální zařízení a umístění jednotlivých sond	28
Obr. 20: Schéma měřícího zařízení	29
Obr. 21: Tříotvorová sonda typu kobra	29
Obr. 22: Měřicí aparatura	30
Obr. 23: Vyhodnocení proudění za mříží a kontrolní objem K.....	32
Obr. 24: Kalibrační charakteristiky	34
Obr. 25: Úhel $\Delta\beta$ při měření rychlostní sondou s rozměrem sondy $d = 2,4$ mm	38
Obr. 26: Schématické znázornění rychlostního trojúhelníka	39
Obr. 27: Body definující profil lopatky.....	40
Obr. 28: Schéma postupu při numerické simulaci	41
Obr. 29: Pojmenování ploch včetně souřadnicového systému.....	41
Obr. 30: Tvar konečného objemu.....	42
Obr. 31: Princip posuzování kvality 2D a 3D buněk	43
Obr. 32: Vytvořená výpočetní síť.....	44
Obr. 33: Znázornění mezní vrstvy.....	44
Obr. 34: Odlišný přístup k modelování proudění u stěny	45
Obr. 35: Rozdělení oblasti v blízkosti stěny	46
Obr. 36: Bezrozměrná vzdálenost od stěny y^+	47
Obr. 37: Nastavení domény a vlastností vzduchu	48
Obr. 38: Rozložení nátokové rychlosti na jednotlivé složky.....	48
Obr. 39: Příklad využití okrajové podmínky symetrie	49
Obr. 40: Příklad použití periodické podmínky	50
Obr. 41: Výsledné nastavení všech okrajových podmínek	50
Obr. 42: Nastavení počátečních podmínek.....	51
Obr. 43: Nastavení řešiče	52
Obr. 44: Diagram algoritmu řešení.....	52
Obr. 45: Průběh reziduálů	53
Obr. 46: Vyhodnocovací přímka a rovina.....	54
Obr. 47: Pole střední rychlosti.....	55

Obr. 48: Pole celkového tlaku	55
Obr. 49: Pole statického tlaku	56
Obr. 50: Úplav spolu se zpětným vířením za odtokovou hranou lopatky	56
Obr. 51: Rozložení odtokové rychlosti w_2 na složky w_{2y} a w_{2z}	58
Obr. 52: Průtočný průřez A	65
Obr. 53: Tříotvorová sonda vystavená poli gradientu rychlosti	66
Obr. 54: Výkres lopatky s 38 odběry statického tlaku	70
Obr. 55: Odběr statického tlaku ve všech 38 měřených bodech	71
Obr. 56: Měřicí aparatura	72
Obr. 57: Nastavení počátečních podmínek	74
Obr. 58: Průběh reziduí	75
Obr. 59: Rozložení statického tlaku po profilu lopatky	75

Seznam tabulek

Tab. 1: Geometrie lopatkové mříže	27
Tab. 2: Naměřené hodnoty okolního vzduchu	30
Tab. 3: Naměřené hodnoty před lopatkovou mříží	31
Tab. 4: Naměřené hodnoty za lopatkovou mříží	31
Tab. 5: Charakteristiky výpočtu	53
Tab. 6: Naměřené hodnoty okolního vzduchu	69
Tab. 7: Naměřené hodnoty před lopatkovou mříží	69
Tab. 8: Charakteristiky výpočtu	74
Tab. 9: Tlaky naměřené sondou při experimentálním měření, kalibrační hodnoty sondy	93
Tab. 10: Tlaky naměřené sondou se zahrnutím tlaku okolí, korekční součinitele	94
Tab. 11: Vypočtené hodnoty charakteristik proudění za mříží, korekce chyby gradientu	95
Tab. 12: Charakteristiky proudění při počítačové simulaci	96
Tab. 13: Použité korekce při simulaci proudění lopatkovou mříží	97
Tab. 14: Výsledné hodnoty získané CFD simulací po aplikaci všech korekcí	98
Tab. 15: Naměřené hodnoty tlaků po profilu lopatky	99
Tab. 16: Rozdělené tlaku po profilu – hodnoty získané počítačovou simulací	100
Tab. 17: Tlak po profilu lopatky při snížení rychlosti w_1 na vstupu do mříže (CFD)	101
Tab. 18: Tlak po profilu lopatky při snížení rychlosti w_1 na vstupu do mříže (experiment) .	102

Seznam grafů

Graf 1: Koeficient směru k_β	35
Graf 2: Koeficient celkového tlaku k_t	35
Graf 3: Koeficient statického tlaku k_s	36
Graf 4: Průběh statického tlaku p_2 na výstupu z mříže	36
Graf 5: Průběh celkového tlaku p_{t2} na výstupu z mříže	37
Graf 6: Průběh rychlosti na výstupu z mříže w_2	38
Graf 7: Úhel relativní rychlosti měřený ze záporného směru y'	39
Graf 8: Průběh odtokové rychlosti w_2	57
Graf 9: Průběh celkového tlaku p_{t2}	57
Graf 10: Průběh statického tlaku p_2	58
Graf 11: Úhel relativní rychlosti měřený ze záporného směru y'	59
Graf 12: Průběh rychlosti w_2 pro různé hodnoty nátokové rychlosti w_1	61
Graf 13: Průběh rychlosti w_2 pro různé řády turbulence a typy advekčních schémat.....	62
Graf 14: Průběh rychlosti w_2 při použití Kato–Launder modifikace	63
Graf 15: Průběh celkového tlaku p_{t2} po změně všech nastavení	64
Graf 16: Bezrozměrný rychlostní gradient K	67
Graf 17: Flow angle error $\Delta\varepsilon$	67
Graf 18: Lineární závislost veličin $K-\Delta\varepsilon$	68
Graf 19: Úhel relativní rychlosti po korekci naměřených hodnot.....	68
Graf 20: Průběh statického tlaku p_2 po provedení všech korekcí.....	69
Graf 21: Rozložení c_p po profilu – měření	73
Graf 22: Rozložení c_p po profilu – CFD modelování.....	76
Graf 23: Porovnání hodnot c_p na profilu lopatky měřením a CFD modelováním	77
Graf 24: Průběh veličiny c_p při změně nátokové rychlosti w_1 u CFD výsledků	78
Graf.25: Porovnání hodnot c_p obou výsledků pro uvedené rychlosti.....	78
Graf.26: Průběh veličiny c_p při změně nátokové rychlosti w_1 u experimentálních výsledků .	79
Graf 27: Porovnání hodnot c_p obou výsledků pro uvedené rychlosti.....	80

Seznam použitých rovnic

Rovnice 1: Rovnice kontinuity.....	13
Rovnice 2: Navier–Stokesovy rovnice.....	13
Rovnice 3: Navier–Stokesova rovnice odvozena ze silové rovnováhy na element tekutiny ...	13
Rovnice 4: Rovnice vedení tepla.....	13
Rovnice 5: Reynoldsovo číslo pro turbulentní proudění.....	15
Rovnice 6: Reynoldsovo číslo pro jednorozměrné proudění.....	16
Rovnice 7: Stanovení vírové (turbulentní) viskozity.....	17
Rovnice 8: Změna tlaku po profilu lopatky.....	20
Rovnice 9: Rovnice pro stanovení dynamického tlaku.....	21
Rovnice 10: Rovnice pro stanovení dynamického tlaku pro malá Machova čísla.....	21
Rovnice 11: Koeficient dynamického tlaku.....	24
Rovnice 12: Rovnice pro hmotnostní bilanci.....	32
Rovnice 13: Tvar impulsové věty aplikované na rovinu kolmou na čelo mříže.....	32
Rovnice 14: Tvar impulsové věty pro rovinu rovnoběžnou s čelem mříže.....	32
Rovnice 15: Velikost relativní rychlosti na vstupu do mříže.....	32
Rovnice 16: Rovnice pro stanovení hustoty vzduchu na vstupu do mříže.....	33
Rovnice 17: Rychlost na vstupu do mříže.....	33
Rovnice 18: Rovnice pro výpočet rychlosti zvuku na vstupu do mříže.....	33
Rovnice 19: Hodnota Machova čísla na vstupu do mříže.....	33
Rovnice 20: Stanovení střední teploty vzduchu v tunelu.....	33
Rovnice 21: Stanovení kinematické viskozity.....	33
Rovnice 22: Vztahy pro výpočet kalibračních koeficientů.....	34
Rovnice 23: Rovnice pro výpočet hodnoty středního tlaku.....	34
Rovnice 24: Střední hodnota Machova čísla na výstupu z mříže.....	37
Rovnice 25: Střední hodnota termodynamické teploty vzduchu na výstupu z mříže.....	37
Rovnice 26: Střední hodnota rychlosti vzduchu na výstupu z mříže.....	37
Rovnice 27: Střední hodnota statického tlaku na výstupu ze mříže.....	37
Rovnice 28: Rychlost na výstupu z lopatkové mříže.....	38
Rovnice 29: Úhel relativní rychlosti měřený ze záporného směru y'	38
Rovnice 30: Stanovení poměru rychlostí na vstupu a výstupu do a z lopatkové mříže.....	39
Rovnice 31: Stanovení poměru rychlostí z rychlostního trojúhelníka.....	39
Rovnice 32: Výpočet míry deformace u 2D buněk.....	43
Rovnice 33: Výpočet míry deformace u 3D buněk.....	43
Rovnice 34: Tloušťka turbulentní mezní vrstvy.....	44
Rovnice 35: Stanovení Reynoldsova čísla pro případ měření proudění pneum. sondou.....	45
Rovnice 36: Třecí koeficient.....	45
Rovnice 37: Rovnice pro stanovení smykového napětí.....	45
Rovnice 38: Rovnice pro stanovení rychlosti smykového napětí.....	46
Rovnice 39: Vzdálenost první buňky od okraje lopatky.....	46
Rovnice 40: Rozložení nátokové rychlosti na jednotlivé složky.....	48
Rovnice 41: Turbulentní kinetická energie.....	48
Rovnice 42: Rychlosti disipace.....	49
Rovnice 43: Stanovení velikosti úhlu β_2^+	58
Rovnice 44 Stanovení rychlosti na výstupu z mříže.....	60
Rovnice 45: Stanovení úhlu β_2^+ při použití kritického průřezu.....	65
Rovnice 46: Rovnice pro stanovení gradientu rychlosti.....	66
Rovnice 47: Rovnice pro stanovení flow angle error.....	66
Rovnice 48: Hodnota úhlu β_2^+ korigovaná pomocí flow angle error.....	68

Rovnice 49: Výpočet Reynoldsova čísla pro měřící sondu.....	68
Rovnice 50: Rovnice pro výpočet hustoty vzduchu.....	72
Rovnice 51: Rovnice pro výpočet rychlosti zvuku	72
Rovnice 52: Stanovení velikosti Machova čísla.....	72
Rovnice 53: Změna tlaku po profilu lopatky.....	72
Rovnice 54: Střední teplota vzduchu v mříži	74
Rovnice 55: Velikost turbulentní kinetické energie	74
Rovnice 56: Velikost turbulentní disipace	74

Přílohy

Tab. 9: Tlaky naměřené sondou při experimentálním měření, kalibrační hodnoty sondy.

posuv y'	naměřené tlaky sondou			kalibrační hodnoty sondy			
	p1 - pu	p2 - pu	p3 - pu	$\Delta\beta$	k β	kt	ks
[mm]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[grad]	[-]	[-]	[-]
0.000	2790.1	669.4	666.6	-30.0	-2.962	-0.906	0.685
1.825	2791.3	680.1	661.4	-27.5	-2.342	-0.679	0.639
3.650	2787.7	692.4	667.1	-25.0	-1.981	-0.516	0.575
5.475	2787.9	702.6	674.2	-22.5	-1.558	-0.314	0.517
7.300	2788.4	708.4	682.3	-20.0	-1.320	-0.251	0.444
9.125	2789.9	710.9	684.5	-17.5	-1.034	-0.180	0.410
10.950	2785.9	724.7	697.2	-15.0	-0.866	-0.106	0.357
12.775	2783.6	720.3	713.5	-12.5	-0.571	-0.069	0.273
14.600	2784.3	724.8	720.3	-10.0	-0.455	-0.032	0.288
16.425	2786.9	733.1	736.7	-7.5	-0.321	-0.027	0.386
18.250	2775.1	723.9	748.7	-5.0	-0.179	-0.015	0.352
20.075	2774.0	724.0	757.0	-2.5	0.002	0.000	0.311
21.900	2761.6	717.4	767.0	0.0	0.234	-0.002	0.287
23.725	2754.4	717.8	771.7	2.5	0.327	-0.009	0.324
25.550	2732.4	704.0	773.3	5.0	0.495	-0.014	0.291
27.375	2713.5	692.1	772.7	7.5	0.655	-0.021	0.346
29.200	2691.2	689.5	776.4	10.0	0.793	-0.032	0.328
31.025	2646.6	690.3	765.2	12.5	0.985	-0.054	0.295
32.850	2608.5	664.7	755.9	15.0	1.154	-0.068	0.260
34.675	2567.7	654.3	747.9	17.5	1.369	-0.127	0.323
36.500	2526.0	644.5	752.5	20.0	1.486	-0.132	0.296
38.325	2501.9	619.2	752.8	22.5	1.788	-0.227	0.337
40.150	2492.2	624.5	769.1	25.0	2.028	-0.313	0.292
41.975	2505.4	598.4	764.5	27.5	2.227	-0.343	0.315
43.800	2533.7	576.1	762.7	30.0	2.460	-0.419	0.289
45.625	2576.4	558.8	776.4				
47.450	2608.6	558.7	785.4				
49.275	2653.0	565.3	772.0				
51.100	2692.1	590.9	766.0				
52.925	2719.6	588.7	747.2				
54.750	2732.6	599.1	733.5				
56.575	2748.0	606.4	720.0				
58.400	2764.4	611.6	705.2				
60.225	2766.4	619.2	691.7				
62.050	2773.1	624.4	681.4				
63.875	2773.1	630.6	673.7				
65.700	2769.6	636.0	670.7				
67.525	2772.8	641.4	660.3				
69.350	2769.9	649.0	652.8				
71.175	2773.5	662.9	654.1				
73.000	2769.2	671.8	648.8				

Tab. 10: Tlaky naměřené sondou se zahrnutím tlaku okolí, korekční součinitele.

posuv y' [mm]	naměřené tlaky sondou vč. tlaku okolí				korekční součinitele			
	p1 [Pa]	p2 [Pa]	p3 [Pa]	p s čar [Pa]	k β [-]	$\Delta\beta$ [grad]	kt [-]	ks [-]
0.000	101650	99529	99527	99528	0.001	-2.510	0.000	0.311
1.825	101651	99540	99521	99531	0.009	-2.427	0.000	0.310
3.650	101648	99552	99527	99540	0.012	-2.392	0.000	0.310
5.475	101648	99563	99534	99548	0.013	-2.376	0.000	0.310
7.300	101648	99568	99542	99555	0.012	-2.387	0.000	0.310
9.125	101650	99571	99544	99558	0.013	-2.386	0.000	0.310
10.950	101646	99585	99557	99571	0.013	-2.379	0.000	0.310
12.775	101644	99580	99573	99577	0.003	-2.486	0.000	0.311
14.600	101644	99585	99580	99583	0.002	-2.498	0.000	0.311
16.425	101647	99593	99597	99595	-0.002	-2.552	0.000	0.312
18.250	101635	99584	99609	99596	-0.012	-2.696	-0.001	0.314
20.075	101634	99584	99617	99601	-0.016	-2.752	-0.002	0.315
21.900	101622	99577	99627	99602	-0.025	-2.867	-0.002	0.317
23.725	101614	99578	99632	99605	-0.027	-2.898	-0.002	0.318
25.550	101592	99564	99633	99599	-0.035	-3.008	-0.003	0.319
27.375	101573	99552	99633	99592	-0.041	-3.089	-0.004	0.321
29.200	101551	99549	99636	99593	-0.044	-3.141	-0.004	0.322
31.025	101507	99550	99625	99588	-0.039	-3.067	-0.003	0.320
32.850	101468	99525	99616	99570	-0.048	-3.191	-0.004	0.322
34.675	101428	99514	99608	99561	-0.050	-3.220	-0.004	0.323
36.500	101386	99505	99612	99559	-0.059	-3.343	-0.005	0.325
38.325	101362	99479	99613	99546	-0.074	-3.543	-0.006	0.328
40.150	101352	99484	99629	99557	-0.081	-3.640	-0.007	0.330
41.975	101365	99458	99624	99541	-0.091	-3.786	-0.008	0.332
43.800	101394	99436	99623	99529	-0.100	-3.910	-0.008	0.334
45.625	101436	99419	99636	99528	-0.114	-4.102	-0.010	0.337
47.450	101469	99419	99645	99532	-0.117	-4.144	-0.010	0.338
49.275	101513	99425	99632	99529	-0.104	-3.966	-0.009	0.335
51.100	101552	99451	99626	99538	-0.087	-3.729	-0.007	0.331
52.925	101580	99449	99607	99528	-0.077	-3.595	-0.007	0.329
54.750	101593	99459	99594	99526	-0.065	-3.427	-0.006	0.326
56.575	101608	99466	99580	99523	-0.054	-3.280	-0.005	0.324
58.400	101624	99472	99565	99518	-0.044	-3.141	-0.004	0.322
60.225	101626	99479	99552	99515	-0.034	-3.001	-0.003	0.319
62.050	101633	99484	99541	99513	-0.027	-2.899	-0.002	0.318
63.875	101633	99491	99534	99512	-0.020	-2.808	-0.002	0.316
65.700	101630	99496	99531	99513	-0.016	-2.754	-0.002	0.315
67.525	101633	99501	99520	99511	-0.009	-2.651	-0.001	0.313
69.350	101630	99509	99513	99511	-0.002	-2.553	0.000	0.312
71.175	101633	99523	99514	99518	0.004	-2.477	0.000	0.311
73.000	101629	99532	99509	99520	0.011	-2.404	0.000	0.310

Tab. 11: Vypočtené hodnoty charakteristik proudění za mříží, korekce chyby gradientu.

posuv y' [mm]	vypočtené charakteristiky proudění za mříží				korekce - chyba gradientu		
	pt2 [Pa]	p2 [Pa]	w2 [m.s-2]	β_{2+} [grad]	K [-]	$\Delta\varepsilon$ [grad]	β_{2+kor} [grad]
0.000	101650	98868	68.91	12.49			12.49
1.825	101651	98873	68.87	12.57	-0.003	-0.027	12.55
3.650	101648	98886	68.65	12.61	-0.005	-0.038	12.57
5.475	101648	98898	68.51	12.62	-0.003	-0.026	12.60
7.300	101649	98907	68.41	12.61	-0.001	-0.012	12.60
9.125	101650	98909	68.40	12.61	-0.004	-0.032	12.58
10.950	101646	98928	68.11	12.62	-0.005	-0.042	12.58
12.775	101644	98934	68.00	12.51	-0.002	-0.020	12.49
14.600	101644	98941	67.92	12.50	-0.003	-0.022	12.48
16.425	101648	98955	67.79	12.45	-0.003	-0.028	12.42
18.250	101638	98956	67.66	12.30	-0.002	-0.020	12.28
20.075	101637	98960	67.60	12.25	-0.003	-0.024	12.22
21.900	101626	98962	67.43	12.13	-0.004	-0.034	12.10
23.725	101619	98967	67.29	12.10	-0.005	-0.038	12.06
25.550	101599	98962	67.08	11.99	-0.005	-0.040	11.95
27.375	101580	98957	66.91	11.91	-0.007	-0.057	11.85
29.200	101559	98963	66.56	11.86	-0.014	-0.117	11.74
31.025	101513	98973	65.84	11.93	-0.013	-0.110	11.82
32.850	101476	98958	65.55	11.81	-0.011	-0.091	11.72
34.675	101436	98959	65.02	11.78	-0.016	-0.128	11.65
36.500	101395	98965	64.40	11.66	-0.010	-0.080	11.58
38.325	101373	98950	64.31	11.46	-0.006	-0.046	11.41
40.150	101364	98965	64.00	11.36	0.004	0.031	11.39
41.975	101379	98936	64.58	11.21	0.018	0.153	11.37
43.800	101409	98907	65.36	11.09	0.022	0.184	11.27
45.625	101455	98884	66.24	10.90	0.018	0.152	11.05
47.450	101488	98878	66.75	10.86	0.016	0.133	10.99
49.275	101530	98864	67.46	11.03	0.014	0.116	11.15
51.100	101567	98872	67.82	11.27	0.012	0.099	11.37
52.925	101593	98853	68.39	11.41	0.009	0.075	11.48
54.750	101604	98852	68.53	11.57	0.005	0.039	11.61
56.575	101618	98848	68.75	11.72	0.006	0.052	11.77
58.400	101632	98841	69.02	11.86	0.003	0.028	11.89
60.225	101633	98842	69.02	12.00	0.001	0.010	12.01
62.050	101638	98840	69.11	12.10	0.001	0.005	12.11
63.875	101637	98842	69.07	12.19	-0.002	-0.016	12.18
65.700	101633	98846	68.96	12.25	-0.001	-0.008	12.24
67.525	101635	98846	68.99	12.35	-0.001	-0.008	12.34
69.350	101631	98850	68.89	12.45	-0.003	-0.022	12.43
71.175	101634	98861	68.79	12.52	-0.003	-0.023	12.50
73.000	101629	98866	68.67	12.60			12.60

Tab. 12: Charakteristiky proudění při počítačové simulaci.

posuv	hodnoty získané CFD simulací								
	y'	pt2rel	p2rel	pt2	p2	w2	w2_y	w2_z	β2+
[mm]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[m.s-1]	[m.s-1]	[m.s-1]	[grad]	
0.000	3152.5	-41.2	102012	98819	73.82	18.89	71.37	14.82	
1.825	3152.3	-39.3	102012	98821	73.80	18.97	71.32	14.89	
3.650	3152.2	-37.3	102012	98823	73.77	19.04	71.27	14.96	
5.475	3152.5	-33.7	102012	98826	73.74	19.12	71.22	15.03	
7.300	3154.1	-25.0	102014	98835	73.66	19.19	71.11	15.10	
9.125	3155.8	-16.2	102016	98844	73.57	19.26	71.01	15.18	
10.950	3158.0	-5.5	102018	98855	73.47	19.30	70.89	15.23	
12.775	3161.0	7.6	102021	98868	73.36	19.30	70.77	15.26	
14.600	3163.9	20.7	102024	98881	73.24	19.30	70.65	15.28	
16.425	3167.4	33.1	102027	98893	73.13	19.23	70.56	15.25	
18.250	3171.2	45.2	102031	98905	73.04	19.14	70.48	15.20	
20.075	3175.0	56.7	102035	98917	72.95	19.05	70.42	15.14	
21.900	3179.1	63.8	102039	98924	72.91	18.91	70.42	15.03	
23.725	3183.3	70.9	102043	98931	72.88	18.77	70.42	14.93	
25.550	3185.4	74.5	102045	98934	72.86	18.63	70.44	14.81	
27.375	3185.2	74.3	102045	98934	72.86	18.47	70.48	14.69	
29.200	3185.0	73.9	102045	98934	72.86	18.32	70.52	14.56	
31.025	3138.3	68.1	101998	98928	72.38	18.08	70.08	14.47	
32.850	3086.8	61.6	101947	98922	71.85	17.84	69.60	14.37	
34.675	2980.7	54.0	101841	98914	70.63	17.43	68.45	14.29	
36.500	2759.6	44.5	101620	98904	67.98	16.69	65.90	14.21	
38.325	2538.5	35.0	101399	98895	65.33	15.95	63.35	14.14	
40.150	2443.5	26.9	101304	98887	64.21	15.60	62.29	14.06	
41.975	2396.7	19.2	101257	98879	63.69	15.39	61.80	13.99	
43.800	2367.5	11.4	101227	98871	63.40	15.26	61.54	13.92	
45.625	2478.6	2.7	101339	98863	64.97	15.63	63.06	13.92	
47.450	2589.7	-6.0	101450	98854	66.54	16.01	64.58	13.92	
49.275	2710.4	-14.1	101570	98846	68.16	16.43	66.15	13.94	
51.100	2840.8	-21.5	101701	98839	69.85	16.89	67.78	13.99	
52.925	2971.3	-28.9	101831	98831	71.54	17.35	69.41	14.04	
54.750	3038.1	-34.9	101898	98825	72.41	17.63	70.23	14.09	
56.575	3091.4	-40.5	101951	98820	73.10	17.86	70.88	14.14	
58.400	3137.5	-45.6	101998	98814	73.70	18.08	71.45	14.20	
60.225	3145.2	-48.1	102005	98812	73.82	18.21	71.54	14.28	
62.050	3152.9	-50.6	102013	98809	73.94	18.34	71.63	14.36	
63.875	3157.4	-52.0	102017	98808	74.01	18.45	71.67	14.44	
65.700	3158.2	-51.9	102018	98808	74.01	18.55	71.65	14.51	
67.525	3158.9	-51.7	102019	98808	74.02	18.64	71.63	14.59	
69.350	3158.7	-50.0	102019	98810	74.00	18.74	71.59	14.67	
71.175	3158.0	-47.7	102018	98812	73.96	18.83	71.53	14.75	
73.000	3157.4	-45.2	102017	98815	73.93	18.92	71.47	14.83	

Tab. 13: Použité korekce při simulaci proudění lopatkovou mříží.

posuv	změna nátokové rychlosti w1			změna Pre-processingu			Kato-Launder modifikace
	18m.s-1	17,5m.s-1	17,3m.s-1	UP-FO	UP-HR	HR-HR	
y'	w2	w2	w2	w2	w2	w2	w2
[mm]	[m.s-1]	[m.s-1]	[m.s-1]	[m.s-1]	[m.s-1]	[m.s-1]	[m.s-1]
0.000	71.56	69.60	68.78	66.89	66.92	68.92	68.71
1.825	71.54	69.58	68.76	67.19	67.22	68.89	68.67
3.650	71.52	69.55	68.74	67.48	67.52	68.85	68.63
5.475	71.48	69.52	68.70	67.75	67.80	68.80	68.59
7.300	71.40	69.44	68.63	67.94	67.99	68.71	68.51
9.125	71.32	69.37	68.55	68.12	68.18	68.62	68.43
10.950	71.23	69.27	68.46	68.27	68.33	68.52	68.34
12.775	71.11	69.16	68.35	68.36	68.43	68.39	68.24
14.600	71.00	69.05	68.24	68.46	68.53	68.27	68.14
16.425	70.90	68.95	68.14	68.53	68.59	68.16	68.05
18.250	70.80	68.86	68.05	68.60	68.65	68.06	67.97
20.075	70.72	68.78	67.97	68.67	68.70	67.96	67.89
21.900	70.68	68.74	67.93	68.74	68.73	67.90	67.87
23.725	70.65	68.71	67.90	68.82	68.75	67.84	67.85
25.550	70.63	68.70	67.89	68.87	68.74	67.78	67.86
27.375	70.63	68.70	67.89	68.90	68.69	67.70	67.89
29.200	70.64	68.70	67.89	68.94	68.64	67.63	67.93
31.025	70.17	68.24	67.44	68.62	68.27	67.11	67.40
32.850	69.66	67.74	66.95	68.26	67.87	66.55	66.81
34.675	68.48	66.60	65.81	67.42	67.09	65.51	65.63
36.500	65.91	64.09	63.34	65.55	65.54	63.46	63.18
38.325	63.33	61.59	60.86	63.69	63.98	61.41	60.73
40.150	62.24	60.51	59.80	62.27	62.71	60.55	59.91
41.975	61.71	59.99	59.27	61.02	61.54	60.15	59.71
43.800	61.41	59.69	58.97	59.94	60.52	59.93	59.68
45.625	62.92	61.16	60.42	60.19	60.68	61.06	61.04
47.450	64.44	62.63	61.88	60.43	60.84	62.20	62.41
49.275	66.02	64.17	63.40	60.92	61.23	63.42	63.91
51.100	67.67	65.78	65.00	61.66	61.85	64.73	65.55
52.925	69.32	67.39	66.59	62.39	62.48	66.03	67.19
54.750	70.17	68.23	67.42	63.03	63.05	66.89	67.97
56.575	70.85	68.90	68.08	63.65	63.61	67.65	68.56
58.400	71.44	69.48	68.66	64.24	64.15	68.33	69.06
60.225	71.56	69.59	68.77	64.64	64.55	68.58	69.09
62.050	71.67	69.71	68.89	65.04	64.95	68.82	69.12
63.875	71.74	69.77	68.95	65.37	65.29	68.98	69.12
65.700	71.75	69.78	68.96	65.63	65.57	69.03	69.06
67.525	71.76	69.79	68.97	65.88	65.84	69.08	69.01
69.350	71.73	69.77	68.95	66.07	66.07	69.08	68.96
71.175	71.70	69.73	68.91	66.25	66.27	69.06	68.92
73.000	71.67	69.70	68.88	66.43	66.47	69.03	68.87

*UP = Upwind, FO = First Order, HR = High Resolution

Tab. 14: Výsledné hodnoty získané CFD simulací po aplikaci všech korekcí.

posuv	výsledné hodnoty získané CFD simulací po aplikaci všech korekcí								
	y'	w2	pt2rel	p2rel	pt2	p2	w2_y	w2_z	β2+
[mm]	[m.s-1]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[m.s-1]	[m.s-1]	[grad]
0.000	68.71	2730.6	-35.5	101590.6	98824.5	17.55	66.43	14.80	
1.825	68.67	2729.0	-34.2	101589.0	98825.8	17.61	66.37	14.86	
3.650	68.63	2727.5	-32.8	101587.5	98827.2	17.67	66.32	14.92	
5.475	68.59	2726.7	-29.9	101586.7	98830.1	17.74	66.25	14.99	
7.300	68.51	2728.4	-21.8	101588.4	98838.2	17.82	66.15	15.08	
9.125	68.43	2730.2	-13.8	101590.2	98846.2	17.91	66.04	15.17	
10.950	68.34	2732.9	-4.0	101592.9	98856.0	17.95	65.94	15.23	
12.775	68.24	2736.6	7.8	101596.6	98867.8	17.95	65.84	15.25	
14.600	68.14	2740.3	19.6	101600.3	98879.6	17.94	65.73	15.27	
16.425	68.05	2743.9	30.1	101603.9	98890.1	17.88	65.66	15.23	
18.250	67.97	2747.5	40.2	101607.5	98900.2	17.79	65.60	15.17	
20.075	67.89	2751.1	49.9	101611.1	98909.9	17.70	65.55	15.11	
21.900	67.87	2755.4	56.0	101615.4	98916.0	17.57	65.56	15.01	
23.725	67.85	2759.7	62.0	101619.7	98922.0	17.45	65.57	14.90	
25.550	67.86	2763.2	65.1	101623.2	98925.1	17.31	65.61	14.78	
27.375	67.89	2765.9	64.7	101625.9	98924.7	17.17	65.69	14.65	
29.200	67.93	2768.6	64.2	101628.6	98924.2	17.03	65.76	14.52	
31.025	67.40	2721.5	59.1	101581.5	98919.1	16.80	65.27	14.43	
32.850	66.81	2669.4	53.4	101529.4	98913.4	16.56	64.73	14.35	
34.675	65.63	2573.0	46.7	101433.0	98906.7	16.18	63.60	14.27	
36.500	63.18	2383.6	38.5	101243.6	98898.5	15.49	61.25	14.20	
38.325	60.73	2194.0	30.2	101054.0	98890.2	14.81	58.90	14.11	
40.150	59.91	2126.6	23.2	100986.6	98883.2	14.53	58.12	14.04	
41.975	59.71	2105.6	16.7	100965.6	98876.7	14.42	57.94	13.97	
43.800	59.68	2097.1	9.9	100957.1	98869.9	14.35	57.93	13.91	
45.625	61.04	2187.4	2.2	101047.4	98862.2	14.67	59.25	13.91	
47.450	62.41	2277.8	-5.5	101137.8	98854.5	14.99	60.58	13.90	
49.275	63.91	2382.6	-12.5	101242.6	98847.5	15.38	62.03	13.93	
51.100	65.55	2502.1	-18.7	101362.1	98841.3	15.84	63.61	13.98	
52.925	67.19	2621.6	-24.9	101481.6	98835.1	16.29	65.19	14.03	
54.750	67.97	2677.4	-30.2	101537.4	98829.8	16.54	65.93	14.08	
56.575	68.56	2719.5	-35.2	101579.5	98824.8	16.74	66.48	14.13	
58.400	69.06	2755.1	-39.8	101615.1	98820.2	16.92	66.96	14.19	
60.225	69.09	2755.5	-42.0	101615.5	98818.0	17.03	66.96	14.27	
62.050	69.12	2755.8	-44.1	101615.8	98815.9	17.13	66.97	14.35	
63.875	69.12	2754.2	-45.2	101614.2	98814.8	17.22	66.94	14.43	
65.700	69.06	2750.2	-44.9	101610.2	98815.1	17.29	66.86	14.50	
67.525	69.01	2746.1	-44.7	101606.1	98815.3	17.36	66.79	14.57	
69.350	68.96	2743.7	-43.3	101603.7	98816.7	17.44	66.72	14.65	
71.175	68.92	2741.9	-41.5	101601.9	98818.5	17.52	66.65	14.73	
73.000	68.87	2740.2	-39.6	101600.2	98820.4	17.60	66.59	14.80	

Tab. 15: Naměřené hodnoty tlaků po profilu lopatky.

měřicí otvor	číslo měř. otvoru	umístění v souř. sys.		získané a vypočtené hodnoty - měření		
		y	z	p-pu	p	cp
[-]	[-]	[-]	[-]	[Pa]	[Pa]	[-]
1	1	0.00	0.00	2839.8	101799.8	0.60
2	4	2.34	5.97	2853.7	101813.7	0.67
3	6	6.10	8.13	2775.1	101735.1	0.27
4	8	10.50	9.37	2789.5	101749.5	0.35
5	10	14.80	10.96	2772.1	101732.1	0.26
6	12	18.98	12.82	2766.7	101726.7	0.23
7	14	23.03	14.95	2765.9	101725.9	0.23
8	16	26.85	17.46	2752.0	101712.0	0.16
9	18	30.43	20.31	2714.0	101674.0	-0.03
10	20	33.76	23.46	2691.4	101651.4	-0.14
11	22	36.82	26.85	2643.7	101603.7	-0.38
12	24	39.64	30.46	2577.2	101537.2	-0.71
13	26	42.23	34.23	2485.0	101445.0	-1.17
14	28	44.61	38.14	2366.7	101326.7	-1.76
15	30	47.86	44.19	2136.0	101096.0	-2.91
16	33	50.81	50.39	1837.5	100797.5	-4.39
17	36	53.54	56.69	1480.7	100440.7	-6.17
18	66	56.91	51.82	-121.3	98838.7	-14.14
19	69	55.36	45.35	-169.2	98790.8	-14.38
20	72	53.71	38.90	-216.5	98743.5	-14.61
21	75	51.94	32.48	-257.4	98702.6	-14.82
22	77	50.67	28.23	-264.5	98695.5	-14.85
23	79	49.31	24.00	-259.5	98700.5	-14.83
24	81	47.84	19.81	-251.5	98708.5	-14.79
25	83	46.25	15.67	-231.6	98728.4	-14.69
26	85	44.49	11.59	-187.4	98772.6	-14.47
27	87	42.57	7.59	-121.4	98838.6	-14.14
28	89	40.43	3.70	-31.4	98928.6	-13.69
29	91	38.03	-0.03	104.2	99064.2	-13.02
30	93	35.32	-3.54	250.7	99210.7	-12.29
31	96	30.57	-8.20	512.3	99472.3	-10.99
32	98	26.87	-10.63	704.7	99664.7	-10.03
33	100	22.78	-12.33	927.9	99887.9	-8.92
34	102	18.40	-13.01	1224.2	100184.2	-7.44
35	104	14.00	-12.54	1471.2	100431.2	-6.22
36	106	9.84	-11.01	1974.1	100934.1	-3.71
37	108	6.06	-8.70	2216.5	101176.5	-2.51
38	110	2.69	-5.82	2403.2	101363.2	-1.58

Tab. 16: Rozdělení tlaku po profilu – hodnoty získané počítačovou simulací.

měřící otvor	číslo měř. otvoru	umístění v souř. sys.		získané a vypočtené hodnoty - CFD		
		y	z	p-pu	p	cp
[-]	[-]	[-]	[-]	[Pa]	[Pa]	[-]
1	1	0.00	0.00	3059.9	102019.9	1.69
2	4	2.34	5.97	3101.2	102061.2	1.90
3	6	6.10	8.13	2996.0	101956.0	1.37
4	8	10.50	9.37	3036.4	101996.4	1.57
5	10	14.80	10.96	3006.7	101966.7	1.43
6	12	18.98	12.82	3008.3	101968.3	1.43
7	14	23.03	14.95	3002.6	101962.6	1.41
8	16	26.85	17.46	2980.8	101940.8	1.30
9	18	30.43	20.31	2952.3	101912.3	1.16
10	20	33.76	23.46	2918.0	101878.0	0.99
11	22	36.82	26.85	2858.4	101818.4	0.69
12	24	39.64	30.46	2788.8	101748.8	0.34
13	26	42.23	34.23	2699.1	101659.1	-0.10
14	28	44.61	38.14	2560.7	101520.7	-0.79
15	30	47.86	44.19	2315.1	101275.1	-2.02
16	33	50.81	50.39	1981.3	100941.3	-3.68
17	36	53.54	56.69	1561.0	100521.0	-5.77
18	66	56.91	51.82	-250.3	98709.8	-14.78
19	69	55.36	45.35	-286.2	98673.8	-14.96
20	72	53.71	38.90	-339.5	98620.5	-15.23
21	75	51.94	32.48	-384.6	98575.4	-15.45
22	77	50.67	28.23	-401.4	98558.6	-15.53
23	79	49.31	24.00	-407.7	98552.3	-15.57
24	81	47.84	19.81	-400.6	98559.4	-15.53
25	83	46.25	15.67	-373.9	98586.1	-15.40
26	85	44.49	11.59	-327.9	98632.1	-15.17
27	87	42.57	7.59	-261.6	98698.4	-14.84
28	89	40.43	3.70	-159.9	98800.2	-14.33
29	91	38.03	-0.03	-17.5	98942.5	-13.62
30	93	35.32	-3.54	141.0	99101.0	-12.84
31	96	30.57	-8.20	391.2	99351.2	-11.59
32	98	26.87	-10.63	627.5	99587.5	-10.41
33	100	22.78	-12.33	824.7	99784.7	-9.43
34	102	18.40	-13.01	1202.1	100162.1	-7.55
35	104	14.00	-12.54	1661.1	100621.1	-5.27
36	106	9.84	-11.01	2084.7	101044.7	-3.16
37	108	6.06	-8.70	2401.0	101361.0	-1.59
38	110	2.69	-5.82	2552.6	101512.6	-0.83

Tab. 17: Tlaky po profilu lopatky při snížení rychlosti w_1 na vstupu do mříže (CFD).

měřicí otvor	číslo měř. otvoru	umístění v souř. sys.		změna výtokové rychlosti na $w_1 = 17,5\text{m.s}^{-1}$ (CFD)		
		y	z	p-pu	p	cp
[-]	[-]	[-]	[-]	[Pa]	[Pa]	[-]
1	1	0.00	0.00	2832.48	101792.5	0.60
2	4	2.34	5.97	2870.44	101830.4	0.81
3	6	6.10	8.13	2733.08	101693.1	0.07
4	8	10.50	9.37	2810.49	101770.5	0.49
5	10	14.80	10.96	2783.07	101743.1	0.34
6	12	18.98	12.82	2784.51	101744.5	0.35
7	14	23.03	14.95	2779.25	101739.3	0.32
8	16	26.85	17.46	2759.08	101719.1	0.21
9	18	30.43	20.31	2732.74	101692.7	0.07
10	20	33.76	23.46	2700.96	101661.0	-0.10
11	22	36.82	26.85	2645.85	101605.9	-0.40
12	24	39.64	30.46	2581.43	101541.4	-0.75
13	26	42.23	34.23	2498.31	101458.3	-1.19
14	28	44.61	38.14	2370.26	101330.3	-1.88
15	30	47.86	44.19	2142.93	101102.9	-3.10
16	33	50.81	50.39	1833.87	100793.9	-4.76
17	36	53.54	56.69	1444.78	100404.8	-6.86
18	66	56.91	51.82	-231.52	98728.5	-15.87
19	69	55.36	45.35	-264.80	98695.2	-16.05
20	72	53.71	38.90	-314.21	98645.8	-16.32
21	75	51.94	32.48	-355.94	98604.1	-16.54
22	77	50.67	28.23	-371.48	98588.5	-16.62
23	79	49.31	24.00	-377.31	98582.7	-16.65
24	81	47.84	19.81	-370.88	98589.1	-16.62
25	83	46.25	15.67	-346.26	98613.7	-16.49
26	85	44.49	11.59	-303.67	98656.3	-16.26
27	87	42.57	7.59	-242.38	98717.6	-15.93
28	89	40.43	3.70	-148.14	98811.9	-15.42
29	91	38.03	-0.03	1.82	98961.8	-14.62
30	93	35.32	-3.54	130.56	99090.6	-13.92
31	96	30.57	-8.20	362.28	99322.3	-12.68
32	98	26.87	-10.63	581.02	99541.0	-11.50
33	100	22.78	-12.33	763.66	99723.7	-10.52
34	102	18.40	-13.01	1113.06	100073.1	-8.64
35	104	14.00	-12.54	1537.83	100497.8	-6.36
36	106	9.84	-11.01	1929.91	100889.9	-4.25
37	108	6.06	-8.70	2222.73	101182.7	-2.67
38	110	2.69	-5.82	2363.09	101323.1	-1.92

Tab. 18: Tlaky po profilu lopatky při snížení rychlosti w_1 na vstupu do mříže (experiment).

měřicí otvor	číslo měř. otvoru	umístění v souř. sys.		změna výtokové rychlosti na $w_1 = 17,5\text{m.s}^{-1}$ (měření)		
		y	z	p-pu	p	cp
[-]	[-]	[-]	[-]	[Pa]	[Pa]	[-]
1	1	0.00	0.00	2839.8	101799.8	0.64
2	4	2.34	5.97	2853.7	101813.7	0.72
3	6	6.10	8.13	2775.1	101735.1	0.30
4	8	10.50	9.37	2789.5	101749.5	0.37
5	10	14.80	10.96	2772.1	101732.1	0.28
6	12	18.98	12.82	2766.7	101726.7	0.25
7	14	23.03	14.95	2765.9	101725.9	0.25
8	16	26.85	17.46	2752.0	101712.0	0.17
9	18	30.43	20.31	2714.0	101674.0	-0.03
10	20	33.76	23.46	2691.4	101651.4	-0.15
11	22	36.82	26.85	2643.7	101603.7	-0.41
12	24	39.64	30.46	2577.2	101537.2	-0.77
13	26	42.23	34.23	2485.0	101445.0	-1.26
14	28	44.61	38.14	2366.7	101326.7	-1.90
15	30	47.86	44.19	2136.0	101096.0	-3.14
16	33	50.81	50.39	1837.5	100797.5	-4.75
17	36	53.54	56.69	1480.7	100440.7	-6.66
18	66	56.91	51.82	-121.3	98838.7	-15.28
19	69	55.36	45.35	-169.2	98790.8	-15.54
20	72	53.71	38.90	-216.5	98743.5	-15.79
21	75	51.94	32.48	-257.4	98702.6	-16.01
22	77	50.67	28.23	-264.5	98695.5	-16.05
23	79	49.31	24.00	-259.5	98700.5	-16.02
24	81	47.84	19.81	-251.5	98708.5	-15.98
25	83	46.25	15.67	-231.6	98728.4	-15.87
26	85	44.49	11.59	-187.4	98772.6	-15.63
27	87	42.57	7.59	-121.4	98838.6	-15.28
28	89	40.43	3.70	-31.4	98928.6	-14.79
29	91	38.03	-0.03	104.2	99064.2	-14.07
30	93	35.32	-3.54	250.7	99210.7	-13.28
31	96	30.57	-8.20	512.3	99472.3	-11.87
32	98	26.87	-10.63	704.7	99664.7	-10.84
33	100	22.78	-12.33	927.9	99887.9	-9.64
34	102	18.40	-13.01	1224.2	100184.2	-8.04
35	104	14.00	-12.54	1471.2	100431.2	-6.71
36	106	9.84	-11.01	1974.1	100934.1	-4.01
37	108	6.06	-8.70	2216.5	101176.5	-2.71
38	110	2.69	-5.82	2403.2	101363.2	-1.70