

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270013 – Stavba energetických strojů a zařízení

Studijní specializace: Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studium vlivu modelové eroze náběžné hrany lopatky na strukturu proudění v úplavu metodou PIV

Autor: Bc. Vladimír Abrhám

Vedoucí práce: RNDr. Daniel Duda, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

Zadání DP

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vladimír ABRHÁM**
Osobní číslo: **S21N0038P**
Studijní program: **N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení**
Specializace: **Stavba jaderně energetických zařízení**
Téma práce: **Studium vlivu modelové eroze náběžné hrany lopatky na strukturu proudění v úplavu metodou PIV**
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Zásady pro vypracování

1. Návštěva erozního stendu a prohlídka erodované lopatky z provozu.
2. Sken lopatky s poškozenou náběžnou hranou.
3. Příprava geometrického návrhu nepoškozené lopatky NACA 0012.
4. Příprava geometrického návrhu lopatky NACA 0012 s lehkou erozí náběžné hrany.
5. Příprava geometrického návrhu lopatky NACA 0012 se silně poškozenou náběžnou hranou, viz bod č. 1.
6. Výroba navržených modelů.
7. Upevnění modelů v aerodynamickém tunelu.
8. Kalibrace metody PIV.
9. Měření pomocí metody PIV.
10. Vyhodnocení naměřených dat.
11. Sepsání diplomové práce.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- C. Tropea, A. Yarin a J. Foss, Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Berlin: Springer, 2007
- V. Kopecký, Laserová anemometrie v mechanice tekutin, Brno: Tribun EU (2008); ISBN: 978-80-7399-357-3
- İ. Bakırtaş, N. Antar (Eds.) Vortex Dynamics – From Physical to Mathematical Aspects. London, United Kingdom, IntechOpen, 2022 [Online]
- R. J. Adrian, „Twenty years of particle image velocimetry“, Experiments in Fluids, sv. 39, č. 2, pp. 159-169, 2005
- D. Duda, V. Yanovych, V. Tsybalyuk a V. Uruba, „Effect of Manufacturing Inaccuracies on the Wake Past Asymmetric Airfoil by PIV“, Energies, sv. 15, č. 3, p. 1227, 2022
- C.R.F. Azevedo, A. Sinátoro, Erosion-fatigue of steam turbine blades, Engineering Failure Analysis, sv. 16, č. 7, 2009, p. 2290-2303
- Alessandro Corsini, Adrea Machedgiani, Franco Rispoli, Paolo Venturini, Anthony G. Sheard, Predicting Blade Leading Edge Erosion in an Axial Induced Draft Fan, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, sv. 134, p. 042601-1, 2012

Vedoucí diplomové práce: **RNDr. Daniel Duda, Ph.D.**
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant diplomové práce: **Vitalii Yanovych, doktor technických věd**
Katedra energetických strojů a zařízení

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Václav Dostál, Sc.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: 26.5.2023

.....

podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval RNDr. Danielu Dudovi, Ph. D za odborné rady, připomínky a celkovou spolupráci při zpracování výsledků a měření v rámci diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Jakubovi Jančovi za odbornou pomoc při 3D tisku lopatek. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Urubovi, CSc., doc. Ing. Vitalii Yanovychovi, DrSc. a dvojici Lukáš Bednář and Jakub Vlasák z Doosan Škoda Power.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Abrahám	Jméno Vladimír	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270013 – Stavba energetických strojů a zařízení		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) RNDr. Duda, Ph.D.	Jméno Daniel	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Studium vlivu modelové eroze náběžné hrany lopatky na strukturu proudění v úplavu metodou PIV		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	51	TEXTOVÁ ČÁST	29	GRAFICKÁ ČÁST	22
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Cílem této diplomové práce je experiment zkoumání vlivu eroze náběžné hrany lopatky pomocí metody PIV. Pro tento účel byly navrženy a vyrobeny tři modely lopatek z výchozího profilu NACA 0012 pomocí 3D tisku s různým stádiem poškození. Lopatky byly následně skenovány a použity při měření v aerodynamickém tunelu.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	PIV, 3D tisk, eroze, skenování lopatek, střední rychlost, fluktuace, turbulence, úplav, mezní vrstva

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Abrahám	Name Vladimír
STUDY PROGRAMME	N0715A270013 – Design of Power Machines and Equipment	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) RNDr. Duda, Ph.D.	Name Daniel
INSTITUTION	ZČU – FST – KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	A Study of the effect of erosion on the leading edge of a blade on the flow structure in the channel using the PIV method	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power system engineering	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	51	TEXT PART	29	GRAPHICAL PART	22
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis contains a description and experimental investigation of the effect of leading edge erosion using the PIV method. Three NACA 0012 airfoil models were manufactured using 3D printing, each with a different level of damage. These models were scanned and utilized for measurements in an aerodynamic tunnel.
KEY WORDS	PIV, edge erosion, wake, fluctuations, mean velocimetry, 3D printing, inspection, measurement

Přehled použitých zkratk a symbolů

x	suchost páry	[-]
m''	hmotnost syté páry	[kg]
m'	hmotnosti syté kapaliny	[kg]
m	hmotnost mokré páry	[kg]
$\frac{u}{c}$	rychlostní poměr	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
w	střední rychlost proudu	$[m \cdot s^{-1}]$
d	charakteristický rozměr	[m]
ν	kinematická viskozita	$[m^2 s^{-1}]$
PIV	Particle image velocimetry	[-]
STL	Standard Tessellation Language	[-]
I, II, III	označení zkoumané oblasti	[-]
α	úhle náběhu	[°]
u_r	referenční rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
u	rychlost ve směru proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
v	rychlost kolmá ke směru proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
Hz	jednotka frekvence	[-]
$\sigma[u]$	směrodatná odchylka rychlosti po směru proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
$\sigma[v]$	směrodatná odchylka rychlosti ve směru kolmém	$[m \cdot s^{-1}]$
i	index snímku	[-]
c	délka tětiny	[m]
CFD	Computational Fluid Dynamics	[-]

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Erozní koroze při proudění (3)	14
Obrázek 2 – rozdělení proudění kapalně fáze (1)	16
Obrázek 3 - Průběh eroze v čase	16
Obrázek 4 - Laminární proudění v trubce kruhového průřezu (8)	18
Obrázek 5 - Turbulentní proudění v trubce kruhového průřezu (8)	18
Obrázek 6 - Karmánova vírová stezka (16)	19
Obrázek 7 - Princip metody PIV (15)	20
Obrázek 8 - erozně poškozená lopatka	21
Obrázek 9 - základní profil lopatky NACA 0012 (17)	21
Obrázek 10 - Návrh modelu neporušené lopatky	22
Obrázek 11 - Vyrobený model neporušené lopatky	23
Obrázek 12 - Návrh modelu lehce porušené lopatky	23
Obrázek 13 - Zkompletovaný model lehce porušené lopatky	24
Obrázek 14 - Návrh modelu silně poškozené lopatky	24
Obrázek 15 - První návrh náběžné hrany silně porušené lopatky	25
Obrázek 16 - Druhý návrh náběžné hrany silně porušené lopatky	25
Obrázek 17 - Špatně vyrobený model druhého návrhu silně porušené lopatky	26
Obrázek 18 - Špatně vyrobený model neporušené lopatky	26
Obrázek 19 - Finální návrh silně poškozené lopatky	27
Obrázek 20 - Zkompletovaný model silně porušené lopatky	27
Obrázek 21 - Kalibrace skeneru pomocí kalibrační desky	28
Obrázek 22 - Skenování lopatky	29
Obrázek 23 - Ukázka necelistvého zmapování modelu	30
Obrázek 24 - Porovnání skutečné geometrie neporušené lopatky s navrhovaným modelem ..	31
Obrázek 25 - Porovnání skutečné geometrie lehce porušené lopatky s navrhovaným modelem ..	32
Obrázek 26 - Porovnání skutečné geometrie silně porušené lopatky s navrhovaným modelem ..	33
Obrázek 27 - Uspořádání aparatury pro měření	34
Obrázek 28 - Kalibrační snímky	35
Obrázek 29 - Způsob sycení hlavního proudu částicemi	36
Obrázek 30 - schéma zkoumaných oblastí	37
Obrázek 31 - okamžitá rychlost po směru proudění	38
Obrázek 32 - Střední rychlost po směru proudění pro pole I	39

Obrázek 33 - Střední rychlost po směru proudění pro pole II.....	40
Obrázek 34 - Střední rychlost po směru proudění pro pole III s úhlem náběhu 5°	41
Obrázek 35 - Střední rychlost po směru proudění pro pole III s úhlem náběhu 10°	42
Obrázek 36 – Fluktuace po směru proudění pro pole I	43
Obrázek 37 - Fluktuace po směru proudění pro pole II	43
Obrázek 38 - Fluktuace po směru proudění pro pole III s úhlem náběhu 5°	44
Obrázek 39 - Fluktuace po směru proudění pro pole III s úhlem náběhu 10°	44
Obrázek 40 - Fluktuace ve směru kolmém k hlavnímu proudění pro pole I.....	45
Obrázek 41 - Fluktuace ve směru kolmém k hlavnímu proudění pro pole II	45
Obrázek 42 - Fluktuace ve směru kolmém k hlavnímu proudění pro pole III s úhlem náběhu 5°	46
Obrázek 43 - Fluktuace ve směru kolmém k hlavnímu proudění pro pole III s úhlem náběhu 10°	46
Obrázek 44 – Přehlednější porovnání fluktuací v obou směrech pro pole I	47
Obrázek 45 - Přehlednější porovnání fluktuací v obou směrech pro pole II.....	48
Obrázek 46 - Přehlednější porovnání fluktuací v obou směrech pro pole III	48

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přepočítané hodnoty frekvence ventilátoru na Reynoldsovo číslo.....	37
---	----

Obsah

Zadání DP.....	2
Poděkování.....	5
ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	6
SUMMARY OF DIPLOMA SHEET.....	7
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
1 Úvod.....	13
2 Eroze.....	14
3 Erozní koroze.....	14
3.1 Reakce při erozní korozi.....	14
3.2 Eroze turbínových lopatek.....	15
3.3 Opatření proti účinkům eroze.....	17
3.4 Aktivní prostředky pro předcházení erozních účinků.....	17
3.4.1 Rychlostní poměr u/c	17
3.4.2 Snížení vlhkosti páry.....	17
3.4.3 Konstrukční řešení průtočné části.....	17
3.5 Pasivní ochrana.....	17
4 Proudění.....	18
4.1 Karmánova vírová stezka.....	19
5 Metoda měření.....	20
6 Návrh lopatek.....	21
6.1 Neporušený model lopatky.....	22
6.2 Lehce porušený model lopatky.....	23
6.3 Silně porušený model lopatky.....	24
7 Skenování lopatek.....	28
7.1 Skenovaný model neporušené lopatky.....	31
7.2 Skenovaný model lehce porušené lopatky.....	32
7.3 Skenovaný model silně porušené lopatky.....	33
8 Příprava pro měření.....	34
8.1 Sycení proudu částicemi.....	36
9 Měření.....	37
9.1 Vyhodnocené veličiny.....	38
9.1.1 Střední rychlost po směru proudění.....	39

9.1.2	Fluktuace rychlosti	42
10	Závěr.....	49
11	Bibliografie.....	Chyba! Záložka není definována.

1 Úvod

Eroze se týká téměř všech lopatkových strojů. Proces eroze ovlivňuje komponenty turbíny, která slouží pro výrobu elektrické energie. Lopatky časem degradují a snižují se jejich původní vlastnosti jako například mechanické vlastnosti či tvar. Tvar lopatky zásadně ovlivňuje účinnost celého stroje, ale také strukturu proudění za ní. Cílem této diplomové práce je především zkoumání modelové eroze náběžné hrany lopatky na strukturu proudění.

Pro sledování proudění kolem lopatky slouží různé metody jako jsou: laserová Dopplerovská anemometrie (LDA), metoda žhavého drátku (HWA) nebo také obrazové měření rychlosti unášených částic (PIV). V našem případě byla zvolena právě poslední zmíněná metoda (PIV), pomocí které bylo měřeno okamžité pole rychlostí, z kterého následně byly vyhodnoceny veličiny jako je průměrná rychlost a fluktuace.

Úvodní kapitola diplomové práce se zabývá principem eroze. Následně je vztažena na lopatky parních turbín. Dále je vysvětleno, jaká část parní složky se na erozi podílí a jak zmírnit její účinky. Závěrečná část teorie se věnuje základům teorie proudění, jeho rozdělení a příkladnému jevu, který může nastat při obtékání lopatky.

Následná praktická část pojednává o výrobě lopatek a týkajících se problémů se samotnou výrobou. Následuje skenování lopatek, příprava instrumentace měření, měření a vyhodnocení výsledků.

2 Eroze

Eroze je proces, při kterém dochází k mechanickému opotřebení povrchu materiálu. V našem případě se jedná o lopatky turbíny, kde dochází k rozrušování povrchu lopatky. Jedná se především o oběžné lopatky, ale i o rozváděcí. Lopatka je v přímém kontaktu s pracovním médiem (párou), které obsahuje kapičky vody. Ty po kontaktu s lopatkou působí abrazivně a obrušují povrch lopatky. Ve většině případech je eroze doprovázená chemickými účinky na lopatku (koroze). Jev, při kterém působí tyto dva faktory se nazývá erozní koroze. (1) (2)

3 Erozní koroze

Princip erozní koroze spočívá ve zrychleném či zvýšeném napadení kovu. Kromě abraze materiálu lopatky je zde zastoupená koroze. Erozní koroze je důsledkem prudké turbulence na určitém místě v důsledku narušení vzoru proudění. Jedná se například o ohyby potrubí, za zúžením nebo překážkou. Kov je z povrchu odstraňován ve formě rozpuštěných iontů nebo rozměrově stálých korozních produktů, které se z povrchu kovu mechanicky opotřebovávají. Erozní koroze může snadno nastat v případě měkkých kovů nebo tam, kde je poškozena ochranná vrstva na kovovém povrchu. Pevné částice nebo vzduchové bubliny v kapalinách jsou zvláště destruktivní v procesu erozní koroze. Erozní korozi lze obecně rozpoznat podle zřetelného vzoru proudění ve formě hladkých důlků, drážek, vln nebo žlabů. (3)

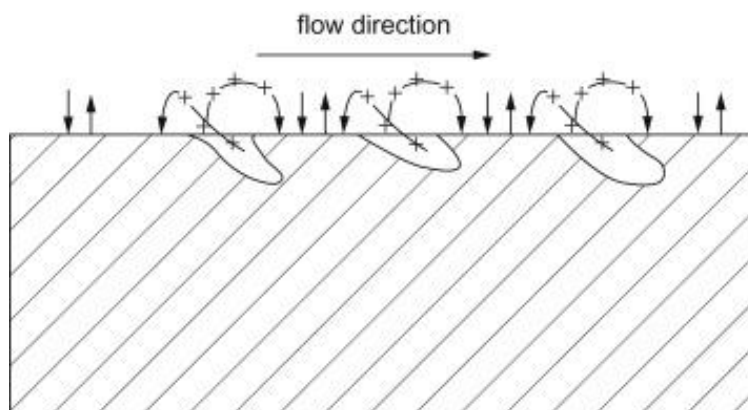
3.1 Reakce při erozní korozi

V případě parních turbín dochází k reakci mezi vodou ve vlhké páře a ocelovým materiálem lopatek. Při proudění mokré páry průtočnou částí turbíny a potrubími dochází ke dvou základním reakcím.

První reakce převládá při teplotách $120\text{ }^{\circ}\text{C} \div 170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při této teplotě vzniká na povrchu ocelových dílů hydroxid železnatý $\text{Fe}(\text{OH})_2$, který je rozpustný ve vodě. Tato chemická reakce by se zastavila v, pokud by se voda v blízkosti ocelových stěn nasýtila ionty železa.

Vodní film s vysokým obsahem iontů železa je však prouděním odnášen a je nahrazován novým filmem z vlhké páry bez iontů železa. Tím dochází k trvalé erozní korozi materiálu. Popsaná chemická rovnice je: $\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$.

Druhá chemická reakce je $3\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$. Tato reakce převládá při teplotách nad $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ a má pozitivní vliv na životnost lopatek parních turbín, neboť Fe_3O_4 (magnetit) má prakticky stejný součinitel roztažnosti jako ocel, je ve vodě nerozpustný, pevně ulpívá na ocelových stěnách a chrání ocelový materiál před korozi (ochrana vůči rozpouštění hydroxidu železnatého ve vodě). (1) (2)



Obrázek 1 – Erozní koroze při proudění (3)

3.2 Eroze turbínových lopatek

Při erozi působením mokré páry je směr kapek dopadajících na náběžnou hranu lopatek jiný než směr rychlosti páry, na kterou byla lopatka navržena. Kapičky vody dopadající na náběžnou hranu oběžné lopatky pod jiným úhlem způsobují erozi jejího povrchu. Erozi způsobují kapičky vody o průměru $10 \mu\text{m} \div 500 \mu\text{m}$.

Erozním působením jsou tedy zasaženy hlavně lopatky turbíny pracující v určité oblasti se sytou (mokrú) parou. To jsou například koncové stupně kondenzačních turbín a ve většině stupňů turbín v jaderných elektrárnách s tlakovodním nebo varným reaktorem. Zde expanduje pára pod pravou horní mezní křivku. Pro tento případ se v jaderných elektrárnách používají zařízení pro separaci a přehřívání páry.

Mokrá pára proudící stupni kol s lopatkami má kapalnou fázi ve formě mlhy, jemných kapiček, disperzního stavu (tj. kapek vody různé velikosti) nebo vodního filmu.

Stav mokré páry v rovnovážném stavu je dán jejím tlakem nebo teplotou a její suchostí x . Suchost páry je definována jako poměr hmotnosti parní fáze k celkové hmotnosti mokré páry.

$$x = \frac{m''}{m} = \frac{m''}{m' + m''} \quad (1)$$

m'' - hmotnost syté páry

m' - hmotnost syté kapaliny

m – hmotnost mokré páry

Jak již bylo zmíněno, eroze lopatek je dána abrazivním působením kapalně fáze, ale ne veškerá kapalná fáze se podílí na erozi. Proudění kapalně fáze na výstupu z rozváděcí mříže lopatek lze dělit následovně:

1. Kapičky vody nejmenšího průměru, které projdou stupněm turbíny a nezpůsobují erozi ($5 \mu\text{m}$)
2. Kapičky, které se vytvořily odtržením vodního filmu na stěnách kanálu.
3. Kapičky, které se vytvořily odtržením kapek ze stěny lopatek.
4. Kapičky vody vzniklé rozpadem filmu tekoucím přes odtokové hrany.



Obrázek 2 – rozdělení proudění kapalné fáze (1)

Při erozi lopatek záleží na parametrech páry a na druhu vodní fáze, která se v daném místě vyskytuje. Kromě těchto dvou parametrů se vyskytuje i časová závislost. To znamená, jak dlouho je daný stupeň turbíny vystavován eroznímu prostředí. V první fázi, kdy jsou lopatky nové, dochází k počáteční erozi, která je intenzivní. Dochází k „odbroušení“ poddajnější fáze materiálu. V další fázi dochází již ke snížení intenzity eroze, protože již poddajnější fáze materiálu chybí. V poslední fázi již k úbytku materiálu dochází velmi málo. U dlouhých lopatek se eroze materiálu zvětšuje od paty ke špičce (koncové stupně) a při erozi náběžných hran může dojít k destrukci lopatky. (1) (2)



Obrázek 3 - Průběh eroze v čase

3.3 Opatření proti účinkům eroze

Omezení či snížení erozivních účinků na lopatky turbíny je možné různými způsoby. Jedním z možných způsobů ochrany jsou pasivní a aktivní prostředky. Mezi aktivní prostředky patří snížení vlhkosti páry před turbínovým stupněm, vhodným konstrukčním provedením průtočné části (které napomáhá odvodu vlhkosti mimo turbínu), konstrukčním provedením průtočné části ke zmírnění erozního účinku a snížení rychlostního poměru u/c . (1) (2)

3.4 Aktivní prostředky pro předcházení erozních účinků

3.4.1 Rychlostní poměr u/c

Uvedený rychlostní poměr je bezrozměrný parametr, který dává do poměru unášivou složku rychlosti oběžných lopatek a fiktivní rychlost, kterou by měla mít pára, při izoentropickém proudění a entalpickém spádu. Při snížení rychlostního poměru se stupeň stává přetížený a zpracovává příliš velký spád a účinnost stupně klesá. V důsledku větší rychlosti expanze jsou menší kapky vody. Větší rychlost v mezeře mezi rozváděcími a oběžnými lopatkami způsobí rozdrobení velkých kapek, které mají na erozi zásadní vliv. Dalším kladným efektem přetíženého stupně, kromě jednoho z možného opatření vůči korozi může být i možné snížení počtu stupňů, či patního průměru. (1) (2) (4)

3.4.2 Snížení vlhkosti páry

Lze docílit pomocí zvýšení teploty vstupní páry při stejném tlaku. Toho se dosáhne přehříváním páry v kotli u klasických uhelných elektráren, nebo vnější separací vlhkosti a přehříváním páry v jaderných elektrárnách (tlakovodní a varné).

Další variantou je snížení tlaku vstupní páry nebo snížení dělicího tlaku u přehřívání. Dělicí tlak se volí takový, aby byla největší tepelná účinnost oběhu. Zvyšováním dělicího tlaku roste tepelná účinnost cyklu, ale naopak klesá účinnost termodynamická, kvůli již zmíněné zvyšující se vlhkosti páry. (1) (2) (4)

3.4.3 Konstrukční řešení průtočné části

K předcházení erozních účinků lze využít více regeneračních odběrů, kterými se odvádí z obvodu stupňů vlhkost, snížením míst s náhlými změnami tvaru, zvětšením axiální vzdálenosti mezi rozváděcí a oběžnou mříží, odstranění vlhkosti z prostoru za rozváděcími lopatkami.

Pomocí odstředivých sil se vlhkost dostává na obvod lopatkového stupně, odkud lze vlhkost odsávat mimo těleso turbíny, ale zároveň může nastat odsávání vlhkosti s párou. Tento jev může narušit proudění páry a snižovat účinnost stupně. (1) (2) (4)

3.5 Pasivní ochrana

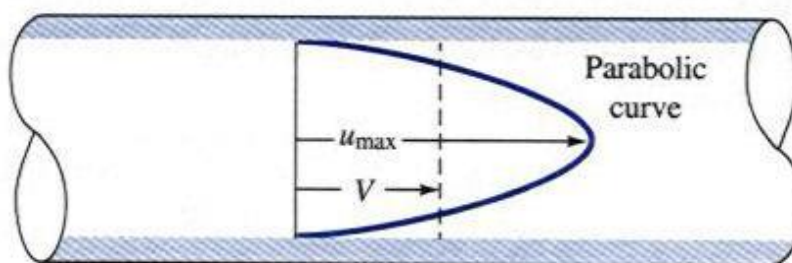
Z hlediska pasivního typu ochrany se používají následující metody: použití materiálů odolných vůči erozi, povrchové kalení, úprava náběžné hrany lopatek v místech, kde dochází k intenzivní korozi, ochrana materiály nevhodných pro celou lopatku, elektrojiskrové či plazmové nanesení tvrdé ochranné vrstvy.

Materiály odolné proti korozi jsou například nerezavějící oceli a titanové slitiny. Ochranné materiály, které jsou odolné proti erozi, ale nejsou vhodné pro celou lopatku, mohou být stelitové pásky pájené stříbrnou pájkou. Pro elektrojiskrové nebo plazmové ochranné vrstvy bývají z rychlořezné oceli, wolframové slitiny nebo stelitu (5). (4)

4 Proudění

Větší pozornost v této diplomové práci bude věnována struktuře proudění. Při proudění dochází k pohybu tekutin (kapaliny a plyny), který jsou zapříčiněn vlivem působením vnějších sil. Tyto síly mohou být způsobeny gravitačním polem, tlakem, rozdílem hustoty nebo různými kombinacemi těchto faktorů. Částice tekutiny se pohybují po trajektoriích, pomocí kterých klasifikujeme tři základní typy proudění. Typy proudění jsou: laminární, turbulentní a přechodové.

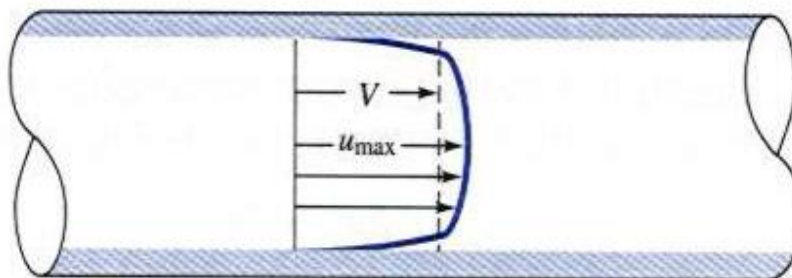
Laminární proudění představuje proudění, kde částice tekutiny se pohybují rovnoběžně po nekonečně tenkých vrstvách (lamina – vrstva). Každá vrstva tekutiny se pohybuje rychlostí, která je závislá na vzdálenosti od stěny. Při laminárním proudění v potrubí kruhového průřezu je rychlost na vnitřní stěně nejmenší a rychlost v podélné ose symetrie největší (viz obrázek 4). Pro laminární proudění je typický velmi pomalý pohyb částic nebo vysoká hodnota vazkosti (vazkost/viskozita udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti).



Obrázek 4 - Laminární proudění v trubce kruhového průřezu (8)

Mnohem častějším úkazem je proudění turbulentní. Částice tekutiny se již pohybují všemi směry a dochází k výměně kinetické energie. Rychlosti částic po průřezu vyrovnávají a rychlostní profil již nepřipomíná parabolu, ale spíše „obdélník“.

Tekutiny, které jsou v turbulentním proudění, mají v sobě značné množství kinetické energie. Dokud tato energie přetrvává, proudění bude i nadále turbulentní a nepravidelné. Jakmile je energie spotřebována, tok přechází do stavu laminárního proudění. Tento typ proudění také závisí na rychlosti a vazkosti. Lze říci, že čím je vyšší hodnota rychlosti (opačně pro viskozitu), tím je větší šance na turbulentní stav proudění. (6) (7)



Obrázek 5 - Turbulentní proudění v trubce kruhového průřezu (8)

Typ proudění je závislý na více faktorech, než jen rychlosti a vazkosti tekutiny. Záleží také na geometrii, kterou tekutina prochází, drsnosti povrchu či tlaku. Důležitou veličinou popisující druh proudění je Reynoldsovo číslo. Tento parametr (Re) je bezrozměrné číslo, které popisuje chování tekutiny v proudu. Reynoldsovo číslo je definováno jako poměr setrvačné síly k viskózní síle a lze ho vypočítat jako:

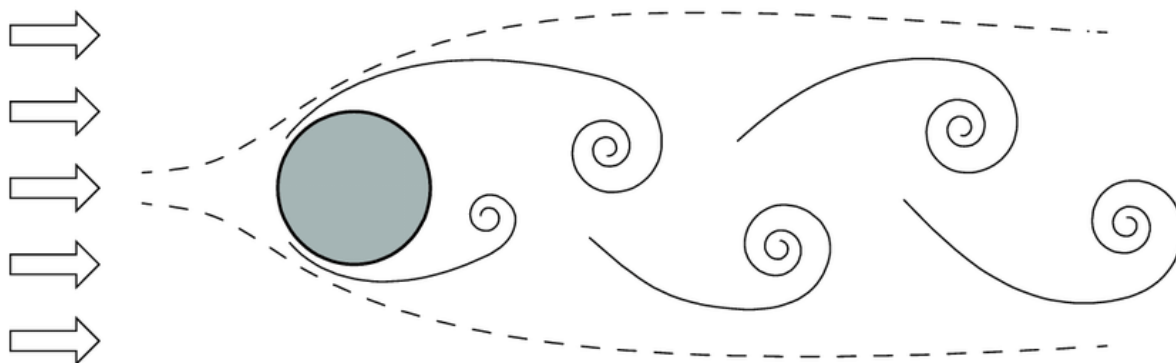
$$Re = \frac{w d}{\nu} = \frac{\text{setrvačná síla}}{\text{třecí síla}} \quad (2)$$

Parametr d označuje charakteristický rozměr, w označuje střední rychlost proudu a ν značí kinematickou viskozitu. Reynoldsovo číslo se používá k určení toho, zda je proudění laminární nebo turbulentní. Pokud je Re menší než určitá kritická hodnota, proudění je laminární a tekutina se pohybuje rovnoměrně a hladce. Pokud je Re větší než kritická hodnota, proudění je turbulentní a dochází ke změnám směru a rychlosti tekutiny.

Pro proudění v trubici, kde $Re < 2300$ se jedná o laminární proudění. V případě, že $Re > 10^4$, tak se jedná o turbulentní proudění a oblast mezi těmito hodnoty se nazývá přechodová. (9)

4.1 Karmánova vírová stezka

Jeden z jevů nestabilit, které se mohou vyskytovat u lopatek (ať už ve stupni turbíny nebo u letadla) je tzv. Karmánova vírová stezka (10). Jedná se o jev, při kterém se vytváří periodická struktura ve tvaru vírů. Proudění tekutiny nad povrchem obtékaného tělesa (lopatky (11)) se stává nestabilním při určité kritické rychlosti, což způsobuje vznik malých vírů. Tyto víry mají tendenci se postupně slučovat a vytvářet větší víry, které se dále slučují, dokud se nedosáhne stavu, kdy je v proudění viditelný systém vírů s různou velikostí. Tyto víry se pohybují proti směru proudění a vytvářejí charakteristický vzor spirál v podobě vírové stezky.

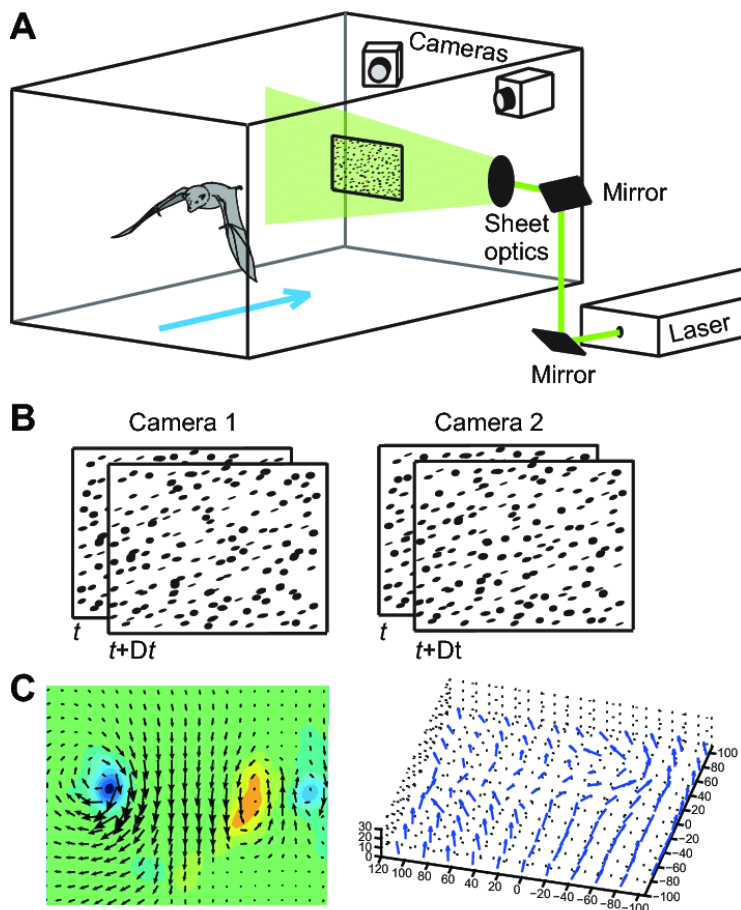


Obrázek 6 - Karmánova vírová stezka (16)

5 Metoda měření

Pro získání naměřených dat byla použita metoda PIV (particle image velocimetry (12) (13)). Jedná se o optickou metodu, pomocí které lze pozorovat utvářené struktury proudění ve formě vektorových polí okamžitých rychlostí. Pro použití metody PIV je zapotřebí laseru nebo stroboskopu, vysokofrekvenčních kamer, synchronizátoru a přístroje pro sycení částic.

Princip metody je takový, kde do proudu tekutiny jsou vnášeny částice ve formě aerosolu (mlhy). Nasycené částice procházející zkoumanou rovinou jsou zviditelněny (osvětleny) výkonným laserem, který vysílá dvojici světelných impulzů s krátkým rozestupem v čase. Tyto impulzy jsou zachyceny pomocí kamer, které vytvoří dvojici snímků. Tyto snímky o čase t a přírůstků času Δt jsou následně vyhodnoceny. Vyhodnocující program zná polohu částic v čase t a přírůstek času Δt , ze kterých vyhodnotí rychlost a směr. Výsledkem jsou již zmíněná vektorová pole okamžitých rychlostí. Pro účely této diplomové práce bylo užito klasické metody PIV (obraz se neskládá z obrazů dvou kamer, ale pouze z jedné). (9)



Obrázek 7 - Princip metody PIV (15)

6 Návrh lopatek

Inspirace návrhu lopatek byla spojená s návštěvou firmy Doosan Škoda Power, kde bylo ukázáno, jak vypadá erodovaná náběžná hrana lopatky (viz obrázek 8). Na lopatce lze pozorovat silné poškození náběžné hrany, která má charakter rozevření. Rozevřené plochy jsou nepravidelně ozubené odlamováním materiálu lopatky.



Obrázek 8 - erozně poškozená lopatka

Po konzultaci s vedoucím diplomové práce bylo rozhodnuto o návrhu tří různých lopatek. Lopatky mají znázorňovat různá stadia poškození náběžné hrany lopatky, a to od neporušené, lehce porušené až po silně porušenou. Při návrhu lopatky bylo vycházeno z profilu NACA 0012, který byl následně modifikován. K samotnému návrhu modelu byl použit software Inventor od firmy Autodesk.

NACA 4 digit airfoil generator (NACA 0012 AIRFOIL)



Obrázek 9 - základní profil lopatky NACA 0012 (17)

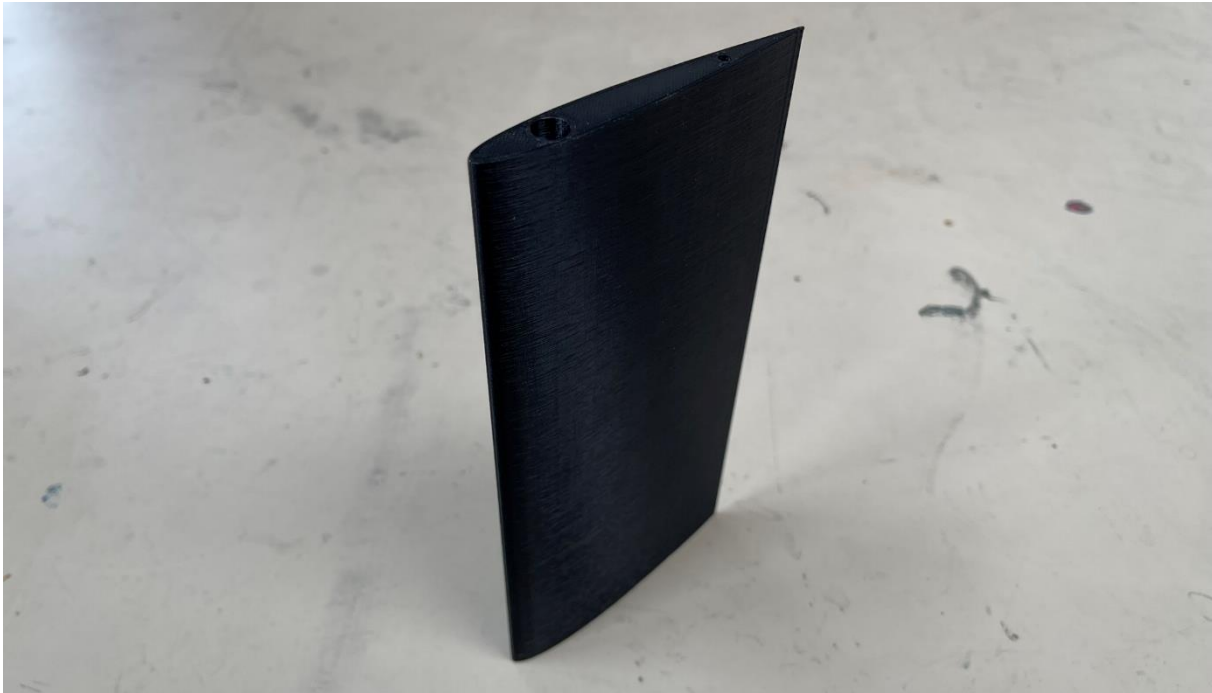
Zvolený profil NACA 0012 bylo potřeba upravit pro potřeby upevnění lopatky a způsobu výroby. Modifikace lopatek z hlediska výroby byla zásadní, protože byla zvolena možnost 3D tisku na tiskárně od firmy Prusa s označením i3MK3S. Model navržený v konturovacím prostředí je potřeba následně převést do formátu, který komunikuje s 3D tiskárnou. Uvedený formát má zkratku STL. Tento formát mění geometrii modelu z navržené na trojúhelníkovou síť. Při konkrétním příkladu se z děr kruhového průřezu stanou mnohoúhelníky. S tímto faktem je potřeba počítat a zvolit rozumný přírůstek tak, aby bylo možné do konstrukčních děr vložit protikus (tyč), která následně drží vymodelovanou lopatku v aerodynamické trati.

6.1 Neporušený model lopatky

Profil lopatky obsahuje dvě průchozí kruhové díry o průměrech 8,3 mm a 3,2 mm (přídavky 0,3 a 0,2 mm byly vysvětleny v odstavci výše). Větší průměr konstrukční díry je vzdálený od náběžné hrany 20 mm a menší průměr 70 mm. Tyto díry kruhového průřezu slouží pro uchycení modelu lopatky na aerodynamickou trať. Další modifikace nastává v odtokové hraně, která nelze pomocí 3D tisku úplně přesně vyrobit díky špičatému ukončení. Při výrobě všech tří modelů, by nebyla odtoková hrana stejná ani v jednom případě, proto byla zaoblena na poloměr 0,450mm. Samotná lopatka je pak dlouhá 100 mm a široká 200 mm.



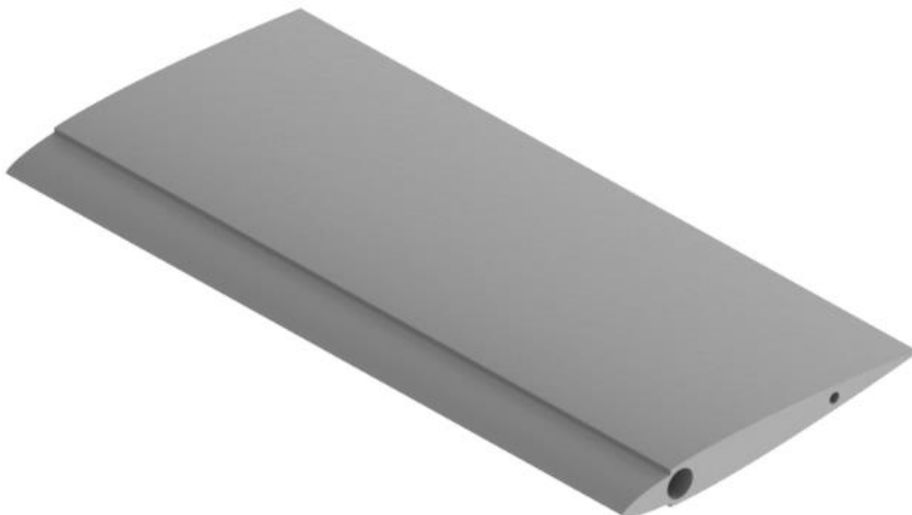
Obrázek 10 - Návrh modelu neporušené lopatky



Obrázek 11 - Vyrobený model neporušené lopatky

6.2 Lehce porušený model lopatky

Tento model nese společné prvky se základním modelem v podobě konstrukčních děr a zaoblené odtokové hrany (společné i s třetím modelem). Pro napodobení poškození byla upravena náběžná hrana lopatky formou odebrání materiálu. Odebraný materiál po výtisku lopatky byl nahrazen brusným papírem, který z hlediska náhodnosti porušení má vhodný povrch.



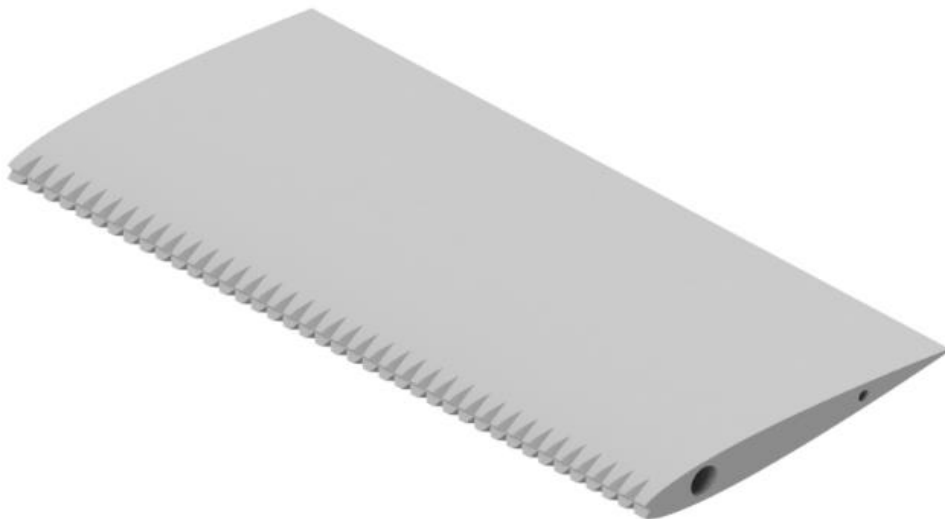
Obrázek 12 - Návrh modelu lehce porušené lopatky



Obrázek 13 - Zkompletovaný model lehce porušené lopatky

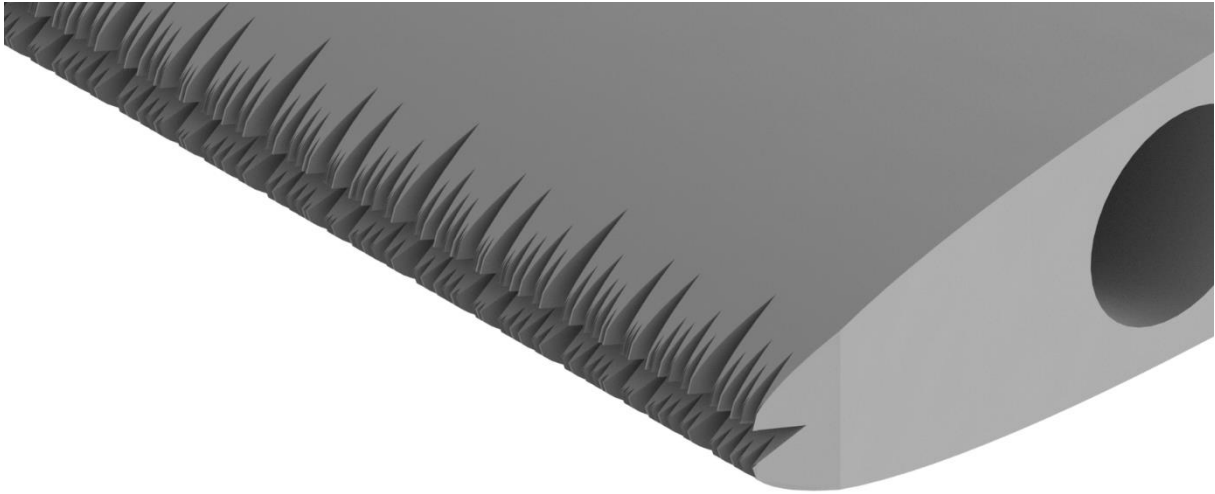
6.3 Silně porušený model lopatky

Poslední model lopatky je stejného tvaru jako model neporušený s modifikací náběžné hrany. Ta spočívá v usazení drážky ve tvaru písmene V hluboké 3 mm a úhlem rozevření 100°.



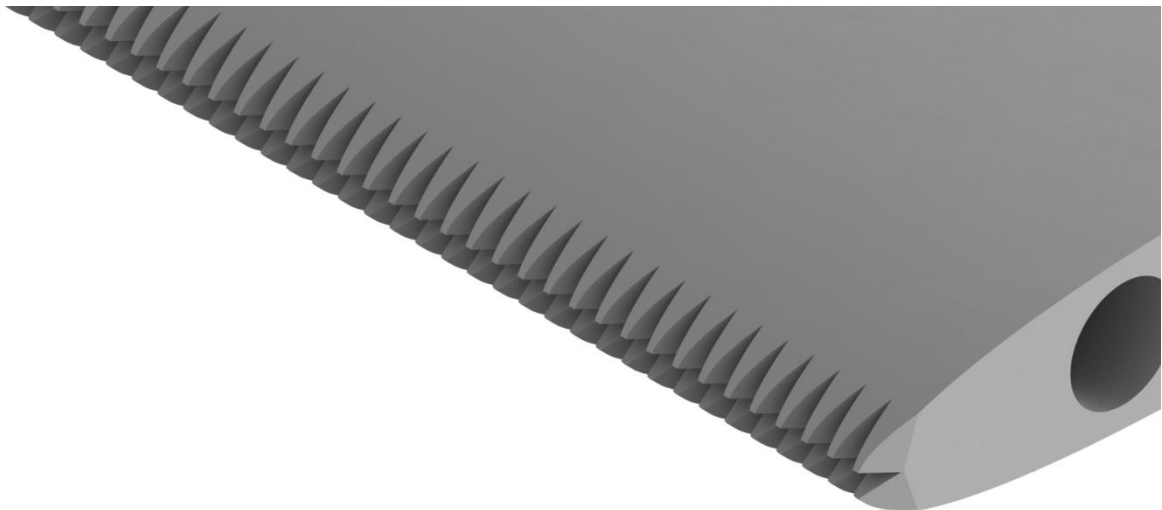
Obrázek 14 - Návrh modelu silně poškozené lopatky

Při návrhu silně porušené lopatky vzniklo více návrhů, jak by lopatka měla vypadat, ale nebylo možné některé návrhy vyrobit. První návrh vypadal realističtěji, co se týká náhodného rozprostření eroze. Tento model však nebylo možné vyrobit, protože 3D tiskárna by nedokázala takovou geometrii vytisknout.

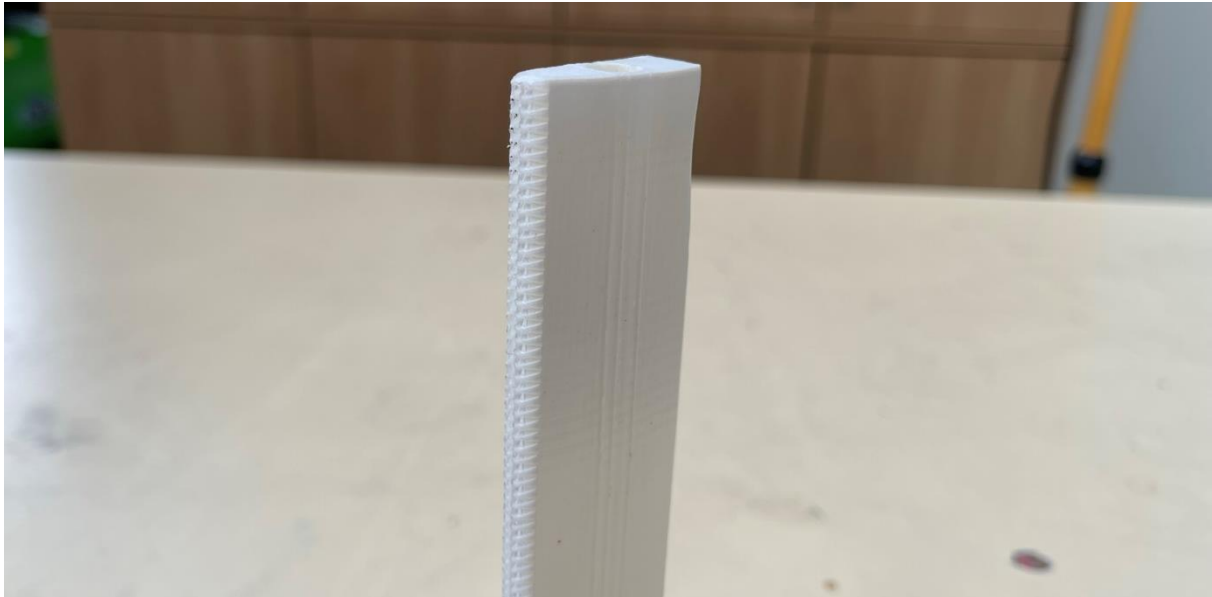


Obrázek 15 - První návrh náběžné hrany silně porušené lopatky

Po zjednodušení tvarů erodované náběžné hrany lopatky (druhý návrh) byl proveden pokus o vytisknutí lopatky. Zde nastal problém, kde vytištěná náběžná hrana byla natolik jemná, až se jednotlivé „zuby“ napodobující erozi slepily k sobě. Konečný model má proto zuby napodobující erozi širší a více rozevřené.

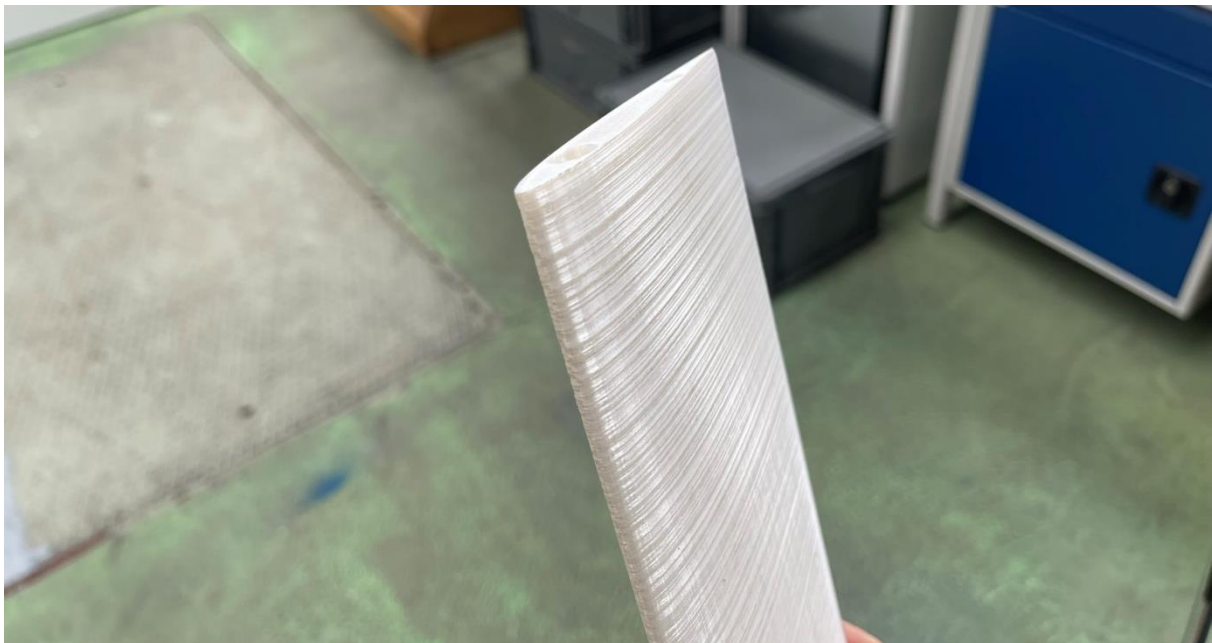


Obrázek 16 - Druhý návrh náběžné hrany silně porušené lopatky



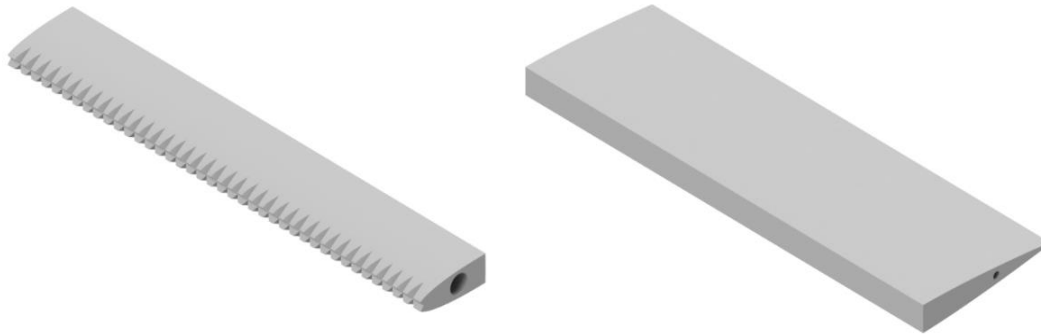
Obrázek 17 - Špatně vyrobený model druhého návrhu silně porušené lopatky

Dalším problémem byla výška lopatky. Lopatka (vysoká 200 mm) při tisku do výšky nebyla celou dobu tisku ve stabilní poloze a povrch lopatky nebyl hladký a celistvý. Na povrchu se objevovali rýhy, které by při porušeném modelu nevadily. Tento problém se ale jevil již při tisku neporušené lopatky. Tento problém byl vyřešen nastavením rychlosti extruderu a tiskové podložky.



Obrázek 18 - Špatně vyrobený model neporušené lopatky

Při výrobě byla silně porušené lopatka rozdělena na dvě části, protože 3D tiskárna nedokázala vytisknout porušenou náběžnou hranu ve stejné orientaci tisku. Tělo lopatky bylo rozděleno na dvě části (ve vzdálenosti 31 mm od náběžné hrany) a následně slepeno epoxydovým lepidlem. Po zatvrdnutí byla přebytečná vrstva odstraněna a vzniklá nespojitost (schod) mezi díly zbroušena do hladkého spojitého povrchu.



Obrázek 19 - Finální návrh silně poškozené lopatky

Poslední úprava se týkala průchozí díry o průměru 8,3 mm. Přídavek 0,3 mm byl dostačující pro neporušenou a lehce porušenou lopatku. V případě posledního modelu průchozí díra nebyla přesně vyrobena, a proto byl použit vrták o průměru 8 mm, aby vyhladil vnitřní povrch díry.

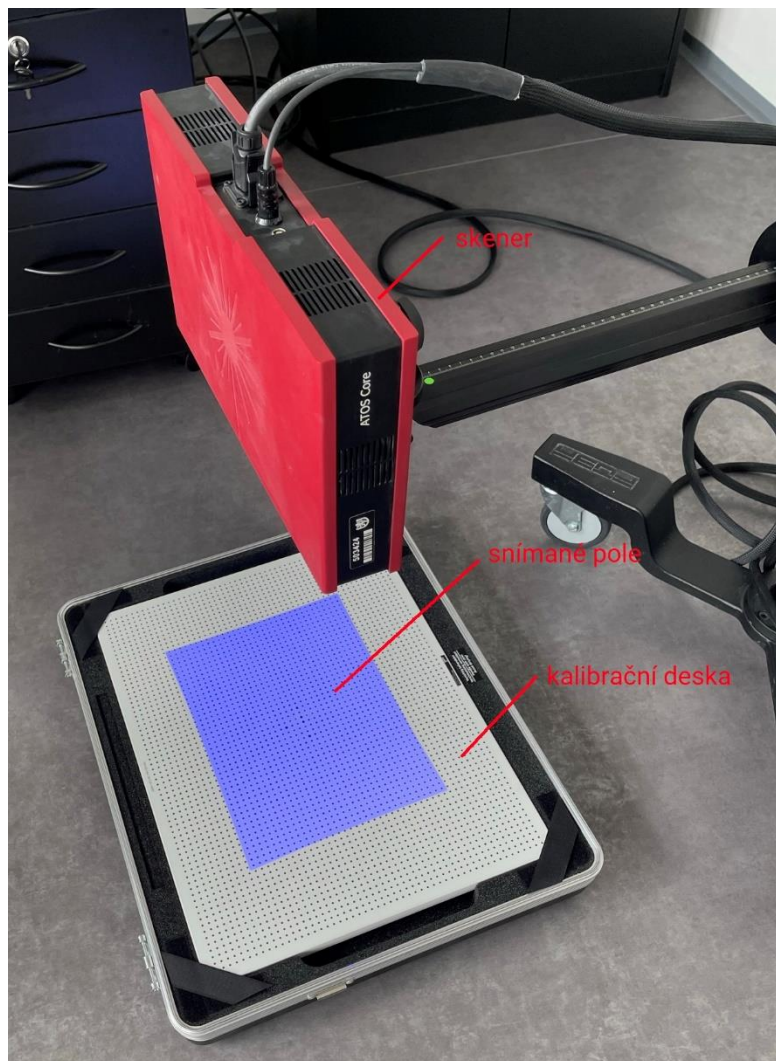


Obrázek 20 - Zkompletovaný model silně poškozené lopatky

7 Skenování lopatek

Navržený model jakékoliv součásti nikdy není totožný s reálným. Pro určení přesných rozměrů je vhodná metoda skenování dané součásti. Tento princip lze využít i při reverzním inženýrství. To spočívá v obnovení návrhu či dokumentace součásti, která již byla vyrobena. Jedním z možným konkrétnějších případů využití v oblasti parních turbín je při retrofitu turbíny. V případě starších lopatek, které jsou například porušené a není k nim dohledatelný návrh ji lze oskenovat a z digitalizovaný model upravit a následně vyrobit. V případě této diplomové práce slouží sken všech tří lopatek k určení skutečných okrajových podmínek pro základ měření. (14)

Pro možné skenování lopatek bylo v prvním kroku zapotřebí kalibrace přístroje. Ta se prováděla pomocí kalibrační desky, která obsahuje kalibrační body (terčíky). Samotná deska se položí na místo, které snímá skener. Podle pokynů softwaru se hýbe s hlavou skeneru tak, aby skener lokalizoval body na desce pod různými úhly a vzdálenostmi.



Obrázek 21 - Kalibrace skeneru pomocí kalibrační desky

Po kalibraci následuje příprava lopatek a jejich skenování. Příprava se provádí nalepením podobných terčů (jako byly na kalibrační desce) na model. Tyto terče slouží k tomu, aby si program pamatoval polohu daného modelu. Skenování se provádí pořizováním snímků modelu v různých směrech, které se vykreslují ve formě 3D modelu v softwaru. Pro skenování byl použit přístroj ATOS Core 300 s programem GOM Inspect.

Materiál, z kterého byly lopatky vyrobeny má určité vlastnosti. Pro neporušenou a středně porušenou lopatku se jedná o vzhledově černý materiál, který částečně odráží světlo skeneru. Tento jev je nežádoucí, protože se hůře vyhodnocují pořízené snímky, a tedy i virtuální model. Pro případ těchto dvou lopatek byl použit matný práškový sprej, který tento nežádoucí jev eliminoval. Při takovémto zásahu je potřeba mít na paměti následné očištění terčů zaznamenávající polohu.

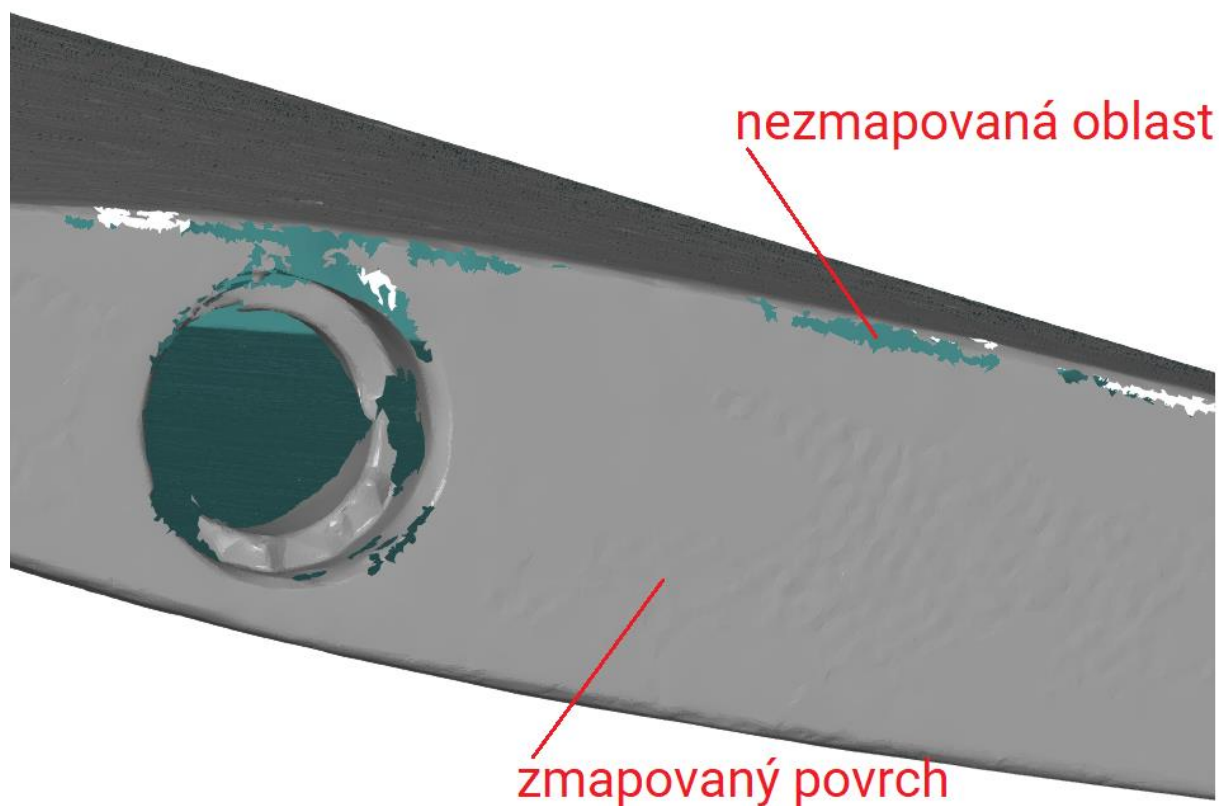
Po nanesení matné vrstvy byla lopatka uchycena na elektronicky otočný stůl, s kterým lze pomocí ovladače polohovat dle potřeby. Pořizováním snímků a vykreslování jeho virtuální podoby musel být stojan skeneru i otočná deska v nehybném stavu, aby byla zachycena skutečná geometrie lopatky.



Obrázek 22 - Skenování lopatky

Pořízené snímky se spojí a vykreslí reálný tvar lopatky. Aby mohl být jednotlivý snímek pořízen, bylo zapotřebí, aby skener rozeznal alespoň pár bodů, který již měl zmapované. Při nedostatku bodů nemohl program spojit pořízený snímek se zmapovanou geometrií lopatky. Tento popsáný princip byl těžce realizovatelný v případě boků lopatky, odtokové a náběžné hrany. V případě těchto dvou zmíněných hran nebylo místo, kde takřka uchytit více mapovacích bodů (terčů). Z tohoto důvodu nejsou modely kompletně zmapované.

V případě této diplomové práce nepatrná nezmapovaná oblast není závažnou chybou. Kdyby se jednalo o simulaci proudění při použití například CFD výpočtů, tak by nezmapovaná část byla chybou významnou. Nezmapovaná oblast v rozhraní programu lze aproximovat, ale tento způsob zcela nenahradí reálný zmapovaný povrch.

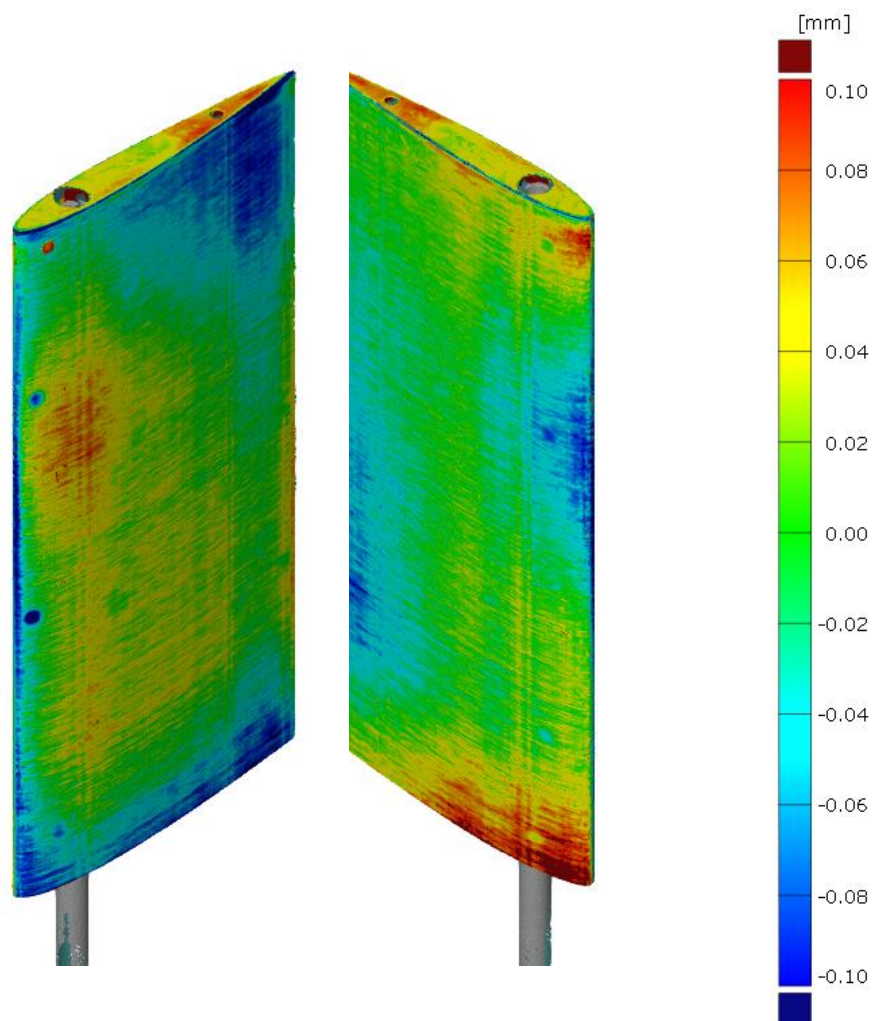


Obrázek 23 - Ukázka necelistvého zmapování modelu

7.1 Skenovaný model neporušené lopatky

Při vyhotovení skenování může být zajímavé, jak se změnila okrajová podmínka z teoretického modelu na model vyrobený. Na obrázku 24 lze vidět porovnání geometrie již zmíněných dvou modelů. Z tohoto porovnání lze vidět barevné škály, které značí tvarový rozdíl těchto dvou modelů (teoretický a skutečný). Červená barva značí přebytek materiálu a modrá barva naopak označuje místa, kde je materiálu méně, než měl teoretický model. Z toho lze usoudit, že vyrobený model je lehce prohnutý ve střední části po výšce. To může být způsobeno tisknutím lopatky po výšce, protože lopatka je poměrně dlouhá.

Dalším úkazem, který lze sledovat je, že vyrobená lopatka je „vroubkovaná“. To je způsobeno procesem výroby, kde materiál se tiskne po vrstvách, které zanechávají takové to stopy. To by se dalo vyřešit broušením lopatky brusným papírem, ale jakýkoliv takový lidský zásah do výroby přispívá v nerovnoměrnosti provedení a snižuje šanci replikovatelnosti experimentu.

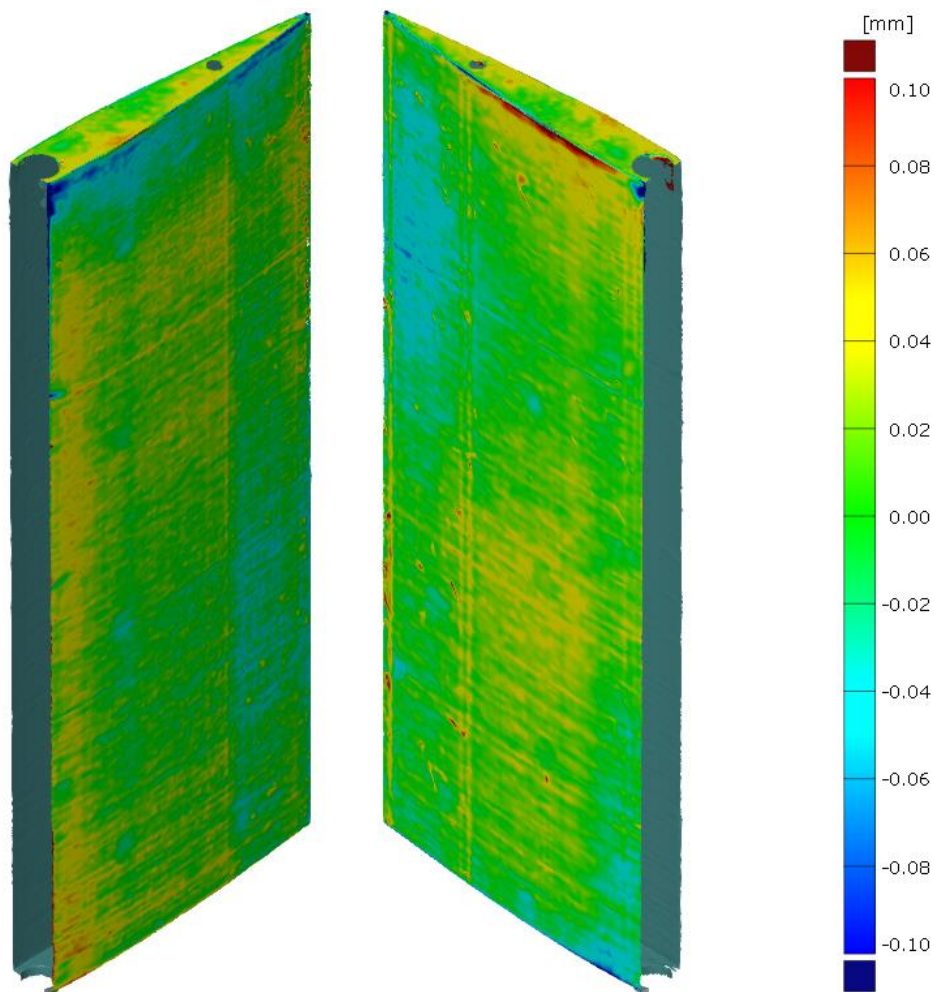


Obrázek 24 - Porovnání skutečné geometrie neporušené lopatky s navrhovaným modelem

Kromě viditelnosti uchycovací tyčky lze jako poslední uvést to, že se na lopatce vyskytují tři kruhové body (levá část na obrázku 24). To je zapříčiněno mapovacími terčíky, které se vyhodnotily jako konstrukční součást mapované lopatky. Tudíž se nejedná o vadu výrobní, ale mapovací.

7.2 Skenovaný model lehce porušené lopatky

V případě lehce porušeného modelu nelze porovnat celý model, protože vyrobená lopatka byla upravena. Úprava se týkala náběžné hrany, na kterou byl nanesen brusný papír, který má simulovat lehké poškození náběžné hrany. Tato část byla z porovnání odstraněna kvůli tomu, že by nám tato část nevykazovala žádné informace. Na tomto porovnání se ukazují jevy, které již byly popsány v podkapitole 7.1.

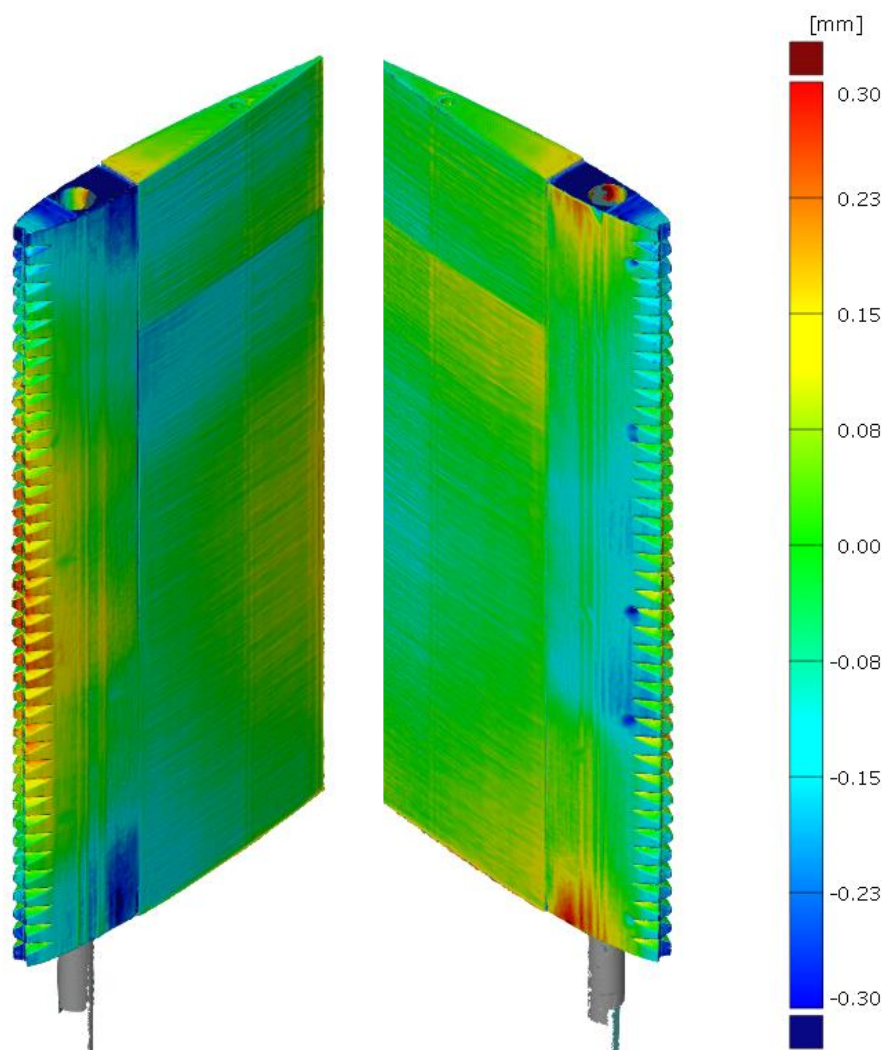


Obrázek 25 - Porovnání skutečné geometrie lehce porušené lopatky s navrhovaným modelem

7.3 Skenovaný model silně porušené lopatky

Jako poslední skenovanou lopatkou byla silně porušená. Tato lopatka je tvořena dvěma částmi, které byly slepeny k sobě pomocí epoxidového lepidla. Toto slepení se projevuje i do geometrické odchylky, kde jde vidět spára za náběžnou hranou.

Dále lze z obrázku vyčíst, že vytištěná náběžná hrana je kratší, než celková délka (po výšce) lopatky. Tento „defekt“ byl způsoben výrobou přední části lopatky z jiného materiálu, kvůli nedostatku stejného filamentu. Aby byla tato vada rozprostřena po délce, byla snaha o to, aby schod dvou součástí byl rovnoměrný na obou stranách. To však nebylo možné kontrolovat pomocí posuvného měřítka, nebo jiného nástroje, protože epoxidové lepidlo se vytvrzovalo poměrně rychle. V tom případě nezbývalo nic jiného než spolehnouti na vizuální kontrolu při spojování obou částí.

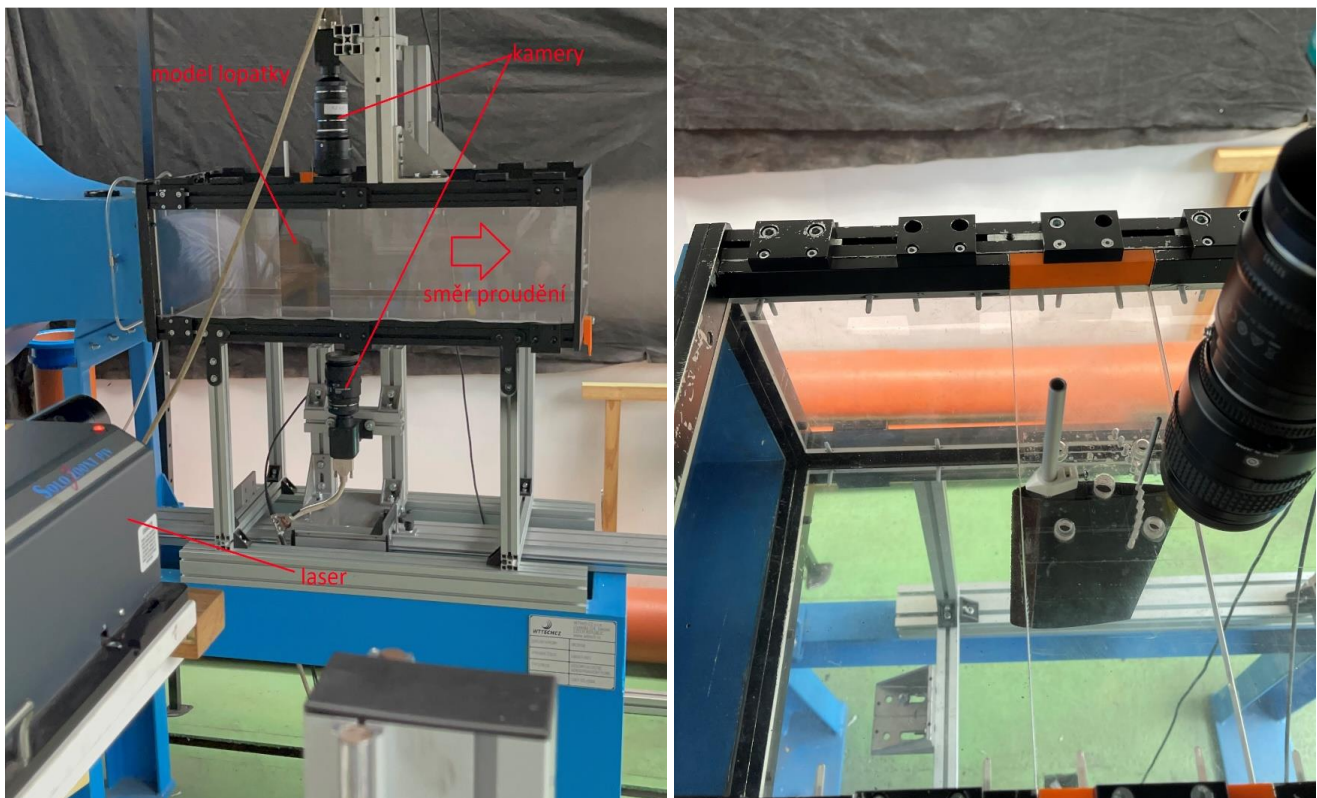


Obrázek 26 - Porovnání skutečné geometrie silně porušené lopatky s navrhovaným modelem

Kromě toho, že byla přední část lopatky vyrobena z jiného materiálu, tak také byl tištěna v opačném směru, než druhá část. To lze vidět na tvaru vrstev, které jsou takřka kolmé na vrstvy druhé části. To je zapříčiněno štíhlostí části, kterou při takové výšce (200 mm) nelze jednoduše vyrobit při 3D tisku. Tyto brázdy mohou a nemusí mít vliv na následné měření proudění za lopatkou. Poslední dodatek je takový, že i přes nevhodnou výšku přední části, tak by tato část nemohla být vytištěna po výšce ještě z jednoho důvodu, a to je takový, že orientace „zářezů“, které mají značit porušení lopatky je nevyhovující pro tisknutí ve směru po výšce.

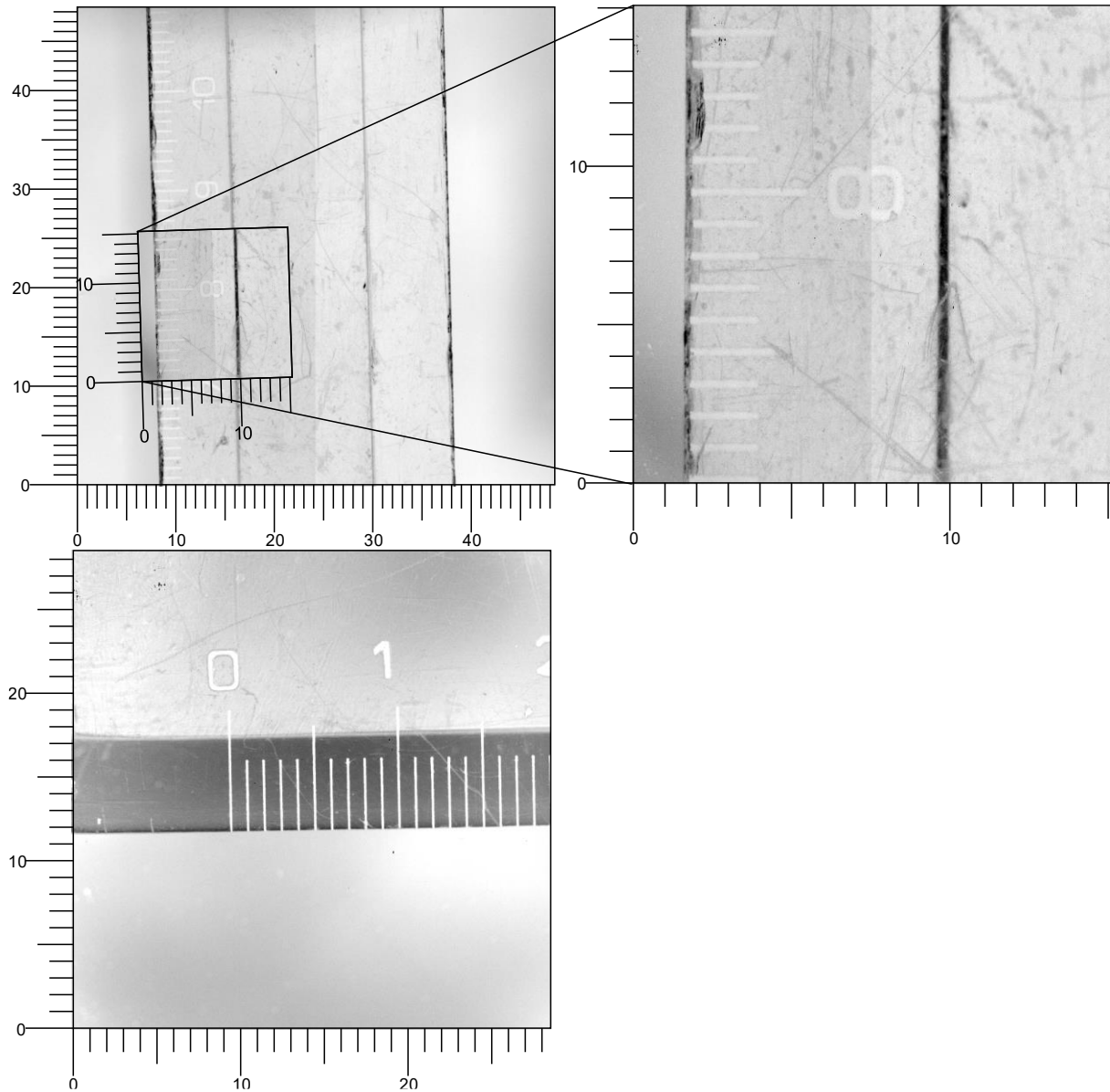
8 Příprava pro měření

Před samotným měřením bylo nutné sestavit aparaturu. Nejprve byl uchycen daný model lopatky do průhledného tunelu pomocí tyčí (o průměru 8 a 3 mm). Následně proběhlo uchycení vysokorychlostních kamer nad a pod model lopatky a jejich zaostření do zkoumané roviny. Do stejné výšky (zkoumané oblasti) byl nastaven laser pro ozařování proudu tekutiny. Na obrázku 27 lze vidět, jak uspořádání aparatury vypadalo.



Obrázek 27 - Uspořádání aparatury pro měření

Zaostření kamer odpovídá úrovni zhruba poloviny výšky lopatky (100 mm). Pro ověření správnosti zaostření byl proveden kalibrační snímek, který je zhotoven na obrázku 28. Kalibrační snímky jsou tři, protože se měřilo ve třech různých polích popsané v kapitole Měření na obrázku 30.



Obrázek 28 - Kalibrační snímky

8.1 Sycení proudu částicemi

Pro zviditelnění částic v proudící tekutině bylo zapotřebí nasýtit proud stopovacími částicemi. Toho bylo docíleno pomocí atomizéru SAFEX Fog Generator 2010 (220 VAC) od společnosti SAFEX, který kapalinu na bázi propylenglykolu a rostlinného glycerolu vypařuje za vzniku aerosolu. Ten je následně nasáván ventilátorem. Nasávaná směs aerosolu a okolního vzduchu projde skrz uklidňovací komoru, kde se proud vzduchu stabilizuje a vyústí v námi pozorované oblasti, kde je uchycena lopatka.



Obrázek 29 - Způsob sycení hlavního proudu částicemi

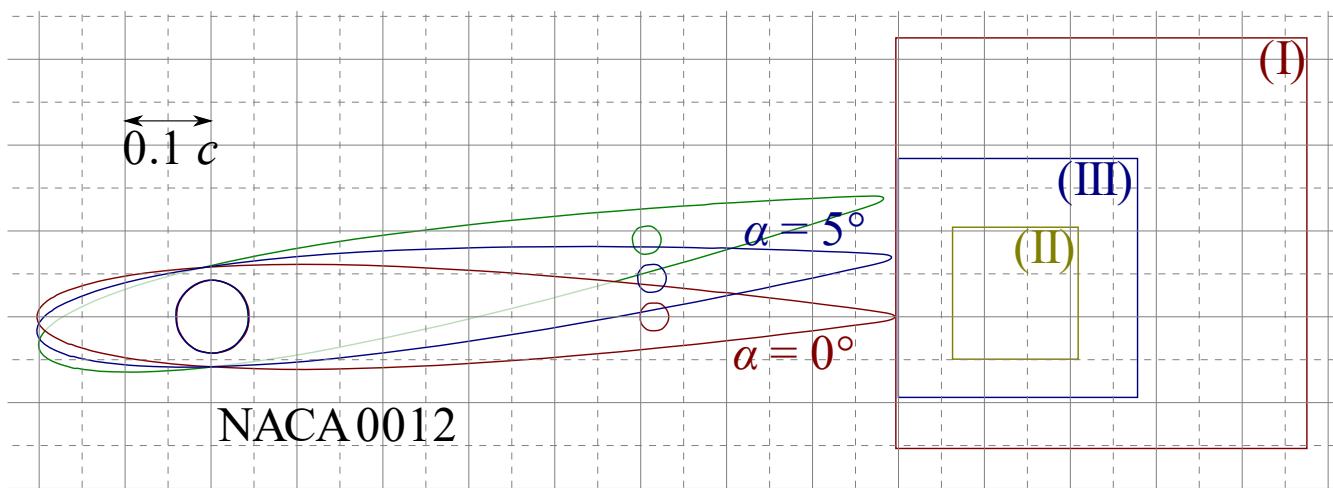
9 Měření

Pomocí metody PIV bylo změřeno rovinné rozložení okamžitých rychlostí pro tři typy lopatek a různé úhly náběhu (značeno α). Pro nulový úhel náběhu byla změřena data z dvou kamer, kde jedna kamera snímala detailnější proudovou strukturu ihned za lopatkou, kdežto druhá kamera snímala spíše globálnější vírovou strukturu.

Pro každý případ úhlu α byly zaznamenány data ve čtyřech různých stupňujících se rychlostí. Rychlost se odvíjela od frekvence ventilátoru a konkrétněji se jednalo o hodnoty 2, 6, 12, 18 Hz.

Pro úhly náběhu 5 a 10 stupňů od hlavního směru proudu byly pořízeny data pouze jednou kamerou.

Pro lepší pochopení je zde uveden obrázek 30, který popisuje, jaká zkoumaná oblast je zachycena při měření. Pro nulový úhel náběhu odpovídá oblast s označením I a II a pro úhly náběhu 5/10 stupňů odpovídá pole označené římskou číslicí III.



Obrázek 30 - schéma zkoumaných oblastí

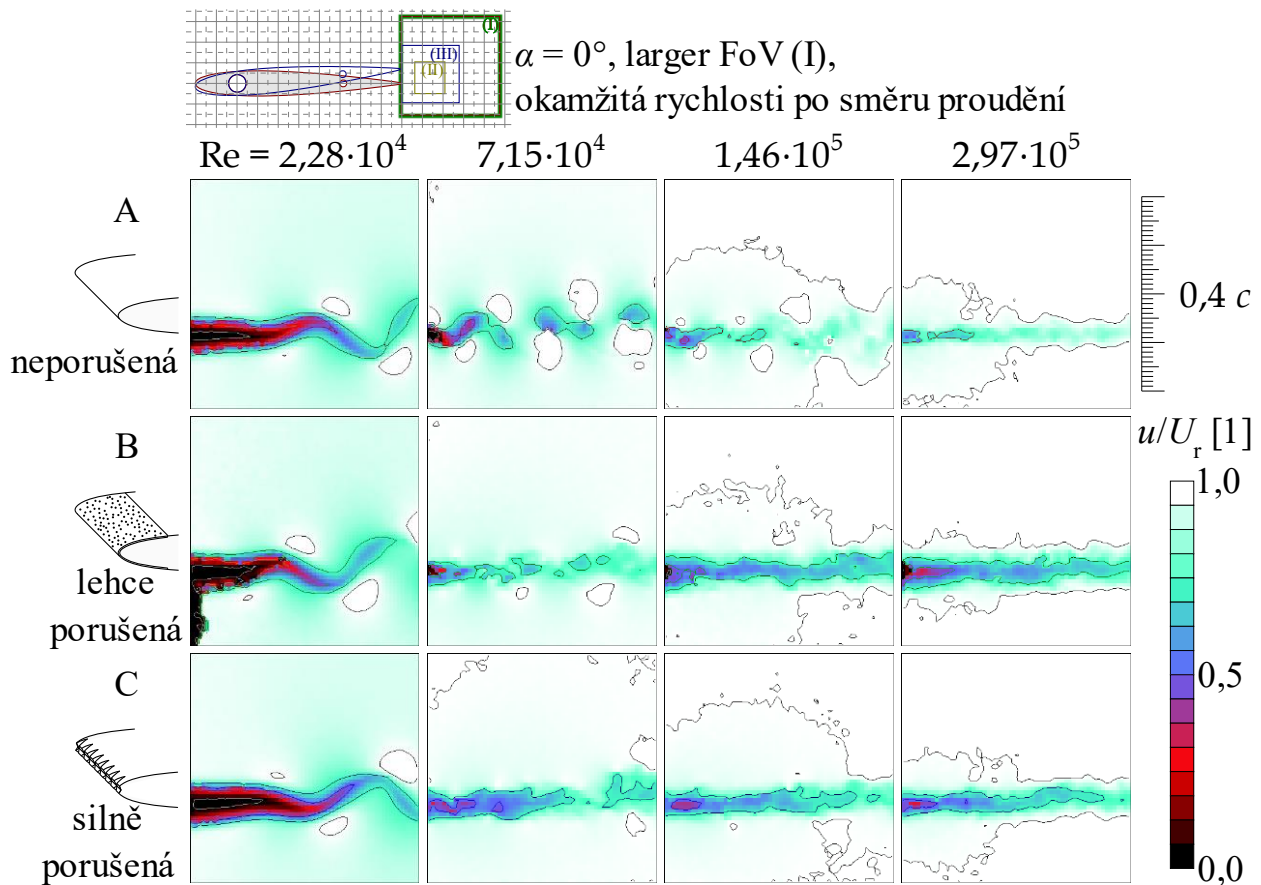
Rychlost ventilátoru byla přepočítána na Reynoldsovo číslo podle rovnice (2), kde charakteristickým rozměrem byla délka lopatky. Po přepočítání vycházejí hodnoty uvedené v Tabulka 1.

Tabulka 1 - Přepočítané hodnoty frekvence ventilátoru na Reynoldsovo číslo

Frekvence ventilátoru [Hz]	Re [-]
2	$2,28 \cdot 10^4$
6	$7,15 \cdot 10^4$
12	$1,46 \cdot 10^5$
18	$2,97 \cdot 10^5$

9.1 Vyhodnocené veličiny

Z vyhodnocených dat je vhodné vybrat veličiny, které mají nějakou vypovídající hodnotu o tom, jaké jevy lze pozorovat na vyhodnocených snímcích. Jedna z těchto veličin je rychlost. V našem konkrétním případě se jedná o rovinnou úlohu, kde má rychlost dvě složky, a to po ose proudění a složku kolmou na osu proudu. Tyto dvě složky byly hodnoceny zvlášť spolu s fluktuací rychlosti v obou zmíněných směrech. Pro jedno měření bylo zachyceno přibližně 1000 snímků, z kterých byla zhotovena střední hodnota. Na obrázku 31 lze vidět příklad okamžité rychlosti podělené referenční rychlostí naměřené v tunelu, která se použila i pro výpočet Reynoldsova čísla. Jak již bylo zmíněno, takových to snímků bylo zachyceno přibližně tisíc a dále byla hodnocena střední hodnota, protože okamžitá rychlost se mění v každém bodě v čase.

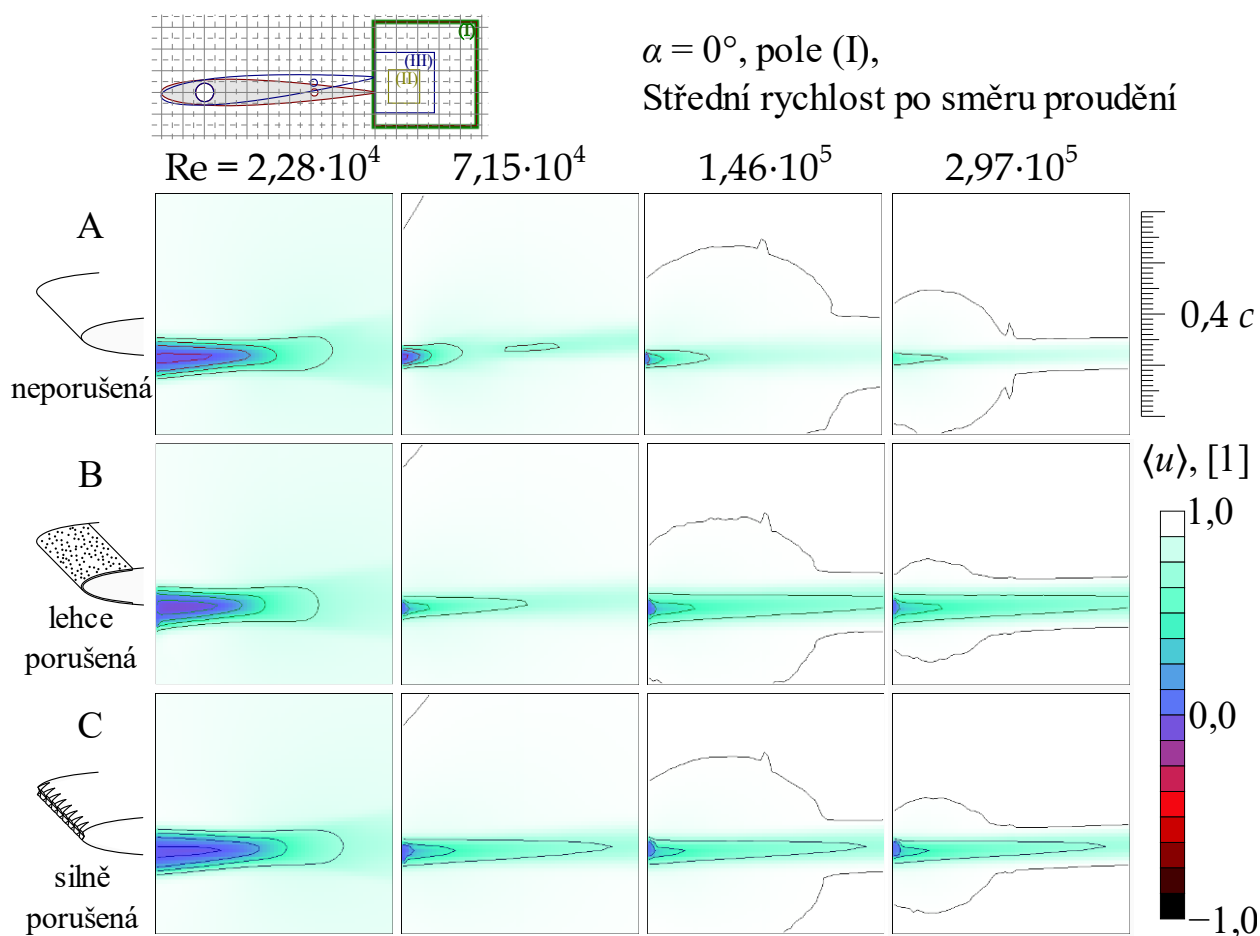


Obrázek 31 - okamžitá rychlost po směru proudění

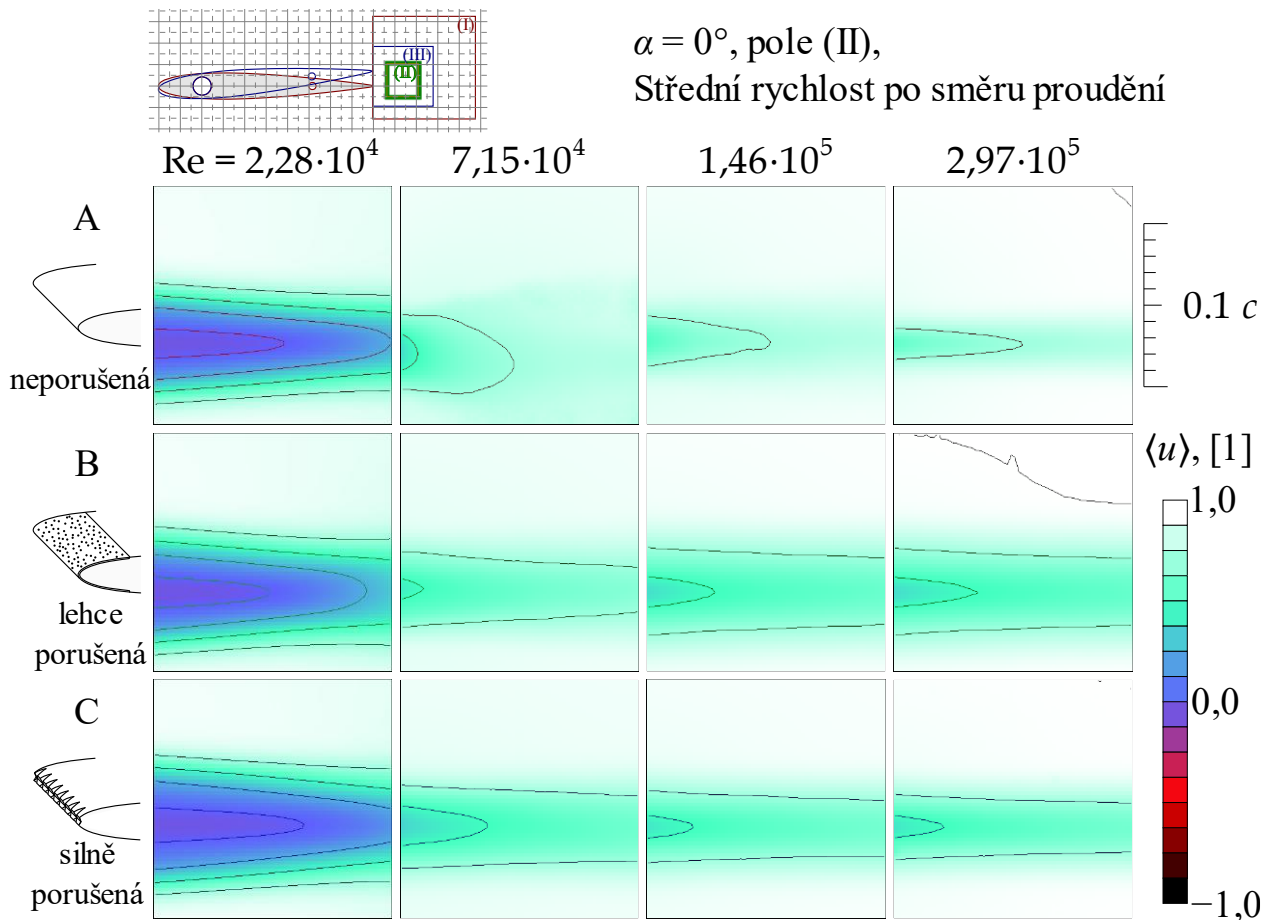
9.1.1 Střední rychlost po směru proudění

Střední rychlost proudění tekutiny je měřítkem průměrného pohybu částic tekutiny v daném prostoru během určitého časového intervalu. Jedná se o vektorovou veličinu, která udává rychlost a směr pohybu tekutiny.

Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny výsledky měření. Sloupce značí rychlost, které se výsledky týkají a řádky typ lopatky. Hodnoty jsou podělené referenční hodnotou rychlosti, takže hodnoty jsou bezrozměrné s vhodně zvoleným měřítkem. Dále je uvedeno, které pole bylo užito a hodnota α značí úhel natočení vůči směru proudění.



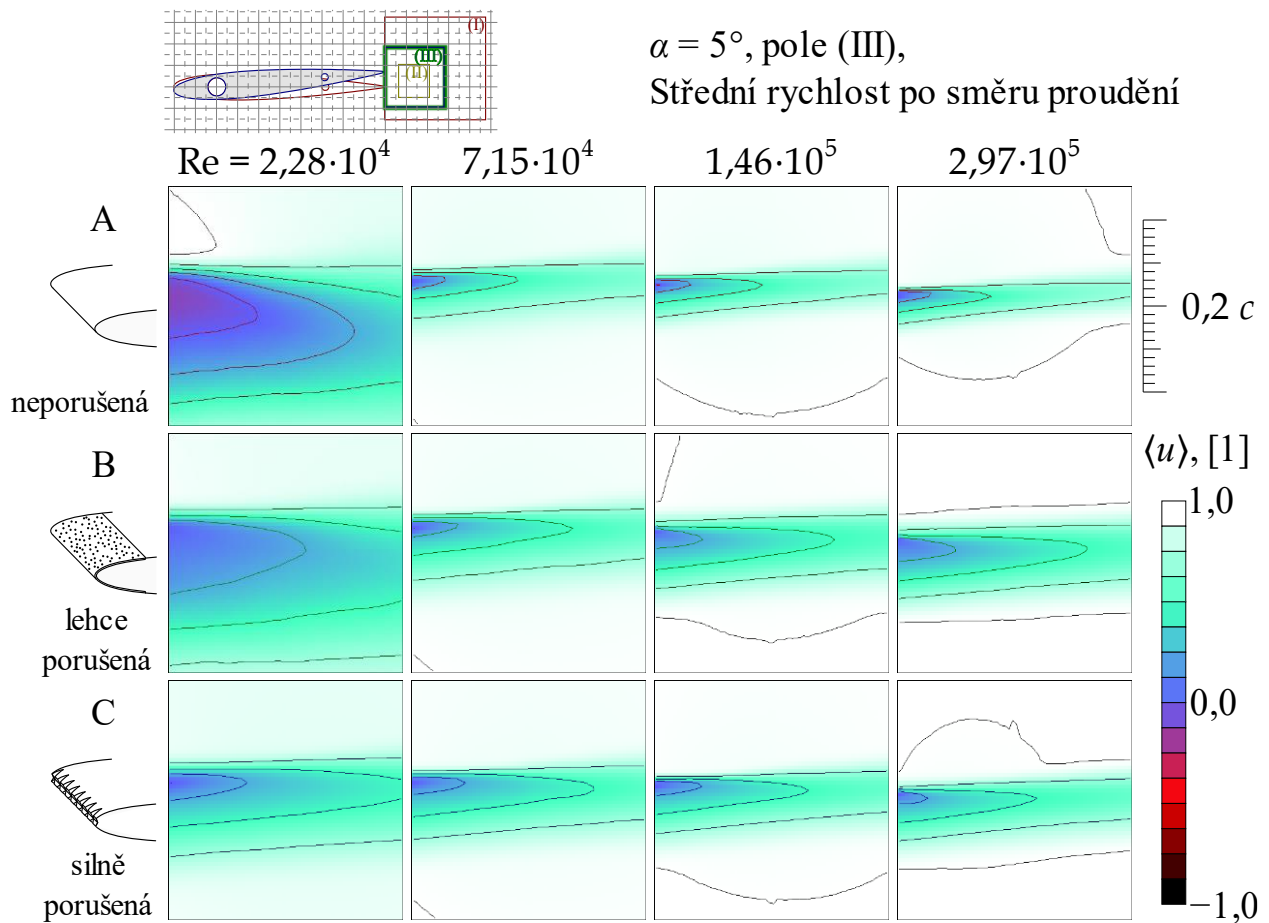
Obrázek 32 - Střední rychlost po směru proudění pro pole I



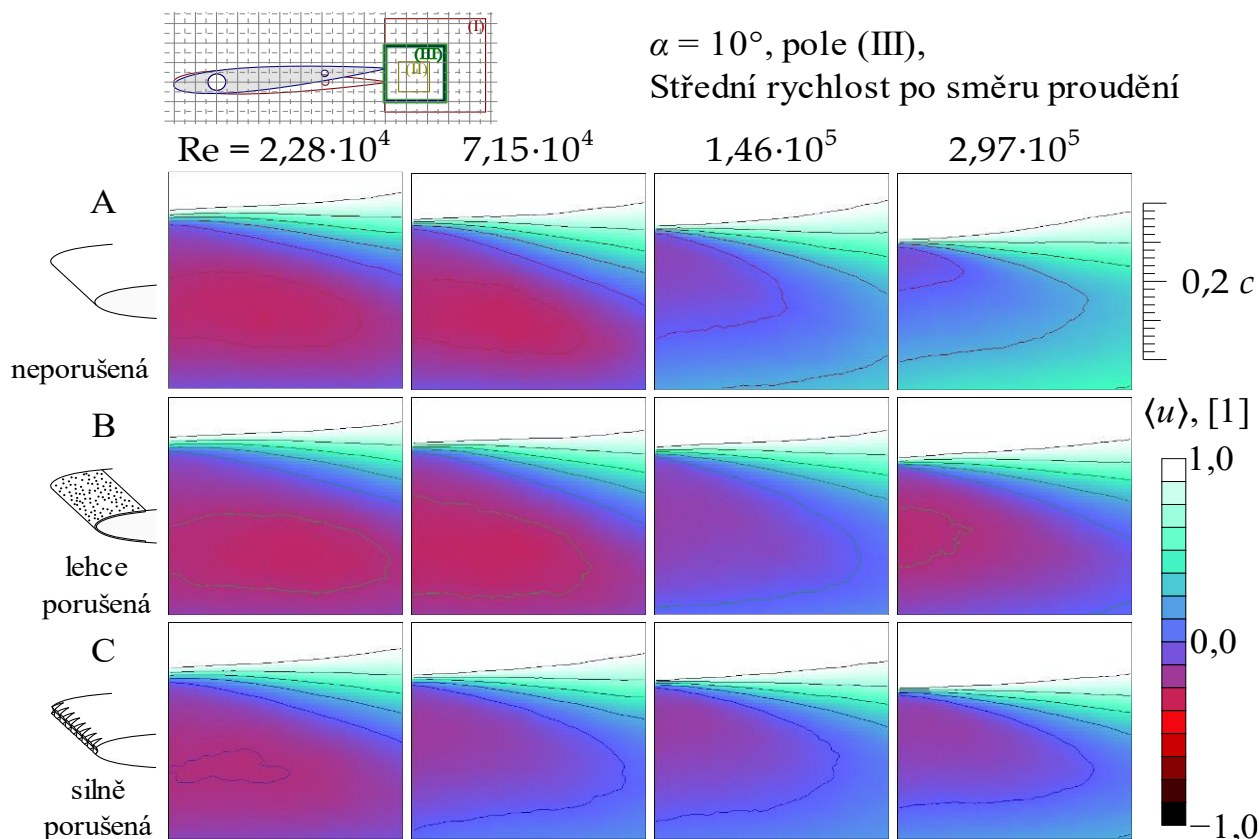
Obrázek 33 - Střední rychlost po směru proudění pro pole II

Na obrázcích 32 a 33 lze pozorovat změny střední rychlosti pro daný typ lopatky. V případě malých rychlostí není vidět velký rozdíl vlivu porušení náběžné hrany na změnu rychlosti. V oblasti nízkých rychlostí lze pozorovat vznik zpětného proudění, délku a šířku úplavu, který se zdá o něco delší pro neporušenou lopatku. Při vyšších rychlostech je na obrázcích vidět, že porušení náběžné hrany vede k rozšiřování úplavu a tím pádem k většímu zpomalování rychlosti, kde i při vyšších rychlostech se zde objevuje skoro nepatrné zpětné proudění. Z pohledu energie lze říci, že narušená náběžná hrana vede k větší ztrátě energie než v případě neporušené náběžné hrany. Překvapivým zjištěním může být, že úplav za silně porušenou lopatkou je užší než v případě lehce porušené lopatky. To může být způsobeno tím, že geometrie náběžné silně porušené hrany lopatky má stabilizační efekt na úplav.

Na obrázku 34 a 35 jsou znázorněny střední rychlosti pro úhly náběhu 5 a 10 stupňů, kde můžeme vidět, že ve všech případech dochází k odtržení proudění na podtlakové straně lopatky.



Obrázek 34 - Střední rychlost po směru proudění pro pole III s úhlem náběhu 5°



Obrázek 35 - Střední rychlost po směru proudění pro pole III s úhlem náběhu 10°

9.1.2 Fluktuace rychlosti

Fluktuace rychlosti mají významný vliv na chování proudění tekutin. Tento pojem neznamená nic jiného než odchylku od střední hodnoty rychlosti v daném místě.

V této diplomové práci bylo počítáno s fluktuací po směru hlavního proudu a ve směru kolmém k hlavnímu proudu odděleně. Tyto fluktuace lze vypočítat z následujících vzorců s užitím naměřeného souboru okamžitých lokálních rychlostí $u(x, y; i)$, kde $\sigma[u]$ značí fluktuace v podélném směru a $\sigma[v]$ ve směru příčném.

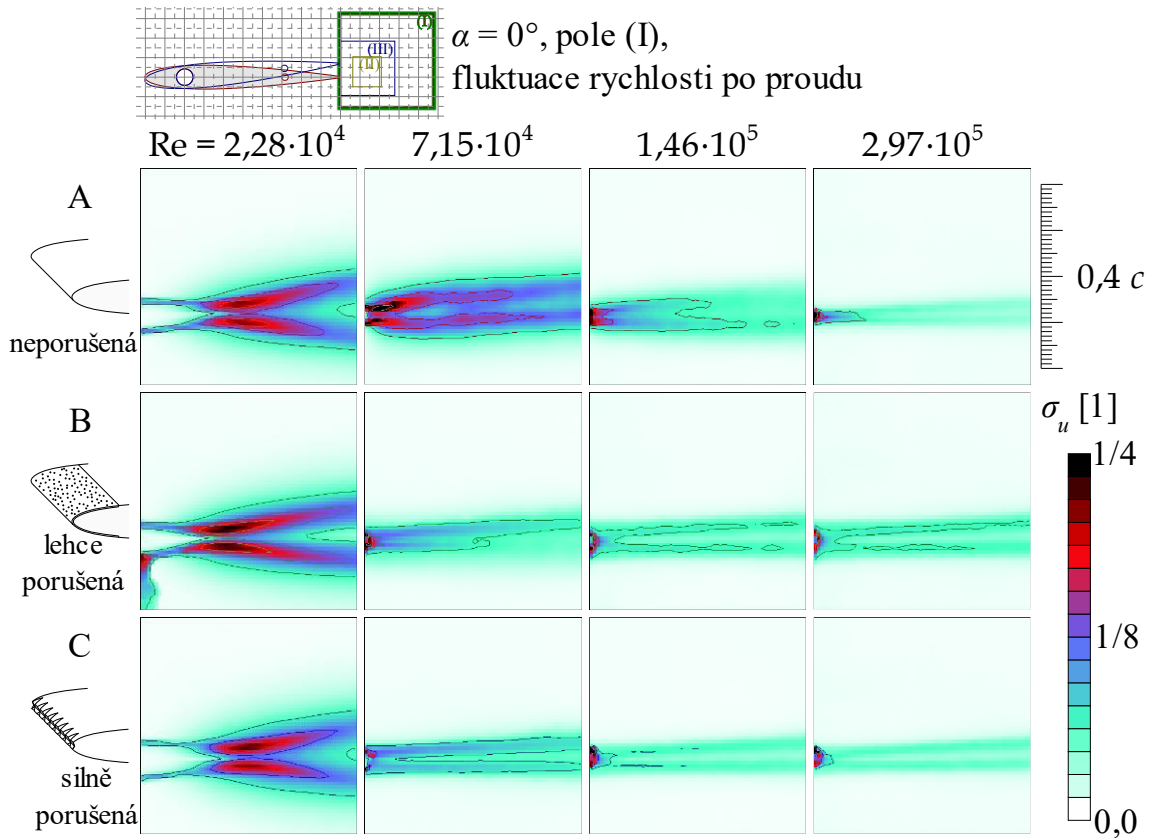
$$\sigma[u](x, y) = \sqrt{\langle u^2(x, y) \rangle_i - \langle u(x, y) \rangle_i^2} \quad (3)$$

$$\sigma[v](x, y) = \sqrt{\langle v^2(x, y) \rangle_i - \langle v(x, y) \rangle_i^2} \quad (4)$$

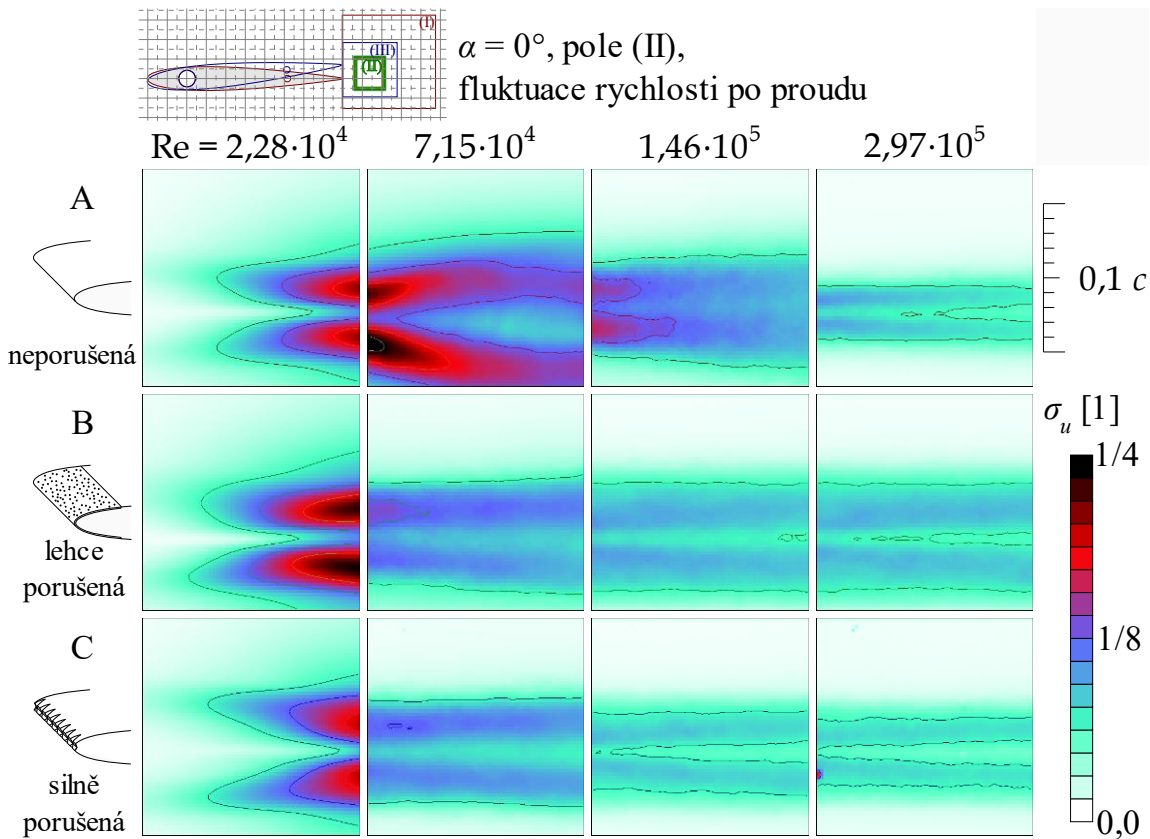
Parametry v rovnici znázorňují: x, y – souřadnice v měřeném poli
 i – číslo pořizovacího snímku
 $\langle \rangle$ – průměrování přes i

Pro přesnější interpretaci fráze „průměrování přes i “ je možné vypočítat střední hodnotu z obecné veličiny x následujícím způsobem: $\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum x_i$.

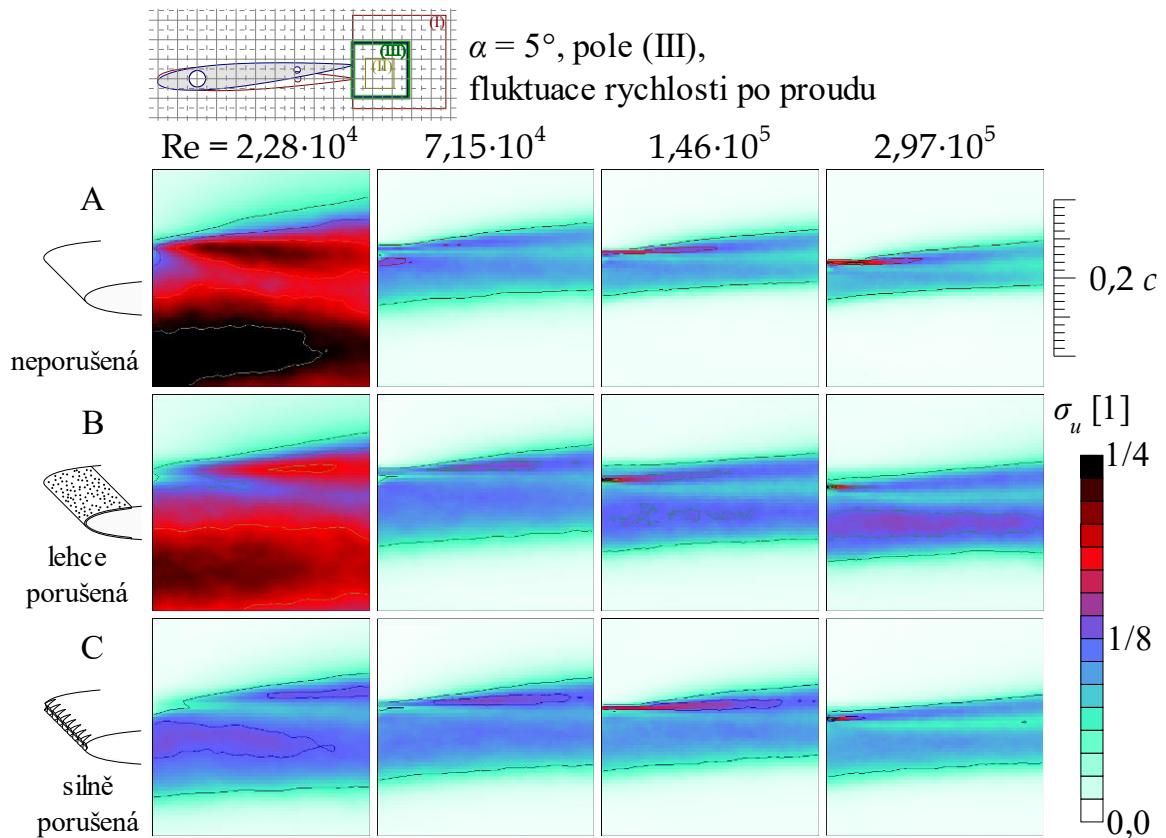
9.1.2.1 Výsledné hodnoty fluktuace po proudu



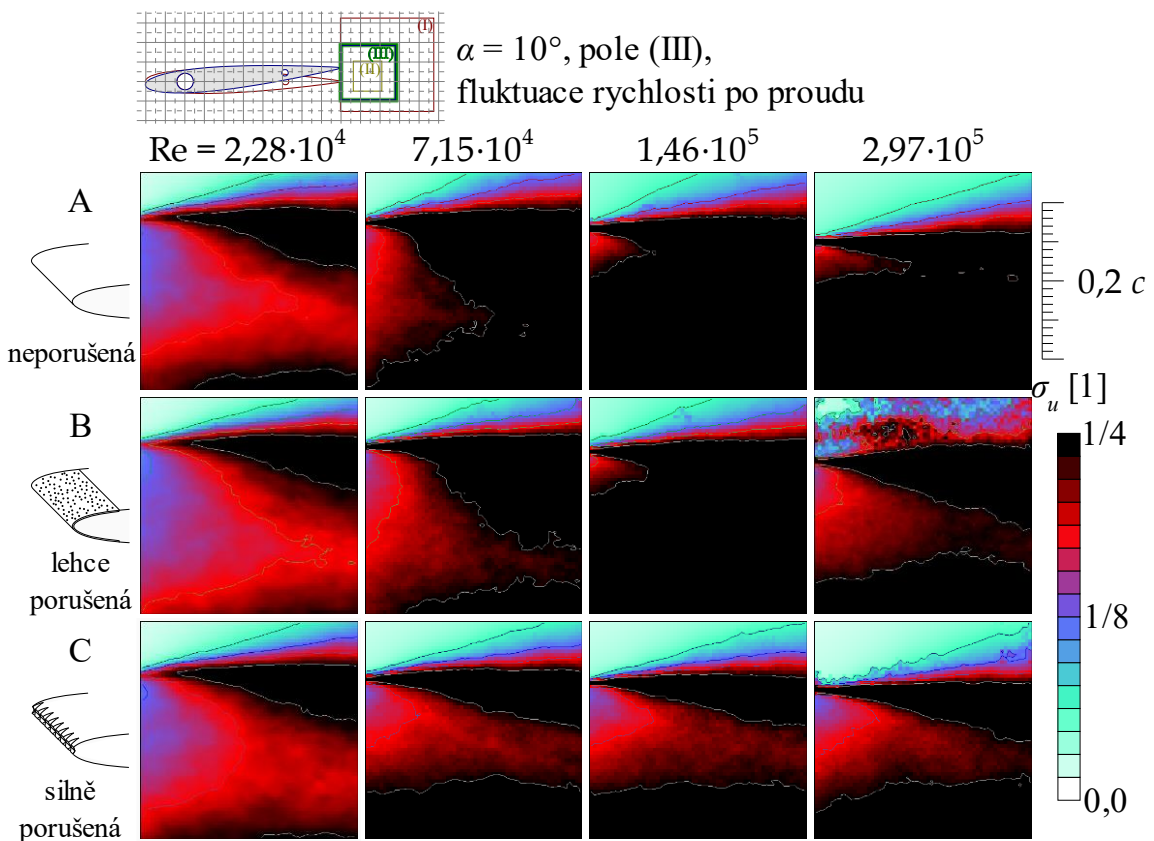
Obrázek 36 – Fluktuace po směru proudění pro pole I



Obrázek 37 - Fluktuace po směru proudění pro pole II

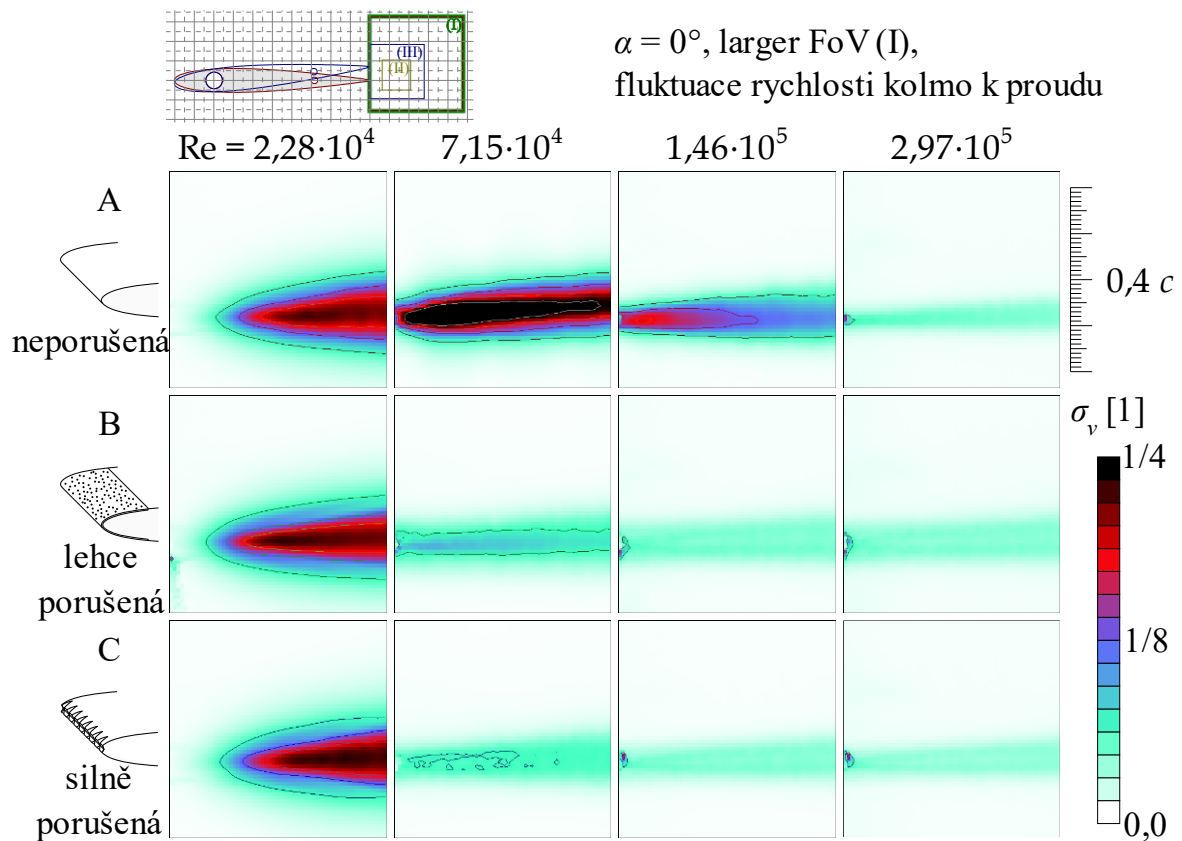


Obrázek 38 - Fluktuace po směru proudění pro pole III s úhlem náběhu 5°

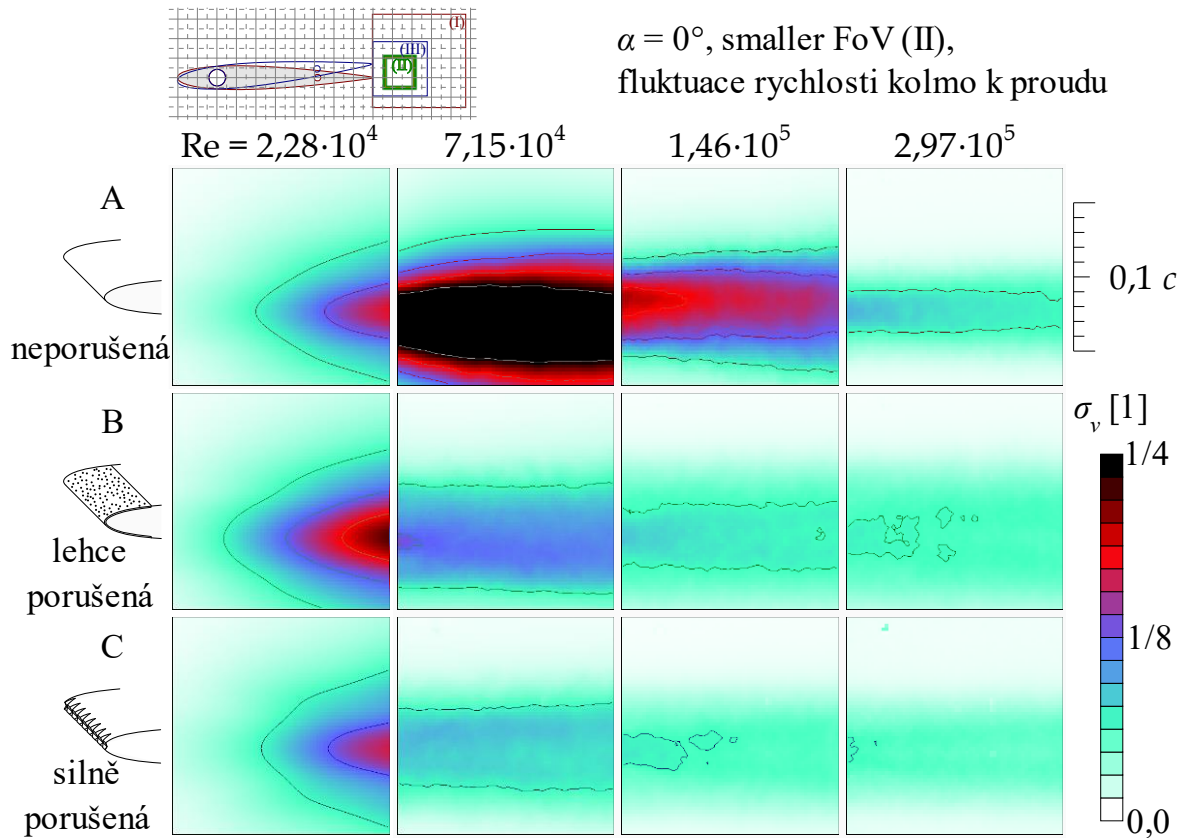


Obrázek 39 - Fluktuace po směru proudění pro pole III s úhlem náběhu 10°

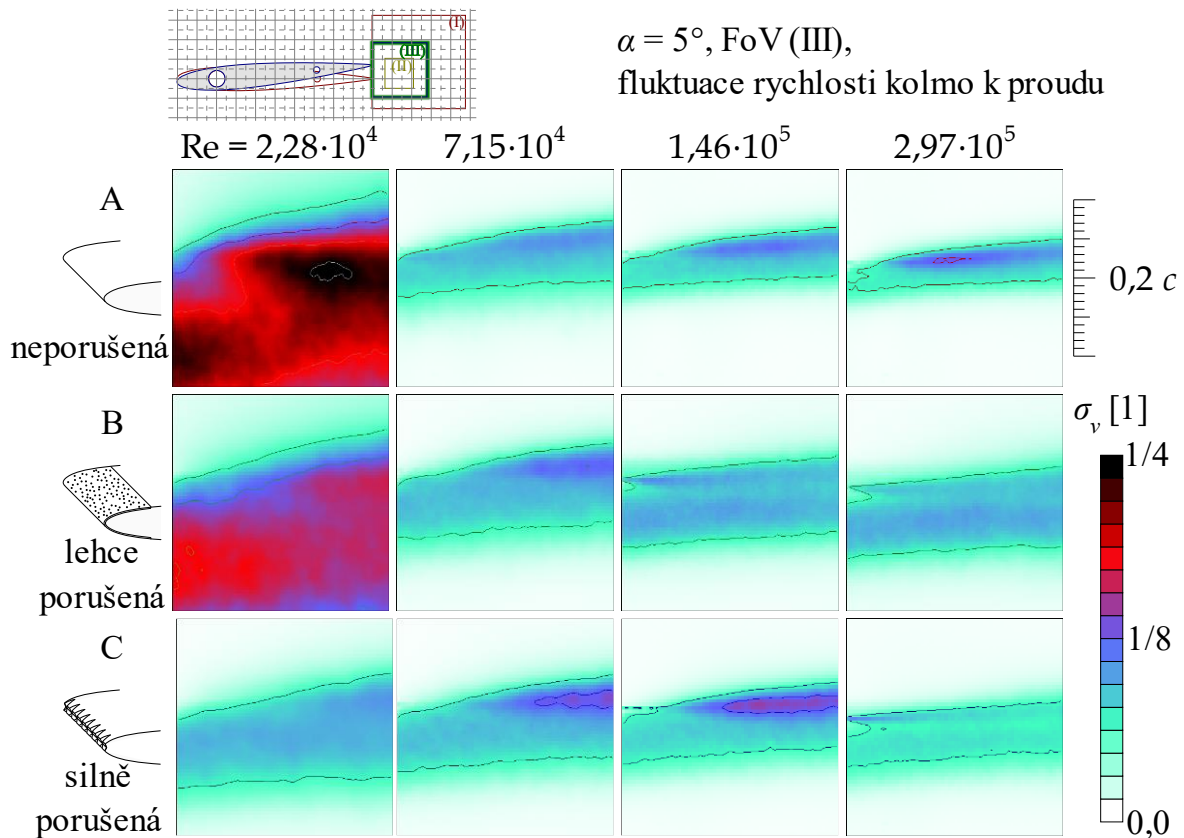
9.1.2.2 Naměřené hodnoty fluktuace kolmo ke směru hlavního proudu



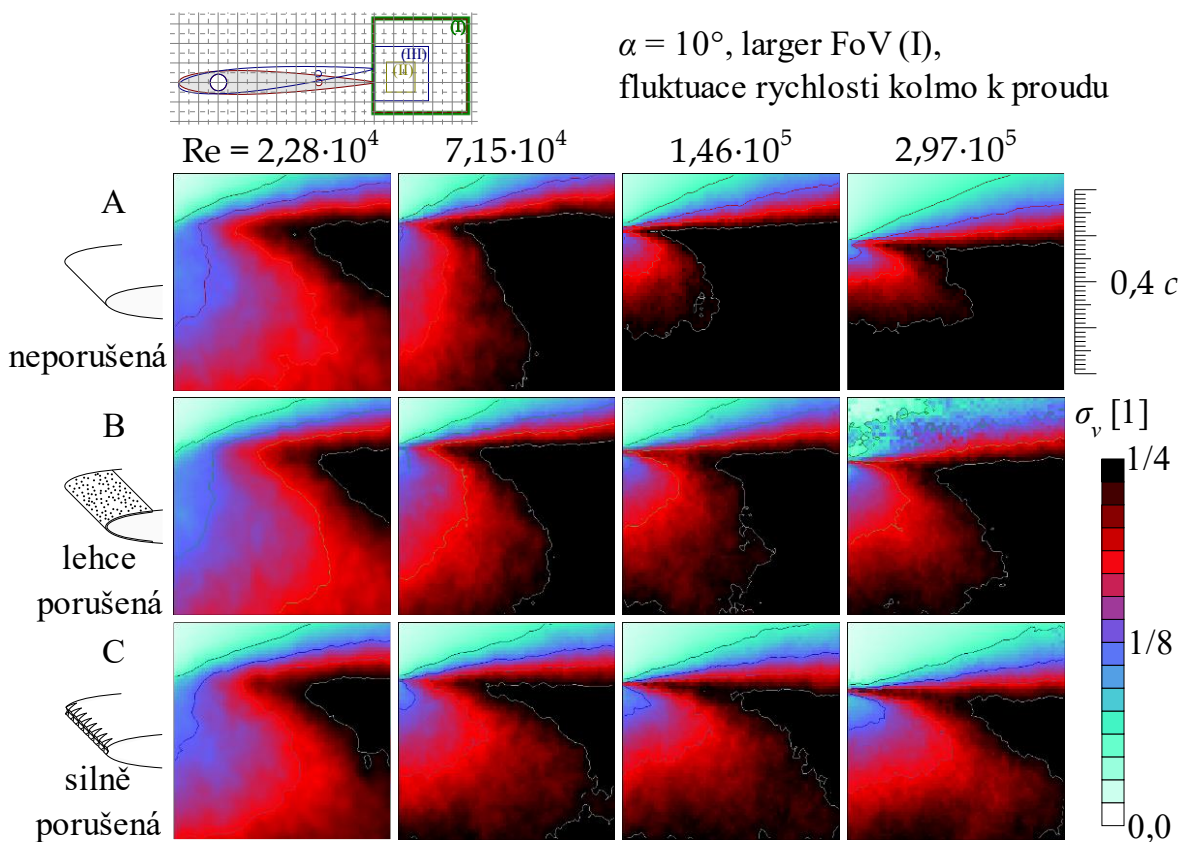
Obrázek 40 - Fluktuace ve směru kolmém k hlavnímu proudění pro pole I



Obrázek 41 - Fluktuace ve směru kolmém k hlavnímu proudění pro pole II



Obrázek 42 - Fluktuační rychlosti ve směru kolmém k hlavnímu proudění pro pole III s úhlem náběhu 5°



Obrázek 43 - Fluktuační rychlosti ve směru kolmém k hlavnímu proudění pro pole III s úhlem náběhu 10°

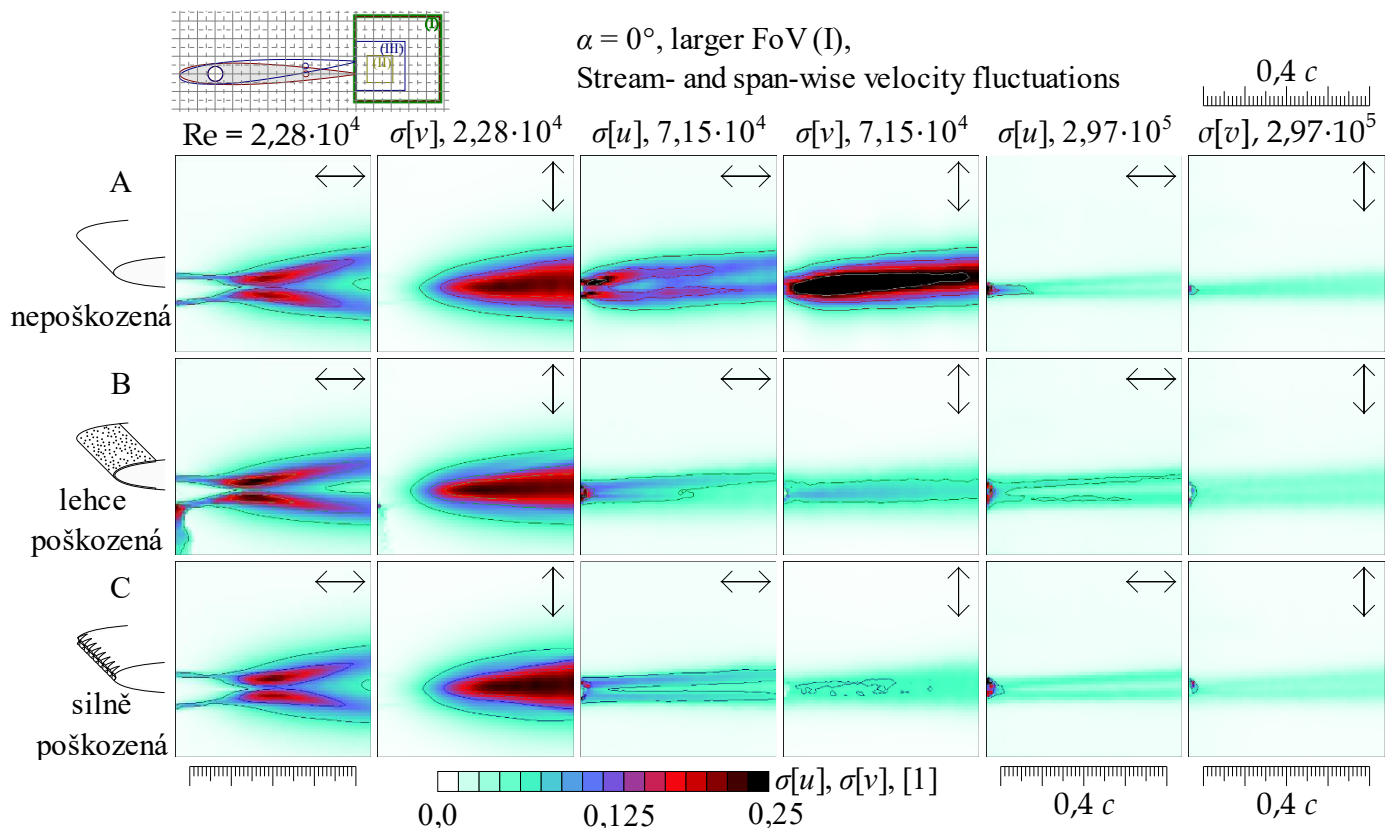
9.1.2.3 Přehlednější porovnání fluktuací

Pro přehlednější porovnání jsou zde obrázky 44, 45 a 46, kde je možné pozorovat přehlednější porovnání fluktuací v obou směrech. Šipka \leftrightarrow značí směr proudění podélné a \updownarrow směr příčný. Hodnoty veličin byly pro každý směr počítány zvlášť, protože topologický rozdíl mezi nimi ukazuje na odlišný původ odpovídajících turbulentních struktur. Fluktuace po proudu vznikají v připojené smykové vrstvě, zatímco příčné fluktuace jsou spojeny s jevem špatně obtékaného tělesa a tvorbou Von Karmánových vírových stezek.

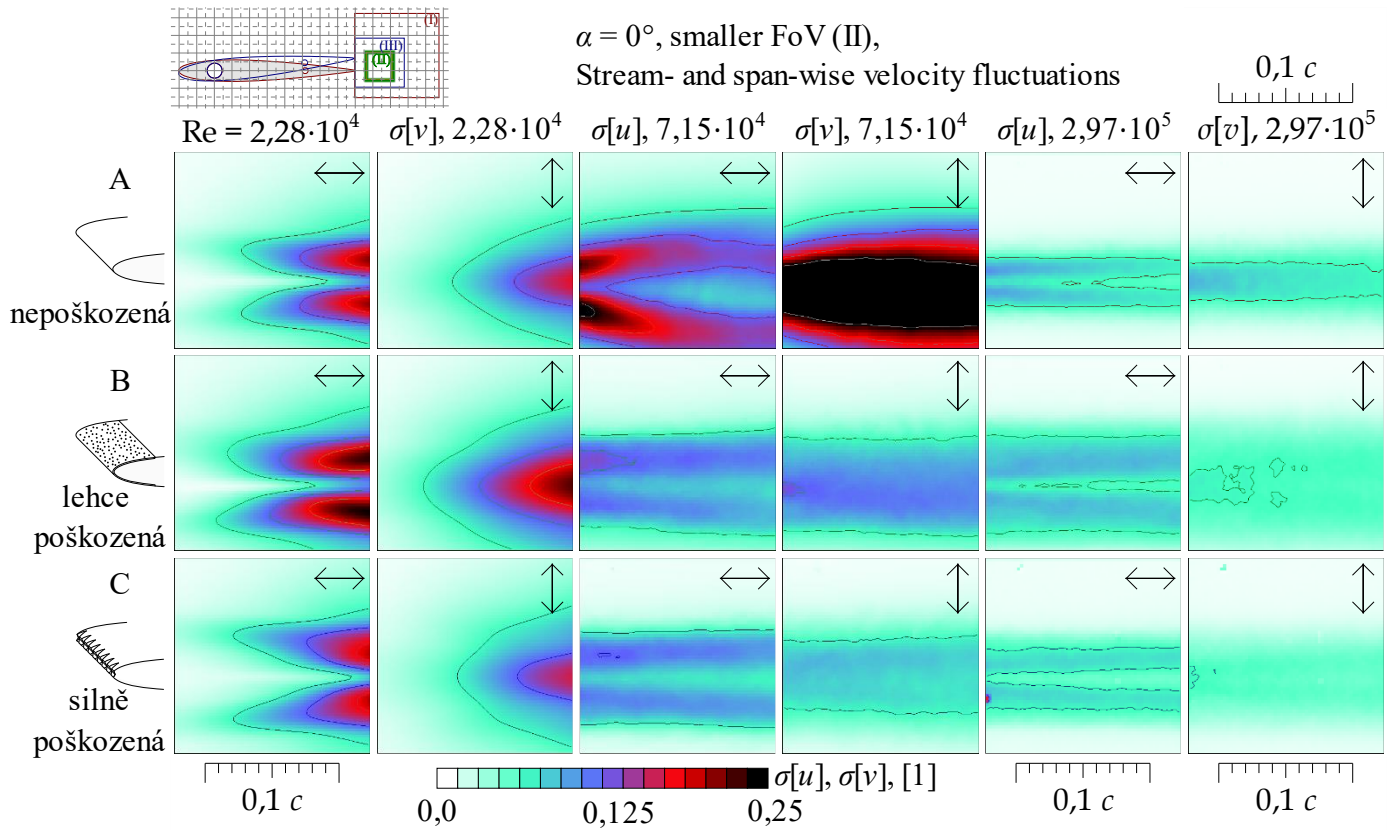
Při nulovém úhlu náběhu a nižších rychlostech jsou příčné fluktuace soustředěny okolo osy vznikajícího úplavu a zároveň jsou příčné fluktuace silnější než fluktuace podélné. Při stejném úhlu náběhu a vyšších rychlostech se tento jev obrací, tedy příčné fluktuace jsou slabší než podélné.

Překvapujícím jevem může být, že nepoškozená lopatka vykazuje silnější fluktuace při vyšší hodnotě Reynoldsova čísla ($7,10 \cdot 10^4$), zatímco v nejvyšších měřených rychlostech má úplav nižší fluktuace.

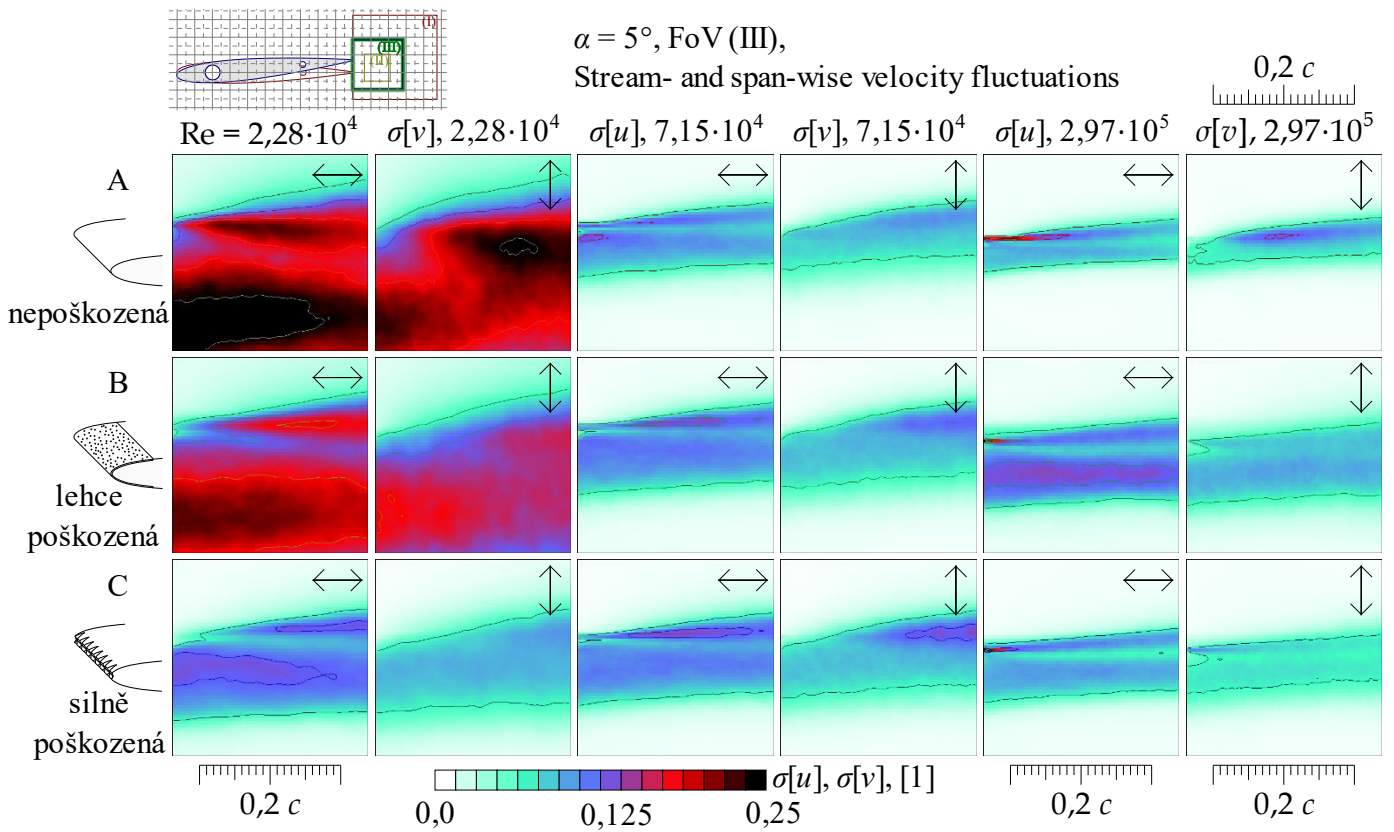
Dalším překvapujícím zjištěním může být to, že silně poškozená lopatka při úhlu náběhu 5° vykazuje nižší úroveň fluktuací než zbylé lopatky, přičemž nepoškozená lopatka je nejhorší z hlediska fluktuací při nižších hodnotách Reynoldsova čísla. Naopak při vyšších hodnotách (Re) je nejvýraznější úplav pozorován za lehce porušenou lopatkou.



Obrázek 44 – Přehlednější porovnání fluktuací v obou směrech pro pole I



Obrázek 45 - Přehlednější porovnání fluktuací v obou směrech pro pole II



Obrázek 46 - Přehlednější porovnání fluktuací v obou směrech pro pole III

10 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zkoumání a vyhodnocení vlivu modelové eroze náběžné hrany lopatky na strukturu proudění v úplavu. Pro samotné zkoumání byla použita metoda obrazového měření rychlostí unášených částic (PIV). K měření byly vyrobeny tři druhy lopatek, které znázorňovaly různá stadia poškození náběžné hrany. Po výrobě pomocí 3D tisku byly lopatky zkompletovány a oskenovány pomocí skeneru, který nám určil skutečné okrajové podmínky. Výstupem měření byly vektorová pole s okamžitou rychlostí, která ukazují směr a velikost rychlosti.

Vyhodnocení střední rychlosti po směru proudění ukazuje, že v oblasti nízkých rychlostí nejsou zásadní rozdíly ve struktuře proudění. Ty se začínají objevovat při rychlostech vyšších, kde porušení náběžné hrany vede k rozšiřování úplavu a zpomalování rychlosti za lopatkou. Z pohledu energie narušená náběžná hrana vede k větší ztrátě energie než v případě neporušené náběžné hrany. Překvapivé je, že úplav za silně porušenou lopatkou je užší než v případě lehce porušené lopatky. Tento jev je způsoben tím, že porušená náběžná hrana lopatky má stabilizační efekt na úplav.

Výsledky podélné a příčné fluktuace jsou taky zajímavé. Při nulovém úhlu náběhu a nižších rychlostech jsou příčné fluktuace silnější než fluktuace podélné. Při stejné konfiguraci, ale vyšších rychlostech se tento jev obrací (příčné fluktuace jsou slabší, než podélné). Překvapivě u nepoškozené náběžné hrany lopatky při hodnotě $Re = 7,10 \cdot 10^4$ dochází k silným příčným fluktuacím. Dalším překvapujícím zjištěním z hlediska fluktuací je, že silně poškozená lopatka při úhlu náběhu 5° vykazuje nižší úroveň fluktuací než zbylé lopatky, přičemž nepoškozená lopatka je nejhorší z hlediska fluktuací při nižších hodnotách Reynoldsova čísla. Naopak při vyšších hodnotách (Re) je nejvýraznější úplav pozorován za lehce porušenou lopatkou.

Na základě popsaných výsledků vyplývá, že obtékání kolem poškozené lopatky je horší než proudění kolem lopatky neporušené. Poškození náběžné hrany způsobuje, že mezní vrstva přechází do turbulentního režimu při nižších hodnotách Reynoldsova čísla, což je výhodné v určitém rozmezí Re , protože mezní vrstva je užší a obsahuje menší fluktuace. Při větších hodnotách Re , kdy se nacházíme v turbulentním režimu tak či tak má poškození náběžné hrany již zmíněný negativní vliv. Ten se projevuje tím, že úplav za poškozenými lopatkami je skoro dvakrát širší a tím pádem bere více energie hlavnímu proudu. Překvapivě silně poškozená lopatka vychází z vyhodnocení lépe než lehce porušená lopatka.

11 Reference

- (1) KRAJÍČ, Ladislav. *Parní turbíny a příslušenství*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017, s. 280.
- (2) KOLLORSS, Petr, Jindřich LOUTHAN a Jan UHER. *Přednášky z předmětu Parní turbíny a kondenzátory*. Plzeň, 2022. Západočeská univerzita v Plzni.
- (3) KHOSHNAW, Fuad a Rolf GUBNER. Part I: General Aspects of Corrosion, Corrosion Control, and Corrosion Prevention. *Corrosion Atlas Case Studies*. Elsevier, 2022, 25-42. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85849-6.02002-3>
- (4) VLASÁK, Jakub a Zdeněk RUMIL. *Vliv erozního poškození na životnost nízkotlakých lopatek s použitím různých erozních ochran*. In: . Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2021.
- (5) BENBIN, Xin, Zhang AIJUN, Han JIESHENG a Meng JUNHU. Improving mechanical properties and tribological performance of Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5} high entropy alloys via doping Si. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021, **869**(15), 159122. Dostupné z: doi:[10.1016/j.jallcom.2021.159122](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159122)
- (6) URUBA, Václav. *Turbulence*. 2. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2014. Skripta.
- (7) MACHÁČKOVÁ, Adéla a Radim KOCICH. *Sdílení tepla a proudění*. 1. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2012.
- (8) SELLENS, Rick. Power Law Profiles in Pipes. *Queensu* [online]. [cit. 2023]. Dostupné z: <https://me.queensu.ca/People/Sellens/PowerLaw.html>
- (9) ABRHÁM, Vladimír. *Vyhodnocení statistik turbulentního proudění v proudovém paprsku* [Bakalářská práce]. Plzeň: Západočeská Univerzita, 2021. Dostupné také z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/44246>
- (10) VON KÁRMÁN, T. *Aerodynamics*. McGraw-Hill paperbacks : science, mathematics and engineering. McGraw-Hill: McGraw-Hill, 1963.
- (11) SOLÍS-GALLEGO, I., A. MEANA-FERNÁNDEZ, J. FERNÁNDEZ ORO, K.M. ARGÜELLES DÍAZ a S. VELARDE-SUÁREZ. Turbulence Structure around an Asymmetric High-Lift Airfoil for Different Incidence Angles. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2017, **10**(4), 1013-1027. Dostupné z: doi:[10.18869/acadpub.jafm.73.241.27625](https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.73.241.27625)
- (12) ADRIAN, Ronald. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*. 2005, **39**(2), 159-169. Dostupné z: doi:[10.1007/s00348-005-0991-7](https://doi.org/10.1007/s00348-005-0991-7)
- (13) TROPEA, C., A.L. YARIN a J.F. FOSS. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Berlin: Springer, 2007.
- (14) LUTKEVICH, Ben. Reverse-engineering. *TechTarget* [online]. 2021 [cit. 2023]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/reverse-engineering>

- (15) HEDENSTRÖM, Anders a Christoffer JOHANSSON. *Bat flight: aerodynamics, kinematics and flight morphology*. The Journal of Experimental Biology, 2015, **218**(5), 653-663. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1242/jeb.031203>
- (16) JEZOV, Jaas. *Pressure Sensitive Lateral Line for Underwater Robot*. Tallin: TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2013.
- (17) Airfoiltools.com. *NACA 0012 AIRFOILS* [online]. [cit. 2023]. Dostupné z: <http://www.airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>