

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Akademický rok: 2014/2015

Bc. David FENDERL



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Experimentální ověření vlastností proudění v lopatkové kaskádě středorychlostního tunelu a potvrzení výsledků pomocí CFD simulací s ohledem na vliv drsnosti povrchů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Jůzy, Ph.D., MBA. a uvedl v ní všechny použité literární a jiné odborné zdroje v souladu s právními předpisy, vnitřními předpisy Západočeské univerzity a vnitřními akty řízení Západočeské univerzity a Fakulty strojní ZČU.

V Plzni dne 10. května 2015

---

vlastnoruční podpis autora

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Michalovi Hoznedlovi, Ph.D. za cenné podmínky a čas potřebný k uskutečnění měření. Dále bych rád poděkoval Ing. Kamilovi Sedlákovvi, Ph.D. za cenné odborné rady, kterými přispěl k vypracování experimentální části této diplomové práce. Rovněž děkuji prof. Ing. Jaromíru Příhodovi, CSc. a Ing. Bartolomějovi Rudasovi za cenné odborné rady, kterými přispěl k vypracování CFD části této diplomové práce.

Dále děkuji firmě Doosan Škoda Power. s.r.o. za podmínky a nástroje k uskutečnění praktické části této diplomové práce.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Fenderl	Jméno David		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2302T041 „Stavba jaderně energetických zařízení“			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. JÚZA, Ph.D., MBA.	Jméno Zdeněk		
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKE			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	Nehodící se <b>škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Experimentální ověření vlastností proudění v lopatkové kaskádě středorychlostního tunelu a potvrzení výsledků pomocí CFD simulací s ohledem na vliv drsnosti povrchů.			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	79	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	50	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	29
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Cílem práce bylo získat představu o nárůstu ztrát při expanzi media se zvyšující se drsností lopatky. Vznikající ztráta je úzce spjata s turbulencí. Proudění bylo zkoumáno na experimentální lopatkové mříži. Rovněž byla řešena úloha pomocí CFD. Pro získání okrajových podmínek bylo nutné experimentální ověření vstupní podmínky. Sledovány byly profilové a okrajové ztráty. Po získání dostatečných informací o proudovém poli bylo možné ovlivnit okrajovou ztrátu smykovou vrstvou u povrchu lopatky.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Lopatková mříž, lopatky VS33b a VS33T, drsnost povrchu, intenzita turbulence, rychlostní profil</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Fenderl	Name David	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2302T041 „Design of Nuclear Power Equipment“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. JÚZA, Ph.D., MBA.	Name Zdeněk	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Experimental verification of the flow properties in the wind tunnel with blade cascade and confirm the results using CFD simulations with respect to the influence of surface roughness.		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Design of Power Machine	<b>SUBMITTED IN</b>	2015
----------------	------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	79	<b>TEXT PART</b>	50	<b>GRAPHICAL PART</b>	29
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The aim of this article was to get an idea about the losses of increase blade roughness during the expansion. Emerging loss is closely associated with turbulence. The flow was examined on experimental blade cascade. Also, the task was solved using CFD. To obtain boundary conditions was necessary experimental verification of input conditions. Efforts are directed to obtain of profile losses and secondary losses. After obtaining sufficient information on the flow field we may be able to influence secondary losses of shear layer at the surface of the blade.
<b>KEY WORDS</b>	Blade cascade, blade VS33b and VS33T, profile roughness, turbulence intensity, velocity profile

# OBSAH

POUŽITÉ ZNAČENÍ.....	7
ÚVOD .....	9
<b>1 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>10</b>
1.1 POPIS AERODYNAMICKÉHO TUNELU .....	10
1.2 POPIS TRAVERZOVACÍHO ZAŘÍZENÍ PRO SBĚR TLAKŮ .....	11
1.2.1 Schéma zapojení měřicí aparatury.....	11
1.3 POPIS MĚŘICÍ APARATURY CTA .....	12
1.4 POPIS GEOMETRIE LOPATKOVÉ MŘÍŽE.....	14
<b>2 OKRAJOVÁ PODMÍNKA NA VSTUPU DO LOPATKOVÉ MŘÍŽE.....</b>	<b>15</b>
2.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍHO PROFILU POMOCÍ PITOTOVY SONDY .....	15
2.1.1 Ztráta v mezní vrstvě.....	16
2.1.2 Korekce rychlosti u stěny pro Pitotovu sondu.....	16
2.1.3 Rychlostní profil před repasí ventilátoru .....	18
2.1.4 Rychlostní profil po repasi ventilátoru .....	19
2.2 MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍHO PROFILU POMOCÍ MĚŘICÍ APARATURY CTA (CONSTANT TEMPERATURE ANEMOMETRY).....	21
2.3 2D VÝPOČET V CFD PRO NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK.....	23
2.3.1 Vytvoření výpočtové oblasti a diskretizace .....	23
2.3.2 Nastavení okrajových podmínek a parametrů turbulentního modelu .....	24
2.3.2.1 Fyzikální vlastnosti proudícího média .....	24
2.3.2.2 Model turbulence .....	25
2.3.2.3 Okrajové podmínky .....	26
2.3.3 Výsledek a vyhodnocení výpočtu.....	27
<b>3 INTENZITA TURBULENCE V DEFINOVANÉ ROVINĚ ZA ODTOKOVÝMI HRANAMI LOPATEK.....</b>	<b>29</b>
3.1 LOPATKOVÁ MŘÍŽ S LOPATKAMI VS33T .....	30
3.1.1 Určení vzorkovací frekvence a doby sběru dat .....	31
<b>4 ZTRÁTA PŘI EXPANZI VE SLEDOVANÉ ROVINĚ NA VÝSTUPU Z LOPATKOVÉ MŘÍŽE - EXPERIMENT .....</b>	<b>32</b>
4.1 VYHODNOCENÍ ZTRÁT PŘI EXPANZI .....	32
4.1.1 Definování místního ztrátového součinitele .....	32
4.1.2 Vyhodnocení tlaků a výstupních úhlů proudu .....	33
4.1.3 Uvažování vlivu vlhkosti expandujícího média .....	33
4.1.4 Rychlosti na výstupu z mříže .....	33
4.1.5 Redukce dat.....	34
4.1.5.1 Aplikace hmotnostního toku.....	34
4.1.5.2 Aplikace zákonů zachování .....	35
4.2 PROFILOVÉ A OKRAJOVÉ ZTRÁTY .....	36
4.2.1 Rozbor lopatkové mříže s lopatkami VS33b a VS33T.....	36
<b>5 ZTRÁTA PŘI EXPANZI VE SLEDOVANÉ ROVINĚ NA VÝSTUPU Z LOPATKOVÉ MŘÍŽE – CFD .....</b>	<b>38</b>
5.1 VYTVOŘENÍ VÝPOČTOVÉ OBLASTI A DISKRETIZACE .....	38
5.2 MATEMATICKÝ MODEL A OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	39
5.3 VÝSLEDKY VÝPOČTU.....	40
5.3.1 Rozbor v polovině výšky lopatky .....	40
5.3.1.1 Porovnání modelu k- $\omega$ SST a tohoto modelu včetně $\gamma$ -Re přechodu turbulence .....	42
5.3.2 Rozbor lopatkových mříží s lopatkami VS33b a VS33T .....	43
<b>6 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH DAT .....</b>	<b>47</b>
<b>7 VLIV DRSNOSTI POVRCHU LOPATKY NA PROFILOVÉ A OKRAJOVÉ ZTRÁTY .....</b>	<b>48</b>

7.1	DATA ZÍSKANÁ EXPERIMENTÁLNĚ.....	48
7.1.1	<i>Nanášení brusiva na povrch lopatky.....</i>	48
7.1.2	<i>Měření drsnosti lopatek.....</i>	49
7.1.3	<i>Výsledky měření ztrát v závislosti na drsnosti povrchu.....</i>	51
7.2	DATA ZÍSKANÁ NUMERICKY.....	52
<b>8</b>	<b>VLIV ZDRSNĚNÍ NA OKRAJOVÉ ZTRÁTY.....</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>PROFILOVÉ ZTRÁTY DLE ZNÁMÉHO VZTAHU.....</b>	<b>56</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>61</b>
1.	PŘÍLOHA 1 - VYKRESLENÍ ZTRÁT - LOPATKOVÁ MŘÍŽ S LOPATKAMI VS33B.....	61
2.	PŘÍLOHA 2 - VYKRESLENÍ ZTRÁT - LOPATKOVÁ MŘÍŽ S LOPATKAMI VS33T.....	65
3.	PŘÍLOHA 3 - NAMĚŘENÁ A VYPOČTENÁ DATA.....	69
4.	PŘÍLOHA 4 - SKRIPT PRO VYHODNOCENÍ ZTRÁT A RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ.....	70



## POUŽITÉ ZNAČENÍ

$b$	[m]	tětiva lopatkového profilu
$l$	[m]	délka lopatky
$t$	[m]	rozteč
$\gamma$	[°]	vstupní úhel lopatky
$p_{c1}, \overline{p_{01}}$	[Pa]	celkový tlak v rovině 1 na vstupu
$p_{s1}$	[Pa]	statický tlak v rovině 1 na vstupu
$\rho_{vv}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota vlhkého vzduchu
$w_1$	[m/s]	rychlost media v rovině 1
$\delta^{***}$	[m]	energetická tloušťka mezní vrstvy
$\zeta^{m.v}$	[-]	ztráta v mezní vrstvě
$y$	[m]	normálová vzdálenost od stěny
$d_p$	[m]	vnější průměr Pitotovy sondy
$u_\tau$	[Nm/kg]	třecí rychlost
$\tau_w$	[N/m <sup>2</sup> ]	smykové napětí na stěně
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita
$d^+$	[Ns/kg]	pomocná veličina
$R$	[m]	polovina šířky kanálu
$\lambda$	[-]	ztrátový součinitel tření
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$\epsilon$	[-]	pomocná veličina
$w_{1zr}$	[m/s]	rychlost media v rovině 1 promítnutá do roviny z-r
$I_{zr}$	[%]	intenzita turbulence
$w'_1$	[m/s]	fluktuace rychlosti v rovině 1
$T$	[K]	celková teplota proudu
$K$	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	turbulentní kinetická energie
$\omega$	[1/s]	specifická míra disipace
$Tu$	[-]	stupeň turbulence
$\beta_\infty, \sigma_K, \alpha_\infty, \beta, \sigma_\omega, \sigma_{\omega 2}$	[-]	modelové konstanty
$\nu_T$	[m <sup>2</sup> /s]	turbulentní viskozita
$F_1$		směšovací funkce
$P$		produkční funkce
$k, l$		sčítací indexy
$\tau_{kl}$	[N/m <sup>2</sup> ]	smykové napětí
$w_{2s}, w_2$	[m/s]	skutečná rychlost na výstupu
$w_{2 s}$	[m/s]	izoentropická rychlost na výstupu
$\overline{\zeta_M}$	[-]	místní ztrátový součinitel celkového tlaku
$p_{c2}, \overline{p_{02}}$	[Pa]	celkový tlak na výstupu
$p_2, \overline{p_2}$	[Pa]	statický tlak na výstupu
$\beta_2^c$	[°]	úhrynná hodnota výstupního úhlu proudu
$w_z$	[m/s]	rychlost kolmá na rovinu odtokových hran lopatek, osa z
$\delta_2$	[°]	úhel mezi $w_2$ a $w_z$

$\overline{\zeta}_M _b, \rho _b, w_2 _b$		střední hodnoty v buňkách
$\rho_{str} w_{2str}$		střední hodnota z matice
$A$	$[m^2]$	plocha
$\overline{\zeta}_M^c$	$[-]$	úhrnná hodnota místního ztrátového součinitele
$La$	$[-]$	Lavalovo číslo
$\overline{I}_M, \theta_2$		pomocná veličina
$I_A$		pomocná veličina v axiálním směru
$I_O$		pomocná veličina v obvodovém směru
$\kappa$	$[-]$	polytropický exponent
$Ma$	$[-]$	Machovo číslo
$Ma_{2is}$	$[-]$	výstupní Machovo číslo při izentropické expanzi
$Ra$	$[-]$	střední aritmetická úchylka drsnosti povrchu

## ÚVOD

Vývoj jde ve všech odvětvích i v energetice stále kupředu. Realizaci energetických projektů bych rozdělil do dvou hledisek. Prvním je ekonomické hledisko a druhým je ekologická, popř. bezpečnostní stránka věci. Tyto hlediska jsou dána způsobem získávání elektrické energie. Pro maximální využití této energie z počátečního zdroje je klíčová účinnost elektrárny.

Největší většinové zdroje, jako jsou jaderné a uhelné, jsou charakteristické velkým výkonem a především svou stabilitou z pohledu elektrické sítě. Jejich účinnost je dána z velké části termodynamickou účinností turbosoustrojí.

Během provozu parní turbíny dochází k erozivnímu a korozivnímu rozrušování lopatek. Ty mají poté vliv na termodynamickou účinnost stupně, objektivně na celý díl parní turbíny a tedy na účinnost celého turbosoustrojí. Zda tento vliv je kladný nebo záporný záleží na mnoha faktorech.

Pro tento případ budou řešeny modelové vysokotlaké lopatky založené na profilu VS33. Ty budou zkoumány experimentálně na aerodynamickém tunelu ve společnosti Doosan Škoda Power a pomocí komerčního softwaru ANSYS Fluent. Jedná se o rozváděcí lopatky, kde pracovním médiem bude vzduch, který expanduje v subsonické oblasti. V této publikaci budou řešeny dva typy modelových lopatkových mříží s uvažováním nezbytných podobnostních čísel.

Hlavní náplní je získat závislost ztrátového součinitele na zvyšující se drsnosti povrchu. Díky těmto výsledkům je možné získat představu o vývoji ztrát v průběhu provozu turbíny. Následně je možné tyto data využít v numerických metodách modelující proudění, tedy v CFD. Zde by se jednalo o chování mezní vrstvy a o separaci vírů od povrchu lopatky.

Vzhledem k faktu, že v této práci bude využito jak experimentální metody tak i výpočetní, je možné vlastnosti proudění v daných směrech porovnávat a vyvozovat určité závěry. Proto zde bude nejprve důkladně řešena vstupní okrajová podmínka, pro kterou bude využito tří metod. Bude se jednat o měření a vyhodnocení rychlostního profilu traverzováním s využitím Pitotovy sondy a CTA sondy. Rovněž i o namodelování v CFD. Vyhodnocení bude směřováno na oblast v blízkosti stěny u vstupního kanálu, kde se určitým způsobem vyvíjí mezní vrstva.

Hlavním důvodem nárůstu ztrát je vznik turbulentní mezní vrstvy na lopatce a sekundárních vírů způsobených interakcí s mezní vrstvou od stěn lopatkové mříže, ty byly sledovány pomocí aparatury CTA anemometru. Na toto měření bude nutné sestavit traverzér schopný traverzovat po rozteči lopatkové mříže.

Po získání dostatečného množství dat z experimentu bude možné přestoupit k CFD. Snahou bylo porovnat experiment se CFD výpočty z pohledu turbulence a vzniku ztrát. Výpočet bude založen na Reynoldsově středovaných Navier-Stokesových rovnicích. Turbulence zde bude řešena pomocí dvourovnicového turbulentního modelu. Vzhledem k pokroku modelování proudění zde bude využito i zmiňovaného turbulentního modelu rozšířeného modelem přechodu z laminárního proudění do turbulentního.

Bude zde provedena rozsáhlejší studie rozšířená o poznatky, které vyplynuly v průběhu měření na experimentálním zařízení. Rovněž poznatky z výpočtů z komerčního softwaru ANSYS Fluent s následným srovnáním s experimentem.

Hlavním cílem je tedy získat profilové a okrajové ztráty na úrovni zdrsnění experimentálně i numericky, dále získat vlastnosti proudového pole dostupnými metodami.

# 1 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

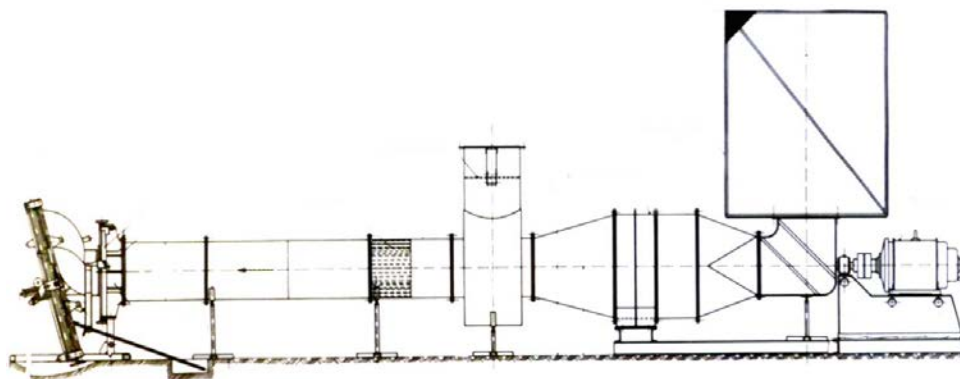
## 1.1 Popis aerodynamického tunelu

Aerodynamický tunel v dnešní společnosti Doosan Škoda Power s.r.o. vznikl v šedesátých letech dvacátého století. Jedna z větších rekonstrukcí probíhala v letech 2008 – 2011, kdy došlo k repasi původního traverzéro, nahrazení krokových motorů novými typy a nahrazení tlakových převodníků za jeden inteligentní tlakový scanner komunikující s řídicím PC pomocí TCP/IP protokolu, dále byl osazen síťový vlhkoměr.

Pohon tunelu obstarává motor o výkonu 150 kW při 1485 ot/min, který je přes kotoučovou spojku spojen s axiálním ventilátorem JU 60. Sání kompresoru je umístěno mimo budovu laboratoře.

V letošním roce, tedy 2014, byla provedena výměna axiálních ložisek z důvodu velkých vibrací. Při této operaci byl i zrušen bypass za konfuzorem, kterým bylo možné řídit průtočné množství tunelem.

Dále je stlačené pracovní medium usměrněno řadou usměrňovacích sít, kde dojde ke snížení intenzity turbulence. Po přechodu potrubí do měřicí místnosti vstupuje pracovní medium do Vitošinského dýzy, za kterou se nachází lopatková mříž. Schematicky je aerodynamický tunel vykreslen na Obr. 1.



Obr. 1 Schéma aerodynamického tunelu

Dále na Obr. 2 je vyfocena část mimo měřicí oblast, tedy sání, pohon, vnitřně umístěný ventilátor a usměrňovací síta. Poté na Obr. 3 je už samotná měřicí oblast.



Obr. 2 Sání, pohon a ventilátor (po rekonstrukci 2014)



Obr. 3 Měřicí část s lopatkovou mříží

## 1.2 Popis traverzovacího zařízení pro sběr tlaků

Traverzovací zařízení, které je též uchyceno na rámu s lopatkovou mříží, čímž je zajištěna vzájemná poloha mříže a traverzéro, umožňuje pohyb sondy ve čtyřech osách. Jedná o tři osy s přímočarým pohybem  $r$ ,  $u$ ,  $z$ , v nichž se odehrává přímočarý posuv sondy a jednu rotační osu  $A$ , kde dochází k otáčení sondy kolem posuvové osy  $r$ .

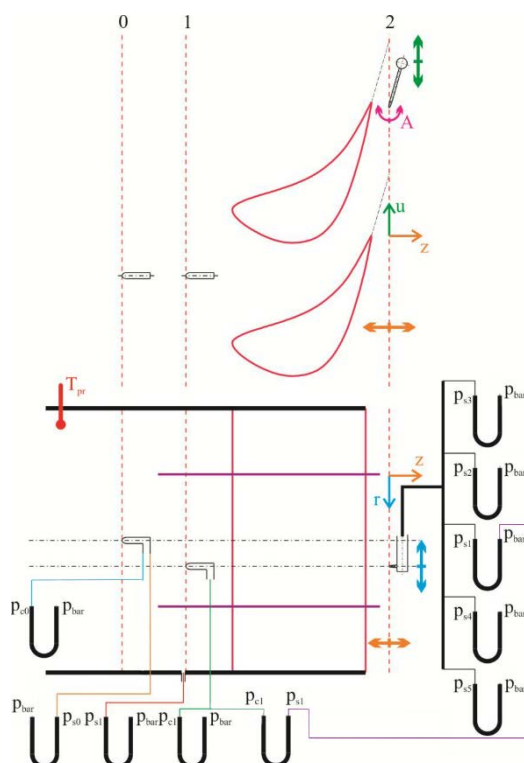
Rotační osy se využívá, buď k nastavení sondy na počátku měření do požadované pozice, to je v případě měření „nenulovací“ metodou, nebo v průběhu měření dochází k vyrovnávání sondy do proudu a odečítání úhlu natočení sondy z řídicího PLC, což se využívá při „nulovací“ způsobu měření. V mém případě byla využita „nenulovací“ metoda.

### 1.2.1 Schéma zapojení měřicí aparatury

Pro měření teplot před mříží je využito odporového teploměru Pt100. Tlaky jsou sbírány prostřednictvím šestnáctikanálového inteligentního tlakového scanneru Netscanner 9116. Schéma zapojení jednotlivých tlakových kanálů je uvedeno na Obr. 4.

Tunel je osazen jednou pevnou Prandtlovo sondou, která sbírá data v rovině 0. Dále je osazena Pitotova sonda jejíž pohyb v rovině 1 je omezen na pouhé traverzování po výšce lopatky. V této rovině je také sbírána hodnota statického tlaku z odběru na stěně.

Poslední sonda je obecně více-otvorová, která traverzuje v rovině 2, jak po výšce lopatky, tak ve směru osy  $u$ . Kromě toho je možné volit libovolnou vzdálenost roviny 2 od roviny odtokových hran v určitém rozsahu.

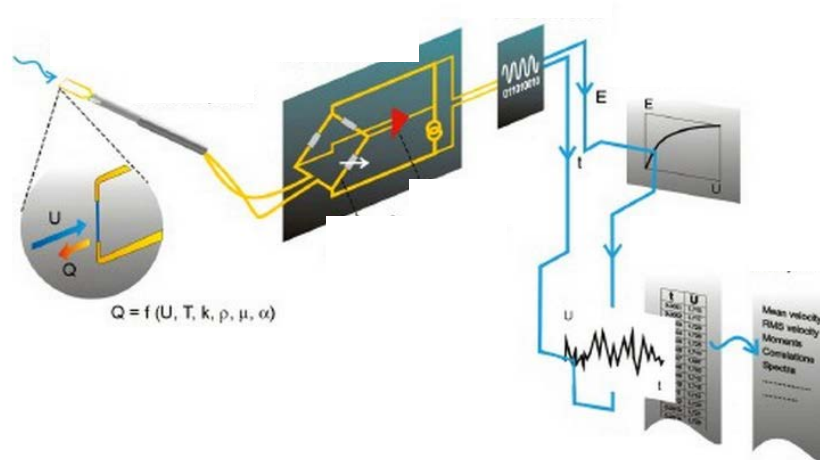


Obr. 4 Schéma zapojení měřící aparatury

### 1.3 Popis měřící aparatury CTA

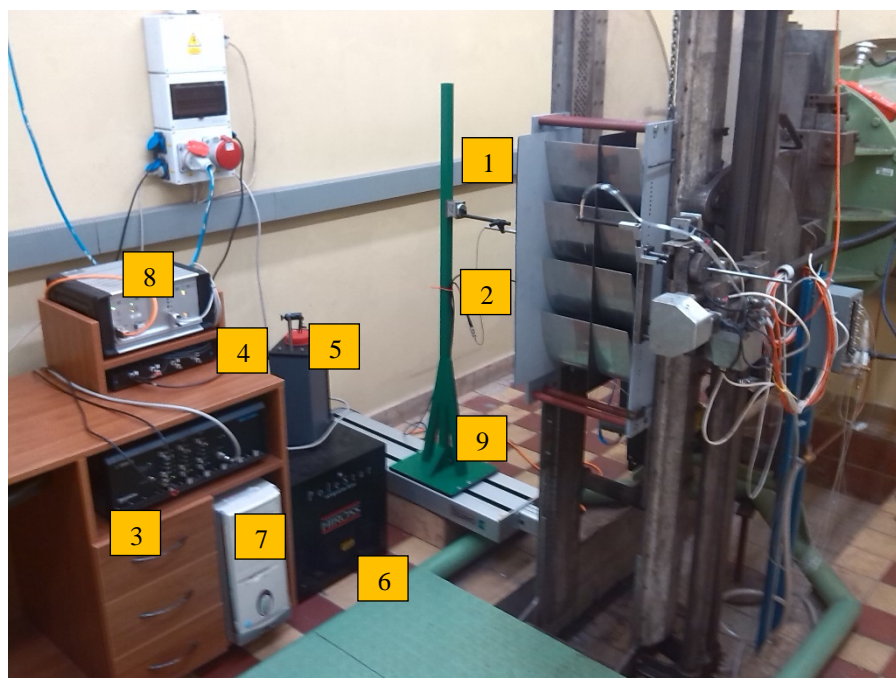
Tato metoda pracuje na základě konvekčního přenosu tepla ze zahřívání sondy do okolní tekutiny, přičemž přestup tepla je primárně závislý na rychlosti tekutiny. Použitím velmi tenkých drátkových sond umístěných v tekutině a elektroniky se zpětnovazební smyčkou je umožněno měření fluktuací rychlostí malého měřítka turbulence a vysokých frekvencí.

Princip metody je patrný z Obr. 5. Vlivem ochlazování drátkové sondy dochází ke změně jednoho odporu ve Wheatstonově můstku, tím dojde k jeho rozvážení. Proměnným rezistorem se snažíme tuto debilanci vyrovnat. Měření na obou větvích můstku je nutné zesílit. Následně je nutné převést analogový signál na digitální. Dále z předem uskutečněné kalibrace je možné získat závislost rychlosti v čase.



**Obr. 5 Princip CTA Anemometru**

Měřicí zařízení představuje měřicí řetězec. Obsahuje drátkovou sondu s nosičem sondy [1] a kabelem [2], CTA anemometru [3], A/D převodníkem [4] a počítačem [7]. Zařízení obsahuje kalibrační zařízení s připojením na tlakový vzduch [5], které obsahuje sušící zařízení [6]. Dále je zde instalována traverzovací jednotka [8] s jednoosým traverzérem [9].



**Obr. 6 Měřicí aparatura CTA**

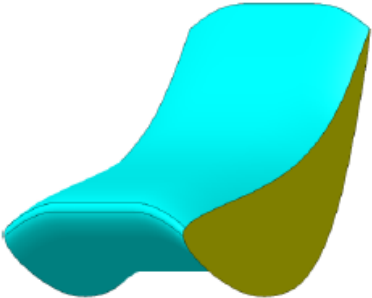
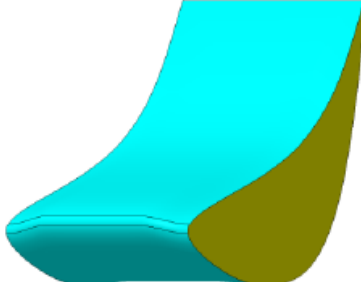
## 1.4 Popis geometrie lopatkové mříže

Výstupní průřez aerodynamického tunelu je osazen 4 lopatkami. Vznikají tři mezilopátkové kanály, v nichž je možné měřit. Je k dispozici dvojice lopatkových mříží založených na statorovém profilu VS 33, jedná se o lopatky označované „VS33b“ (compound lean) a lopatky „VS33T“ (compound twist, popř. controlled flow), lopatky jsou naznačeny na Obr. 7.

Prvním typem lopatek je „VS33b“, jedná se o lopatky, které vzniknou obvodovým vysunutím profilů mimo patního a špičkového ve směru rotace oběžných lopatek. Náběžná hrana profilu u paty a špičky je tvořena parabolickým obloukem, jehož vrchol je obvodově vysunut o 15 mm v radiální vzdálenosti 45mm od paty, popř. špičky lopatky. Úhel nastavení profilu je po výšce lopatky konstantní.

Posledním typem lopatek je typ „VS33T“, který je založen na předpokladu řízení průtoku media lopatkovým kanálem. Lopatka vzniká natáčením profilu VS 33 kolem odtokové hrany, čímž dochází k uzavírání hrdla v oblasti paty a špičky lopatky při zachování průtočné plochy kanálu. Tím pádem musí být hrdlo ve střední části otevřeno. Tímto je směřována podstatná část hmotnostního průtoku do oblastí s menšími ztrátami, čímž dochází ke snižování ztrát statoru, resp. stupně. Pro stanovení průběhu úhlu nastavení profilu po výšce lopatky bylo využito Bezierových křivek.

Parametry řešeného profilu VS33 a ustavení v lopatkové mříži jsou uvedeny v Tab. 1.

	<p><b>VS33b</b>            U paty a špičky profilu jsou parabolické oblouky, vrchol parabol je obvodově vysunut o 15 mm (<math>0,1 \cdot L</math>) v radiální vzdálenosti 45 mm (<math>z = 0,3 \cdot L</math>) od paty, popř. špičky, <math>\gamma = \text{konst.}</math></p>
	<p><b>VS33T</b>  <math display="block">\gamma = 40,85 + 0,95 \cdot \cos \frac{\pi \cdot r}{9}</math>           pro <math>r \in \langle 0 ; 9 \rangle</math>   <math display="block">\gamma = 40,85 + 0,95 \cdot \cos \frac{\pi \cdot r}{9}</math>           pro <math>r \in \langle 27,5 ; 36,5 \rangle</math></p>

Obr. 7 Typy lopatek



<b>Profil</b>	<b>VS33</b>
Délka tětivy b [mm]	200
Délka lopatky l [mm]	150
Rozteč lopatek t [mm]	140
Vstupní úhel lopatky $\gamma$ [°]	37,33
šířka mříže s [mm]	156,69

**Tab. 1** Parametry profilu a lopatkové mříže

## 2 OKRAJOVÁ PODMÍNKA NA VSTUPUDO DO LOPATKOVÉ MŘÍŽE

Okrajová podmínka na vstupu do lopatkové mříže byla zkoumána ze dvou hlavních důvodů. Prvním z nich bylo nutné ověřit vyrovnanost rychlostního profilu a získat informaci o ztrátě v mezní vrstvě u stěny. Druhým důvodem bylo získat okrajovou podmínku včetně chování turbulizujícího média pro namodelování v CFD.

### 2.1 Měření rychlostního profilu pomocí Pitotovy sondy

Pomocí traverzovacího zařízení byla proměřena oblast po výšce lopatky do středu vstupního kanálu ve vzdálenosti 215 mm od náběžných hran lopatek. Měření celkového tlaku  $p_{c1}$  proběhlo několikrát a následně byly hodnoty v jednotlivých bodech, dle vygenerované měřicí oblasti, průměrovány. Tímto se snížila pravděpodobnost velké odchylky při sběru dat. Z dynamického tlaku je vypočtena vstupní rychlost  $w_1$  dle rovnice (1). Statický tlak  $p_{s1}$  je měřen otvorem ve stěně vstupního kanálu. Dále je uvažován vliv vlhkosti vzduchu na hustotu protékajícího média  $\rho_{vv}$ .

$$w_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{c1} - p_{s1})}{\rho_{vv}}} \quad (1)$$

Pro získání celkového tlaku  $p_{c1}$  v bezprostřední blízkosti stěny, pro následné získání potřebných charakteristik mezní vrstvy, byla vytvořena sonda o vnějším průměru  $d_p$  1 mm s tloušťkou stěny 0,25 mm.

### 2.1.1 Ztráta v mezní vrstvě

Ze znalosti rozložení rychlosti je již možné počítat tloušťku mezní vrstvy, která významným způsobem ovlivňuje velikost a rozložení ztrát. Pro získání ztráty v mezní vrstvě je třeba nejdříve vyjádřit energetickou tloušťku mezní vrstvy. Ta je definována jako náhradní mezní vrstva, o kterou by mohla být posunuta stěna ve směru normály k obtékanému povrchu do proudu při zachování stejné kinetické energie. Nutno podotknout, že je zde uvažována hustota media od vnějšího proudu až ke stěně konstantní.

$$\delta^{***} = \int_0^{l/2} \frac{w_1}{w_1|_{l/2}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{w_1}{w_1|_{l/2}} \right)^2 \right] \cdot dr \quad (2)$$

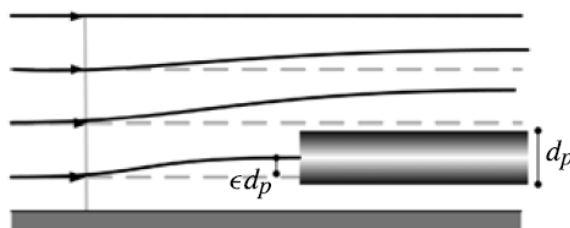
Po integrálním výpočtu energetické mezní vrstvy od stěny do středu kanálu je možné vyjádřit ztrátu v mezní vrstvě definovanou následovně.

$$\zeta^{m.v} = 2 \cdot \frac{\delta^{***}}{l} \quad (3)$$

### 2.1.2 Korekce rychlosti u stěny pro Pitotovu sondu

V případě vazkého proudění, kde bude docházet v rychlostní mezní vrstvě k výrazné derivaci rychlosti od stěny, je vhodné použít korekci rychlosti. Vlivem přiblížení sondy dochází k ucpávacímu účinku a k odklonu proudnice, viz Obr. 8. Tímto efektem dochází k zkreslení naměřeného rychlostního profilu v bezprostřední blízkosti stěny. Abychom tomuto efektu zabránili, je třeba použít korekci. Zde byla použita korekce rychlosti dle MacMillana (1957).

$$\frac{\Delta w_1}{w_1} = 0.015 e^{-3.5 \left( \frac{y}{d_p} - 0.5 \right)} \quad (4)$$



Obr. 8 Odklon proudnice

Pro zjištění odklonu proudnice  $\Delta y = \epsilon \cdot d_p$  je třeba zjistit koeficient epsilon. Výše uvedená korekce rychlosti by měla být použita v rozmezí  $30 < d^+ < 230$ , kde

$$d^+ = d_p \cdot \frac{u_\tau}{\nu}, \text{ a} \quad (5)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho \nu}}. \quad (6)$$

Představu o velikosti smykového napětí na stěně  $\tau_w$  je možné vyjádřit z rovnováhy sil působících na tekutinu v potrubním úseku, když budeme předpokládat, že stěna je hydraulicky hladká. Z rovnováhy sil ve vytknutém kontrolním objemu platí

$$\tau_w 2\pi R dx = dp \pi R^2. \quad (7)$$

Po vyjádření  $\tau_w$  a za dosazení  $dp$  tlakovou ztrátu na dynamickém tlaku v potrubí, platí

$$\tau_w = \frac{dpR}{2dx} = \lambda \frac{dx}{2R} \rho \frac{w_s^2}{2} \frac{R}{2dx} = \frac{\lambda \rho w_s^2}{8}. \quad (8)$$

Pro případ turbulentního proudění je ztrátový součinitel tření vyjádřen jako

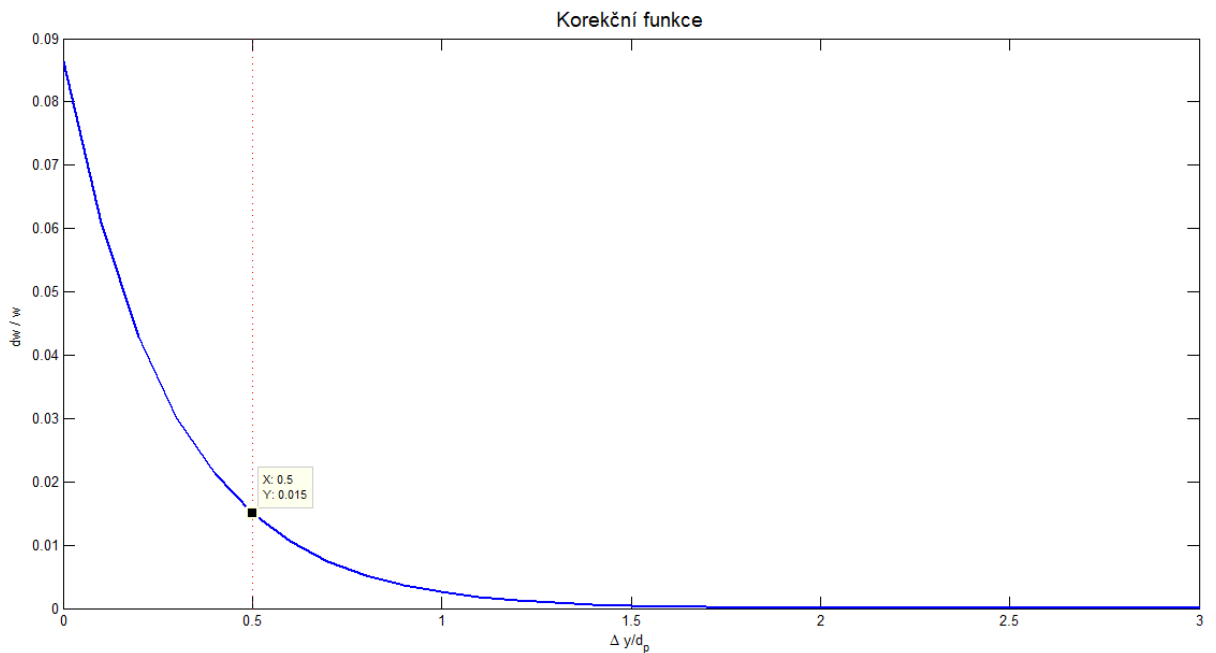
$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{\frac{1}{4}}} = \frac{0.3164}{\left(\frac{w_s 2R}{\nu}\right)^{\frac{1}{4}}}. \quad (9)$$

Konstanta  $R$  je v našem případě polovina šířky kanálu. Následně je možné dopočíst  $d^+$  a vybrat  $\epsilon$

$$\epsilon = \begin{cases} 0.150 & d^+ < 8 \\ 0.120 & 8 < d^+ < 110 \\ 0.085 & 110 < d^+ < 1660 \end{cases}, \quad (10)$$

z kterého můžeme získat představu o odklonu proudnice dle MacMillana.

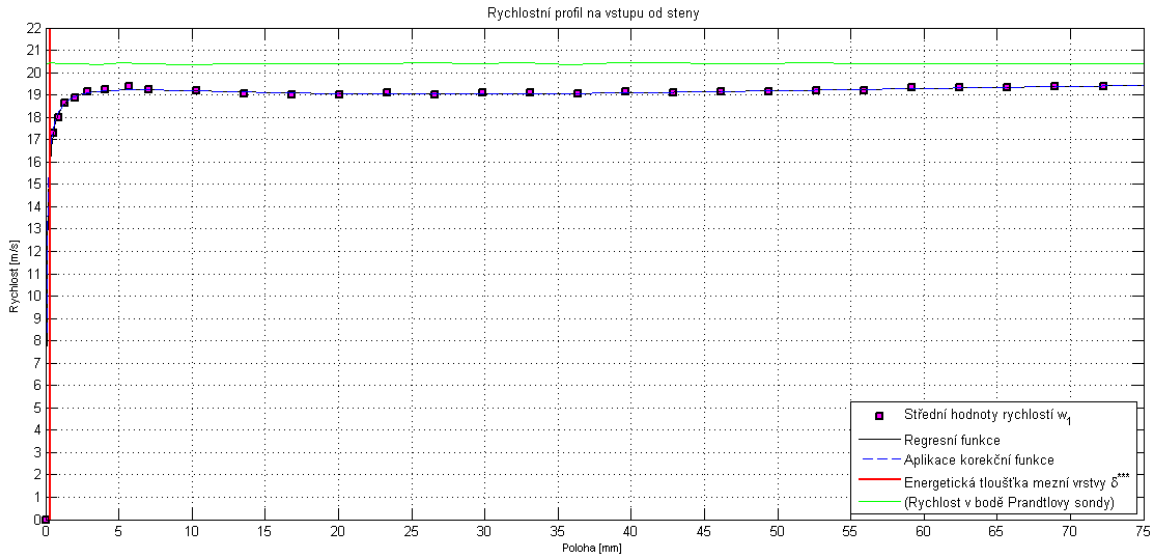
Na následujícím grafu Obr. 9 je vykreslena funkce korekce rychlosti na vzdálenosti normované průměrem Pitotovy sondy. Průměr sondy  $d_p$  je 1mm, tedy je možné se s osou sondy dostat nejbliže ke stěně 0.5 mm, vyznačeno tečkovanou čarou.



Obr. 9 Korekční funkce dle rovnice (4)

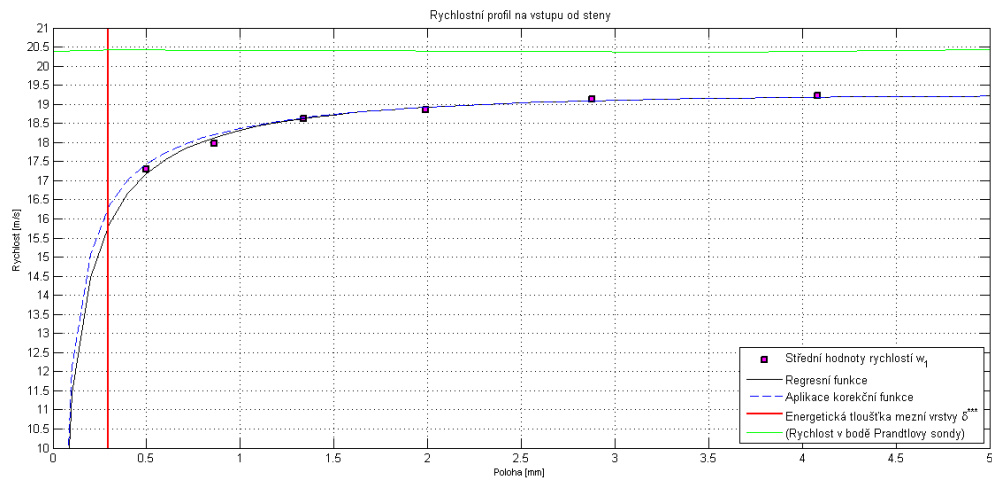
### 2.1.3 Rychlostní profil před repasí ventilátoru

V roce 2014 proběhla repase ventilátoru včetně ložisek. Pro zjištění změny vstupní podmínky, tedy vstupního rychlostního profilu, bylo nutné opětovné proměření. Rychlostní profil před repasí ventilátoru je zobrazen na Obr. 10. Střední body rychlostí byly proloženy funkcí v programu TableCurve 2D. Koeficient determinace  $r^2 = 0.999685$ . Z toho vyplývá, že model vysvětluje 99% hodnot z celkové variability měření. V rovině 0, dle Obr. 4, se nachází Prandtlova sonda, která sbírá data ve středu kanálu. V Obr. 10 je vynesena vypočtená rychlost z dat této sondy (zeleně). V legendě je uvedena v závorce, protože závislost je časová, nikoli polohová. V grafu je vidět pokles kinetické energie mezi vstupními rovinami.



Obr. 10 Rychlostní profil před repasí ventilátoru

Na Obr. 11 je detailněji vykreslena oblast v blízkosti stěny. Je zde vidět vliv korekce (čárkovaně) na proležený rychlostní profil regresní funkcí (černě). Následně je vypočtena energetická tloušťka mezní vrstvy dle vztahu (2) a ztráta v mezní vrstvě dle vztahu (3). V Tab. 2 v následující kapitole jsou uvedeny zmiňované hodnoty i s dalšími používanými vrstvami (definice například v [1]).

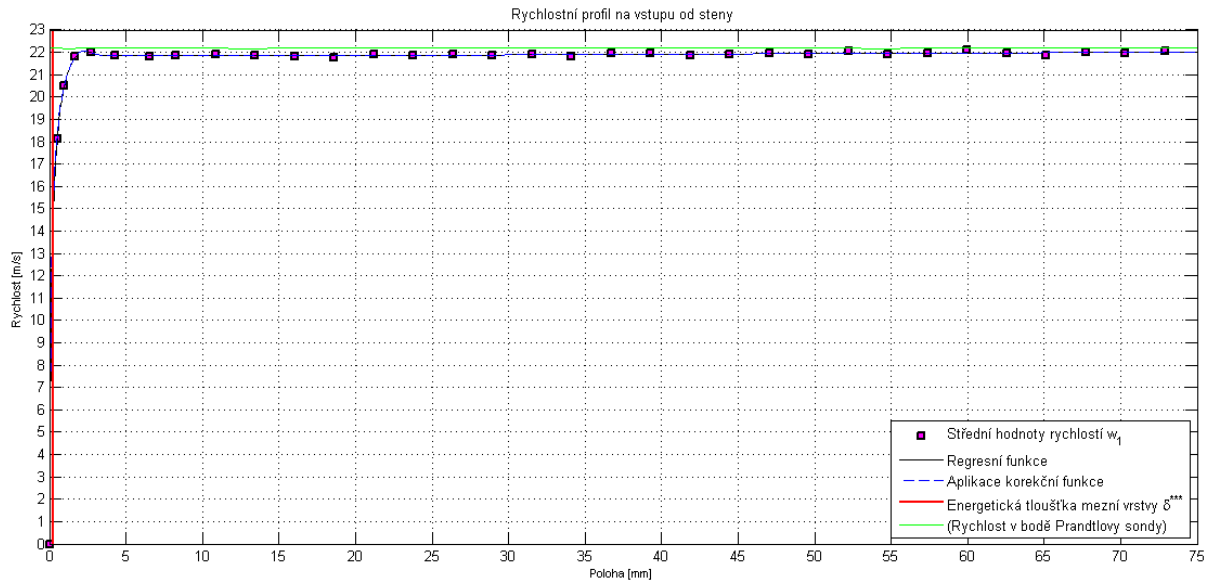


Obr. 11 Rychlostní profil před repasí ventilátoru (detail)

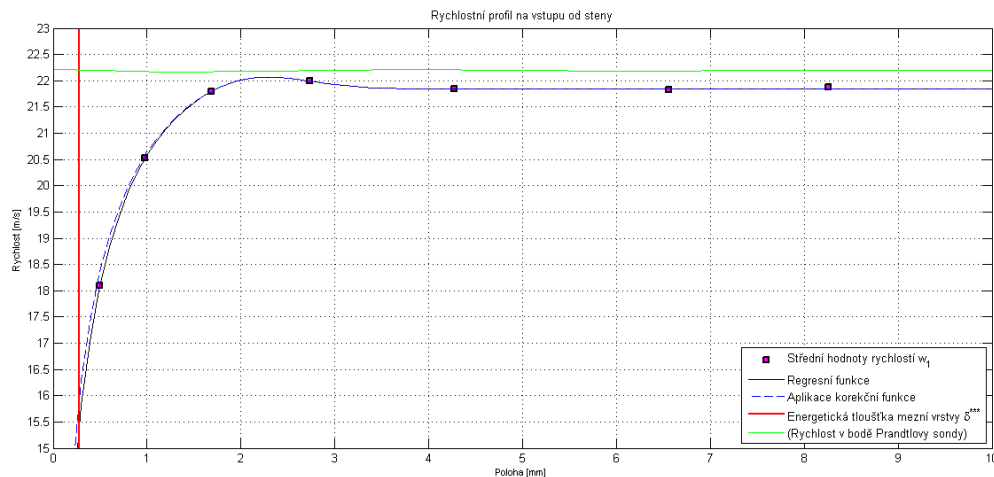
#### 2.1.4 Rychlostní profil po repasí ventilátoru

Po repasí ventilátoru se změnila okrajová podmínka na vstupu. Maximální rychlost stoupla přibližně o 2 m/s. Tento fakt je převážně způsoben snížením ložiskových ztrát. Na Obr. 12 je

vidět změněný rychlostní profil společně s detailem na Obr. 13. Vyhodnocení mezní vrstvy je definováno výše a uvedeno v Tab. 2.



Obr. 12 Rychlostní profil po repasi ventilátoru



Obr. 13 Rychlostní profil po repasi ventilátoru (detail)

Tloušťky mezních vrstev [mm]		
Etapa měření – před/po repasi ventilátoru	před	po
Pošinovací tloušťka mezní vrstvy	0,29	0,31
Impulsní tloušťka mezní vrstvy	0,13	0,16
Energetická tloušťka mezní vrstvy	0,30	0,28
<b>Ztráta v mezní vrstvě [%]</b>		
	<b>0,39</b>	<b>0,37</b>

Tab. 2 Tloušťky mezních vrstev – Pitotova sonda

Ztráta je závislá na energetické tloušťce mezní vrstvy. Tato vrstva po délce vstupního kanálu roste do momentu přechodu z laminární mezní vrstvy do turbulentní, kdy se tloušťka výrazně nemění.

## 2.2 Měření rychlostního profilu pomocí měřící aparatury CTA (Constant Temperature Anemometry)

Pro přesnější naměření rychlostního profilu na vstupu byla použita aparatura CTA. Bylo nutné vytvořit traverzovací zařízení dle Obr. 14, které bylo schopné přímočarého pohybu v ose měřeného rychlostního profilu. Dále bylo nutné snížení vlastní frekvence stěn se záměrem zvýšení tuhosti systému. To se provedlo pomocí tlumících desek s vysokou měrnou hmotností nalepených na stěny vstupního kanálu. Následně bylo možné se dostat se sondou blíže ke stěně při provozu aerodynamického tunelu.



Obr. 14 Měřící aparatura CTA pro měření rychlostního profilu

Pro měření rychlostního profilu byla použita drátková sonda s přibližným odporem  $3,3 \Omega$  při  $20^\circ\text{C}$ . Sonda byla ve tvaru dle Obr. 15 s výrobním označením dle výrobce DANTEC 55P14.



Obr. 15 Drátková sonda pro měření rychlostního profilu

Pro samotné měření bylo třeba sondu nasměrovat do proudu a přiblížit se ke stěně za provozu aerodynamického tunelu. Pomocí online vyhodnocení rychlosti se přibližovalo ke stěně. V momentě snižující se rychlosti u stěny se snížil krok posuvu na  $0,05 \text{ mm}$  do chvíle, kdy došlo k propojení konektorů sondy přes nerezovou stěnu. Po nepatrném vzdálení od tohoto stavu s jistotou stability můstku byla odhadnuta relativní vzdálenost  $0,25 \text{ mm}$ . O této vzdálenosti byl proměřen rychlostní profil až do vzdálenosti  $25 \text{ mm}$  od sousední stěny,

tedy do 5/6 šířky kanálu. Pro přesnější vykreslení mezní vrstvy byl z počátku do 1 mm nastaven krok 0,05mm, do 3mm krok 0,1mm, dále krok 0,25mm.

Pro sběr dat napětí, které udržuje žhavený drátek na konstantní teplotě, byla zvolena vzorkovací frekvence 64 kHz s celkovým počtem vzorků 1024. Záznam jednoho měřeného bodu tedy trval 0,016 sekundy.

Na Obr. 16 vlevo je vykreslen graf naměřeného rychlostního profilu pomocí měřící aparatury CTA. Jednotlivé body jsou střední rychlosti v daném bodě dle vztahu (11).

$$\bar{w}_1 = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} w_1 dt = \frac{1}{N} \sum_1^N w_i \quad (11)$$

Od předešlých grafů je zde vykreslena tloušťka s označením  $\delta_{95\%}$ . Tloušťka je definována jako vzdálenost mezi obtékanou stěnou a bodem, v němž místní rychlost dosahuje 95% rychlosti hlavního proudu. Tato tloušťka je zde vykreslena z praktického hlediska. Z grafu je vidět, že není možné integrovat energetickou tloušťku mezní vrstvy až do středu kanálu, protože rychlostní profil, jak ukázala přesnější metoda CTA, není vyrovnaný. V průběhu měření byl zaznamenáván i vliv vlhkosti a teploty proudícího media, který se pohyboval v přijatelných mezích po ustálení okrajových podmínek. Nevyrovnanost rychlostního profilu je způsobena nejspíš nesymetrickým umístěním měřené oblasti lopatkové mříže ve výstupní části tunelu. V grafu je rovněž vykreslena osa vstupního kanálu.

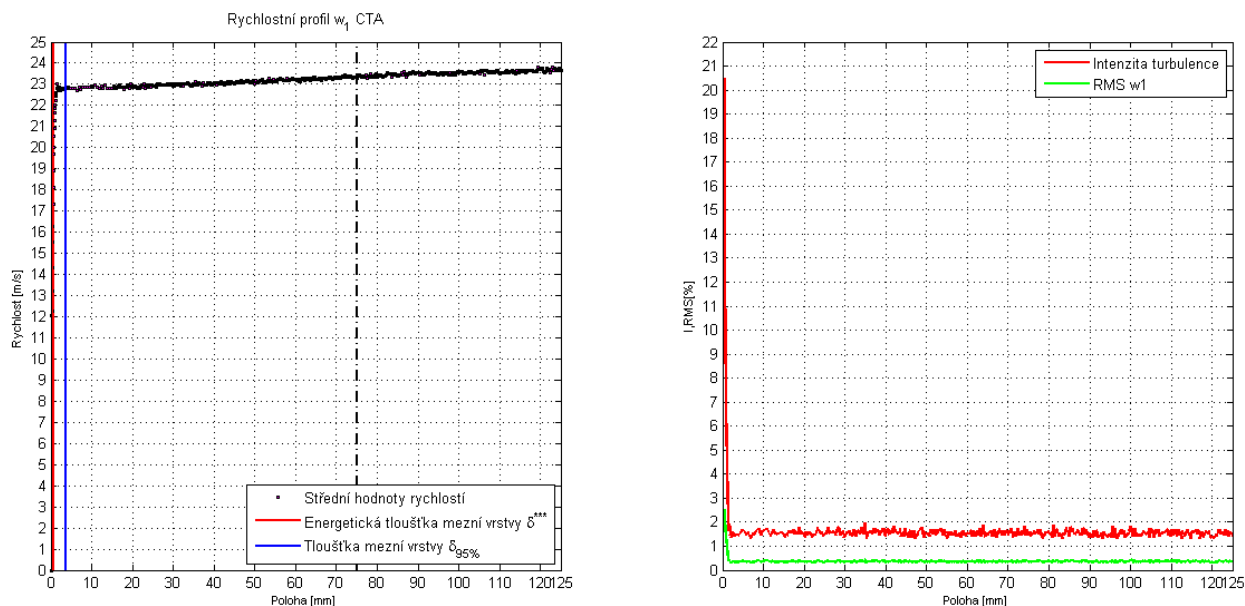
Dále na Obr. 16 vpravo je vykreslena intenzita turbulence v dvourozměrném proudění kolmém na drátek sondy (12) a směrodatná odchylka fluktuací RMS (13) [2].

$$I_{zr} = \frac{\sqrt{w_{1zr}'^2}}{w_{1zr}} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

$$RMS w_1' = \sqrt{w_1'^2} = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} w_1'^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N w_1'^2} \quad (13)$$

Na tomto obrázku je vidět, že intenzita turbulence je po šířce kanálu konstantní a v blízkosti stěny prudce narůstá. Střední hodnota intenzity turbulence je 1,856%. V následující tabulce Tab. 3 je vyhodnocena mezní vrstva.





Obr. 16 Rychlostní profil CTA

Tloušťky mezních vrstev [mm]	
Pošinovací tloušťka mezní vrstvy	0,59
Impulsní tloušťka mezní vrstvy	0,27
Energetická tloušťka mezní vrstvy	0,50
Ztráta v mezní vrstvě [%]	
	<b>0,67</b>

Tab. 3 Tloušťky mezních vrstev – CTA

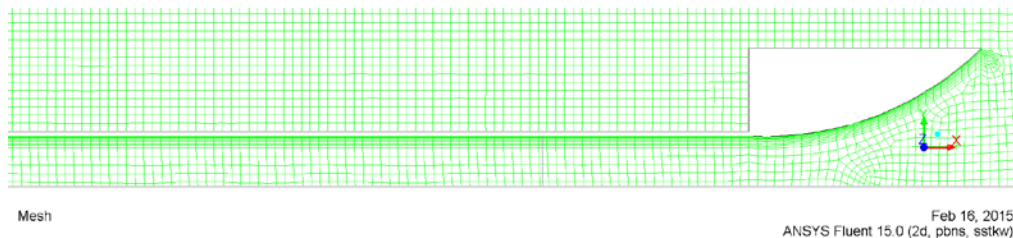
## 2.3 2D výpočet v CFD pro nastavení okrajových podmínek

Cílem tohoto výpočtu je porovnat výše zkoumané rychlostní profily s výpočtem ze CFD. Nasimulovaná vstupní oblast lopatkové mříže bude rovněž použita pro ověření vlastností turbulence pro následný 3D výpočet dvou typů lopatkových mříží. Veškeré okrajové podmínky budou vycházet z experimentálního měření.

### 2.3.1 Vytvoření výpočtové oblasti a diskretizace

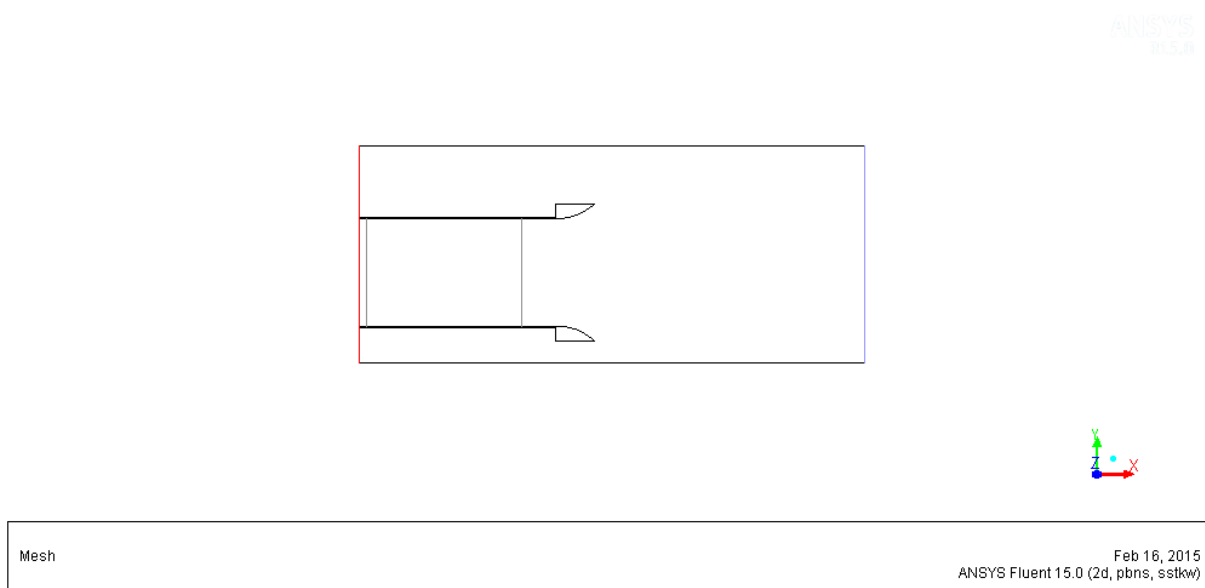
Nejprve byl vytvořen 2D model charakterizující rozměrově vstupní oblast do lopatkové mříže v programu CATIA. Následně byla oblast diskretizována v programu ANSYS Meshing. Maximální velikost buněk byla nastavena na 2 mm o celkovém počtu 61 tisíc buněk. V oblastech zkoumaných mezních vrstev bylo nastaveno dělení dle geometrické řady. První

vrstva byla nastavena na 0,1mm s koeficientem násobení 1,2 o celkovém počtu 10 vrstev. Jemné dělení dosahuje do 3mm od stěny. Na Obr. 17 je vidět zmiňovaný detail u stěny.



**Obr. 17 2D síť v oblasti stěny**

Na následujícím Obr. 18 je zobrazena celá výpočtová oblast. Je zde vidět vstupní doména (modře) a výstupní (červeně). Dále je zde vyznačena oblast pohybu Pitotovy sondy, popř. žhaveného drátku (vertikální - šedá - pravá). Nakonec náběžná hrana lopatky (vertikální - šedá - levá).



**Obr. 18 Výpočetní oblast s vyznačenými doménami**

## 2.3.2 Nastavení okrajových podmínek a parametrů turbulentního modelu

### 2.3.2.1 Fyzikální vlastnosti proudícího média

Nejprve bylo nutné sjednotit fyzikální vlastnosti protékajícího média. Mezi nejvýznamnější patří hustota, kinetická viskozita a teplota proudu. Díky velmi malému tlakovému spádu mezi vstupní doménou a náběžnou hranou lopatky byla zanedbána stlačitelnost proudění. Měrná

hmotnost byla nastavena dle střední hodnoty z experimentu. Ve výpočtu nebude uvažován vliv parciálního tlaku přehřáté páry v suchém vzduchu, tedy vlhkosti pracovního média. Kinematická viskozita byla vypočtena podle Sutherlandova vztahu (14). Hodnota měrné hmotnosti a kinematické viskozity je uvedena v Tab. 4. Teplota proudu byla nastavena na hodnotu 297,15 K.

$$\nu = \frac{2,48982 \cdot 10^{-5}}{\rho_{vv} \cdot (T + 122)} \sqrt{\frac{T^3}{273,15}} \quad (14)$$

Hustota $\rho_{vv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,15
Kinematická viskozita $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	0,00001598

Tab. 4 Fyzikální vlastnosti média

### 2.3.2.2 Model turbulence

Při modelování turbulentního proudění se jako měřítko turbulence používá turbulentní energie (15),

$$K = \frac{1}{2} \overline{w_i w_i} = \frac{1}{2} (\overline{w_x^2} + \overline{w_y^2} + \overline{w_z^2}) \quad (15)$$

kteřá je v bezrozměrném tvaru vyjádřena stupněm turbulence  $Tu$  (18), zpravidla v procentech.

$$Tu = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} K}}{\bar{w}} = \frac{1}{\bar{w}} \sqrt{\frac{1}{3} (\overline{w_x^2} + \overline{w_y^2} + \overline{w_z^2})} \quad (16)$$

V případě isotropního proudění pak platí  $Tu = I_{zr}$  (12).

Výpočet je založen na Reynoldsově středované pohybové rovnici (RANS), kde významnou roli, charakterizující turbulenci, hraje tenzor napětí. Tenzor je dán součtem středovaných součinů fluktuací rychlosti, teoreticky. Prakticky se tento problém koncentruje na výpočet turbulentní viskozity. Ta je v tomto případě řešena pomocí turbulentního modelu  $k - \omega SST$ . Tento model je definován dvěma transportními rovnicemi řešící turbulentní kinetickou energii  $K$  (17) a specifickou míru disipace (turbulentní frekvenci)  $\omega$  (18).

Tyto dvě lineární parciální diferenciální rovnice jsou upraveny do stacionárního a nestlačitelného tvaru.

$$\rho \bar{w}_k \frac{\partial K}{\partial k} = P - \rho \beta_{\infty}^* \omega K + \frac{\partial}{\partial k} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial k} \right] \quad (17)$$

$$\rho \overline{w}_k \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\alpha_\infty}{\nu_T} P - \rho \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial k} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial k} \right] + \frac{\rho 2(1 - F_1)}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial K}{\partial k} \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (18)$$

První člen na pravých stranách obou rovnic charakterizuje produkci diferencované funkce, kde P je vyjádřeno v (19), kde  $\tau_{kl}$  je smykové napětí. Druhé členy vyjadřují disipaci.

$$P = \min \left( \tau_{kl} \rho \frac{\partial \overline{w}_k}{\partial l}, 10 \rho \beta_\infty^* \omega K \right) \quad (19)$$

Třetí členy vyjadřují součty změn efektivní kinematické viskozity. Poslední člen v rovnici (18) vyjadřuje spojení výhod modelu  $k - \varepsilon$  a  $k - \omega$  ve zkratce SST (shear – stress – transport). Model  $k - \varepsilon$  vykazuje lepší výsledky u stěn a model  $k - \omega$  je výhodnější v proudě. Pomocí váhové funkce jsou oba tyto modely propojeny. Pomocné funkce a obsažené konstanty jsou uvedeny [3].

### 2.3.2.3 Okrajové podmínky

Na vstupu byla nastavena okrajová podmínka pressure-inlet. Hodnota tlaku byla vzata jako střední hodnota celkového tlaku  $p_{c0}$  z Prandtlovy sondy v rovině 0 dle Obr. 4. Na výstupu byla nastavena okrajová podmínka pressure-outlet. Tento statický tlak byl laděn podle rychlostního profilu z Obr. 16 v rovině Pitotovy sondy (absolutní hodnota rychlosti byla vzata z drátkové sondy), dle Obr. 18.

Celkový tlak $p_{c0}$ [Pa]	100957
Statický tlak - náběžná hrana $p_{sn}$ [Pa]	100660
Stupeň turbulence Tu [%] (vstup, výstup)	1,856
$\beta = \nu_T/\nu$ [-] (vstup, výstup)	1

Tab. 5 Okrajové podmínky - 2D výpočet

Vztahy mezi turbulentní kinetickou energií K, popř. specifickou mírou disipace  $\omega$  a intenzitou turbulence, popř. poměrem  $\beta$  jsou uvedeny v rovnicích (20) a (21).

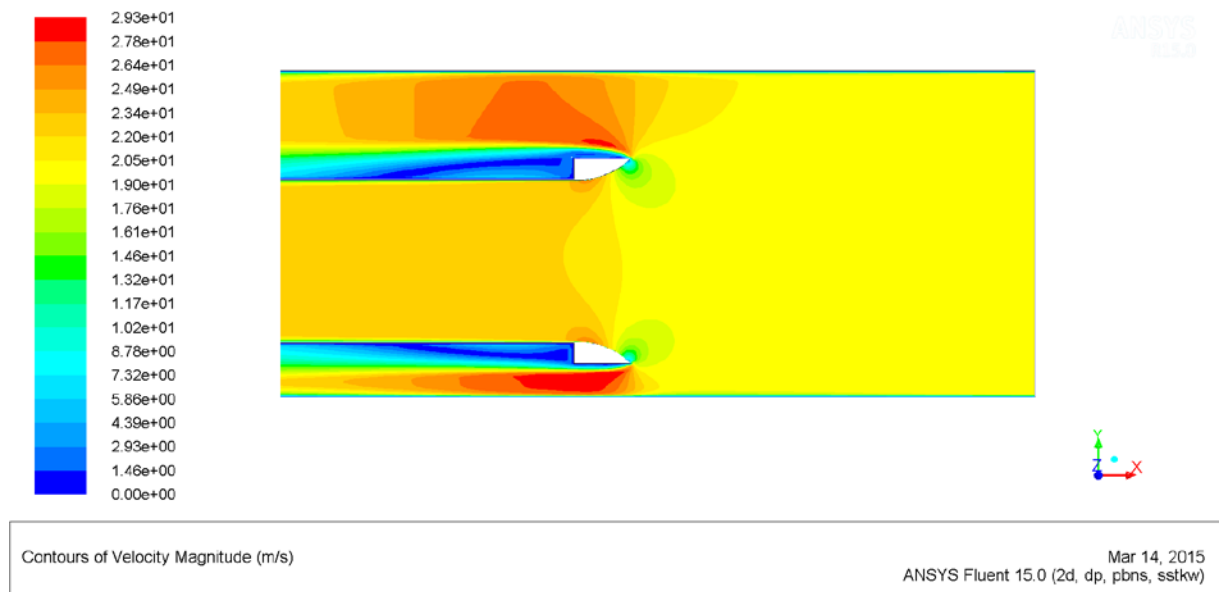
$$K = \frac{3}{2} (\overline{w} Tu)^2 \quad (20)$$

$$\omega = \frac{0,09K}{\beta \nu} \quad (21)$$

### 2.3.3 Výsledek a vyhodnocení výpočtu

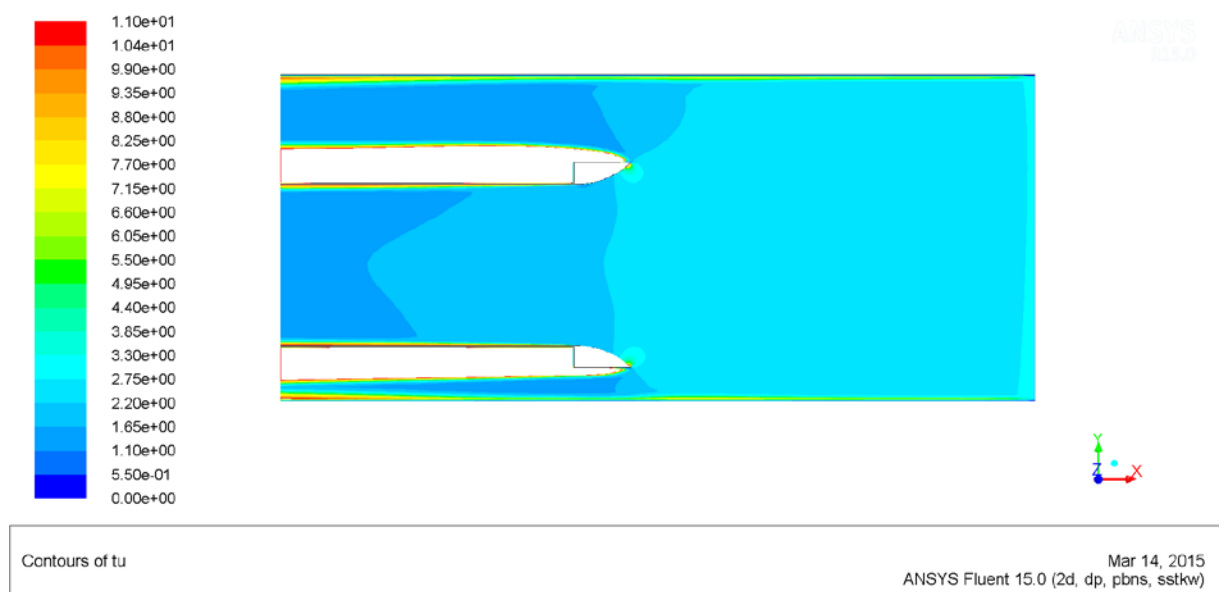
Výsledkem bylo vyhodnocení mezní vrstvy v oblasti drátkové sondy a náběžné hrany. Dále pak nastavení okrajových podmínek charakterizující turbulenci, která byla sledována v celé výpočtové oblasti a především v oblasti pohybu drátkové sondy.

Na následujícím Obr. 19 je vykresleno rychlostní pole, které bylo nastaveno podle výše uvedených okrajových podmínek vycházejících z experimentu.



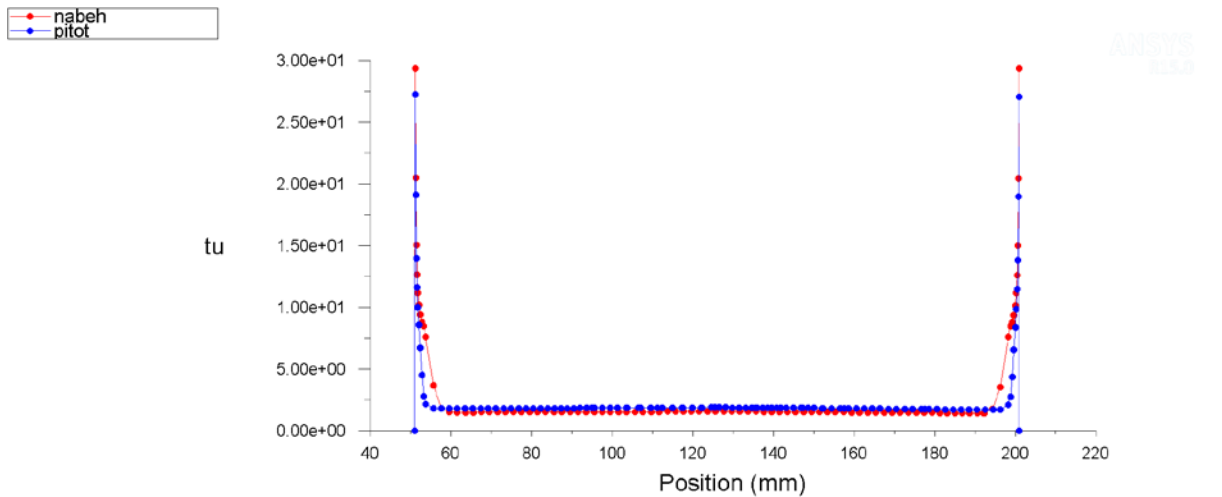
Obr. 19 Rychlostní pole

Dále na následujícím poli izochar na Obr. 20 je vykreslen stupeň turbulence, který odpovídá experimentálním hodnotám ve sledované oblasti pohybu CTA sondy.



Obr. 20 Stupeň turbulence Tu (definovaný rozsah)

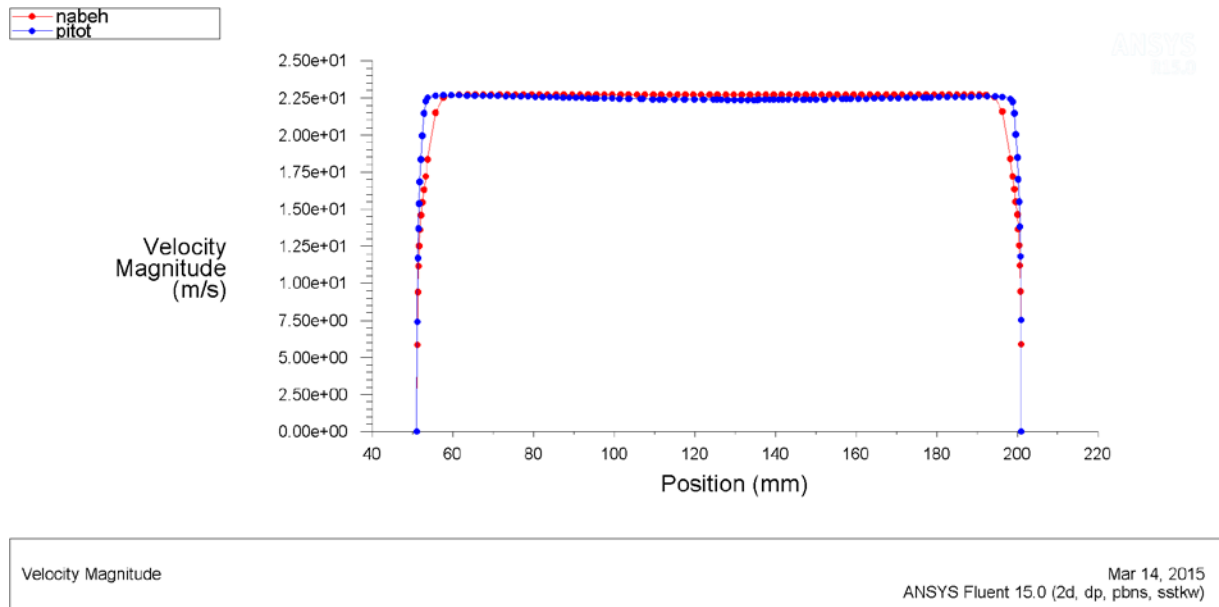
Na Obr. 21 je vykreslen graf stupně turbulence po šířce kanálu v oblasti náběžné hrany (červeně) a drátkové sondy (modře). X-ová osa je posunuta o 51 mm (sledovaná oblast po výšce lopatky je 150 mm).



tu  
 ANSYS FLUENT  
 Mar 14, 2015  
 ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, sstk)

**Obr. 21 Stupeň turbulence po šířce kanálu – turbulentní model SST k- $\omega$**

Na Obr. 22 jsou vykresleny rychlostní profily v oblasti drátkové sondy (modře) a v oblasti náběžné hrany (červeně). V Tab. 6 jsou vyhodnoceny mezní vrstvy stejnou metodou jako u drátkové sondy nebo Pitotovy sondy. Při pohledu na Tab. 3 je vidět jistá podobnost v datech z drátkové sondy. Dále je vidět z Tab. 6 že ztráta k náběžné hraně lopatky výrazně vzrostla.



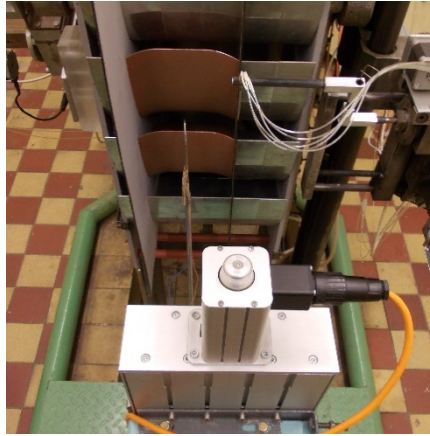
Obr. 22 Rychlostní profily – turbulentní model SST k- $\omega$

Tloušťky mezních vrstev [mm]	Oblast drátkové sondy	Oblast náběžné hrany
Pošinovací tloušťka mezní vrstvy	0,59	1,55
Impulsní tloušťka mezní vrstvy	0,31	0,97
Energetická tloušťka mezní vrstvy	0,52	1,67
Ztráta v mezní vrstvě [%]	<b>0,69</b>	<b>2,23</b>

Tab. 6 Tloušťky mezních vrstev – turbulentní model SST k- $\omega$

### 3 INTENZITA TURBULENCE V DEFINOVANÉ ROVINĚ ZA ODTOKOVÝMI HRANAMI LOPATEK

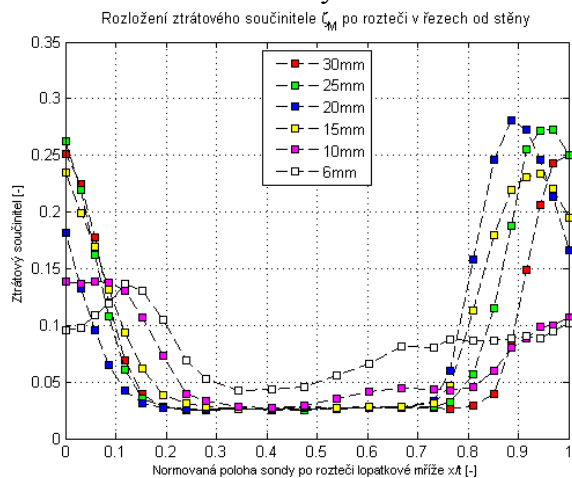
Pro uskutečnění tohoto měření bylo nutné přeskupit traverzovací zařízení do pracovní polohy pohybující se po rozteči lopatkové mříže, viz Obr. 23. Dále pak byl k drátkové sondě, jako i v předešlém případě, upevněn termistor pro časový záznam teploty.



Obr. 23 Traverzování po rozteči lopatkové mříže

### 3.1 Lopatková mříž s lopatkami VS33T

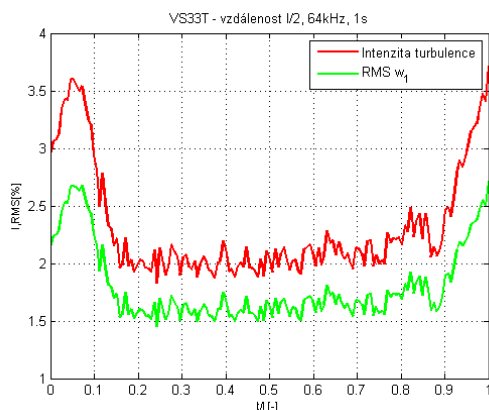
Měření probíhalo ve dvou řezech. Vzdálenost od roviny odtokových byla rovna 20% tětivy lopatky. Lopatková mříž s lopatkami VS33T byla proměřena ve středním řezu a ve vzdálenosti od stěny vykazující nejvyšší lokální ztrátu v sekundárním víru (bude popsáno níže), vycházející z grafu na Obr. 24. Na tomto grafu je vykreslen ztrátový součinitel na rozteči lopatkové mříže v šesti řezech od stěny.



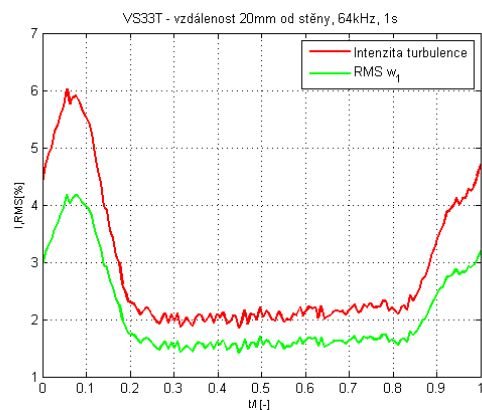
Obr. 24 Rozložení ztrátového součinitele po rozteči v řezech od stěny

Intenzita turbulence byla tedy proměřena ve středním řezu Obr. 25 a ve 20 mm od stěny Obr. 26. Rozteč byla zjištěna ve sledované rovině od minimální rychlosti v úplavu k následujícímu. Rovněž byly vyhodnoceny střední hodnoty intenzity uvedené v Tab. 7.





Obr. 25 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – intenzita turbulence ve vzdálenosti  $l/2$



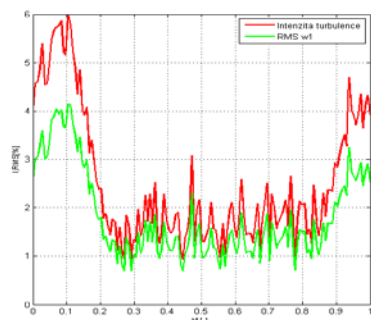
Obr. 26 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – intenzita turbulence ve vzdálenosti 20 mm od stěny

	Vzdálenost $l/2$	Vzdálenost 20 mm od stěny
Střední hodnota intenzity turbulence [%]	2,31	2,85

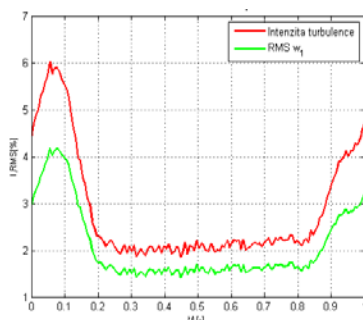
Tab. 7 Střední hodnota intenzity turbulence

### 3.1.1 Určení vzorkovací frekvence a doby sběru dat

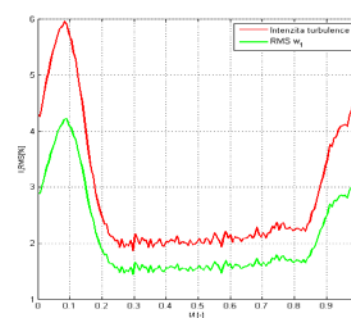
Vzorkovací frekvence byla nastavena na 64 kHz a následně byl sledován vliv doby sběru dat. Doba sběru dat byla sledována ve třech režimech. První sběr dat odpovídá časovému úseku 0,016s (1024 vzorků) Obr. 27, 1s (64000 vzorků) Obr. 28, 2s (128000 vzorků) Obr. 29. Z tohoto byla usouzena doba sběru dat rovnající se 1s jako nejvhodnější z hlediska použitelnosti výsledků a výpočetních možností.



Obr. 27 VS33T – vzdálenost 20 mm od stěny, 64 kHz, 0,016s



Obr. 28 VS33T – vzdálenost 20 mm od stěny, 64 kHz, 1s



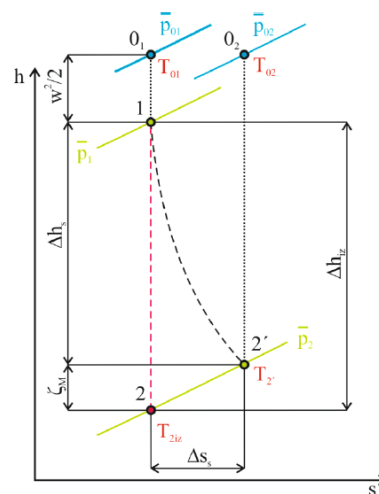
Obr. 29 VS33T – vzdálenost 20 mm od stěny, 64 kHz, 2s

## 4 ZTRÁTA PŘI EXPANZI VE SLEDOVANÉ ROVINĚ NA VÝSTUPU Z LOPATKOVÉ MŘIŽE - EXPERIMENT

### 4.1 Vyhodnocení ztrát při expanzi

#### 4.1.1 Definování místního ztrátového součinitele

Pro správné pochopení samotného vyhodnocení je třeba si rozebrat děje, které probíhají v mezilopátkovém kanálu. Pro snadnější pochopení je vhodné si tyto děje znázornit v diagramu h-s na Obr. 30.



Obr. 30 h-s diagram expanze média v mezilopátkovém kanálu

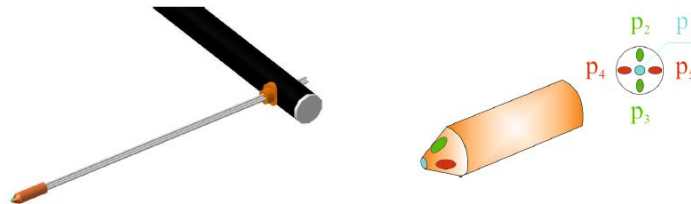
Jak je vidět z diagramu, byl učiněn předpoklad, že v průběhu expanze nedochází ke změně celkové entalpie. Tudíž nedochází k výměně tepla mezi médiem a mezilopátkovým kanálem. Expanze média po fiktivním zastavení proudu na vstupu expanduje ze středního statického tlaku  $\bar{p}_1$  do tlaku  $\bar{p}_2$ . Isoentropická expanze (červeně) a polytropická expanze (černě) s nárůstem ztráty o  $\Delta s_s$  je vykreslena na Obr. 30.

Ztrátový součinitel je dán rozdílem kinetické energie po izentropické expanzi a kinetické energie obsažené v proudícím médiu po skutečné expanzi normovaným kinetickou energií média po izentropické expanzi, viz vztah (22). Jelikož přímo měřenou veličinou jsou tlaky, je možné tento součinitel uvádět ve formě tlaků. Nicméně je nutné poznamenat, že níže uvedený vztah je platný jen pro předpoklad nestlačitelného proudění pracovního média, tzn. pro nízká Machova čísla  $Ma \lesssim 0,4$ .

$$\bar{\zeta}_M = 1 - \frac{\overline{w_{2s}^2}}{w_2^2|_s} = \frac{\bar{p}_{01} - \bar{p}_{02}}{\bar{p}_{01} - \bar{p}_2} \quad (22)$$

#### 4.1.2 Vyhodnocení tlaků a výstupních úhlů proudu

V rovině 2, dle Obr. 4, se nachází pětiotvorová kuželová sonda o průměru 3 mm. Díky malému průměru je ovlivnění proudu minimální. Tato sonda sbírá pět tlaků dle Obr. 31.



Obr. 31 Pětiotvorová kuželová sonda

Výpočetní metoda pro výpočet  $\overline{p_{02}}$  a  $\overline{p_2}$  v rovnici (22) je založena na znalosti regresních funkcí, které se získají z kalibrace sondy. Definované koeficienty jsou pak funkcemi zmiňovaných regresních funkcí. Poté je možné kromě vypočtených tlaků získat i úhly vektoru rychlosti směřující na čelo sondy. Více informací o použité výpočetní metodě je možné nalézt v článku [1]. Díky této metodě není nutné sondu vyrovnávat v každém měřeném bodě do proudu. Prakticky by to nebylo ani možné, sondou je možné rotovat pouze v jedné ose.

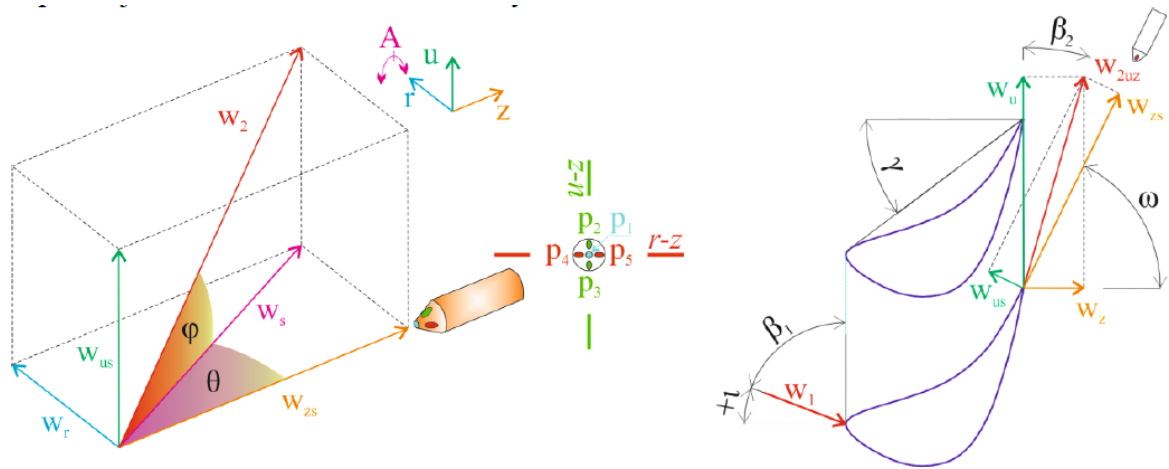
#### 4.1.3 Uvažování vlivu vlhkosti expandujícího média

Proudícím médiem je vlhký vzduch, tedy směs suché vzduchu a přehřáté vodní páry, proto je nutné zavést korekci na vlhkost. Ta se projeví ve změně hustoty směsi. Při měření jsou sbírána data v podobě relativní vlhkosti a teploty proudu. Odsud je možné určit tlak syté vodní páry a následně tlak směsi (tlak syté vodní páry a suchého vzduchu) podle Daltonova zákona. Pro samotný výpočet hustoty vlhkého vzduchu je třeba rovněž vypočítat měrnou vlhkost a individuální plynovou konstantu. Vztahy jsou uvedeny v [1].

#### 4.1.4 Rychlosti na výstupu z mříže

Výstupní rychlost z lopatkové mříže je možné vypočítat dle následujícího vztahu (23) za předpokladu, že není uvažován vliv stlačitelnosti média. Ze znalosti modulu vektoru rychlosti a jeho směru je možné jej rozložit do složek odpovídajících zvolenému souřadnému systému, viz Obr. 32. Aplikací goniometrických funkcí a úhlů získaných z regresních funkcí je možné získat zbývající vektory rychlostí, které jsou definovány v [1].

$$w_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{c2} - p_{s2})}{\rho_{vv}}} \quad (23)$$



Obr. 32 Souřadný systém lopatkové mříže a sondy

Důležitou informací lopatkové mříže je výstupní úhel proudu, jeho úhrnná hodnota integrovaná po rozteči a do poloviny výšky lopatky je definována v rovnici (24).

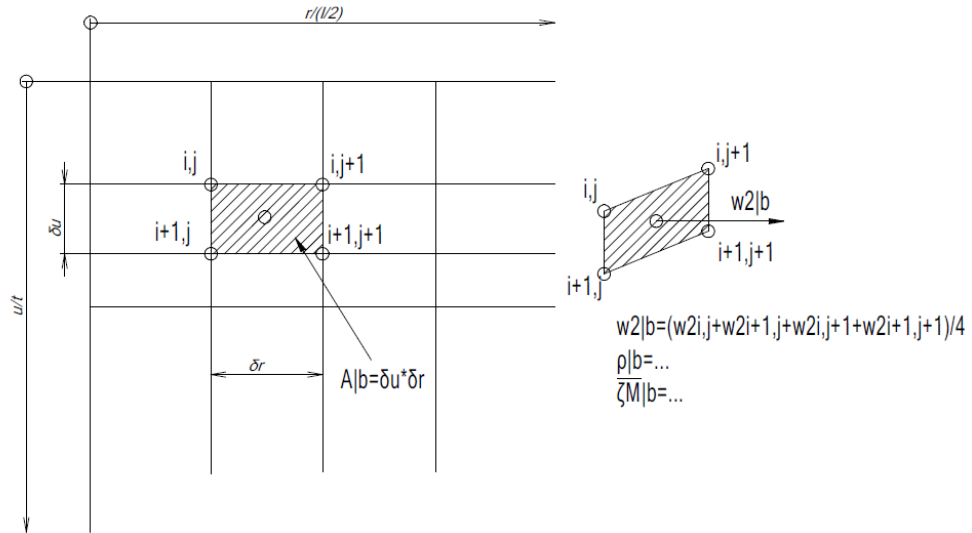
$$\beta_2^c = \arcsin \left( \frac{\int_0^{l/2} \int_0^t w_z \cdot du \cdot dr}{\int_0^{l/2} \int_0^t w_2 \cdot \cos \delta_2 \cdot du \cdot dr} \right) \quad (24)$$

#### 4.1.5 Redukce dat

Redukce dat slouží k získání jedné úhrnné hodnoty charakterizující v dané rovině ztrátu za lopatkovou mříží. Z rovnice (22) získáme pouze matici, popř. konturu rozložení ztrát, proto je nutné ke klasifikaci ztrát získat jednu směrodatnou hodnotu.

##### 4.1.5.1 Aplikace hmotnostního toku

Při traverzování ve sledované rovině pětiořadovou sondou je nastavena nerovnoměrná mřížka. Mřížka je zahuštěna v úplavech a u stěny. Hodnota ztrátového součinitele je vážena hmotnostním tokem. Získaná celková hodnota ztrátového součinitele je definována dle rovnice (25). Grafické znázornění této rovnice je na Obr. 33.



Obr. 33 Měřicí mřížka

$$\bar{\zeta}_M^C = \frac{\int_0^{l/2} \int_0^t \bar{\zeta}_M|_b \rho|_b w_2|_b du^2 dr^2}{\rho_{str} w_{2str} A} \quad (25)$$

#### 4.1.5.2 Aplikace zákonů zachování

Tato metoda vychází ze základních zákonů - zákona o zachování hmotnosti, toku energie a hybnosti. Zde bude uveden jen koncový vztah celkové místní ztráty (26). Touto metodou je rovněž možné vypočítat podobnostní čísla  $Ma$  (27) a  $La$  (28). Všechny pomocné veličiny jsou uvedeny v [4].

$$\bar{\zeta}_M^C = 1 - \frac{\bar{I}_M}{\theta_2 \sin \beta} \quad (26)$$

$$La = \left\{ \left( \frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \frac{I_A^2}{\bar{I}_M^2} \left[ \frac{1}{2} - \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \frac{\bar{I}_M^2}{I_A^2} + \frac{\kappa + 1}{2\kappa} \frac{I_O^2}{I_A^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \frac{\bar{I}_M^2}{I_A^2} + \frac{\kappa^2 - 1}{4\kappa^2} \frac{I_O^2}{I_A^2}} \quad (27)$$

$$Ma = \sqrt{\frac{2La^2}{(\kappa + 1) - La^2(\kappa - 1)}} \quad (28)$$

## 4.2 Profilové a okrajové ztráty

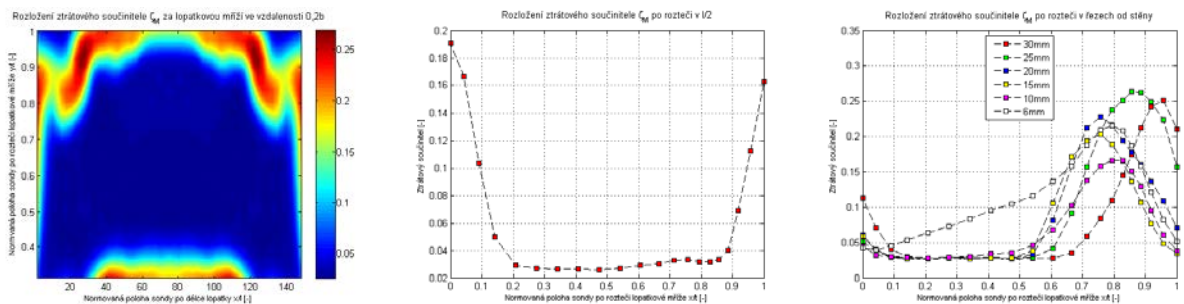
Na experimentu proběhlo měření ztrát při expanzi v lopatkové mříži charakterizující profilové a okrajové ztráty. Měření se provedlo ve sledované rovině rovnající se 20% délky tětivy lopatkového profilu za rovinou odtokových hran lopatek. Jinak řečeno v rovině vzdálené 40 mm od roviny odtokových hran lopatek v normálovém směru, viz Obr. 34. Tyto měření byly pak použity jako referenční ke sledování vlivu a rozložení ztrát se zvyšující se drsností povrchu. Rovněž byly tyto výsledky využity k porovnání výsledků se CFD.



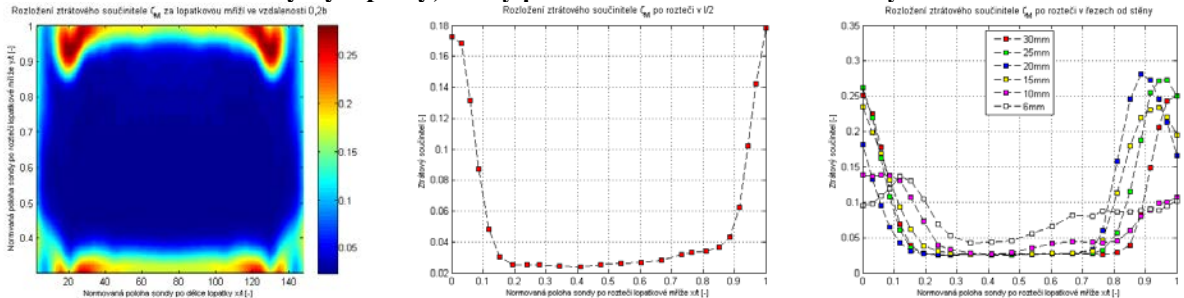
Obr. 34 Pohled na pětivotrovou sondu a traverzér

### 4.2.1 Rozbor lopatkové mříže s lopatkami VS33b a VS33T

Výstupní proudové pole je sledováno na definované rovině. Pole ztrát pro lopatkovou mříž s lopatkami VS33b je vykresleno v Tab. 8 a s lopatkami VS33T v Tab. 9. Dále je možné vyhodnotit profilové ztráty za předpokladu, že nejsou ovlivněny sekundárními víry. Teoreticky by lopatka měla být prizmatická a nekonečně dlouhá. Realizace by byla náročná, proto jsou zde vyhodnoceny profilové ztráty v polovině výšky lopatky, které jsou vykresleny na vedlejším grafu. Pro sledování okrajových ztrát a pro následné porovnávání je vhodné si vykreslit ztráty v definovaných vzdálenostech od stěny.

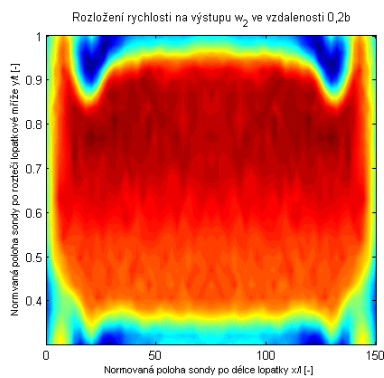


**Tab. 8 Lopatková mříž s lopatkami VS33b – rozložení ztrát v rovině 0.2b; ztráty po rozteči v polovině výšky lopatky; ztráty po rozteči ve vzdálenosti od stěny**

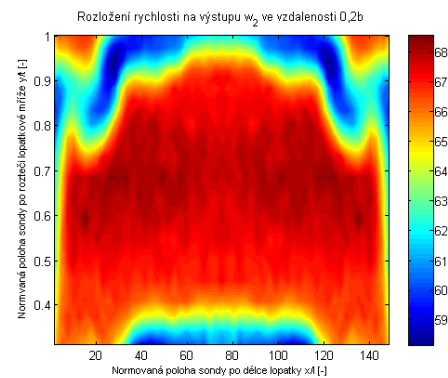


**Tab. 9 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - rozložení ztrát v rovině 0.2b; ztráty po rozteči v polovině výšky lopatky; ztráty po rozteči ve vzdálenosti od stěny**

Dále je nutné sledovat výstupní rychlost, z které je možné odhadnout výstupní ztrátu a rovněž nám poslouží k vyhodnocení výstupního  $Ma_2$ . Na Obr. 35 a Obr. 36 jsou vykresleny zmiňované rychlostní pole.

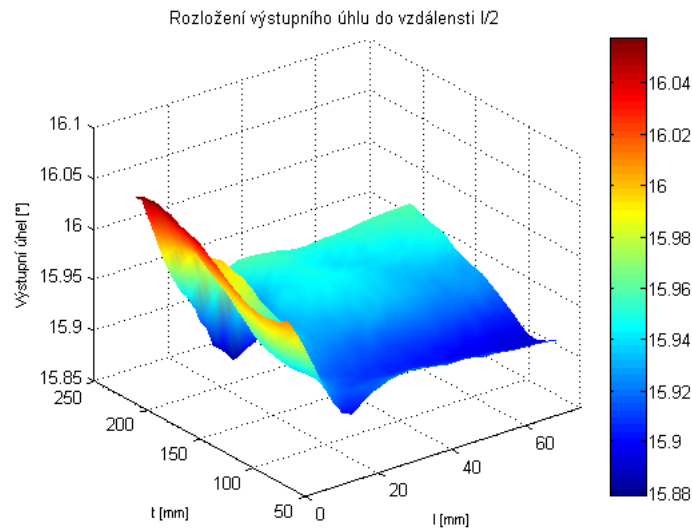


**Obr. 35 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – rozložení rychlosti na výstupu ve vzdálenosti 0.2b**



**Obr. 36 Lopatková mříž s lopatkami VS33b – rozložení rychlosti na výstupu ve vzdálenosti 0.2b**

Nezbytnou součástí vyhodnocení je výstupní úhel z lopatkové mříže  $\alpha_2$ , který je pro názornost vykreslen na Obr. 37.



Obr. 37 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – rozložení výstupního úhlu z lopatkové mříže

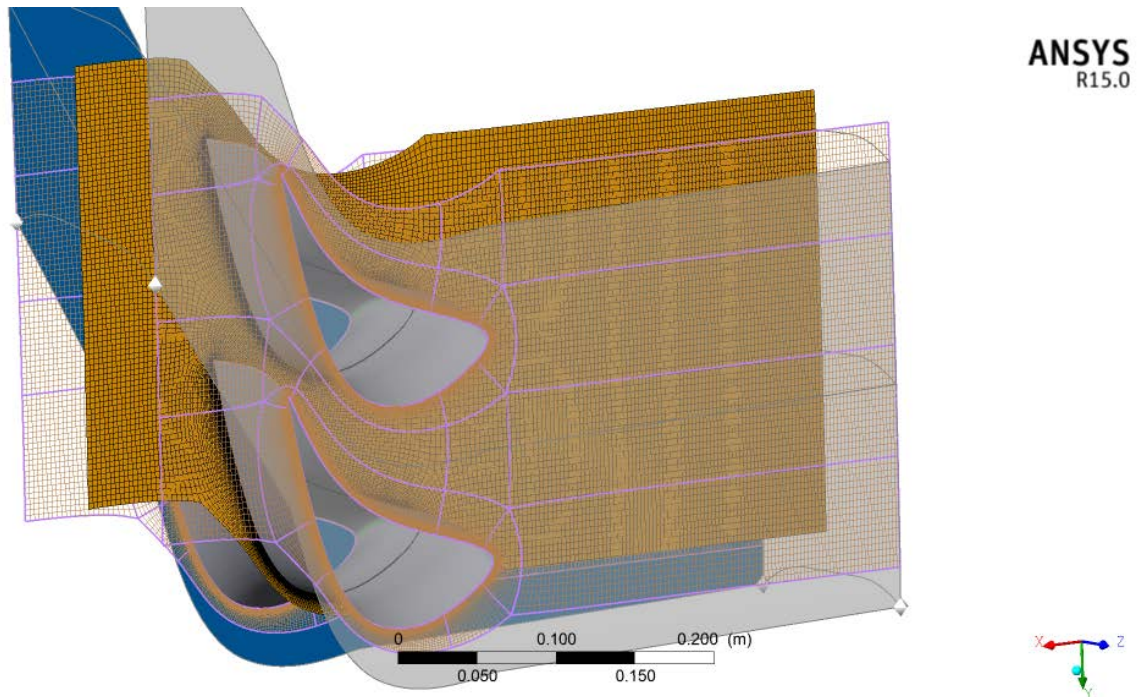
## 5 ZTRÁTA PŘI EXPANZI VE SLEDOVANÉ ROVINĚ NA VÝSTUPU Z LOPATKOVÉ MŘÍŽE – CFD

Třírozměrné subsonické proudění v přímé lopatkové mříži s profilem lopatek VS33 s poměrnou roztečí lopatek  $t/c = 0,7$  při úhlu náběhu  $\alpha_1 = 0^\circ$  bylo vypočteno pomocí komerčního softwaru Fluent.

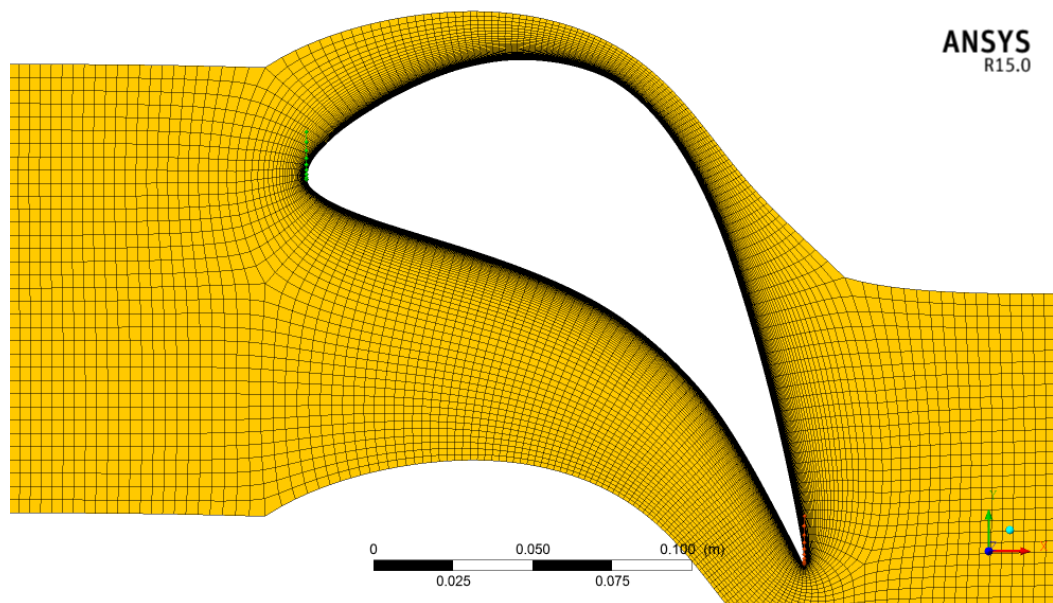
### 5.1 Vytvoření výpočtové oblasti a diskretizace

Pro tento případ bylo nejprve nutné vytvořit soubor popisující parametrickými body danou lopatku. Následně byla vytvořena výpočetní oblast v programu Turbogrid implementovaného v programu ANSYS. Tato oblast koresponduje kromě charakteristických parametrů lopatkové mříže i délkou vstupního kanálu. Vzhledem k výpočetní kapacitě byl nastaven celkový počet buněk diskretizované výpočetní oblasti na hodnotu pohybující se okolo jednoho milionu. Rovněž bylo nastaveno jemné dělení buněk u stěn a na povrchu lopatky. Kvalita diskretizované oblasti je patrná z Obr. 39.





Obr. 38 Výpočetní oblast lopatkové mříže



Obr. 39 Pohled na síť v okolí profilu v polovině výšky lopatky

## 5.2 Matematický model a okrajové podmínky

Výpočet je založen na Reynoldsově středované pohybové rovnici (RANS), kde významnou roli, charakterizující turbulenci, hraje tenzor napětí. Tenzor je dán součtem středovaných součinů fluktuací rychlosti, teoreticky. Prakticky se tento problém koncentruje na výpočet turbulentní viskozity. Ta je v tomto případě řešena pomocí turbulentního modelu  $k - \omega SST$ .

Tento model je definován dvěma transportními rovnicemi řešící turbulentní kinetickou energii (17) a specifickou míru disipace (18), jak je uvedeno výše.

Fyzikální vlastnosti viz Tab. 4, pouze hustota zde není uvažována konstantní. Hustota je zde řešena podle rovnice ideálního plynu. Toto je učiněno z důvodu následného sledování Machova čísla.

Okrajové podmínky byly nastaveny dle experimentu, viz Tab. 10.

	Vstupní doména	Výstupní doména
Celkový tlak [Pa]	100957	-
Statický tlak [Pa]	-	97400
Celková teplota [K]	297,15	297,15
Intenzita turbulence [%]	1,856	1,856
Hydraulický rozměr [mm]	140	140

Tab. 10 Okrajové podmínky - 3D výpočet

### 5.3 Výsledky výpočtu

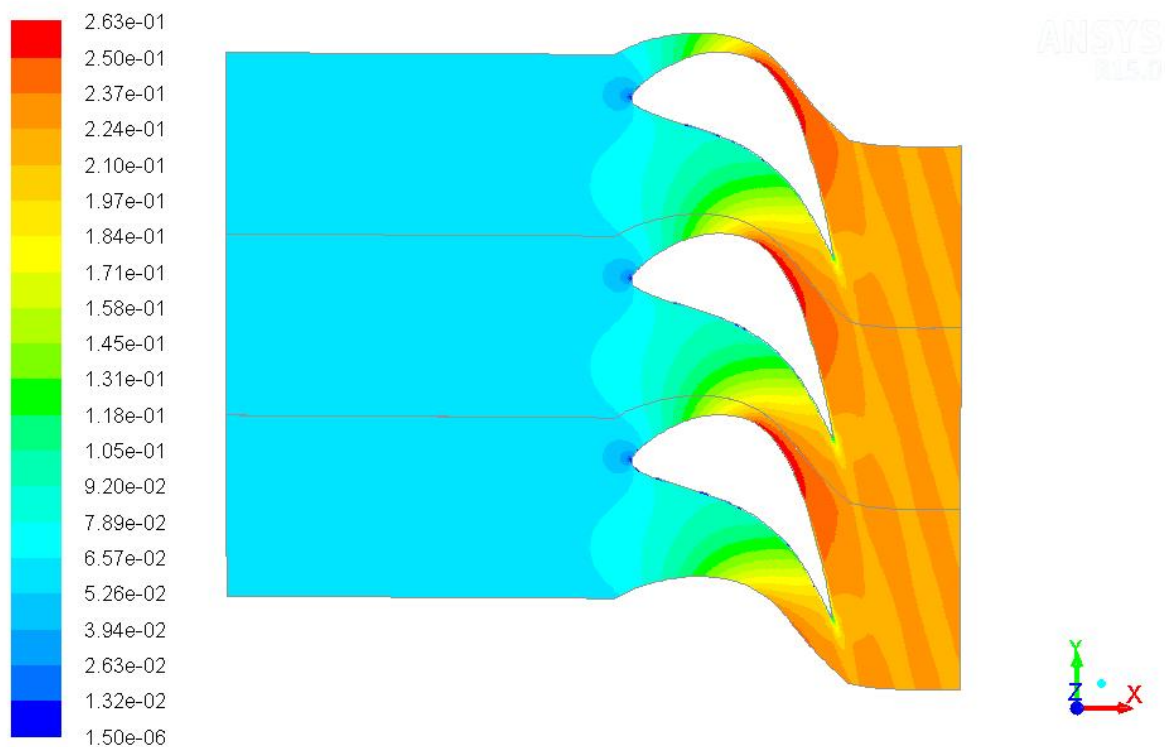
První sledovanou veličinou charakterizující rychlost expandujícího média je Machovo číslo na výstupu. Pomocí vstupního celkového tlaku  $p_{01}$  a statického výstupního tlaku  $p_2$  je možné dopočítat isoentropické Machovo expandující v konvergentní dýze (29).

$$Ma_{zis} = \sqrt{\left[ \left( \frac{p_{01}}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \frac{2}{\kappa-1}} \quad (29)$$

Další sledovanou veličinou je stupeň turbulence a místní ztráta dle vztahu (22). Veličiny jsou sledovány v rovině rovnající se polovině výšky lopatky a v rovině odpovídající 20% délky tětiny lopatky za rovinou odtokových hran lopatek v normálovém směru.

#### 5.3.1 Rozbor v polovině výšky lopatky

V polovině výšky lopatky se prakticky jedná o dvoudimenzionální proudění, které je u obou lopatek totožné. Proto jsou lopatky v této rovině vyhodnoceny souběžně. Na Obr. 40 je znázorněno proudové pole pomocí izochar Machových čísel pro  $Re_{zis} = 8,8 \times 10^5$  a  $Ma_{zis} = 0,24$ .

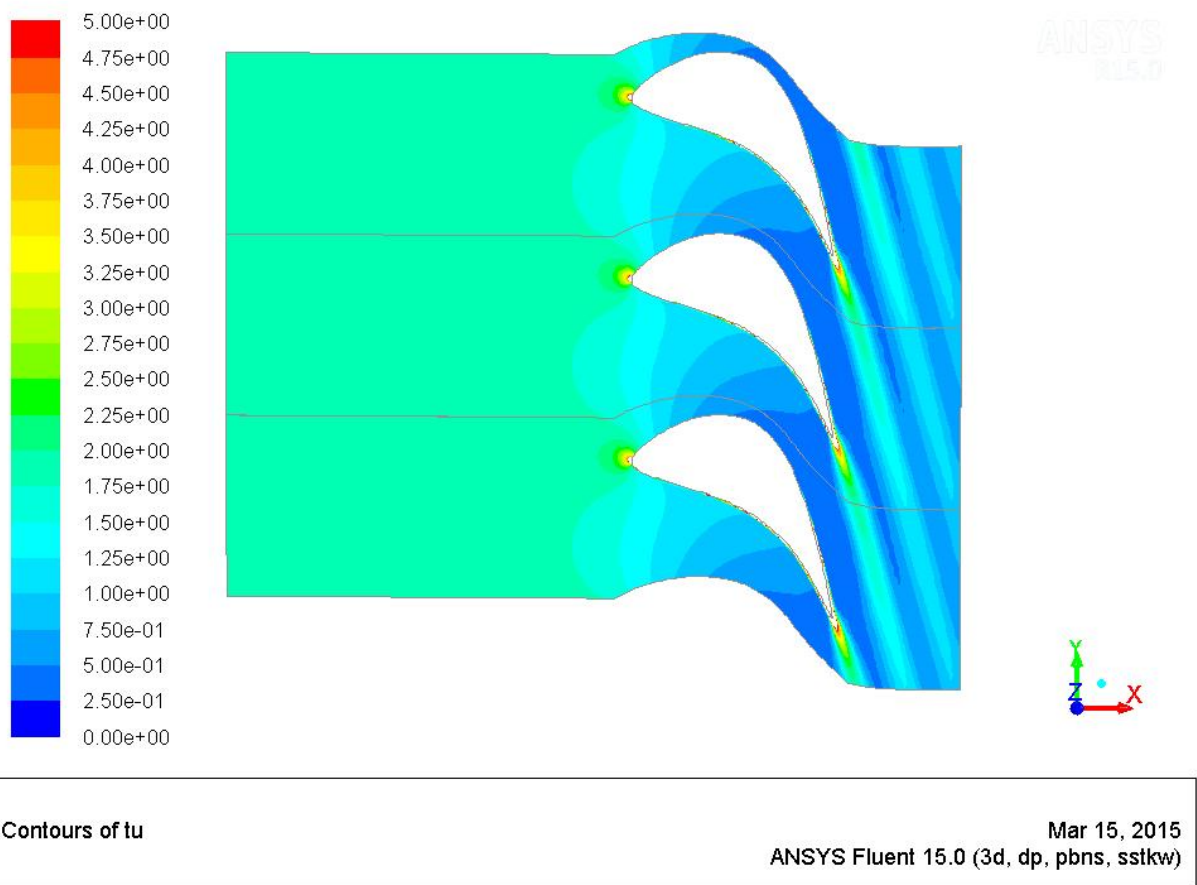


Contours of Mach Number

Mar 15, 2015  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, sstk)

**Obr. 40 Pole izočar Machových čísel pro  $Re_{2is} = 8,8 \times 10^5$  a  $Ma_{2is} = 0,24$**

Na následujícím Obr. 41 je vykreslen stupeň turbulence  $Tu$  v polovině výšky lopatky. Rozsah izočar je nastaven dle obrázku.

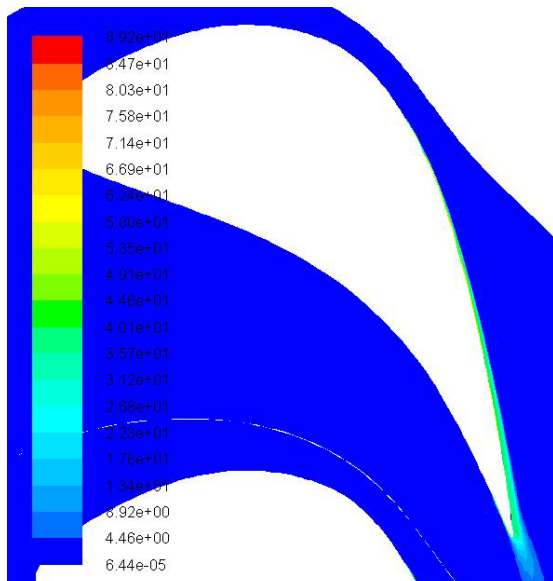


Obr. 41 Stupeň turbulence  $Tu$  v polovině výšky lopatky

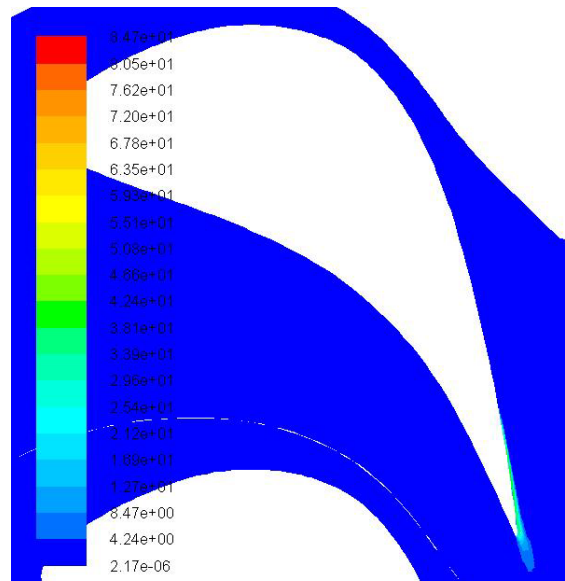
### 5.3.1.1 Porovnání modelu $k-\omega$ SST a tohoto modelu včetně $\gamma$ -Re přechodu turbulence

Na povrchu lopatky od náběžné hrany se bude vyvíjet laminární mezní vrstva s následným přechodem do turbulence. Místo, ve kterém se to stane, je velmi obtížné matematicky popsat. V programu Fluent je možné využít  $\gamma$ -Re přechodu turbulence ve spojení s modelem  $k-\omega$  SST. Standardní model je rozšířen dalšími dvěma transportními rovnicemi pro  $\gamma$  a  $Re$ . Proto je tento model náročnější na výpočetní techniku.

Na Obr. 42 je vidět vznik turbulentní kinetické energie  $K$  na podtlakové straně lopatky pomocí modelu  $k-\omega$  SST turbulence. Dále na Obr. 43 je vidět totéž s použitím  $\gamma$ -Re přechodu. Z porovnání obou kontur je vidět zjevný rozdíl vzniku turbulentní mezní vrstvy.



Obr. 42 Pole izočar turbulentní kinetické energie K, model K- $\omega$  SST



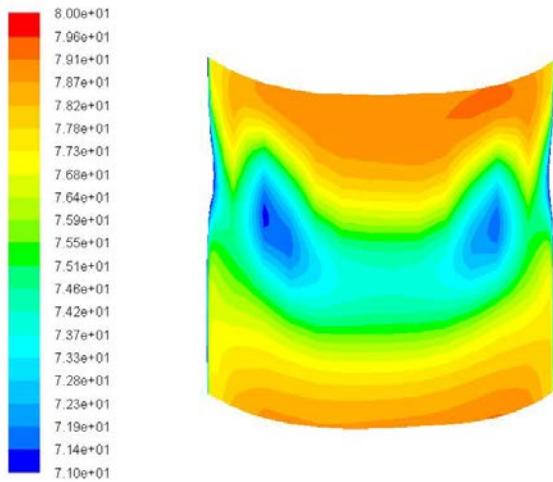
Obr. 43 Pole izočar turbulentní kinetické energie K, model K- $\omega$  SST včetně  $\gamma$ -Re přechodu

### 5.3.2 Rozbor lopatkových mříží s lopatkami VS33b a VS33T

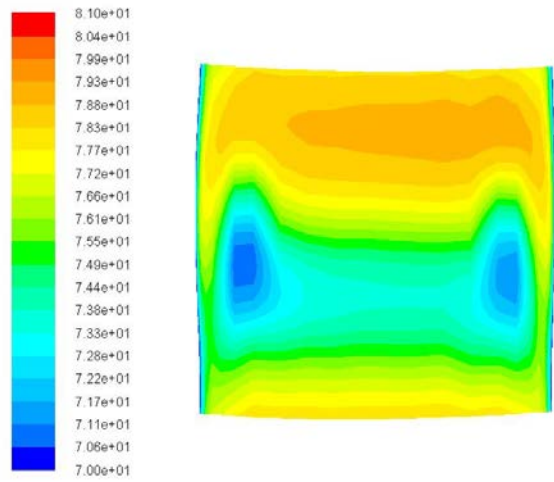
Lopatková mříž v polovině výšky lopatky je shodná u obou lopatek, jak bylo uvedeno výše. Nicméně v radiálním řezu, tedy v řezu kolmém na směr proudění, je třeba vyhodnotit obě lopatky separátně. Vyhodnocení bude směřováno k vyhodnocení profilových a okrajových ztrát ve sledované rovině za rovinou odtokových hran lopatek.

Vzhledem k velkému rozdílu vzniku turbulentní mezní vrstvy na podtlakové straně lopatky u obou modelů, tedy mezi modelem K- $\omega$  SST a modelem K- $\omega$  SST včetně  $\gamma$ -Re přechodu, budou vyhodnoceny ztráty pro oba případy.

Na Obr. 44 a Obr. 45 je vidět rychlostní pole v rovině odpovídající 20% délky tělvy za rovinou odtokových hran lopatek posunutě v normálovém směru, dále označováno 0.2b. Mírná nesymetričnost proudového pole je způsobena zakřivením lopatkové mříže. U experimentu samozřejmě žádné zakřivení nevzniká. Ovšem pro snazší a kvalitnější síť vytvořenou v programu TurboGrid, bylo nutné vytvořit rotační periodicitu, která se limitně blíží mříži rovinné. Průhyb jednoho mezilopatkového kanálu činí 0,97mm.

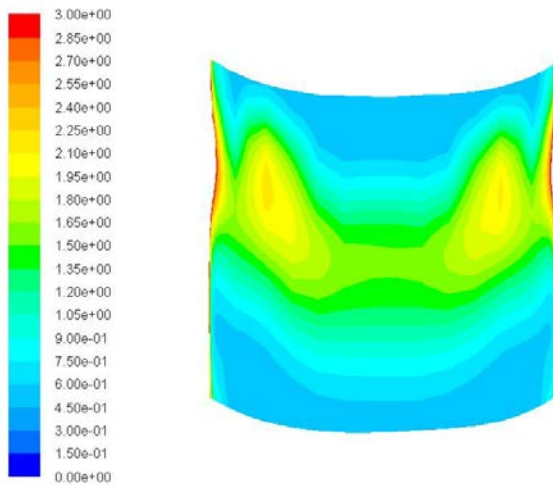


**Obr. 44 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - rychlostní pole v rovině 0.2b**

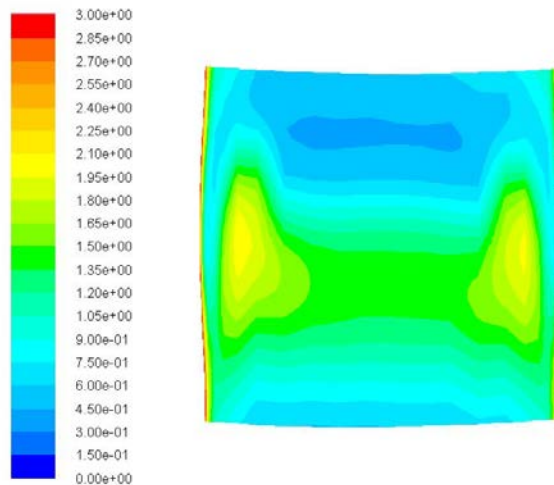


**Obr. 45 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - rychlostní pole v rovině 0.2b**

Na Obr. 46 a Obr. 47 je vykreslen stupeň turbulence ve sledované rovině 0.2b. Lepší představu nám poskytnou grafy uvedené níže.

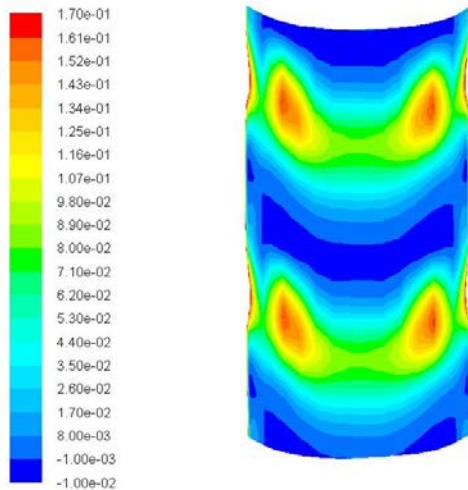


**Obr. 46 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - stupeň turbulence v rovině 0.2b**

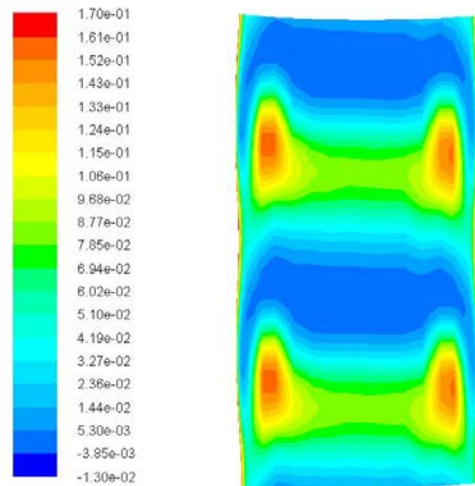


**Obr. 47 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - stupeň turbulence v rovině 0.2b**

Poslední sledovaný parametr vykreslený na Obr. 48 a Obr. 49, zde je vidět pole izočar místního ztrátového součinitele celkového tlaku.

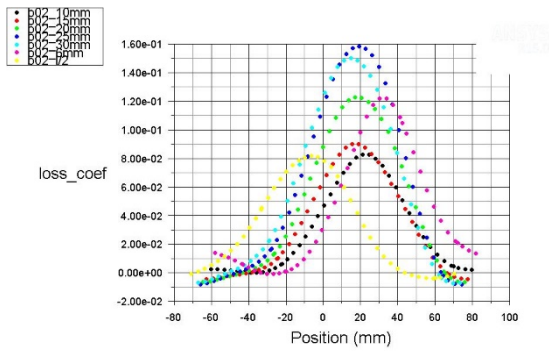


**Obr. 48** Lopatková mříž s lopatkami VS33b -  
 izočáry místního ztrátového součinitele celkového  
 tlaku  $\bar{\zeta}_M$



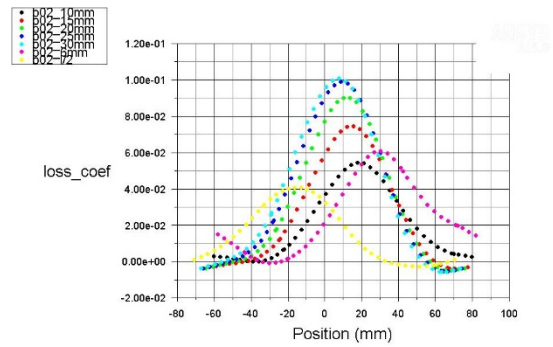
**Obr. 49** Lopatková mříž s lopatkami VS33T -  
 izočáry místního ztrátového součinitele celkového  
 tlaku  $\bar{\zeta}_M$

Pro porovnání výpočtu s experimentem je třeba sledovat veličiny po rozteči lopatkové mříže v definované rovině  $0.2b$ . Na Obr. 50 až Obr. 53 je vidět závislost místního ztrátového součinitele na rozteči, a to ve vzdálenosti 6, 10, 15, 20, 25 a 30 mm od stěny. Rovněž je veličina sledována v polovině výšky lopatky, charakterizující profilové ztráty. Pro upřesnění, každá z vykreslených křivek je po rozteči 140 mm.



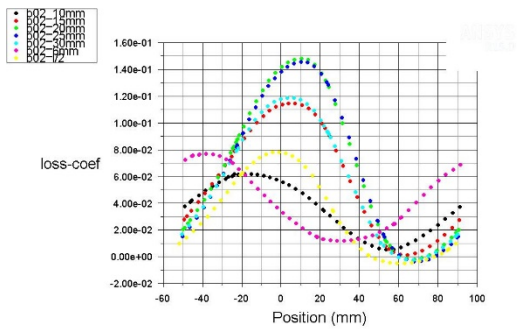
loss\_coef  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, sstk) Mar 17, 2015

**Obr. 50** Lopatková mříž s lopatkami VS33b -  
místní ztrátový součinitel  $\bar{\zeta}_M$  na rozteči - model K-  
 $\omega$  SST



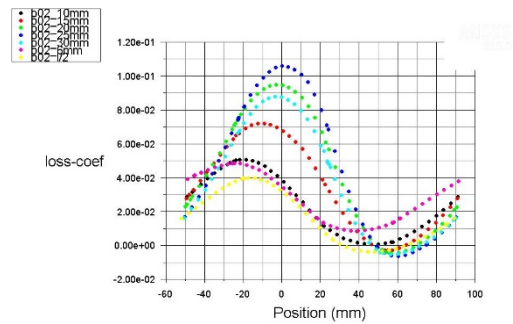
loss\_coef  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, trans-sst) Mar 17, 2015

**Obr. 51** Lopatková mříž s lopatkami VS33b -  
místní ztrátový součinitel  $\bar{\zeta}_M$  na rozteči -model K-  
 $\omega$  SST včetně  $\gamma$ -Re přechodu



loss\_coef  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, sstk) Mar 19, 2015

**Obr. 52** Lopatková mříž s lopatkami VS33T -  
místní ztrátový součinitel  $\bar{\zeta}_M$  na rozteči - model K-  
 $\omega$  SST

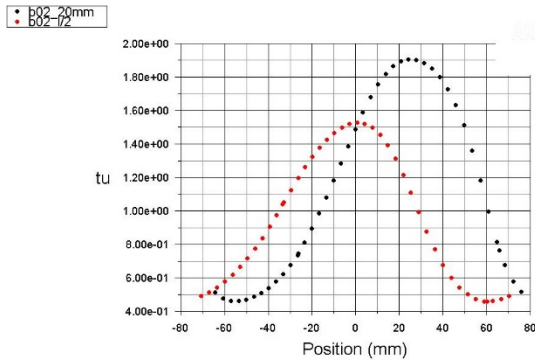


loss\_coef  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, trans-sst) Mar 19, 2015

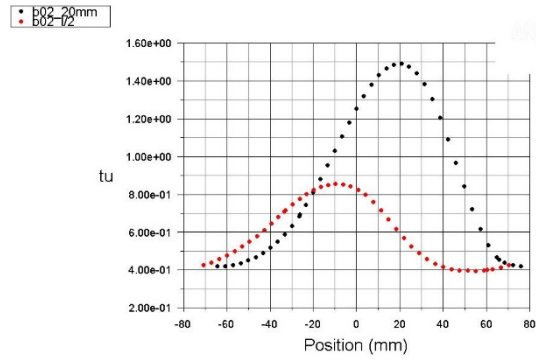
**Obr. 53** Lopatková mříž s lopatkami VS33T -  
místní ztrátový součinitel  $\bar{\zeta}_M$  na rozteči -model K-  
 $\omega$  SST včetně  $\gamma$ -Re přechodu



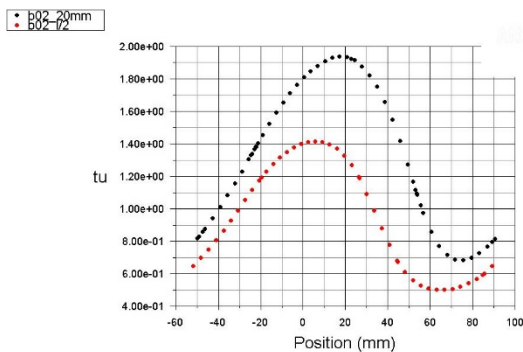
Pro následné porovnání je rovněž důležité vykreslit závislost pro následné porovnání stupně turbulence s intenzitou naměřenou na experimentu. Na Obr. 54 a Obr. 57 je vykreslena závislost stupně turbulence na rozteči.



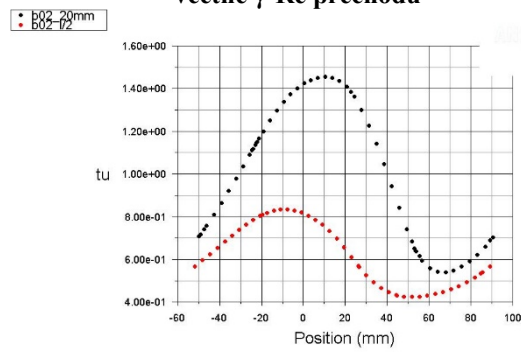
tu Mar 19, 2015  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, sstkvw)  
**Obr. 54 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - stupeň turbulence Tu na rozteči - model K- $\omega$  SST**



tu Mar 19, 2015  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, trans-sst)  
**Obr. 55 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - stupeň turbulence Tu na rozteči - model K- $\omega$  SST včetně  $\gamma$ -Re přechodu**



tu Mar 19, 2015  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, sstkvw)  
**Obr. 56 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - stupeň turbulence Tu na rozteči - model K- $\omega$  SST**



tu Mar 19, 2015  
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, trans-sst)  
**Obr. 57 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - stupeň turbulence Tu na rozteči - model K- $\omega$  SST včetně  $\gamma$ -Re přechodu**

## 6 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH DAT

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot bude sledováno z pohledu turbulence a profilových, popř. profilových a okrajových ztrát. Tyto pohledy jsou spolu úzce spjaty, protože vznik turbulence neboli zavíření za odtokovou hranou má za následek lokální pokles rychlosti. Maření kinetické energie při expanzi je doprovázeno patřičnými ztrátami.

Zde je důležité si uvědomit, že nárůst laminární mezní vrstvy a následný přechod do turbulence vzniká nejen na površích lopatky, ale i u stěn, kde je významným parametrem délka vstupního kanálu. Otázkou zůstává, jaká je tloušťka mezní vrstvy u náběžné hrany lopatky a jaký má turbulentní charakter. Jediné dostupné výsledky jsou získány z 2D výpočtu,

kde ztráta v mezní vrstvě je vypočtena v Tab. 6. Proto je dobré si uvědomit, že na výstupu z lopatkové mříže dochází k interakci mezi tvořící se mezní vrstvou u stěny, která byla do jisté míry vyvinutá u náběžné hrany, a vrstev tvořících se na povrchu lopatky. Následné zavíření je doprovázeno okrajovými ztrátami.

Výše bylo objasněno jakým způsobem a kde se provedlo měření fluktuace rychlosti na výstupu, z které se následně vypočetla intenzita turbulence. V případě izotropního proudění je možné tyto data porovnávat se stupněm turbulence z proudového výpočtu. Na Obr. 25 a Obr. 26 jsou vykresleny data z experimentu měřené na lopatkové mříži s lopatkami VS33T, které následně porovnáme s vypočtenými hodnotami turbulence s využitím modelu turbulence K- $\omega$  SST Obr. 56 a tohoto modelu včetně přechodu  $\gamma$ -Re Obr. 57. Zde je patrné, že vypočtené hodnoty turbulence jsou nižší v úplavu tak i v oblasti s minimálními ztrátami. Za předpokladu minimální nejistoty měření je třeba se zaměřit na použitý turbulentní model. Konkrétně tedy na produkční a disipační členy ve dvou transportních diferenciálních rovnicích, které částečně vychází z experimentálních poznatků.

Následně byly sledovány ztráty, kde vzájemné porovnání mezi experimentem a 3D výpočtem je uvedeno v Tab. 11. Hodnoty charakterizují střední hodnotu ztrátového součinitele  $\overline{\zeta}_M^C$  (25), který je tedy vážen hmotnostním tokem. U experimentu i u výpočtu je ztráta vyhodnocena stejným způsobem. V případě profilových ztrát se pouze integruje po rozteči v polovině výšky lopatky. Následně byly profilové ztráty vyhodnoceny i za použití základních zákonů zachování. Hodnoty zde uvedeny nejsou, protože výsledky prokazovaly nízkou věrohodnost, nejspíše kvůli nedostatečně kvalitním zdrojovým datům pro tuto sofistikovanější metodu.

Z vypočtených hodnot je patrné, že výsledky z 3D výpočtu vykazují ztrátu nižší. Pokud jde o porovnání turbulentních modelů, je patrné, že vliv přechodu je významný. Tohoto jsme si mohli povšimnout na poli izochar turbulentní kinetické energie na Obr. 42 a Obr. 43.

	Experiment		Výpočet			
	Profilové ztráty [-]	Profilové a okrajové ztráty [-]	Profilové ztráty [-]		Profilové a okrajové ztráty [-]	
			K- $\omega$ SST	K- $\omega$ SST + $\gamma$ -Re	K- $\omega$ SST	K- $\omega$ SST + $\gamma$ -Re
VS33b	4,47	7,21	2,95	1,46	4,55	2,9
VS33T	4,41	6,29	3,3	1,75	5,1	3,34

Tab. 11 Porovnání ztrát pro lopatkové mříže s lopatkami VS33b a VS33T

## 7 VLIV DRSNOSTI POVRCHU LOPATKY NA PROFILOVÉ A OKRAJOVÉ ZTRÁTY

### 7.1 Data získaná experimentálně

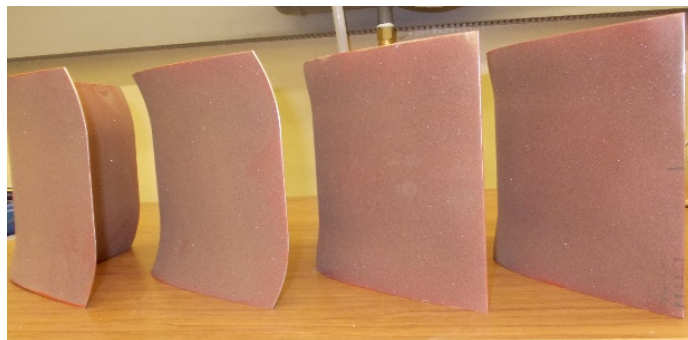
#### 7.1.1 Nanášení brusiva na povrch lopatky

Prvním z úkolů, při měření ztrát v závislosti na drsnosti, byl způsob zdrsňování povrchu. Nanášení drsnosti vhodnou metodou bez znehodnocení povrchů lopatky vyžadovalo určité úsilí. Nejprve bylo využito brusiva a pojiva k výrobě smirkového papíru. Tato metoda se neosvědčila z důvodu čištění povrchu. Následně bylo brusivo nanášeno na povrch lopatky

pomocí barvy ředitelné nitridovým rozpouštědlem. Tento způsob se osvědčil z hlediska stability drsnosti tak i omyvatelnosti.

Simulování zvýšené drsnosti bylo uskutečněno nanesením zrn brusiva označené dle normy FEPA. Dle normy je brusivo děleno podle rozsahu velikosti zrn, které prošly sítí s defilovanou velikostí otvorů. Pro samotné měření bylo vybráno pět drsností charakteristické velikostí zrna brusiva, viz Tab. 12. Jedna z použitých drsností je patrná na Obr. 58.

Dále na následujících obrázcích Obr. 59 a Obr. 60 jsou vidět ustavené zdrsněné lopatky v mříži. Proměřoval se vždy jen jeden mezilopátkový kanál, proto jsou vždy zdrsněny jen dvě lopatky.



Obr. 58 Nanesená drsnost (VS33b – vlevo, VS33T – vpravo)



Obr. 59



Obr. 60

### 7.1.2 Měření drsnosti lopatek

Následné proměření střední aritmetické úchytky drsnosti povrchu bylo provedeno drsnoměrem TESA RUGOSURF 20, Obr. 61. Po důkladném proměření se dospělo ke střední

hodnotám dle Tab. 12. Měření drsnosti se provedlo vždy na podtlakové i přetlakové straně od náběžné hrany až k odtokové hraně. Následně byla vytvořena přibližná střední hodnota.

Norma FEPA	Velikost zrna[ $\mu\text{m}$ ]	$\sim\text{Ra}[\mu\text{m}]$
F320	45 - 32	13
F180	90 - 75	20
F100	150 - 125	30
F70	250 - 212	36
F40	500 - 425	40

**Tab. 12 Použité brusivo a naměřené drsnosti**

Původní drsnost lopatek je důkladně proměřena ve zprávě [5] a střední hodnoty jsou uvedeny v Tab. 13.

	$\sim\text{Ra}[\mu\text{m}]$
VS33b	0,54
VS33T	0,45

**Tab. 13 Drsností lopatek**

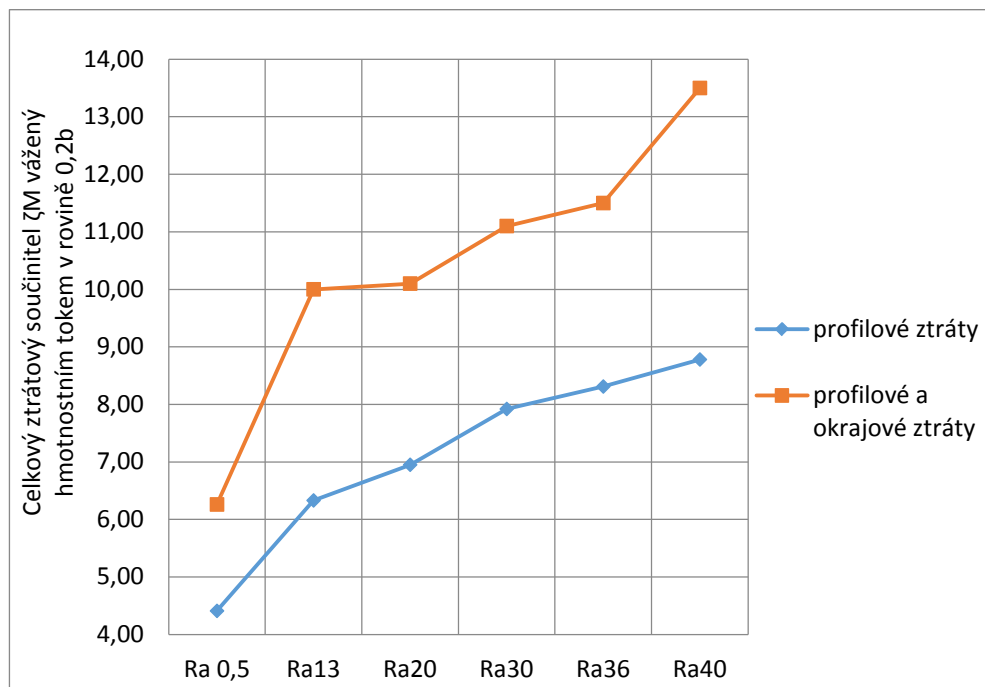


**Obr. 61 Drsnoměr TESA RUGOSURF 20**

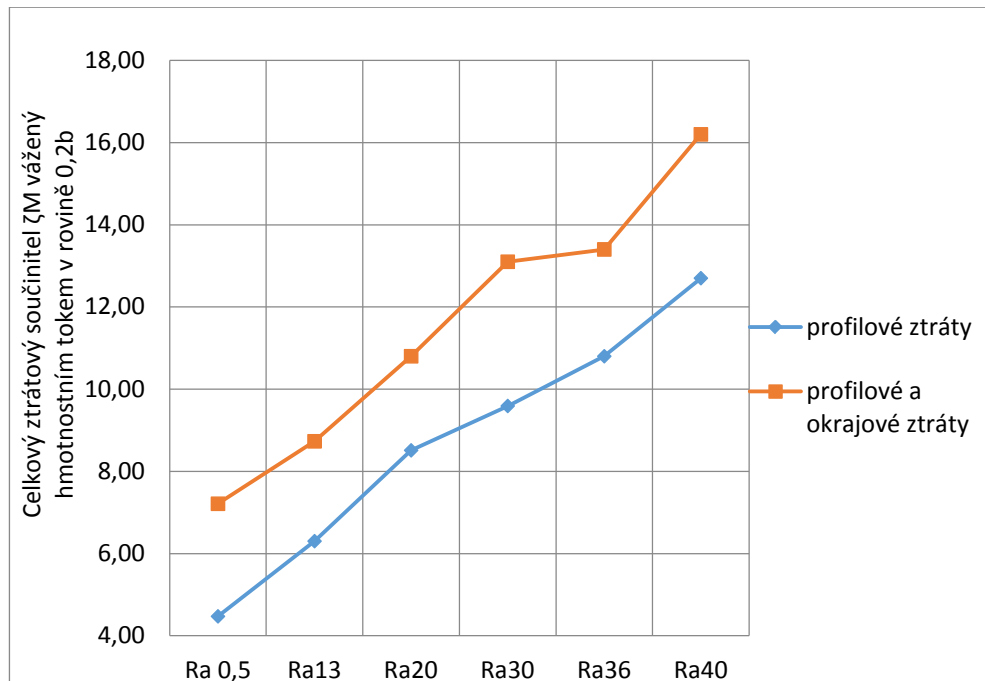
### 7.1.3 Výsledky měření ztrát v závislosti na drsnosti povrchu

Výše uvedené drsnosti byly nanесeny na oba typy lopatek. Celkem bylo uskutečněno 5 měření ztrát u obou typů lopatkových mříží s umělým zdrsněním společně se dvěma referenčními měřeními. Referenční měření odpovídaly drsnosti lopatek dle Tab. 13.

Na následujících grafech, Obr. 62 a Obr. 63, jsou vykresleny hodnoty celkového ztrátového součinitele, definovaného dle (25), na změřené střední aritmetické úchylce drsnosti povrchu Ra. V grafech jsou vykresleny profilové ztráty (modře) a profilové společně s okrajovými ztrátami (oranžově). Z grafů je patrné, že ztráty u lopatkové mříže VS33b rostou rovnoměrněji a rychleji. Tyto vypočtená data by bylo možné následně proložit regresní funkcí a predikovat ztráty v závislosti na zdrsnění. Zde by se jednalo zejména o profilové ztráty, vzhledem k rovinné lopatkové mříži.



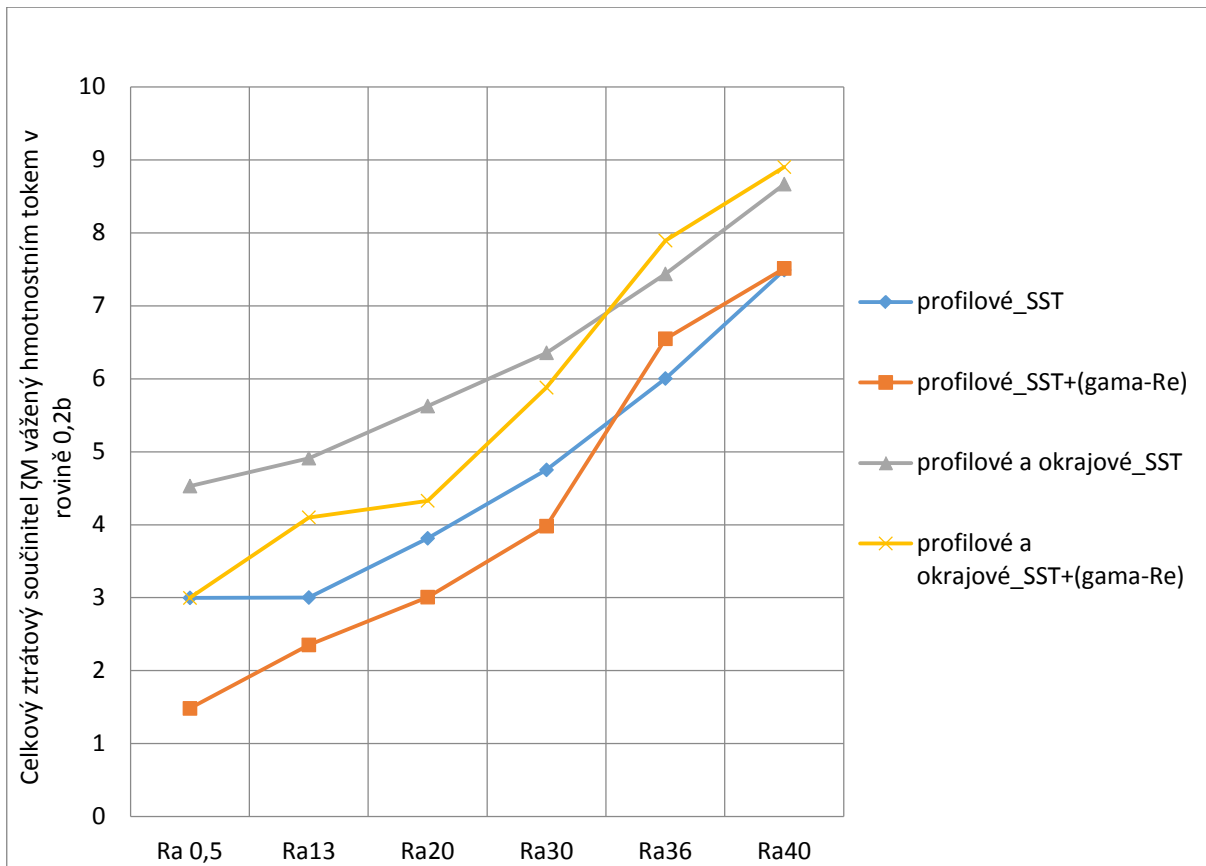
Obr. 62 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – experiment -celkový ztrátový součinitel  $\zeta_M^C$  vážený hmotnostním tokem v rovině 0,2b



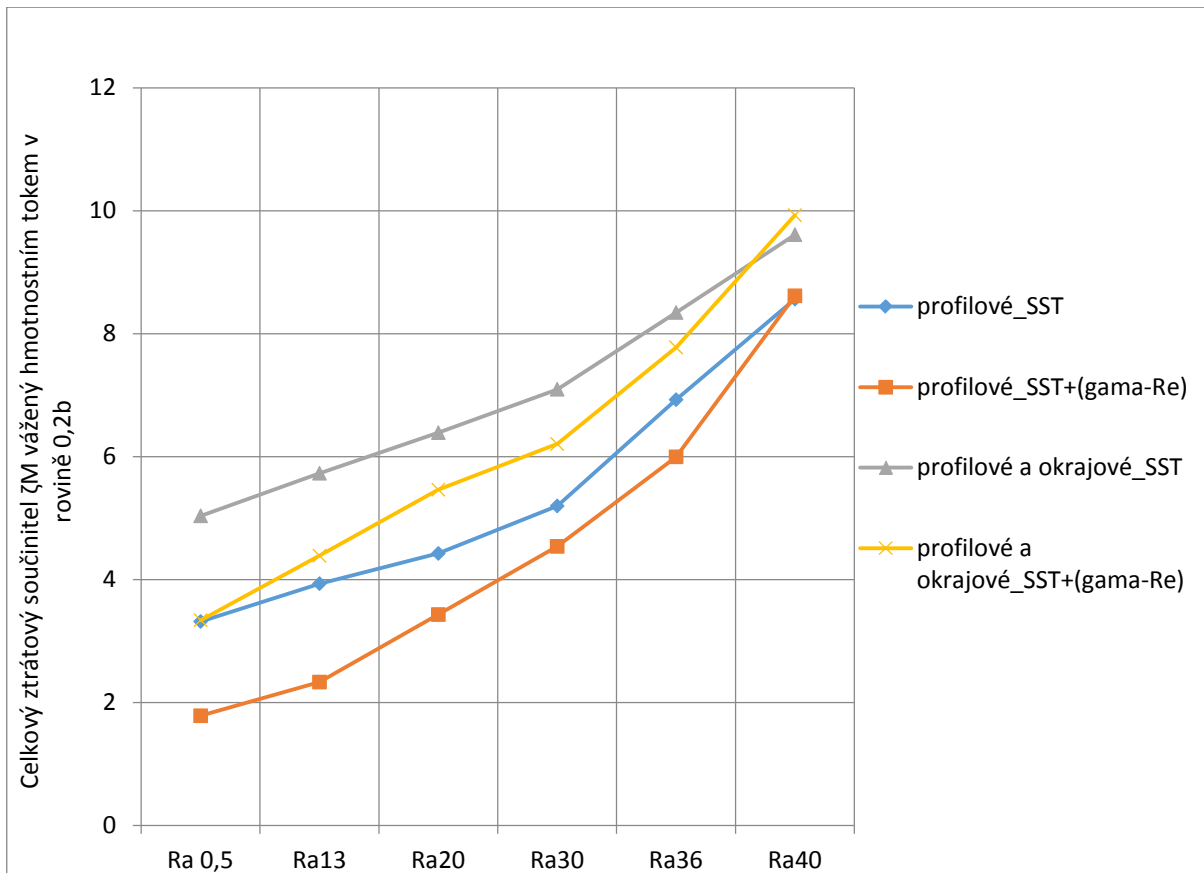
**Obr. 63 Lopatková mříž s lopatkami VS33b – experiment - celkový ztrátový součinitel  $\zeta_M$  vážený hmotnostním tokem v rovině 0,2b**

## 7.2 Data získaná numericky

Nejprve byla data získána experimentálně, jak bylo uvedeno výše. Následně se provedlo totéž namodelováním v CFD, tedy závislost ztrát na zdrsnění povrchu. Profilové a profilové společně s okrajovými ztrátami byly řešeny pomocí turbulentního modelu SST popsaného výše. Rovněž zde bylo využito i přechodu do turbulence  $\gamma$ -Re. Na grafech na Obr. 64 a Obr. 65 je vykreslena závislost celkových ztrát vážených hmotnostním tokem na střední aritmetické úchylice drsnosti povrchu. Z výsledků je patrné, že v případě experimentálně získaných dat jsou ztráty vyšší než u výpočtů. Pro porovnání výsledků výpočtů provedených modelem SST a tímto modelem společně s modelem přechodu ponechám na odborně interesovaném čtenáři.



**Obr. 64** Lopatková mříž s lopatkami VS33b – CFD - celkový ztrátový součinitel  $\zeta_M$  vážený hmotnostním tokem v rovině 0,2b



Obr. 65 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – CFD - celkový ztrátový součinitel  $\zeta_M$  vážený hmotnostním tokem v rovině 0,2b

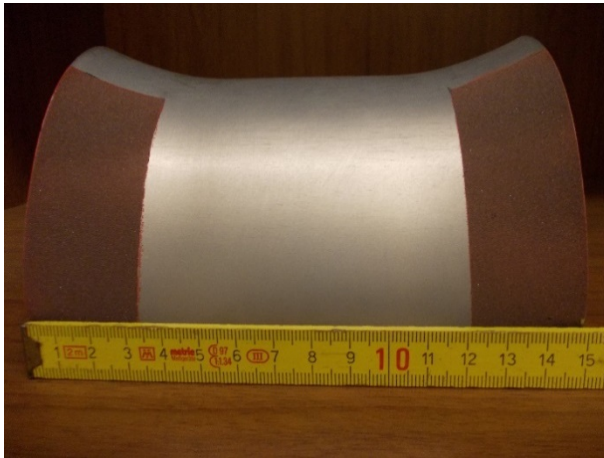
## 8 VLIV ZDRSNĚNÍ NA OKRAJOVÉ ZTRÁTY

V průběhu sledování profilových a okrajových ztrát se změnou drsnosti se objevil určitý vliv na sekundární víry. V příloze 1 je patrná výrazná změna ve tvaru sekundárního víru mezi výsledky s velikostí zrna odpovídající hodnotě Ra 13 a Ra 20.

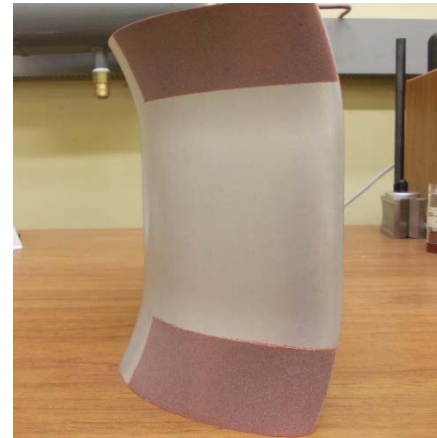
Z experimentálních dat se vyhodnotila vzdálenost od stěny vykazující maximální hodnotu ztrát. Do této vzdálenosti od stěny bylo naneseno zdrsňení odpovídající Ra 13. Zdrsňení se naneslo na podtlakové straně lopatky od náběžné hrany do vzdálenosti 90 mm odpovídající prudkému poklesu smykového napětí na stěně vycházející ze CFD výpočtu s použitím turbulentního modelu K- $\omega$  SST.

Pomocí experimentálních a numerických dat se vytvořilo zdrsňení na lopatce VS33b, patrné na Obr. 66 a Obr. 67. Zdrsňení bylo naneseno stejným způsobem jako v celé ploše.



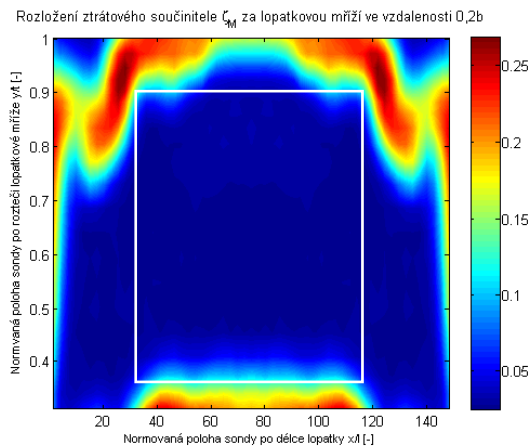


Obr. 66 Lokální zdrsňení – horizontální pohled

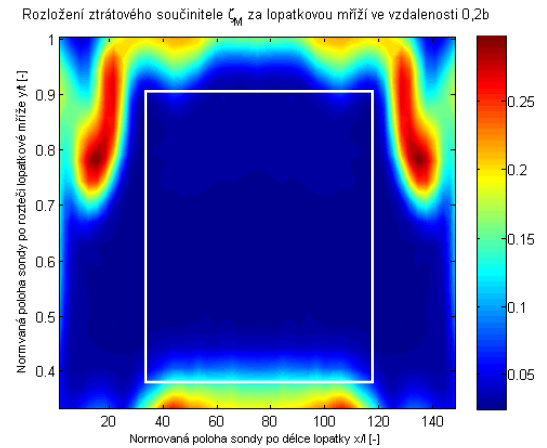


Obr. 67 Lokální zdrsňení – vertikální pohled

Následně bylo provedeno měření ztrát v rovině  $0,2b$  a porovnáno s referenčním měřením bez naneseného zdrsňení. Na Obr. 68 a Obr. 69 je vykresleno rozložení ztrát ve sledované rovině. Střední hodnota ztrátového součinitele klesne o  $0,1\%$ , ale to není až tak průkazné. Cennější informace je dána tím, že se podařilo nasměrovat sekundární víry blíže ke stěně a tím zvětšit plochu s nízkými ztrátami. Tento efekt je patrný na ohraničených plochách ve zmiňovaných konturách.



Obr. 68 VS33b – referenční měření

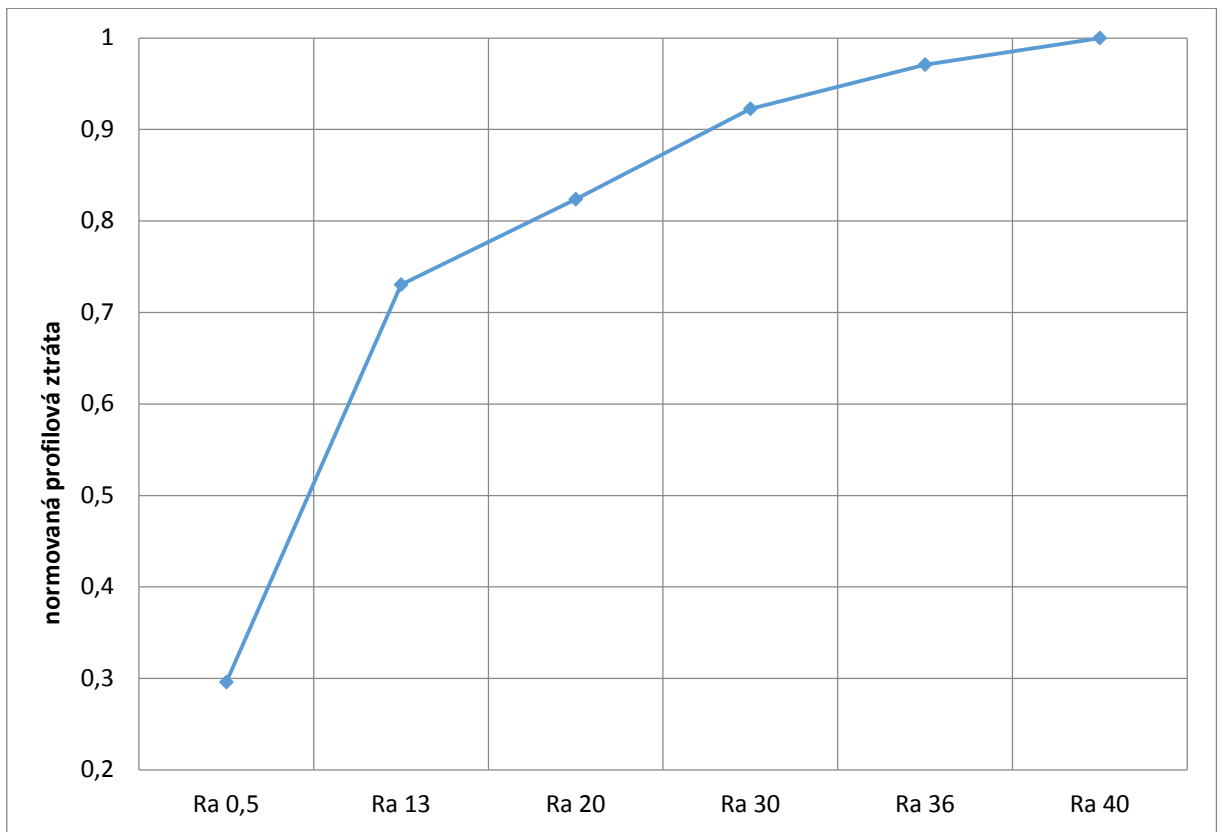


Obr. 69 VS33b – lokální zdrsňení

## 9 PROFILOVÉ ZTRÁTY DLE ZNÁMÉHO VZTAHU

Na závěr této práce uvedu průběh profilových ztrát v závislosti na zdrsnění povrchu, které vycházejí ze známé experimentálně získané regresní funkce. Tato závislost je uvedena v predikci ztrát ve společnosti Doosan Škoda Power a je duševním vlastnictvím firmy. Profilová ztráta rozváděcí lopatkové mříže VS33 je dle vztahu (30) funkcí čtyř proměnných. V grafu na Obr. 70 je vykreslen průběh změny profilových ztrát lopatek s profilem VS33 vysokotlakých lopatek parní turbíny. Výsledky není možné uvést v absolutních hodnotách, proto není možné je v této práci porovnávat.

$$\zeta(\text{Pr})_R = f(Ra, b, t, M_{1is}) \quad (30)$$



Obr. 70 Normovaná profilová ztráta pro lopatku s profilem VS33 vysokotlakého dílu parní turbíny

## ZÁVĚR

V této práci byla provedena rozsáhlejší studie založená na experimentální i numerické metodě řešení proudění v lopatkové mříži s lopatkami VS33b a VS33T. V průběhu řešení této práce byla nejprve řešena vstupní okrajová podmínka experimentální cestou tlakovými sondami a pomocí CTA aparatury. Rovněž byla vstupní podmínka řešena numericky. Získaná data byla aplikována na trojdimenzionální výpočet lopatkové mříže, kde byly sledovány parametry turbulence a ztrát lopatkové mříže. V numerické metodě bylo využito standartního dvourovnicového turbulentního modelu  $k-\omega$  SST a tohoto modelu rozšířeného o model přechodu z laminární do turbulentní mezní vrstvy. Výsledky byly porovnávány s experimentální metou, tedy metodou řešenou na lopatkové mříži se dvěma typy lopatek umístěných v aerodynamickém tunelu. Porovnání bylo provedeno tedy z pohledu turbulence, profilových a okrajových ztrát.

Následně byl sledován vliv zdrsnění lopatek na ztráty. Na toto měření bylo nutné vytvořit pět úrovní zdrsnění na lopatkových mřížích o dvou typech lopatek. Totéž bylo provedeno numericky pomocí dvou zmiňovaných modelů. Z výsledků je patrné, že z experimentálně získaných dat jsou ztráty poněkud vyšší. Nejen z tohoto důvodu je nutné turbulentní model nadále vyvíjet. Rovněž je možné výsledná data proložit regresní funkcí a predikovat profilové ztráty v závislosti na zdrsnění u rozváděcích lopatek reálného VT dílu parní turbíny.

V průběhu této práce se rovněž vyskytly dva neočekávané poznatky. Při sledování vývoje ztrát v závislosti na zdrsnění jsem si u jedné z lopatkových mříží povšimnul výrazné změny sekundárního víru tvořeného za odtokovou hranou lopatky. Následně jsem vytvořil lopatku s lokálním zdrsněním vycházející z experimentálních i numerických úvah. Tímto zdrsněním se podařilo posunout zvýšené ztráty sekundárních vírů blíže ke stěnám a tedy zvětšit oblast s nižšími ztrátami a největším hmotnostním tokem média.

Další poznatek se vyskytl při přenašeni intenzity turbulence z experimentu do numeriky. Při sledování stupně turbulence při vyhodnocení výpočtu byly výsledky velmi vzdáleny experimentu. Proto byl stupeň turbulence definován jako externí funkce, která je definovaná pouze na jedné proměnné charakterizující kinetickou energii turbulence. Takto definovaný stupeň turbulence vykazoval věrohodnější výsledky. Rozdílné výsledky jsou dle mého názoru dány dvouparametrickým zadáváním vlastností turbulence.

Přínosem této práce je získání profilových ztrát a profilových společně s okrajovými na úrovni zdrsnění. Díky těmto závislostem je možné profilové ztráty predikovat u statorových lopatek VT dílu parní turbíny s profilem VS33. Zmíněná závislost byla získána i numericky pomocí dvou turbulentních modelů. Rovněž se získaly informace o proudovém poli pomocí dostupných metod.

Na této problematice je třeba dále pracovat, například formou disertační práce. Je třeba si uvědomit, že lopatky v parní turbíně většinu své životnosti pracují při změněných podmínkách vlivem erozivních a korozivních účinků, které mají výrazný vliv na účinnost celého turbosoustrojí.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] K. Sedlák, „Vyhodnocení ztrátových součinitelů přímých lopatkových mříží, měřených na středorychlostním tunelu ŠKODA,“ 2012.
- [2] J. Linhart, „Mechanika tekutin 2, stručné učební texty, Západočeská univerzita v Plzni,“ 2009.
- [3] ANSYS, „Fluent Theory Guide,“ 2011.
- [4] M. Hoznedl, J. Mach a J. Matas, „Protokol o zkoušce drsnosti“.
- [5] G. L. Morrison, M. T. Schobeiri a K. Pappu, „Five-hole pressure probe analysis technique. Flow Measurement and Instrumentation 9 (1998) 153–158,“ 1998.
- [6] F. R. Menter, „Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,“ *AIAA Journal*, 1994.
- [7] J. Aemecke a P. Šafařík, „Data reduction of wake flow measurements with injection of an other gas,“ 1995.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma aerodynamického tunelu .....	10
Obr. 2 Sání, pohon a ventilátor (po rekonstrukci 2014).....	11
Obr. 3 Měřicí část s lopatkovou mříží.....	11
Obr. 4 Schéma zapojení měřicí aparatury .....	12
Obr. 5 Princip CTA Anemometru.....	13
Obr. 6 Měřicí aparatura CTA.....	13
Obr. 7 Typy lopatek .....	14
Obr. 8 Odklon proudnice .....	16
Obr. 9 Korekční funkce dle rovnice (4) .....	18
Obr. 10 Rychlostní profil před repasí ventilátoru .....	19
Obr. 11 Rychlostní profil před repasí ventilátoru (detail).....	19
Obr. 12 Rychlostní profil po repasí ventilátoru .....	20
Obr. 13 Rychlostní profil po repasí ventilátoru (detail).....	20
Obr. 14 Měřicí aparatura CTA pro měření rychlostního profilu.....	21
Obr. 15 Drátková sonda pro měření rychlostního profilu .....	21
Obr. 16 Rychlostní profil CTA .....	23
Obr. 17 2D síť v oblasti stěny.....	24
Obr. 18 Výpočetní oblast s vyznačenými doménami .....	24
Obr. 19 Rychlostní pole .....	27
Obr. 20 Stupeň turbulence $Tu$ (definovaný rozsah).....	27
Obr. 21 Stupeň turbulence po šířce kanálu – turbulentní model SST $k-\omega$ .....	28
Obr. 22 Rychlostní profily – turbulentní model SST $k-\omega$ .....	29
Obr. 23 Traverzování po rozteči lopatkové mříže .....	30
Obr. 24 Rozložení ztrátového součinitele po rozteči v řezech od stěny.....	30
Obr. 25 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – intenzita turbulence ve vzdálenosti $l/2$ .....	31
Obr. 26 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – intenzita turbulence ve vzdálenosti 20 mm od stěny .....	31
Obr. 27 VS33T – vzdálenost 20 mm od stěny, 64 kHz, 0,016s .....	31
Obr. 28 VS33T – vzdálenost 20 mm od stěny, 64 kHz, 1s .....	31
Obr. 29 VS33T – vzdálenost 20 mm od stěny, 64 kHz, 2s .....	31
Obr. 30 h-s diagram expanze media v mezilopatkovém kanálu .....	32

Obr. 31 Pětiovorová kuželová sonda .....	33
Obr. 32 Souřadný systém lopatkové mříže a sondy .....	34
Obr. 33 Měřicí mřížka .....	35
Obr. 34 Pohled na pětiovorovou sondu a traverzér.....	36
Obr. 35 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – rozložení rychlosti na výstupu ve vzdálenosti 0.2b .....	37
Obr. 36 Lopatková mříž s lopatkami VS33b – rozložení rychlosti na výstupu ve vzdálenosti 0.2b.....	37
Obr. 37 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – rozložení výstupního úhlu z lopatkové mříže .....	38
Obr. 38 Výpočetní oblast lopatkové mříže .....	39
Obr. 39 Pohled na síť v okolí profilu v polovině výšky lopatky .....	39
Obr. 40 Pole izochar Machových čísel pro $Re_{2is} = 8,8 \times 10^5$ a $Ma_{2is} = 0,24$ .....	41
Obr. 41 Stupeň turbulence $Tu$ v polovině výšky lopatky.....	42
Obr. 42 Pole izochar turbulentní kinetické energie $K$ , model $K-\omega$ SST .....	43
Obr. 43 Pole izochar turbulentní kinetické energie $K$ , model $K-\omega$ SST včetně $\gamma$ -Re přechodu.....	43
Obr. 44 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - rychlostní pole v rovině 0.2b .....	44
Obr. 45 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - rychlostní pole v rovině 0.2b .....	44
Obr. 46 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - stupeň turbulence v rovině 0.2b .....	44
Obr. 47 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - stupeň turbulence v rovině 0.2b .....	44
Obr. 48 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - izočáry místního ztrátového součinitele celkového tlaku $\zeta_M$ .....	45
Obr. 49 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - izočáry místního ztrátového součinitele celkového tlaku $\zeta_M$ .....	45
Obr. 50 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - místní ztrátový součinitel $\zeta_M$ na rozteči - model $K-\omega$ SST .....	46
Obr. 51 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - místní ztrátový součinitel $\zeta_M$ na rozteči -model $K-\omega$ SST včetně $\gamma$ -Re přechodu .....	46
Obr. 52 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - místní ztrátový součinitel $\zeta_M$ na rozteči - model $K-\omega$ SST .....	46
Obr. 53 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - místní ztrátový součinitel $\zeta_M$ na rozteči -model $K-\omega$ SST včetně $\gamma$ -Re přechodu .....	46
Obr. 54 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - stupeň turbulence $Tu$ na rozteči - model $K-\omega$ SST .....	47
Obr. 55 Lopatková mříž s lopatkami VS33b - stupeň turbulence $Tu$ na rozteči - model $K-\omega$ SST včetně $\gamma$ -Re přechodu .....	47
Obr. 56 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - stupeň turbulence $Tu$ na rozteči - model $K-\omega$ SST .....	47
Obr. 57 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - stupeň turbulence $Tu$ na rozteči - model $K-\omega$ SST včetně $\gamma$ -Re přechodu .....	47
Obr. 58 Nanesená drsnost (VS33b – vlevo, VS33T – vpravo) .....	49
Obr. 59 Drsnost – lopatková mříž z pohledu odtokových hran .....	49
Obr. 60 Drsnost – lopatková mříž z pohledu náběžných hran .....	49
Obr. 61 Drsnoměr TESA RUGOSURF 20 .....	50
Obr. 62 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – experiment -celkový ztrátový součinitel $\zeta_M^C$ vážený hmotnostním tokem v rovině 0,2b .....	51
Obr. 63 Lopatková mříž s lopatkami VS33b – experiment - celkový ztrátový součinitel $\zeta_M$ vážený hmotnostním tokem v rovině 0,2b .....	52
Obr. 64 Lopatková mříž s lopatkami VS33b – CFD - celkový ztrátový součinitel $\zeta_M$ vážený hmotnostním tokem v rovině 0,2b .....	53
Obr. 65 Lopatková mříž s lopatkami VS33T – CFD - celkový ztrátový součinitel $\zeta_M$ vážený hmotnostním tokem v rovině 0,2b .....	54
Obr. 66 Lokální zdrsnění – horizontální pohled .....	55
Obr. 67 Lokální zdrsnění – vertikální pohled .....	55
Obr. 68 VS33b – referenční měření.....	55
Obr. 69 VS33b – lokální zdrsnění.....	55
Obr. 70 Normovaná profilová ztráta pro lopatku s profilem VS33 vysokotlakého dílu parní turbíny.....	56

## SEZNAM TABULEK

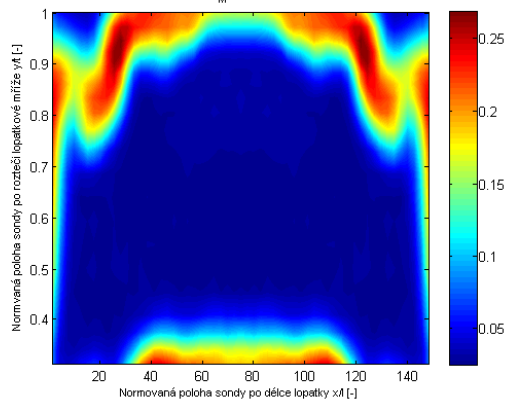
Tab. 1 Parametry profilu a lopatkové mříže .....	15
Tab. 2 Tloušťky mezních vrstev – Pitotova sonda.....	20
Tab. 3 Tloušťky mezních vrstev – CTA .....	23
Tab. 4 Fyzikální vlastnosti media .....	25
Tab. 5 Okrajové podmínky - 2D výpočet .....	26
Tab. 6 Tloušťky mezních vrstev – turbulentní model SST k- $\omega$ .....	29
Tab. 7 Střední hodnota intenzity turbulence .....	31
Tab. 8 Lopatková mříž s lopatkami VS33b – rozložení ztrát v rovině 0.2b; ztráty po rozteči v polovině výšky lopatky; ztráty po rozteči ve vzdálenosti od stěny .....	37
Tab. 9 Lopatková mříž s lopatkami VS33T - rozložení ztrát v rovině 0.2b; ztráty po rozteči v polovině výšky lopatky; ztráty po rozteči ve vzdálenosti od stěny .....	37
Tab. 10 Okrajové podmínky - 3D výpočet .....	40
Tab. 11 Porovnání ztrát pro lopatkové mříže s lopatkami VS33b a VS33T .....	48
Tab. 12 Použité brusivo a naměřené drsnosti.....	50
Tab. 13 Drsnosti lopatek .....	50

# SEZNAM PŘÍLOH

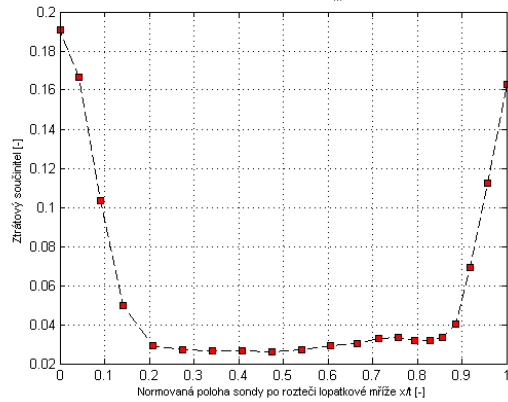
## 1. Příloha 1 - Vykreslení ztrát - lopatková mříž s lopatkami VS33B

$Ra \cong 0,54$

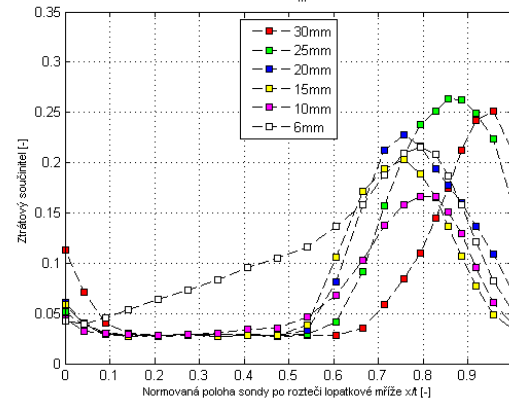
Rozložení ztrátového součinitele  $C_M$  za lopatkovou mříží ve vzdalenosti  $0,2b$



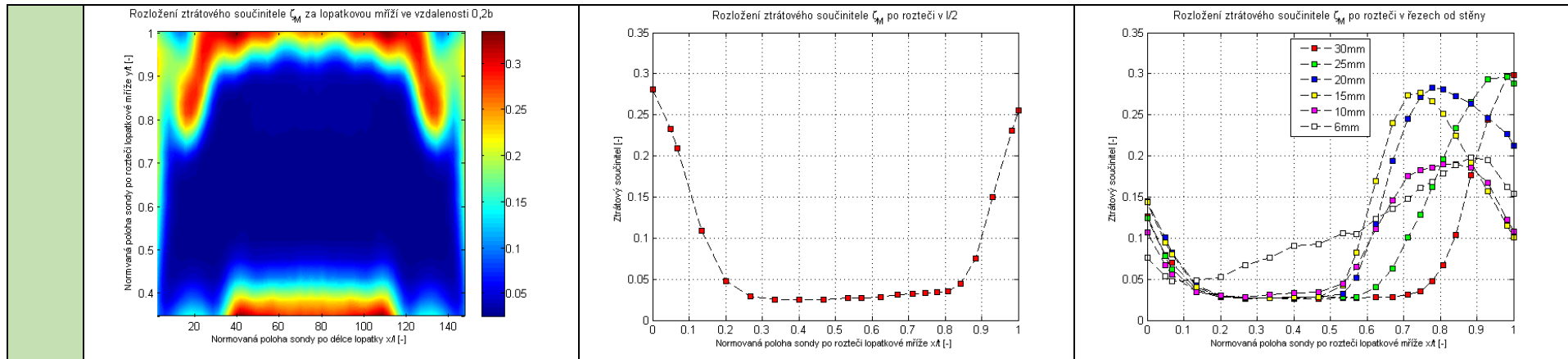
Rozložení ztrátového součinitele  $C_M$  po rozteči v I/2



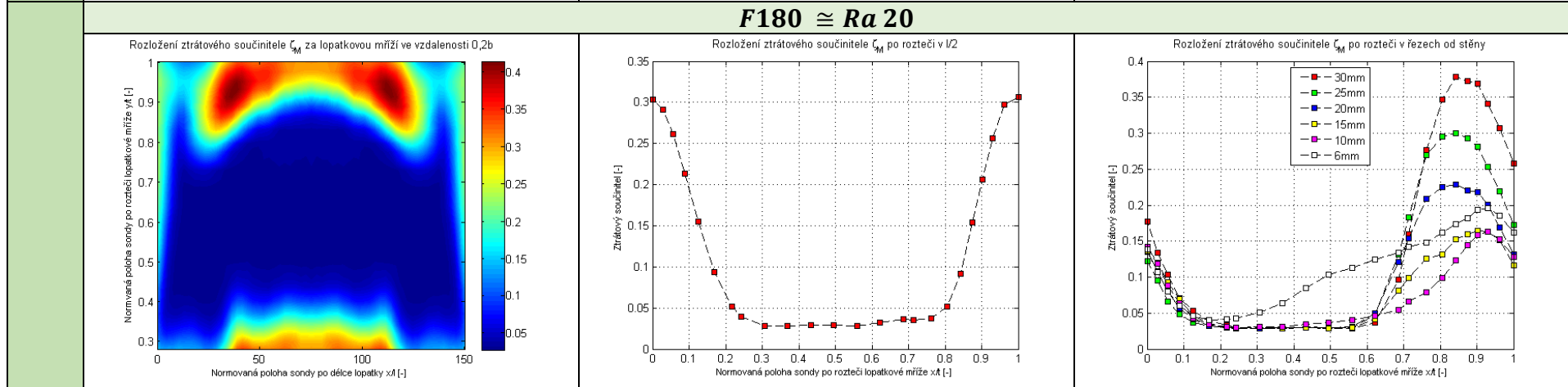
Rozložení ztrátového součinitele  $C_M$  po rozteči v řezech od stěny



$F320 \cong Ra 13$



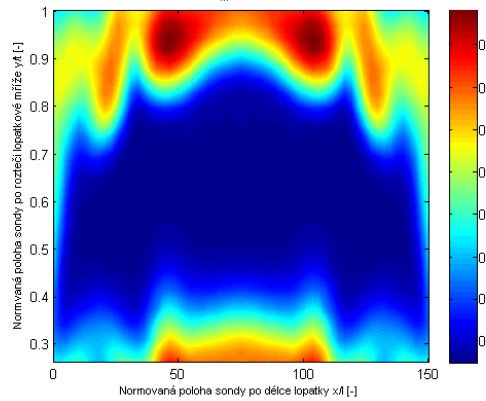
**$F180 \cong Ra 20$**



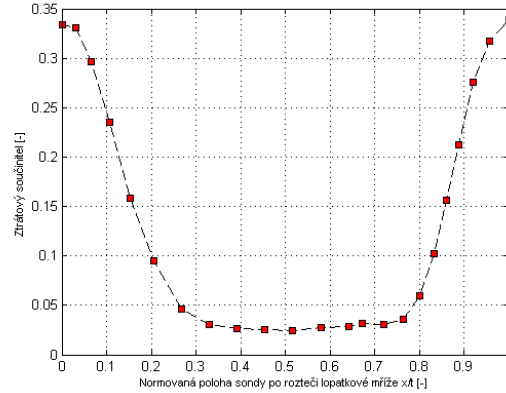
**$F100 \cong Ra 30$**



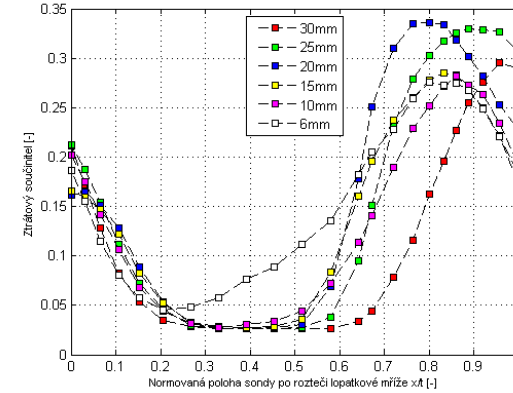
Rozložení ztrátového součinitele  $\zeta_M$  za lopatkovou mříží ve vzdalenosti 0,2b



Rozložení ztrátového součinitele  $\zeta_M$  po rozteči v l/2

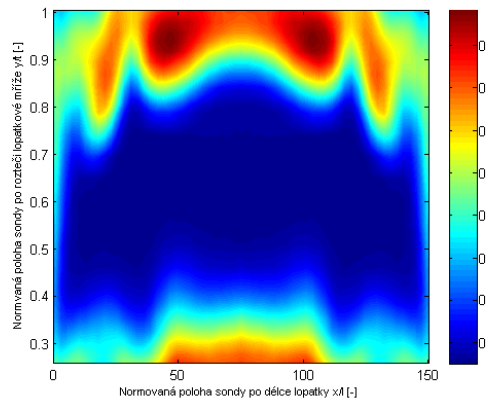


Rozložení ztrátového součinitele  $\zeta_M$  po rozteči v řezech od stěny

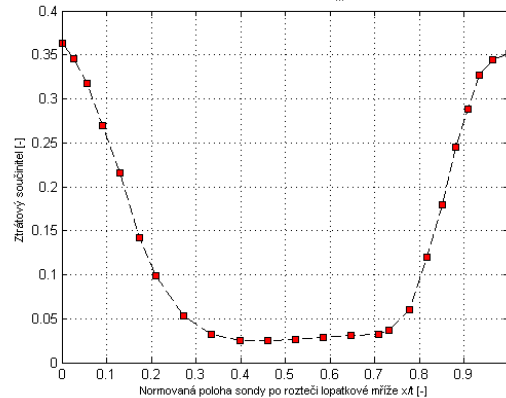


**$F70 \cong Ra 36$**

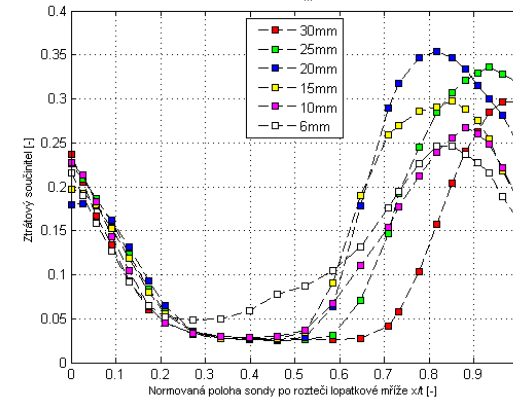
Rozložení ztrátového součinitele  $\zeta_M$  za lopatkovou mříží ve vzdalenosti 0,2b



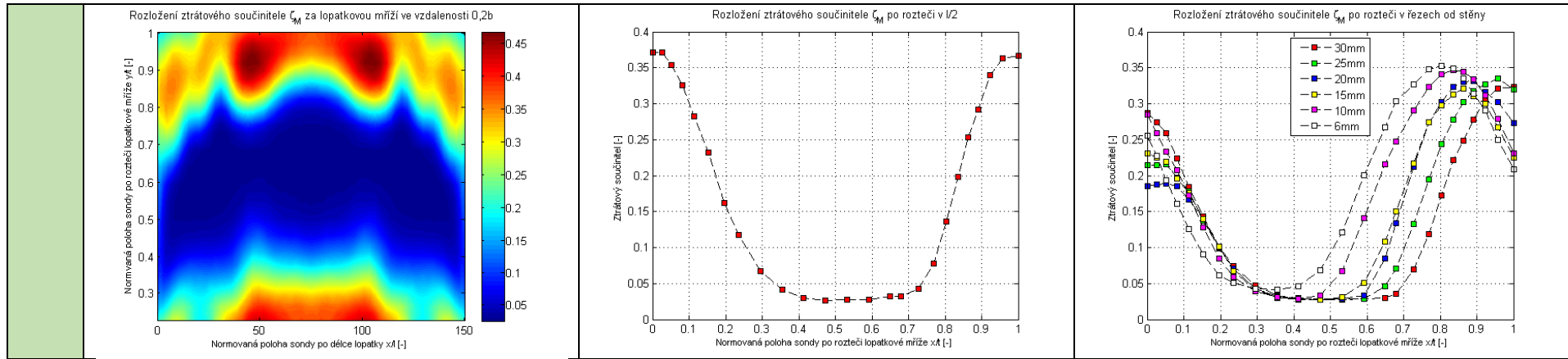
Rozložení ztrátového součinitele  $\zeta_M$  po rozteči v l/2



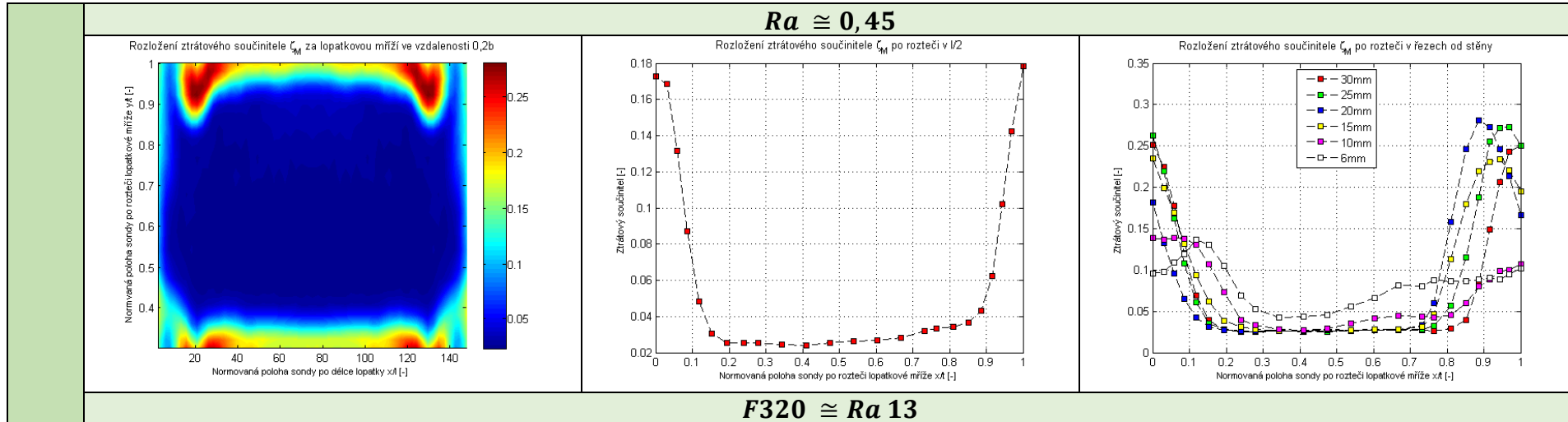
Rozložení ztrátového součinitele  $\zeta_M$  po rozteči v řezech od stěny

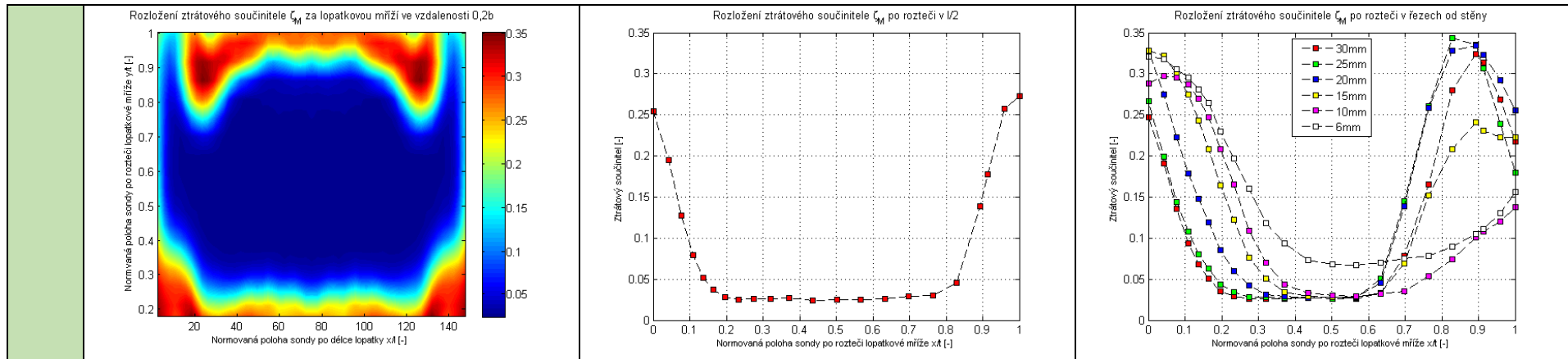


**$F40 \cong Ra 40$**

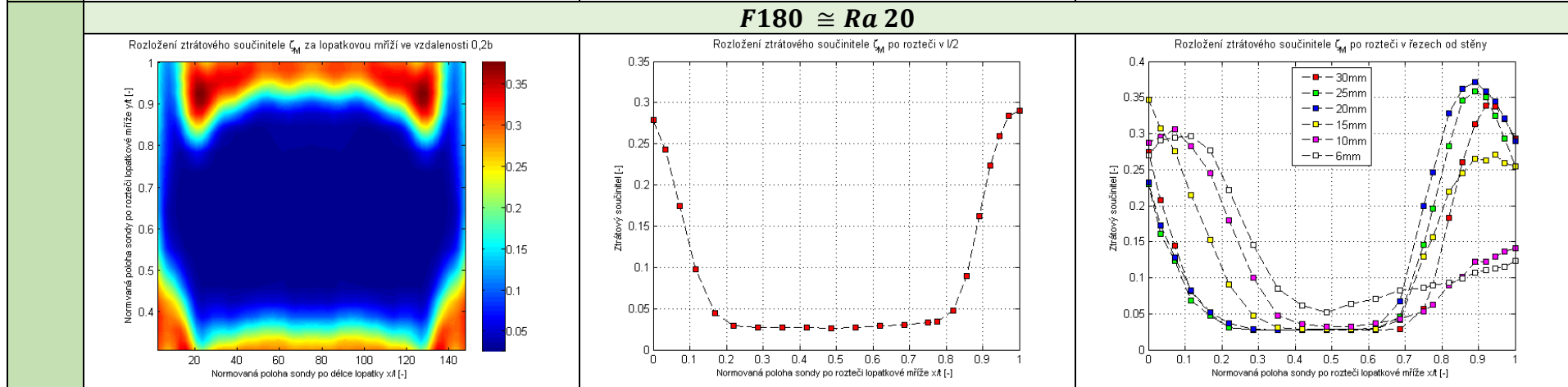


## 2. Příloha 2 - Vykreslení ztrát - lopatková mříž s lopatkami VS33T

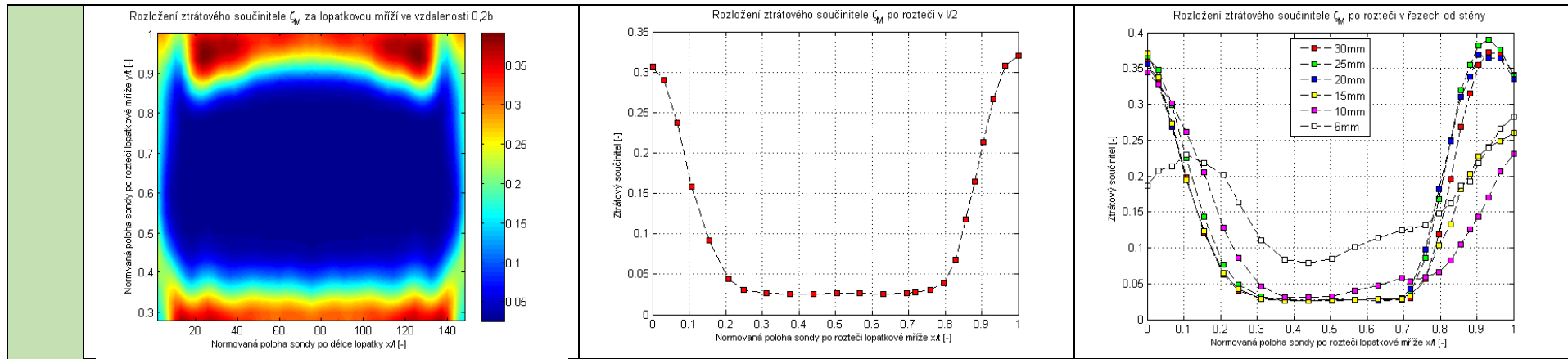




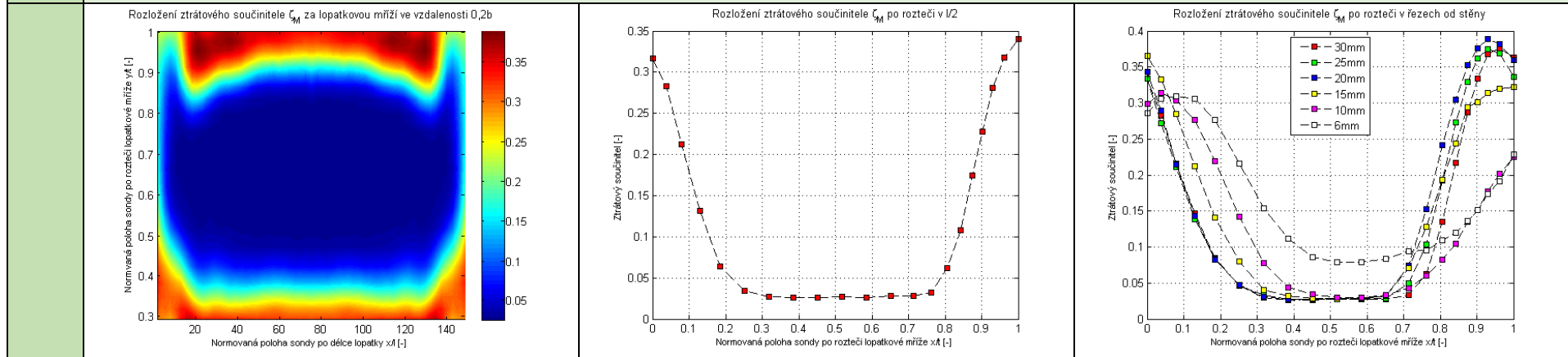
**$F180 \cong Ra 20$**



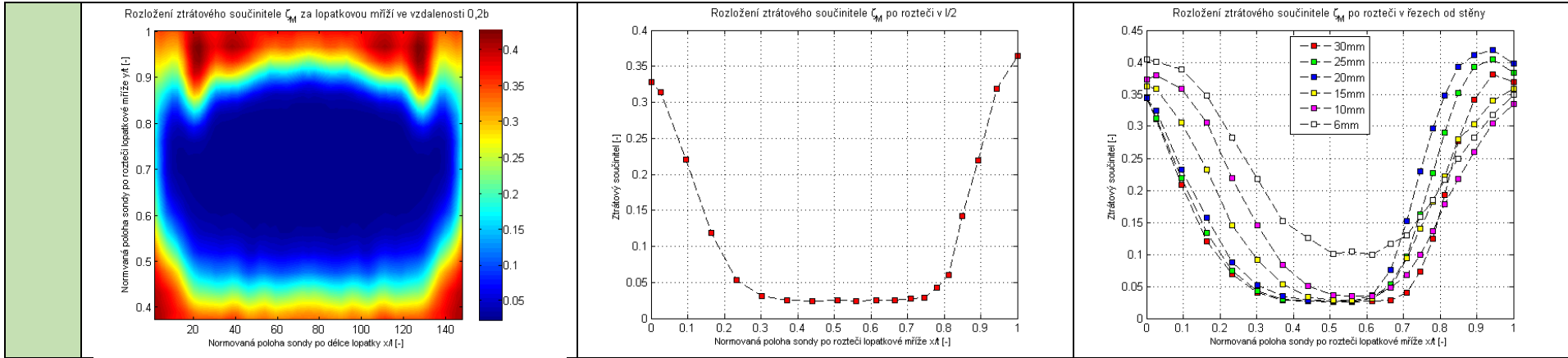
**$F100 \cong Ra 30$**



**$F70 \cong Ra 36$**



**$F40 \cong Ra 40$**



### 3. Příloha 3 - Naměřená a vypočtená data

Vyhodnocení drsnost - experiment																				
ID	brusivo	drsnost	Ma1	Ma2	Ma2 zz	Re1 x 10 <sup>4</sup>	Re2x 10 <sup>4</sup>	Cela oblast					Po rozteci					Vstupní úhel		
								hm.tok	prumer	median	max	min	hm.tok	prumer	median	max	min	po rozteci	cela obl.	ztráta zákon zach.
VS33T	1	-	0.4	0.06331	0.197	0.226	2.743	8.536	6.26	8.36	3.40	28.07	2.338	4.41	3.38	17.82	2.42	15.925	15.932	2.724
	11	F320	13	0.06184	0.1964	0.221	2.668	8.473	10.00	12.50	5.13	35.08	2.378	6.33	3.37	27.37	2.40	15.991	15.992	2.676
	3	F180	20	0.06229	0.1974	0.222	2.685	8.509	10.10	13.90	6.56	37.64	2.564	6.95	4.58	28.97	2.64	15.9622	15.9758	2.634
	5	F100	30	0.06133	0.1984	0.22	2.629	8.502	11.10	15.10	9.61	39.02	2.473	7.92	5.59	32.02	2.52	15.9715	15.9893	2.776
	7	F70	36	0.06213	0.1986	0.22	2.745	8.775	11.50	15.80	11.60	38.85	2.492	8.31	6.42	34.06	2.58	15.9599	15.9795	2.638
	9	F40	40	0.06103	0.198	0.22	2.686	8.713	13.50	16.60	9.13	42.63	2.297	8.78	4.78	36.49	2.41	15.9443	15.9701	2.525
VS33b	12	-	0.5	0.06102	0.1972	0.226	2.66	8.598	7.21	8.97	4.63	26.81	2.474	4.47	3.27	19.06	2.59	16.0098	16.0084	2.645
	10	F320	13	0.05908	0.195	0.221	2.512	8.291	8.73	10.80	3.59	33.46	2.519	6.30	3.44	28.10	2.52	15.954	15.9559	2.635
	2	F180	20	0.06088	0.1986	0.222	2.705	8.821	10.80	13.90	9.50	41.37	2.674	8.51	7.18	30.67	2.78	16.0075	16.0132	2.863
	4	F100	30	0.05928	0.1974	0.218	2.575	8.572	13.10	16.60	15.60	44.07	2.419	9.59	9.50	33.94	2.46	15.9975	16.0049	2.894
	6	F70	36	0.0585	0.1977	0.218	2.603	8.796	13.40	17.20	16.50	44.13	2.466	10.80	13.10	36.37	2.52	15.9996	16.0061	2.904
	8	F40	40	0.05777	0.1969	0.214	2.514	8.571	16.20	19.90	19.60	46.69	2.552	12.70	16.20	37.19	2.64	16.0043	16.0119	3.06

Vyhodnocení drsnost - CFD						
Výpočty drsnosti			profilové ztráty		profilové a okrajové ztráty	
ID	brusivo	drsnost	SST	gama-Re	SST	gama-Re
VS33T	1	-	3.3169	1.7829	5.0357	3.3383
	11	F320	45	3.9325	2.3309	4.3867
	3	F180	90	4.4242	3.4294	5.4611
	5	F100	150	5.1967	4.5383	6.2048
	7	F70	250	6.9259	5.9956	7.7771
	9	F40	500	8.562	8.6155	9.9269
VS33b	12	-	2.9971	1.4818	4.5295	2.996
	10	F320	45	3.0015	2.3516	4.1009
	2	F180	90	3.8134	3.007	4.3279
	4	F100	150	4.7513	3.9799	5.8788
	6	F70	250	6.0037	6.5483	7.896
	8	F40	500	7.49	7.5119	8.668

## 4. Příloha 4 - Skript pro vyhodnocení ztrát a rychlostních profilů

```
1
2
3 clear all
4 clc
5
6 % nacteni dat
7 mereniLopatkovaMriz = data_processing2m('b2_0_2b_14_1_2015_1188_ID1.txt');
8
9 % nahrani dat do matice 40x30
10 m=0;
11 H = 36;
12 L = 33;
13
14 for i=1:H
15     for j=1:L
16         k=m+1;
17         m=m+1;
18         Matpolu(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,3); % nacteni sloupce poloha_u
19         Matpolr(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,4); % nacteni sloupce poloha_r
20         Mat_p_bar(i,j) = mereniLopatkovaMriz(1).data(m,5); % nacteni sloupce pbar
21         Mat_t_p(i,j) = mereniLopatkovaMriz(1).data(m,6); % nacteni sloupce tproud_tp
22         Mat_tokol_to(i,j) = mereniLopatkovaMriz(1).data(m,7); % nacteni sloupce tokol_to
23         Mat_vlhkost(i,j) = mereniLopatkovaMriz(1).data(m,8); % nacteni sloupce vlhk_phi
24         Mat_vlhk_T(i,j) = mereniLopatkovaMriz(1).data(m,9); % nacteni sloupce vlhk_T
25         Mat_vlhk_ros_b(i,j) = mereniLopatkovaMriz(1).data(m,10); % nacteni sloupce vlhk_ros_b
26         Matps0(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,11); % nacteni sloupce ps0
27         Matpc0(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,12); % nacteni sloupce pc0
28         Matps1(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,13); % nacteni sloupce ps1
29         Matpcl(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,14); % nacteni sloupce pcl
30         Matp3(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,15); % nacteni sloupce p23
31         Matp2(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,16); % nacteni sloupce p22
32         Matp4(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,17); % nacteni sloupce p24
33         Matp5(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(m,18); % nacteni sloupce p25
34         Matp1(i,j)= mereniLopatkovaMriz(1).data(k,19); % nacteni sloupce p21
35         Mat_p21_pcl(i,j) = mereniLopatkovaMriz(1).data(m,20); % nacteni sloupce p21_pcl
36     end
37 end
38
39 % vypocet
40
41 for i=1:H
42     for j=1:L
43
44         p(i,j) = (Matp2(i,j) + Matp3(i,j) + Matp4(i,j) + Matp5(i,j)) / 4; %prumerny tlak - ukladani
45         do matice
46
47         Cp_phi = (Matp2(i,j) - Matp3(i,j)) / (Matp1(i,j)-p(i,j));
48         Cp_theta = (Matp4(i,j) - Matp5(i,j)) / (Matp1(i,j)-p(i,j));
49
50         phi(i,j) = phif(Cp_phi, Cp_theta); % uhel phi - ukladani do matice
51         theta(i,j) = thetaf(Cp_phi, Cp_theta); % uhel theta - ukladani do matice
52
53         Cp_stat = cp_statf(phi(i,j), theta(i,j));
54         Cp_total = cp_totalf(phi(i,j), theta(i,j));
55
56         p_s2(i,j) = Matp1(i,j) - Cp_stat * (Matp1(i,j) - p(i,j)); % staticky tlak za mrizi - ukladani
57         do matice
58         p_c2(i,j) = Matp1(i,j) - Cp_total * (Matp1(i,j) - p(i,j)); % celkovy tlak za mrizi - ukladani
59         do matice
60
61
62         p_sp(i,j) = 9.80665 * (62.28 + 4.5256 * Mat_t_p(i,j) + 0.14529 * Mat_t_p(i,j)^2 + 0.0027515 *
63         Mat_t_p(i,j)^3 + 0.000027941 * Mat_t_p(i,j)^4 + 0.00000027935 * Mat_t_p(i,j)^5); % tlak syte
64         vodni pary
65         x(i,j) = 0.622 * ( (Mat_vlhkost(i,j)/100) * p_sp(i,j) ) / (Mat_p_bar(i,j) -
66         (Mat_vlhkost(i,j)/100) * p_sp(i,j)); % merna vlhkost vzduchu
67         r_sv = 287.14; % ind. plynova konstanta sucheho vzduchu
68         r_p = 461.5; % ind. plynova konstanta pary
69         r_vv(i,j) = (r_sv / (1 + x(i,j))) + (r_p * x(i,j) / (1 + x(i,j))); % ind. plynova konstanta
70         vlhkeho vzduchu
71         ro_vv(i,j) = (p_s2(i,j) + Matps1(i,j)+ 2 * Mat_p_bar(i,j)) / (2 * r_vv(i,j) * (Mat_t_p(i,j) +
72         273.15)); % merna hmotnost vlhkeho vzduchu
73
74         % Vypocet rychlosti
```



```

75
76 w0(i,j) = sqrt(((2 * (Matpc0(i,j) - Matps0(i,j))) / ro_vv(i,j))); % rychlost proudeni -
77 Prandtlova sonda
78 w1(i,j) = sqrt(((2 * (Matpcl(i,j) - Matps1(i,j))) / ro_vv(i,j))); % rychlost proudeni - w1
79
80 w2(i,j) = sqrt(((2 * (p_c2(i,j) - p_s2(i,j))) / ro_vv(i,j))); % rychlost proudeni- w2
81
82 w2_s(i,j) = sqrt(((2 * (Matpcl(i,j) - p_s2(i,j))) / ro_vv(i,j))); % rychlost po izoentropicke
83 expanzi- w2_s
84
85 % vypocet ztratoveho soucinitele celkoveho tlaku dzeta_m
86 dzeta_m(i,j) = (Matpcl(i,j) - p_c2(i,j)) / (Matpcl(i,j)- p_s2(i,j)); % ztratovy soucinitel
87 celkoveho tlaku dzeta_m
88 deltap(i,j) = Matpcl(i,j)- p_c2(i,j);
89     end
90 end
91
92
93 % Zjisteni maximalnich hodnot v uplavech po vysce lopatky
94
95 dzeta_m_analyza = dzeta_m(:,1);
96 [a,b] = size (dzeta_m_analyza);
97 HO = dzeta_m_analyza (1:(a/2),1);
98 [a1,b1] = size (HO);
99 DO = dzeta_m_analyza ((a/2):a,1);
100 [a2,b2] = size (DO);
101
102 [A,I1] = max(HO);
103 [B,I2] = max(DO);
104
105
106
107
108 % horni oriznuti
109 dzeta_m(1:I1-1, :) = [];
110 Matpolr(1:I1-1, :) = [];
111 Matpolu(1:I1-1, :) = [];
112 Mat_t_p(1:I1-1, :) = [];
113 ro_vv(1:I1-1, :) = [];
114 w0(1:I1-1, :) = [];
115 w1(1:I1-1, :) = [];
116 w2(1:I1-1, :) = [];
117 w2_s(1:I1-1, :) = [];
118 r_vv(1:I1-1, :) = [];
119
120
121
122 % dolni oriznuti
123 dzeta_m(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
124 Matpolr(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
125 Matpolu(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
126 Mat_t_p(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
127 ro_vv(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
128 w0(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
129 w1(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
130 w2(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
131 w2_s(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
132 r_vv(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
133
134 % oriznuti u steny
135 dzeta_m(:,L-2:L) = [];
136 Matpolr(:,L-2:L) = [];
137 Matpolu(:,L-2:L) = [];
138 Mat_t_p(:,L-2:L) = [];
139 ro_vv(:,L-2:L) = [];
140 w0(:,L-2:L) = [];
141 w1(:,L-2:L) = [];
142 w2(:,L-2:L) = [];
143 w2_s(:,L-2:L) = [];
144 r_vv(:,L-2:L) = [];
145
146
147
148 % Vypocet ostatnich slozek rychlosti
149
150 [H2,L2] = size (dzeta_m);

```

```

151 omega = 74; % uhel otoceni sondy
152
153 for i=1:H2
154     for j=1:L2
155
156 w_us(i,j) = w2(i,j) * sind(phi(i,j));
157 w_zs(i,j) = w2(i,j) * cosd(phi(i,j)) * cosd(theta(i,j));
158 w_r(i,j) = w2(i,j) * cosd(phi(i,j)) * sind(theta(i,j));
159 w_2uz(i,j) = sqrt(w_us(i,j)^2 + w_zs(i,j)^2);
160 w_z(i,j) = w_2uz(i,j) * cosd(omega + atan(w_us(i,j) / w_zs(i,j)));
161 w_u(i,j) = w_2uz(i,j) * sind(omega + atan(w_us(i,j) / w_zs(i,j)));
162     end
163 end
164
165 % Analyza dat - celá oblast
166 %-----
167
168 display(['Analýza dat - celá oblast'])
169 display(['-----'])
170 disp(' ')
171 dzeta_m_z =[fliplr(dzeta_m),dzeta_m];
172 dzeta_m_z(:,L2) = [];
173 Matpolu_z =[Matpolu,Matpolu];
174 Matpolu_z(:,L2) = [];
175 Matpolr_z =[fliplr(Matpolr),150-Matpolr];
176 Matpolr_z(:,L2) = [];
177 ro_vv_z =[ro_vv,fliplr(ro_vv)];
178 w2_z =[w2,fliplr(w2)];
179 [H1,L1] = size (dzeta_m_z);
180
181 for i=1:(H1-1)
182     for j=1:(L1-1)
183         du(i,j) = (Matpolu_z(i,j) - Matpolu_z(i+1,j))*10^-3;
184         dr(i,j) = (Matpolr_z(i,j+1) - Matpolr_z(i,j))*10^-3;
185     end
186 end
187
188
189 for i=1:(H1-1)
190     for j=1:(L1-1)
191         dzeta_m_bunka(i,j) = (dzeta_m_z(i,j) + dzeta_m_z(i+1,j) + dzeta_m_z(i,j+1) +
192 dzeta_m_z(i+1,j+1)) /4; % hodnota stredu bunky
193         ro_vv_bunka(i,j) = (ro_vv_z(i,j) + ro_vv_z(i+1,j) + ro_vv_z(i,j+1) + ro_vv_z(i+1,j+1))
194 /4; % hodnota stredu bunky
195         w2_bunka(i,j) = (w2_z(i,j)+w2_z(i+1,j) + w2_z(i,j+1) + w2_z(i+1,j+1))/4; % hodnota
196 stredu bunky
197         hmotnostni_tok(i,j) = ro_vv_bunka(i,j) * w2_bunka(i,j) * du(i,j) * dr(i,j); %
198 hmotnostni tok bunkou
199         dzeta_m_vaz(i,j) = dzeta_m_bunka(i,j) * hmotnostni_tok(i,j); % ztratovy soucinitel v
200 bunce * hmotnostni tok v bunce
201
202     end
203 end
204
205 Dzeta_m_vaz = 0;
206 Ro_vv_bunka = 0;
207 W2_bunka = 0;
208 Plocha = 0;
209
210 for i=1:(H1-1)
211     for j=1:(L1-1)
212
213         Dzeta_m_vaz = Dzeta_m_vaz + dzeta_m_vaz(i,j);
214         Ro_vv_bunka = Ro_vv_bunka + ro_vv_bunka(i,j);
215         W2_bunka = W2_bunka + w2_bunka(i,j);
216         Plocha = Plocha + du(i,j) * dr(i,j);
217     end
218 end
219
220
221
222 dzeta_m_vazena = Dzeta_m_vaz/((Ro_vv_bunka/((H1-1)*(L1-1)))*(W2_bunka/((H1-1)*(L1-
223 1)))*Plocha);
224 display(['Celkový ztratový soucinitel vážený hmotnostním tokem
225 ',num2str(dzeta_m_vazena*100,3),' [%].'])
226

```

```

227 aritmet_prumer = (sum(sum(dzeta_m_z)))/(H1*L1);
228 display(['Střední hodnota ',num2str(aritmet_prumer*100,3),' [%].'])
229 median_celk = (median(median(dzeta_m_z)));
230 display(['Median ',num2str(median_celk*100,3),' [%].'])
231 MAX = (max(max(dzeta_m_z)));
232 display(['Max ',num2str(MAX*100,4),' [%].'])
233 MIN = (min(min(dzeta_m_z)));
234 display(['Min ',num2str(MIN*100,4),' [%].'])
235
236
237 % Analýza dat - po výšce
238 %-----
239 disp(' ')
240 display(['Analýza dat - po výšce'])
241 display(['-----'])
242 disp(' ')
243 % data středního rezu
244 dzeta_m_str = dzeta_m(:,1);
245 Matpolr_str = Matpolr(1,:);
246 Matpolu_str = Matpolu(:,1);
247 ro_vv_str = ro_vv(:,1);
248 w2_str = w2(:,1);
249
250 [HS,LS] = size (dzeta_m_str); % velikost matice
251
252 Plocha_str = 0;
253
254 for i=1:HS-1
255     for j=1:LS
256         plocha_str(i,j) = du(i,j) * dr(i,j);
257         hmotnostni_tok_str(i,j) = ro_vv_str(i,j) * w2_str(i,j) * plocha_str(i,j);
258         dzeta_m_vaz_str(i,j) = dzeta_m_str(i,j)* hmotnostni_tok_str(i,j);
259         Plocha_str = Plocha_str + du(i,j) * dr(i,j);
260     end
261 end
262
263 dzeta_m_vazena_str = (sum(dzeta_m_vaz_str))/(((sum(ro_vv_str))/((HS-
264 1)*LS))*((sum(w2_str))/((HS-1)*LS))*Plocha_str);
265 display(['Celkový ztrátový součinitel vážený hmotnostním tokem
266 ',num2str(dzeta_m_vazena_str*100,3),' [%].'])
267 median_str = (median(median(dzeta_m_str)));
268 display(['Median ',num2str(median_str*100,3),' [%].'])
269 MAX_str = (max(max(dzeta_m_str)));
270 display(['Max ',num2str(MAX_str*100,4),' [%].'])
271 MIN_str = (min(min(dzeta_m_str)));
272 display(['Min ',num2str(MIN_str*100,4),' [%].'])
273
274
275 % Vykreslení ztrat
276 figure (1)
277 Matpolr_z_n = [fliplr(Matpolr),150-(Matpolr)];
278 Matpolr_z_n(:,L2) = [];
279 Matpolu_z_n = [Matpolu,Matpolu]/Matpolu(1,1);
280 Matpolu_z_n(:,L2) = [];
281 contourf(Matpolr_z_n,Matpolu_z_n,dzeta_m_z,500)
282 shading flat
283 colorbar
284 title ('Rozložení ztrátového součinitele \zeta_M za lopatkovou mříží ve vzdalenosti
285 0,2b', 'fontsize',10)
286 xlabel('Normovaná poloha sondy po délce lopatky x/l [-]', 'fontsize',8)
287 ylabel('Normovaná poloha sondy po rozteči lopatkové mříže y/t [-]', 'fontsize',8)
288
289 % Rozložení rychlosti w2 na výstupu za lopatkovou mříží
290 figure (2)
291 w2Zrcad=[fliplr(w2),w2];
292 w2Zrcad(:,L2) = [];
293 contourf(Matpolr_z_n,Matpolu_z_n,w2Zrcad,500)
294 shading flat
295 colorbar
296 title ('Rozložení rychlosti na výstupu w_2 ve vzdalenosti 0,2b', 'fontsize',10)
297 xlabel('Normovaná poloha sondy po délce lopatky x/l [-]', 'fontsize',8)
298 ylabel('Normovaná poloha sondy po rozteči lopatkové mříže y/t [-]', 'fontsize',8)
299
300
301
302 % Rozložení ztrat po výšce lopatky 6-30mm

```

```

303
304 matpolr_4 = Matpolr(1,:);
305 [HD0,LD0] = size (matpolr_4);
306
307 for i=1:HD0
308     for j=1:LD0
309
310         delta_1(i,j) = abs(matpolr_4(i,j)-6);
311         delta_2(i,j) = abs(matpolr_4(i,j)-10);
312         delta_3(i,j) = abs(matpolr_4(i,j)-15);
313         delta_4(i,j) = abs(matpolr_4(i,j)-20);
314         delta_5(i,j) = abs(matpolr_4(i,j)-25);
315         delta_6(i,j) = abs(matpolr_4(i,j)-30);
316     end
317 end
318
319 [d1,d2] = min(delta_1);
320 [d3,d4] = min(delta_2);
321 [d5,d6] = min(delta_3);
322 [d7,d8] = min(delta_4);
323 [d9,d10] = min(delta_5);
324 [d11,d12] = min(delta_6);
325
326 figure (3)
327 plot((Matpolu(:,1)-Matpolu(H1,1))/(Matpolu(1,1)-Matpolu(H1,1)),dzeta_m(:,d12),'--
328 ks','LineWidth',1,...
329         'MarkerEdgeColor','k',...
330         'MarkerFaceColor','r',...
331         'MarkerSize',5)
332 hold on
333 plot((Matpolu(:,1)-Matpolu(H1,1))/(Matpolu(1,1)-Matpolu(H1,1)),dzeta_m(:,d10),'--
334 ks','LineWidth',1,...
335         'MarkerEdgeColor','k',...
336         'MarkerFaceColor','g',...
337         'MarkerSize',5)
338 hold on
339 plot((Matpolu(:,1)-Matpolu(H1,1))/(Matpolu(1,1)-Matpolu(H1,1)),dzeta_m(:,d8),'--
340 ks','LineWidth',1,...
341         'MarkerEdgeColor','k',...
342         'MarkerFaceColor','b',...
343         'MarkerSize',5)
344 hold on
345 plot((Matpolu(:,1)-Matpolu(H1,1))/(Matpolu(1,1)-Matpolu(H1,1)),dzeta_m(:,d6),'--
346 ks','LineWidth',1,...
347         'MarkerEdgeColor','k',...
348         'MarkerFaceColor','y',...
349         'MarkerSize',5)
350 hold on
351 plot((Matpolu(:,1)-Matpolu(H1,1))/(Matpolu(1,1)-Matpolu(H1,1)),dzeta_m(:,d4),'--
352 ks','LineWidth',1,...
353         'MarkerEdgeColor','k',...
354         'MarkerFaceColor','m',...
355         'MarkerSize',5)
356 hold on
357 plot((Matpolu(:,1)-Matpolu(H1,1))/(Matpolu(1,1)-Matpolu(H1,1)),dzeta_m(:,d2),'--
358 ks','LineWidth',1,...
359         'MarkerEdgeColor','k',...
360         'MarkerFaceColor','w',...
361         'MarkerSize',5)
362
363
364 legend('30mm', '25mm', '20mm', '15mm', '10mm', '6mm', 'Location', 'North')
365 title ('Rozložení ztrátového součinitele \zeta_M po rozteči v řezech od stěny','fontsize',10)
366 xlabel('Normovaná poloha sondy po rozteči lopatkové mříže x/t [-]','fontsize',8)
367 ylabel('Ztrátový součinitel [-] ','fontsize',8)
368 grid on
369
370
371 % Rozloženi ztrat po vysce lopatky l/2
372 figure (4)
373 plot((Matpolu(:,1)-Matpolu(H1,1))/(Matpolu(1,1)-Matpolu(H1,1)),dzeta_m(:,1),'--
374 ks','LineWidth',1,...
375         'MarkerEdgeColor','k',...
376         'MarkerFaceColor','r',...
377         'MarkerSize',5)
378

```

```

379 title ('Rozložení ztrátového součinitele \zeta_M po rozteči v l/2', 'fontsize', 10)
380 xlabel('Normovaná poloha sondy po rozteči lopatkové mříže x/t [-]', 'fontsize', 8)
381 ylabel('Ztrátový součinitel [-] ', 'fontsize', 8)
382 grid on
383
384
385 % Kinetická viskozita
386
387 for i=1:H2
388     for j=1:L2
389         kin_viskozita(i,j) = ((2.48982 * 10^-5) * sqrt(((Mat_t_p(i,j)+273.15)^3)/273.15)/
390 (ro_vv(i,j) * ((Mat_t_p(i,j)+273.15) + 122)));
391     end
392 end
393
394 kin_viskozita_pr = (sum(sum(kin_viskozita)))/(H2*L2);
395
396
397
398 % Ztratovy soucinitel dle Stastneho
399
400 w_z_z =[w_z,fliplr(w_z)];
401 w2_s_z =[w2_s,fliplr(w2_s)];
402
403 uhrnny_citatel = 0;
404 uhrnny_jmenovatel = 0;
405
406 for i=1:(H1-1)
407     for j=1:(L1-1)
408
409         real = uhrnny_citatel +((w2_z(i,j))^2)*w_z_z(i,j)*du(i,j)*dr(i,j);
410         isoentr = uhrnny_jmenovatel + ((w2_s_z(i,j))^2)*w_z_z(i,j)*du(i,j)*dr(i,j);
411
412     end
413 end
414
415 uhrnny_ztratovy_soucinitel = 1-(real/isoentr);
416 display(['Uhrnny ztratovy soucinitel ', num2str(uhrnny_ztratovy_soucinitel*100,3), ' [%].'])
417
418 % Vystupni uhel proudu beta2 - po vysce lopatky
419
420 w_z_str = w_z(:,1);
421
422 for i=1:HS-1
423     for j=1:LS
424         w_z_str_int(i,j) = (w_z_str(i,j) + w_z_str(i+1,j))/2;
425         w2_str_int(i,j) = (w2_str(i,j) + w2_str(i+1,j))/2;
426         w_z_beta(i,j) = w_z_str_int(i,j) * du(i,j);
427         w2_beta(i,j) = w2_str_int(i,j) * cosd(acos(w_z_str_int(i,j)/w2_str_int(i,j))) *
428 du(i,j);
429
430
431     end
432 end
433 disp(' ')
434 display ('Parametry na výstupu z mříže')
435 display ('-----')
436 disp(' ')
437 beta_2_str = (asin ((sum(sum(w_z_beta)))/(sum(sum(w2_beta)))))*(180/pi);
438 display(['Výstupní úhel proudu beta2 - po výšce lopatky ', num2str(beta_2_str,6), ' [°].'])
439
440 % Vystupni uhel proudu beta2c - uhrnna hodnota vystupniho uhlu
441
442
443
444 for i=1:H2-1
445     for j=1:L2-1
446         w_z_int(i,j) = (w_z(i,j) + w_z(i+1,j))/2;
447         w2_int(i,j) = (w2(i,j) + w2(i+1,j))/2;
448         w_z_betac(i,j) = w_z_int(i,j) * du(i,j) * dr(i,j);
449         w2_betac(i,j) = w2_int(i,j) * cosd(w_z_int(i,j)/w2_int(i,j)) * du(i,j) * dr(i,j);
450         beta_2(i,j) = asin(w_z_int(i,j)/w2_int(i,j)) *
451 cosd(acos(w_z_int(i,j)/w2_int(i,j))))*(180/pi);
452         Matpolr_u(i,j) = Matpolr(i,j);
453         Matpolu_u(i,j) = Matpolu(i,j);
454     end

```

```

455 end
456
457
458 figure (6)
459
460
461 surf(Matpolr_u,Matpolu_u,beta_2)
462
463 shading interp
464 colorbar
465 title ('Rozložení výstupního úhlu do vzdálensti l/2','fontsize',10)
466 xlabel('l [mm]','fontsize',8)
467 ylabel('t [mm]','fontsize',8)
468 zlabel('Výstupní úhel [°]','fontsize',8)
469 xlim([0 75])
470
471
472 beta_2_c = (asin ((sum(sum(w_z_betac)))/(sum(sum(w_2_betac))))*(180/pi));
473 display(['Výstupní úhel proudu beta2 - úhrnná hodnota výstupního úhlu ',num2str(beta_2_c,6),'
474 [°].'])
475
476 % Deviace proudu
477
478 delta_beta_2 = abs(beta_2_c - beta_2_str);
479 display(['Deviace proudu ',num2str(delta_beta_2,6),' [-].'])
480
481 %Reynoldsovo cislo
482 Re1 = (((sum(sum(w1)))/(H2*L2))*0.2)/ kin_viskozita_pr;
483 Re2 = (((sum(sum(w2_s)))/(H2*L2))*0.2)/ kin_viskozita_pr;
484 display(['Re1 ',num2str(Re1,4),' [-].'])
485 display(['Re2 ',num2str(Re2,4),' [-].'])
486 % Machovo cislo
487 Ma1 = (((sum(sum(w1)))/(H2*L2))/(sqrt( 1.4 *
488 ((sum(sum(r_vv)))/(H2*L2))*((sum(sum(Mat_t_p)))/(H2*L2))+273.15)))));
489 display(['Ma1 ',num2str(Ma1,4),' [-].'])
490 Ma2 = (((sum(sum(w2_s)))/(H2*L2))/(sqrt( 1.4 *
491 ((sum(sum(r_vv)))/(H2*L2))*((sum(sum(Mat_t_p)))/(H2*L2))+273.15)))));
492 display(['Ma2 ',num2str(Ma2,4),' [-].'])
493 disp(' ')
494
495 display ('Energetická ztráta proudícího media s mezní vrstvou')
496 display ('-----')
497 disp(' ')
498
499
500 w1_profil = sum(w1)/H2;
501 w0_profil = sum(w0)/H2;
502
503 w_profil_o = [w1_profil,0];
504
505 Matpolr_str_o = [Matpolr_str+0.5,0];
506
507 [HD,LD] = size (Matpolr_str_o);
508
509 w_x=0:0.1:75;
510 [HD2,LD2] = size (w_x);
511
512 % Fce w1(y)
513 % af = 0.000628951;
514 % bf = 13.84798990;
515 % cf = 272.6663329;
516 % df = -0.02014985;
517 % ef = -0.98120860;
518 % ff = 0.008560496;
519 % gf = 0.173548718;
520 %
521 % for i=1:HD2
522 %     for j=1:LD2
523 %
524 w1_fce(i,j)=(af+cf*w_x(i,j)+ef*w_x(i,j)^2+gf*w_x(i,j)^3)/(1+bf*w_x(i,j)+df*w_x(i,j)^2+ff*w_x(i
525 ,j)^3);
526 %     end
527 % end
528
529
530

```

```

531 % Fce wl(y) - retrofit
532
533 af = 1.19302779961528225e-05;
534 bf = -0.342935086884486603;
535 cf = 41.2271247010085732;
536 df = 0.227410772060982575;
537 ef = -36.7187231172721309;
538 ff = 0.12194121478921608;
539 gf = 19.8277844069732914;
540 hf = -0.724935433447688931;
541 iff = -19.2500138570761067;
542 jf = 0.351822934303344481;
543 kf = 7.94964528537709498;
544
545
546
547 for i=1:HD2
548     for j=1:LD2
549
550
551 w1_fce(i,j)=(af+cf*w_x(i,j)^(0.5)+ef*w_x(i,j)+gf*w_x(i,j)^(1.5)+iff*w_x(i,j)^2+kf*w_x(i,j)^(2.
552 5))/(1+bf*w_x(i,j)^(0.5)+df*w_x(i,j)+ff*w_x(i,j)^(1.5)+hf*w_x(i,j)^2+jf*w_x(i,j)^(2.5));
553
554     end
555 end
556
557
558 % Korekce rychlosti u steny
559
560 for i=1:HD2
561     for j=1:LD2
562         w_kor(i,j) = (0.015 * exp(-3.5*(w_x(i,j)-0.5))); % korekčni fce pro Pitotovu sondu u
563 steny
564         korekce_stena(i,j) = w1_fce(i,j)+w1_fce(i,j)*w_kor(i,j); % aplikace korekčni fce
565
566     end
567 end
568 w1_radek_lpul = korekce_stena(1,LD2);
569
570 % Posinovací tloušťka mezní vrstvy
571
572 for i=1:HD2
573     for j=1:LD2-727
574         dr_radek(i,j) = (w_x(i,j+1)-w_x(i,j));
575
576         pos_tl(i,j) = (1-(korekce_stena(i,j) / w1_radek_lpul)) * dr_radek(i,j);
577     end
578 end
579
580 pos_tl_mez_vrs = sum(pos_tl);
581 display(['Pošínovací tloušťka mezní vrstvy ',num2str(pos_tl_mez_vrs,6),' [mm].'])
582
583 % Impulzní tloušťka mezní vrstvy
584
585 for i=1:HD2
586     for j=1:LD2-727
587         imp_tl(i,j) = ((korekce_stena(i,j) / w1_radek_lpul) * (1-(korekce_stena(i,j) /
588 w1_radek_lpul))) * dr_radek(i,j);
589     end
590 end
591
592 imp_tl_mez_vrs = sum(imp_tl);
593 display(['Impulzní tloušťka mezní vrstvy ',num2str(imp_tl_mez_vrs,6),' [mm].'])
594
595 % Energetická tloušťka mezní vrstvy
596
597 for i=1:HD2
598     for j=1:LD2-727
599         en_tl(i,j) = ((korekce_stena(i,j) / w1_radek_lpul) * (1-((korekce_stena(i,j) /
600 w1_radek_lpul)^2))) * dr_radek(i,j);
601     end
602 end
603
604 en_tl_mez_vrs = sum(en_tl);
605 display(['Energetická tloušťka mezní vrstvy ',num2str(en_tl_mez_vrs,6),' [mm].'])
606

```

```

607 % Ztrata mezni vrstvou
608 ztr_mez_vrs = 2 * en_tl_mez_vrs/ 150;
609 display(['Ztráta mezní vrstvou ', num2str(ztr_mez_vrs*100,6), ' [%].'])
610
611
612 % % Interpolace bodu rychlostního profilu
613
614 krok = 0:0.1:75.5;
615
616 interp_rych_profil = interp1(Matpolr_str_o,w_profil_o,krok);
617
618
619 % Mocninový zákon
620
621
622 % mocninovy_exp =8;
623 %
624 % w1_max = max(w1_fce);
625 % w_s = sum(w1_fce)/(LD-1);
626 % ro_s = sum(sum(ro_vv))/(H2*L2);
627 % Re_moc_zak = w_s*0.15/kin_viskozita_pr;
628 % lambda = 0.3164/(Re_moc_zak^0.25);
629 % tau_w = (lambda*ro_s*w_s^2)/8;
630 % beta = w_s/w1_max;
631 %
632 % delta_p = ((0.3164*beta/16)^(mocninovy_exp/(1-mocninovy_exp)))*(75/(Re_moc_zak^((-
633 3/4)*(mocninovy_exp/(1-mocninovy_exp)))));% vazka (laminarni) podvrstva
634 %
635 % for i=1:HD
636 %     for j=1:LD
637 %
638 %         w_mocnin_zakon(i,j) = w1_max * (((delta_p +
639 Matpolr_str_o(i,j))/75)^(1/mocninovy_exp)); % mocninovy zakon
640 %
641 %     end
642 % end
643
644 %
645 % % Turbulentni logaritmicky zakon
646 %
647 % w_treci = w_s * sqrt(lambda/8);
648 % w_plus = w_s/w_treci;
649 % for i=1:HD
650 %     for j=1:LD
651 %         y_plus(i,j) = Matpolr_str_o(i,j)*0.001*w_treci/kin_viskozita_pr;
652 %         w_log_zakon(i,j) = w_treci/0.4*log((delta_p +Matpolr_str_o(i,j))/delta_p);
653 %     end
654 % end
655 %
656 % % Prandtlova fce drsnosti
657 %
658 % Re_drsnosti = (0.0000004*w_treci)/kin_viskozita_pr;
659 % n = 0:0.01:100;
660 %
661 % Prandtl_y = (0.8 + 2 * log(n));
662 %
663 % figure (20)
664 %
665 % plot(n,Prandtl_y,'-k','LineWidth',1)
666
667
668
669
670
671 for i=1:HD
672     for j=1:LD
673         energeticka_tlouska(i,j) = en_tl_mez_vrs;
674
675     end
676 end
677 % Prumerny ryclostni profil na vstupu
678
679 % figure (7)
680 % plot([fliplr(Matpolr_str_o),150-
681 Matpolr_str_o],[fliplr(w_profil_o),w_profil_o],'ks','LineWidth',2,...
682 %         'MarkerEdgeColor','k',...

```



```

683 %             'MarkerFaceColor','m',...
684 %             'MarkerSize',5)
685 % hold on
686 % plot([fliplr(krok),150-krok],[fliplr(interp_rych_profil),interp_rych_profil'],'-
687 k','LineWidth',1)
688 %
689 % title ('Rychlostní profil na vstupu','fontsize',10)
690 % xlabel('Poloha [mm]','fontsize',8)
691 % ylabel('Střední rychlost [m/s] ','fontsize',8)
692 % legend('Průměrná rychlost','Interpolace dat','Location','South')
693 % grid on
694 % hold off
695
696 % Prumerny ryclostni profil na vstupu do vzdalosti l/2
697 % figure (8)
698 % plot([0,fliplr(Matpolr_str_o+delta_p)],[0,fliplr(w_mocnin_zakon)],'-k','LineWidth',2)
699 % hold on
700 % plot([0,fliplr(Matpolr_str_o+delta_p)],[0,fliplr(w_log_zakon)],'-k','LineWidth',2)
701 % hold on
702 % plot(Matpolr_str_o,w_profil_o,'ks','LineWidth',2,...
703 %             'MarkerEdgeColor','k',...
704 %             'MarkerFaceColor','m',...
705 %             'MarkerSize',5)
706 % hold on
707 % plot(w_x,wl_fce,'-k','LineWidth',1)
708 % hold on
709 % plot(w_x,korekce_stena,'--','LineWidth',1)
710 % hold on
711 % plot(energeticka_tlouska,[0:1:LD-1],'-r','LineWidth',2)
712 % hold on
713 % plot(Matpolr_str,w0_profil,'-g','LineWidth',1)
714 %
715 % title ('Rychlostní profil na vstupu od steny','fontsize',10)
716 % xlabel('Poloha [mm]','fontsize',8)
717 % ylabel('Rychlost [m/s] ','fontsize',8)
718 % legend('Střední hodnoty rychlostí w_1','Regresní funkce','Aplikace korekční
719 funkce','Energetická tloušťka mezní vrstvy \delta^{**^*}','(Rychlost v bodě Prandtlovy sondy)',
720 'Location','SouthEast')
721 % ylim([0 25])
722 % grid on
723 % hold off
724
725 % Vykresleni korekcni fce
726
727 % figure (9)
728 % plot(w_x,w_kor,'-b','LineWidth',2)
729 % hold on
730 % plot(0.5,[0:0.001:0.09],'-r','LineWidth',2)
731 %
732 % title ('Korekční funkce','fontsize',14)
733 % xlabel('\Delta y/d_p','fontsize',10)
734 % ylabel('dw / w ','fontsize',10)
735 % xlim([0 3])
736
737 disp(' ')
738 display ('Redukce dat podle prof.Safarika')
739 display ('-----')
740 disp(' ')
741
742 % Redukce dat podle prof.Safarika
743 %-----
744
745 % oriznuti v max hodnote upravu po vysce - horni
746 p_s2(1:I1-1, :) = [];
747 p_c2(1:I1-1, :) = [];
748 Mat_tokol_to(1:I1-1, :) = [];
749 Matpcl(1:I1-1, :) = [];
750 Mat_p_bar(1:I1-1, :) = [];
751
752 % oriznuti v max hodnote upravu po vysce - dolni
753 p_s2(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
754 p_c2(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
755 Mat_tokol_to(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
756 Matpcl(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
757 Mat_p_bar(((a-I1+1)-(a2-I2-1)):a-I1+1, :) = [];
758

```

```

759 % oriznuti u steny
760 p_s2(:,L-2:L) = [];
761 p_c2(:,L-2:L) = [];
762 Mat_tokol_to(:,L-2:L) = [];
763 Matpcl(:,L-2:L) = [];
764 Mat_p_bar(:,L-2:L) = [];
765
766 % cela ekspanzni oblast - prezrcadleni
767 p_s2_z = [(p_s2),fliplr(p_s2)];
768 p_c2_z = [(p_c2),fliplr(p_c2)];
769 Mat_tokol_to_z = [(Mat_tokol_to),fliplr(Mat_tokol_to)];
770 Mat_t_p_z = [(Mat_t_p),fliplr(Mat_t_p)];
771 Matpcl_z = [(Matpcl),fliplr(Matpcl)];
772 Mat_p_bar_z = [(Mat_p_bar),fliplr(Mat_p_bar)];
773 r_vv_z = [(r_vv),fliplr(r_vv)];
774 w2_z = [(w2),fliplr(w2)];
775 beta_2_z = [(beta_2),fliplr(beta_2)];
776
777
778 % pomocne veliciny
779
780 for i=1:(H1-1)
781     for j=1:(L1-1)
782
783         theta2y(i,j) =
784             sqrt(2/0.4*((1.2)^(2.4/0.4)))*(((p_s2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j))/(p_c2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j)))
785             ^((1/1.4))*sqrt(1-(((p_s2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j))/(p_c2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j)))^(1.4-
786             1/1.4)))));
787
788         cp(i,j) = 1.4*r_vv_z(i,j)/0.4;
789         T_c2(i,j) = ((Mat_tokol_to_z(i,j)) + ((w2_z(i,j)^2)/(2*cp(i,j))));
790
791         pomer_d_c(i,j) = (1.4/0.4)*(((p_s2_z(i,j) +
792         Mat_p_bar_z(i,j))/(p_c2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j)))^(1/1.4))*(1-
793         (((p_s2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j))/(p_c2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j)))^(1.4-1/1.4)));
794         pomer_c2_c1(i,j) = (p_c2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j))/(Matpcl_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j));
795         pomer_ps2_pc2(i,j) = (p_s2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j))/(p_c2_z(i,j)+Mat_p_bar_z(i,j));
796         pomer_Tc1_Tc2(i,j) = (Mat_t_p_z(i,j)+273.15)/(T_c2(i,j)+273.15);
797         pomer_Tc2_Tc1(i,j) = (T_c2(i,j)+273.15)/(Mat_t_p_z(i,j)+273.15);
798
799         im(i,j) = pomer_c2_c1(i,j)*sqrt(pomer_Tc1_Tc2(i,j))*theta2y(i,j)*sind(beta_2_z(i,j));
800
801         ie(i,j) = pomer_c2_c1(i,j)*sqrt(pomer_Tc2_Tc1(i,j))*theta2y(i,j)*sind(beta_2_z(i,j));
802
803         ia(i,j) = pomer_c2_c1(i,j)*(2*pomer_d_c(i,j)*((sin(beta_2_z(i,j)))^2)+pomer_ps2_pc2(i,j));
804
805         io(i,j) = 2*pomer_c2_c1(i,j)*pomer_d_c(i,j)*sind(beta_2_z(i,j))*cosd(beta_2_z(i,j));
806
807         T_c2_kontr(i,j) = Mat_t_p_z(i,j) * (ie(i,j)/im(i,j));
808
809     end
810 end
811
812 % numericka integrace
813
814     Im=0;Ie=0;Ia=0;Io=0;
815
816     for i=1:(H1-1)
817         for j=1:(L1-1)
818
819             Im=Im+im(i,j)*du(i,j)*dr(i,j);
820             Ie=Ie+ie(i,j)*du(i,j)*dr(i,j);
821             Ia=Ia+ia(i,j)*du(i,j)*dr(i,j);
822             Io=Io+io(i,j)*du(i,j)*dr(i,j);
823         end
824     end
825
826
827     T_c2_str = (sum(sum(T_c2_kontr)))/((H1-1)*(L1-1));
828     Mat_t_p_str = (sum(sum(Mat_t_p_z)))/((H1-1)*(L1-1));
829     Im_str = Im * sqrt(T_c2_str/Mat_t_p_str);
830
831 % podobnostni cisla
832

```

```

833     La_kvadr =(1.2^(2/0.4))*((Ia^2)/(Im_str^2))*(1/2-
834     ((2/2.4)^(2/0.4))*((Im_str^2)/(Ia^2))+(2.4/2.8)*((Io^2)/(Ia^2))-sqrt(1/4-
835     ((2/2.4)^(2/0.4))*((Im_str^2)/(Ia^2))+((1.4^2)-1)/4*(1.4^2))*((Io^2)/(Ia^2)));
836     Ma_kvadr = 2*La_kvadr/(2.4-La_kvadr*0.4);
837     La = sqrt (La_kvadr);
838     Mach = sqrt (Ma_kvadr);
839
840
841     % beta2=acosd((1/(1.4*La))*(1.2^(1.4/0.4))*(Io/Im_str))
842
843     theta2 = ((1-(0.4/2.4)*La_kvadr)^(1/0.4))*((2.4/2)^(1/0.4))*La;
844     dzeta_safarik = ((Im_str)/(theta2*sind(beta_2_str)));
845
846
847     display(['Střední výstupní Ma je ',num2str(Mach,3),' [1].'])
848     disp(' ')
849     display(['Střední ztrátový součinitel je ',num2str(dzeta_safarik*100,4),' [%].'])
850

```