

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 Strojní inženýrství
Studijní specializace: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vyhodnocení statistik turbulentního proudění v proudovém paprsku

Autor: Vladimír Abrhám
Vedoucí práce: RNDr. Daniel Duda, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

Zadání BP

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vladimír ABRHÁM**
Osobní číslo: **S20B0373P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Téma práce: **Vyhodnocení statistik turbulentního proudění v proudovém paprsku**
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Zásady pro vypracování

1. Příprava upevnění měřícího zařízení ke konstrukci aerodynamické tratě vzduchového paprsku.
2. Příprava a výroba nástavce na trysku.
3. Kalibrace.
4. Změření okamžitých rychlostí v paprsku pro různé rychlosti vzduchu.
5. Viz bod 4 pro různé polohy měřeného bodu.
6. Viz body 4 a 5 pro alespoň ještě jednu variantu nástavce na trysku.
7. Vyhodnocení naměřených dat a porovnání variant.
8. Závěr.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Wang, Z.-. & Cheng, N.-. 2006, „Time-mean structure of secondary flows in open channel with longitudinal bedforms“, *Advances in Water Resources*, vol. 29, no. 11, pp. 1634-1649
- List, E.J. 1982, „TURBULENT JETS AND PLUMES.“, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 14, pp. 189-212
- Pope, S.B. 2012 „Turbulent Flows“, Cmbridge University Press
- Frisch, U. 2010, „Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov“, Cambridge University Press
- Tropea, C, Yarin, A, Foss, J F. 2007, „Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics“, Springer
- Duda, D. 2018, „Preliminary PIV measurement of an air jet“, *AIP Conference Proceedings*
- Romano, G.P. 2020, „Large and small scales in a turbulent orifice round jet: Reynolds number effects and departures from isotropy“, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 83

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

V Plzni dne 31. října 2020

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat RNDr. Danielu Dudovi, Ph. D za odborné rady, připomínky a pomoc během experimentu a zpracování bakalářské práce. Nadále mé poděkování patří panu prof. Ing. Urubovi, CSc. za cenné rady před zahájením experimentu a doc. Ing. Vitalii Yanovychovi, DrSc. za technickou výpomoc při sestavování aparatury.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Abrahám	Jméno Vladimír	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) RNDr. Duda, Ph.D.	Jméno Daniel	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU – FST – KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vyhodnocení statistik turbulentního proudění v proudovém paprsku		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	54	TEXTOVÁ ČÁST	33	GRAFICKÁ ČÁST	21
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce obsahuje pozorování proudění vzduchu skrz nástavec trubkovitého tvaru s výstupky a vliv výstupků nástavce na změnu struktury proudění.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>PIV, turbulentní proudění, 3D tisk, tryska</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Abrahám	Name Vladimír		
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering			
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	Evaluation of statistics in the turbulent jet flow			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKE	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	54	TEXT PART	33	GRAPHICAL PART	21
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis contains observation of the air flow through the tubular-shaped nozzle with bumps and influence of the bumps on change of the flow structure.
KEY WORDS	PIV, turbulent flow, 3D printing, nozzle

Obsah

Zadání BP	2
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam grafů.....	12
Úvod.....	13
Proudění	14
Metoda PIV	18
Ventilátor.....	19
Kamery	20
Příprava a výroba nástavce na trysku	21
Návrh nástavců.....	21
Parametry základní trysky	21
Modifikovaný nástavec 1	24
Modifikace 2	26
Výroba modelu.....	26
Tisk základního modelu	27
Kontrola geometrie.....	27
Kontrola základního nástavce	28
Kontrola modifikovaného nástavce 1	31
Kontrola modifikovaného nástavce 2.....	32
Příprava upevnění měřicího zařízení ke konstrukci aerodynamické tratě vzduchového paprsku	34
Zajištění sycení stopovacími částicemi	35
Kalibrace	35
Měření	36
Pozorované veličiny	36
Střední rychlost	36
Vířivost.....	39
Turbulentní kinetická energie.....	42
Enstrofie.....	44
Koeficient asymetrie	45
Koeficient špičatosti.....	47
Koeficient anizotropie tensoru Reynoldsových napětí.....	50

Závěr.....	52
Citovaná literatura	54

Přehled použitých zkratk a symbolů

PIV	Particle image velocimetry	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
d	Průměr	[mm]
ν	Kinematická viskozita	[$m^2 s^{-1}$]
W_{ref}	Referenční hodnota rychlosti	[m/s]
CCD	Charged-couple device	[-]
Δt	Přírůstek času	[μs]
$\vec{\omega}$	Vířivost	[s^{-1}]
∇	Operátor nabra	[-]
\vec{u}	Složka rychlosti ve vodorovném směru	[m/s]
v	Složka rychlosti ve vertikálním směru	[m/s]
w	Složka rychlosti ve směru proudění	[m/s]
TKE	Turbulentní kinetická energie	[m^2/s^2]
u'	Fluktuace složky rychlosti u	[m/s]
Kurt	Koeficient špičatosti	[-]
γ	Koeficient asymetrie	[-]
τ_{ij}	Celkový tenzor napětí	[N/m^2]
ρ	Hustota	[kg/m^3]
\bar{u}	Střední hodnota složky rychlosti u	[m/s]
i,j	Indexy označující směr	[-]
STL	Standard Tessellation Language	[-]
F	koeficient anizotropie	[-]

Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma laminárního proudění	14
Obrázek 2 Schéma turbulentního proudění	15
Obrázek 3 Schéma K-H nestability	16
Obrázek 4 Schéma metody PIV	18
Obrázek 5 Ukázka trysky s ventilátorem	21
Obrázek 6 Předpokládaný vzhled základního nástavce	22
Obrázek 7 Konstrukční výkres základního nástavce.....	23
Obrázek 8 Předpokládaný vzhled modifikovaného nástavce 1	24
Obrázek 9 Konstrukční výkres modifikovaného nástavce 1	25
Obrázek 10 Předpokládaný vzhled modifikovaného nástavce 2.....	26
Obrázek 11 Kontrola rozměrů pomocí skeneru	28
Obrázek 12 Kontrola rozměrů základního nástavce.....	29
Obrázek 13 Rozdíl vnějšího průměru mezi výrobkem a teoretickým modelem.....	30
Obrázek 14 Rozdíl vnitřního průměru mezi výrobkem a teoretickým modelem.....	30
Obrázek 15 Kontrola rozměrů modifikovaného nástavce 1	31
Obrázek 15 Rozdíl vnitřního průměru mezi výrobkem a teoretickým modelem modifikovaného nástavce 1	32
Obrázek 16 Kontrola rozměrů modifikovaného nástavce 2	33
Obrázek 17 Rozdíl vnitřního průměru mezi výrobkem a teoretickým modelem modifikovaného nástavce 2	33
Obrázek 18 Uspořádání aparatury	34
Obrázek 20 Vyobrazení koeficientu asymetrie	46

Seznam grafů

Graf 1 Ukázka grafu pro volnou smykovou vrstvu.....	17
Graf 2 Závislost rychlosti na hodnotě kolečka.....	19
Graf 3 Ukazující nelinearitu závislosti na grafu 1.....	20
Graf 4 Porovnání střední rychlosti pro měřenou rychlost 1.....	37
Graf 5 Porovnání střední rychlosti pro měřenou rychlost 2.....	37
Graf 6 Porovnání střední rychlosti pro měřenou rychlost 3.....	37
Graf 7 Porovnání střední rychlosti pro měřenou rychlost 4.....	38
Graf 8 Ukázka okamžitého pole rychlosti.....	38
Graf 9 Porovnání vířivosti pro měřenou rychlost 1.....	40
Graf 10 Porovnání vířivosti pro měřenou rychlost 2.....	40
Graf 11 Porovnání vířivosti pro měřenou rychlost 3.....	41
Graf 12 Porovnání vířivosti pro měřenou rychlost 4.....	41
Graf 13 Porovnání TKE pro měřenou rychlost 1.....	42
Graf 14 Porovnání TKE pro měřenou rychlost 2.....	43
Graf 15 Porovnání TKE pro měřenou rychlost 3.....	43
Graf 16 Porovnání TKE pro měřenou rychlost 4.....	43
Graf 17 Porovnání enstrofie pro měřenou rychlost 1.....	44
Graf 18 Porovnání enstrofie pro měřenou rychlost 2.....	44
Graf 19 Porovnání enstrofie pro měřenou rychlost 3.....	45
Graf 20 Porovnání enstrofie pro měřenou rychlost 4.....	45
Graf 21 Porovnání koeficientu asymetrie pro měřenou rychlost 1.....	46
Graf 22 Porovnání koeficientu asymetrie pro měřenou rychlost 2.....	46
Graf 23 Porovnání koeficientu asymetrie pro měřenou rychlost 3.....	47
Graf 24 Porovnání koeficientu asymetrie pro měřenou rychlost 4.....	47
Graf 25 Vyobrazení koeficientu špičatosti.....	48
Graf 26 Porovnání koeficientu špičatosti pro měřenou rychlost 1.....	48
Graf 27 Porovnání koeficientu špičatosti pro měřenou rychlost 2.....	49
Graf 28 Porovnání koeficientu špičatosti pro měřenou rychlost 3.....	49
Graf 29 Porovnání koeficientu špičatosti pro měřenou rychlost 4.....	49
Graf 30 Porovnání koeficientu anizotropie Reynoldsových napětí pro měřenou rychlost 1 ...	50
Graf 31 Porovnání koeficientu anizotropie Reynoldsových napětí pro měřenou rychlost 2 ...	51
Graf 32 Porovnání koeficientu anizotropie Reynoldsových napětí pro měřenou rychlost 3 ...	51
Graf 33 Porovnání koeficientu anizotropie Reynoldsových napětí pro měřenou rychlost 4 ...	51

Úvod

Trysky kruhových otvorů mají široké pole působnosti, od různých technických procesů, kompaktních míchacích zařízení po hořáky a řezačky. Právě proudění tekutin se začalo zkoumat v posledních letech díky technologické dostupnosti nejrůznějších metod a snahy využití maximálního potenciálu v praxi.

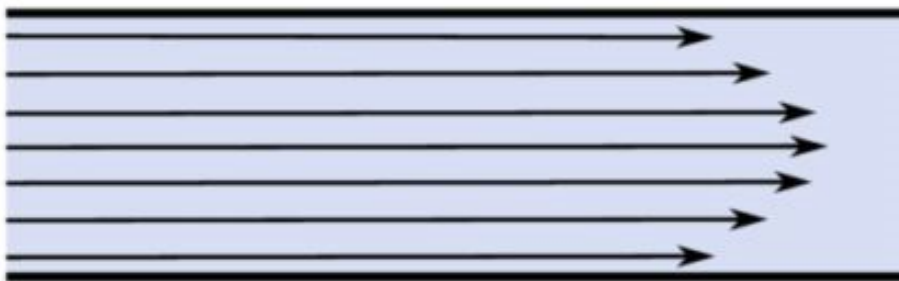
Tato bakalářská práce se zaměřuje na vliv změny vnitřní geometrie nástavce trubkovitého tvaru na strukturu proudění.

Pro možnost zkoumání vlivu geometrie tvaru trysky a naměření takovýchto dat je možné použít nejrůznější dostupné metody. Příkladem nám jsou metody jako Integrovaná laserová anemometrie (PIV), Laserová Dopplerovská Anemometrie (LDA) či metoda žhavého drátku (HWA). Z širokého spektra výše zmiňovaných metod byla námi zvolena metoda PIV. Konkrétně jsme využili modifikaci této metody tzv. metodu stereo-PIV (ve formě dvou kamer), pomocí které lze měřit celkové rychlostní pole tekutiny. Důvodem volby byla její časová nenáročnost. Dále bylo možné použít metodu HWA, s kterou lze naměřit poměrně přesné a rychlé výsledky, ale nevýhodou této metody je citlivost na nečistoty a možnost poškození drátku.

Proudění

Proudění tekutin (kapaliny, plyny) si lze představit jako „neuspořádaný“ pohyb částic v určitém směru. Částice se pohybují po trajektoriích, pomocí kterých klasifikujeme typ proudění. Typ proudění tekutin lze klasifikovat na laminární nebo turbulentní. Laminární proudění je charakterizováno částicemi tekutiny, jež se pohybují uspořádané ve vrstvách (lamina – vrstva). Pro laminární proudění je typický velmi pomalý pohyb částic nebo vysoká hodnota vazkosti (vazkost/viskozita udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti). Rychlost, tlak a další vlastnosti tekutiny zůstávají v každém bodě konstantní (1).

laminar flow



Obrázek 1 Schéma laminárního proudění; převzato z (2)

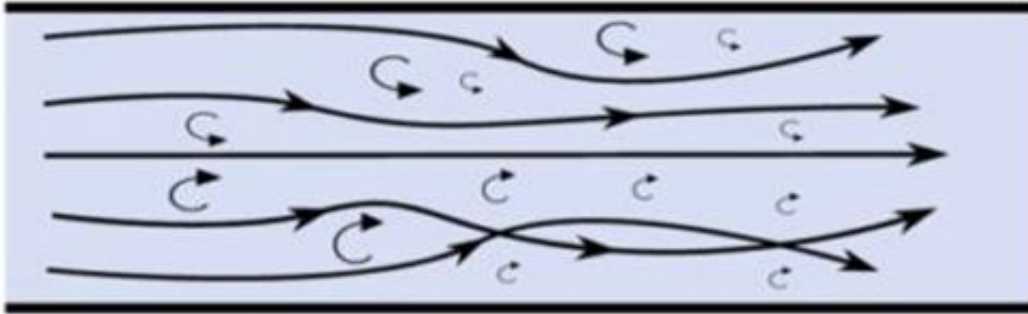
Mnohem častějším úkazem je již zmíněné turbulentní proudění. Jedná se o druh proudění, při kterém se tekutina chová na první pohled chaoticky (turbulentus – neuspořádaný). Turbulentní proudění je „charakterizováno rychlým pohybem nebo malým vlivem viskozity, kdy i malé poruchy v proudu nekontrolovatelně rostou a způsobují tak nepředvídatelné lokální chování tekutiny, intenzivní vířivé promíchávání v celé oblasti.“

Tekutiny, které jsou v turbulentním proudění, mají v sobě značné množství kinetické energie. Dokud tato energie přetrvává, tok bude i nadále turbulentní a nepravidelný. Jakmile je energie spotřebována, tok přechází do stavu laminárního proudění.

I přestože se turbulentní proudění může zdát absolutně nekoherentní, kdy neexistují zákonité vazby, není to zcela přesné. „Chaotické chování skutečných systémů v přírodě však spíše charakterizuje termín „deterministický chaos“. Jedná se o proces samo organizace složitých systémů, kdy vznikají soustavy koherentních struktur chovajících se v souladu s přírodními zákony.“ Jedná se tedy o paradox, protože koherenci vystihuje souvislost mezi

pohyby částic v tekutině na malé vzdálenosti a koherentní vírová struktura je organizovaná a stabilní (1).

turbulent flow



Obrázek 2 Schéma turbulentního proudění; převzato z (2)

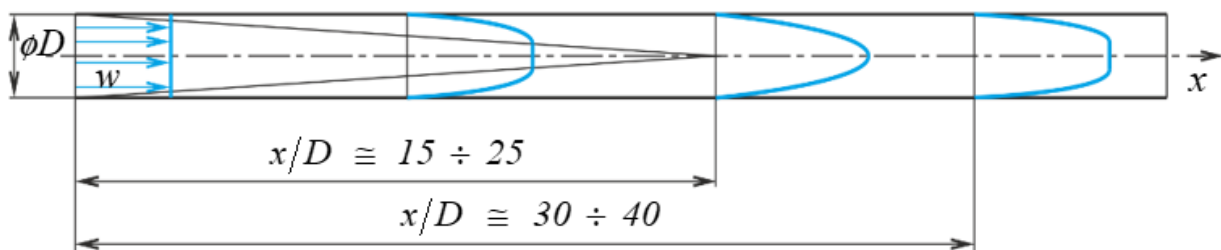
Typ toku vyskytující se v tekutině ovlivňuje vícero faktorů jako např. vstupní geometrie potrubí, drsnost povrchu, tlak aj. Důležitou veličinou ovlivňující druh proudění je Reynoldsovo číslo. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, kde rostoucí hodnota Reynoldsova čísla má za tendenci pravděpodobnější vznik turbulentního proudění. Reynoldsovo číslo pro proudění v trubici lze definovat pomocí vzorce jako:

$$Re = \frac{w d}{\nu} = \frac{\text{setrvačná síla}}{\text{třecí síla}} \quad \text{Rovnice 1 (3)}$$

kde d označuje vnitřní průměr geometrie, kterou tekutina proudí, w označuje střední hodnotu rychlosti proudění kapaliny v daném průřezu a ν značí kinematickou viskozitu (4).

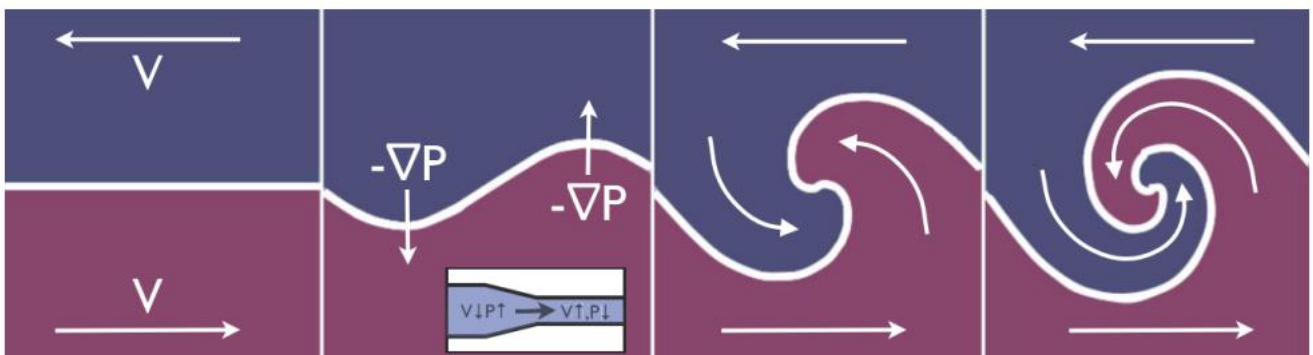
Pro proudění v trubici, kde $Re < 2300$ se jedná o laminární proudění, $Re > 10^4$ se jedná o turbulentní proudění a oblast mezi těmito hodnoty se nazývá přechodová (hodnoty Re jsou v tomto odstavci spíše orientační) (3) (5) (6).

Při průchodu tekutiny otvorem trysky do okolí je tvořena struktura proudění s různou rychlostí. V ranném počátku lze pozorovat jádro paprsku obklopené rostoucí smykovou vrstvou. V pozdější fázi jádro paprsku dissipuje a proudový rychlostní profil se podobá Gaussovskému růstu v prostoru. Smyková vrstva poblíž otvoru trysky zobrazuje optimální prostředí pro Kelvinovu-Helmholtzovu nestabilitu, která je jednou ze základních nestabilit proudění, protože se odehrává ve všech oblastech smykové vrstvy a příčného gradientu rychlosti v tekoucích tekutinách. K-H nestabilita se vyskytuje i u vnitřních vírů, což má za následek fraktální povahu turbulence (7) (8).



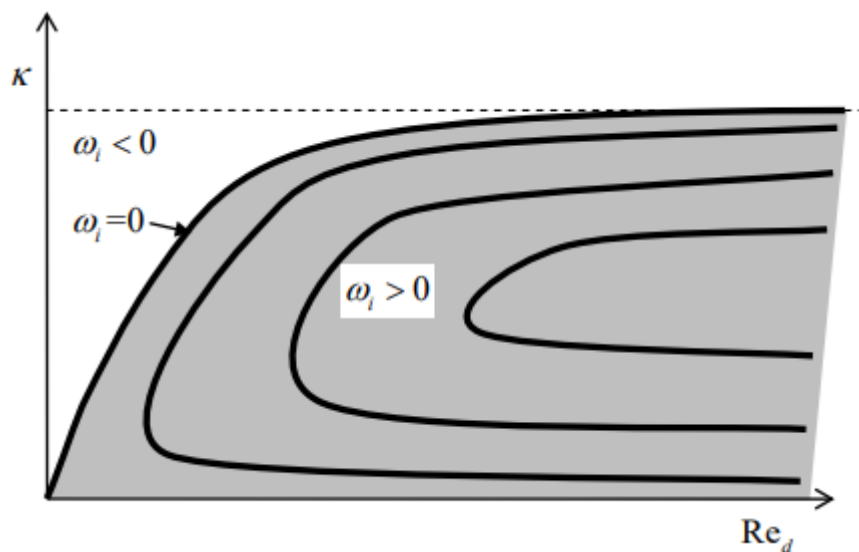
Obrázek 3 Vývoj rychlostního profilu v kanálu kruhového průřezu; převzato z (9)

Jedná se o jednu z nejjednodušších nestabilit. Vyskytuje se v praxi např. u obtékání křídel. Ke Kelvinově-Helmholtzově nestabilitě obvykle dochází mezi dvěma rozhraními kapalin s různou rychlostí. Rozhraní se může vlivem náhodné poruchy vychýlit na jednu stranu. Za podmínky podzvukového proudění je tekutina na vychýlené straně lokálně urychlena. Díky lokálnímu zrychlení se sníží lokální statický tlak a vzniká síla, která rozhraní vychyluje stejným směrem (1).



Obrázek 4 Schéma K-H nestability; převzato z (10)

Na Reynoldsově čísle také závisí i volná smyková vrstva. Na Graf 1 lze pozorovat, že volná smyková vrstva je nestabilní pro libovolnou hodnotu Re . Při rostoucí hodnotě Re se zvětšuje interval nestabilních vlnových čísel κ . Při dostatečně vysoké hodnotě Re dosáhne vlnové číslo κ své maximální asymptotické hodnoty. „Tření ve volné smykové vrstvě působí proti ztrátě stability, vzhledem k poruchám s velkými vlnovými čísly (malé rozruchy) je proudění stabilní.“ (1)

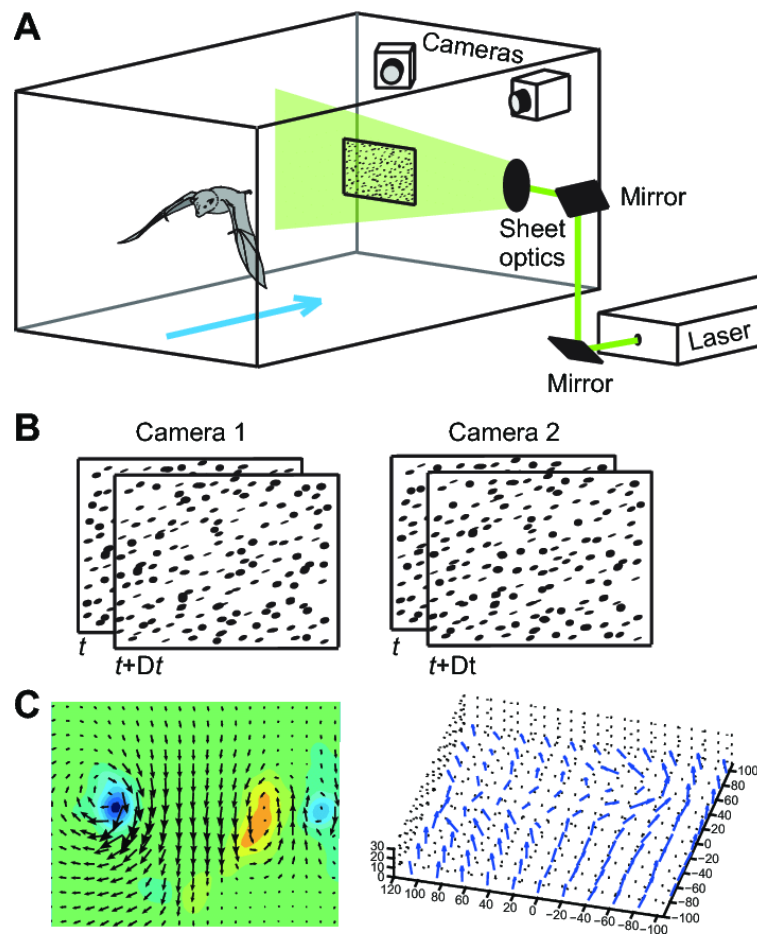


Graf 1 Ukázka grafu pro volnou smykovou vrstvu; převzato z (1)

Metoda PIV

Particle Image Velocimetry, neboli PIV je optická metoda vizualizace toku částic tekutiny. Používá se k získání vektorového pole okamžitých rychlostí a souvisejících vlastností v tekutinách. Typický aparát při používání metody PIV se skládá z vysokofrekvenčních kamer, stroboskopu nebo laseru s optickým uspořádáním omezující osvětlenou fyzickou oblast, synchronizátorem, který funguje jako externí spoušť pro kontrolu kamer i laseru a přístroje pro očkování částic.

K dodatečnému zpracování optických obrazů se používá dostupný software pro metodu PIV. Tekutina je nasycena stopovacími částicemi a při/po průchodu překážkou osvětlena výkonným laserem. Fotoaparát je schopen zachytit každý světelný puls v samostatných snímkách. Vektory rychlosti jsou odvozeny pohybem částic mezi dvěma světelnými impulzy (11).

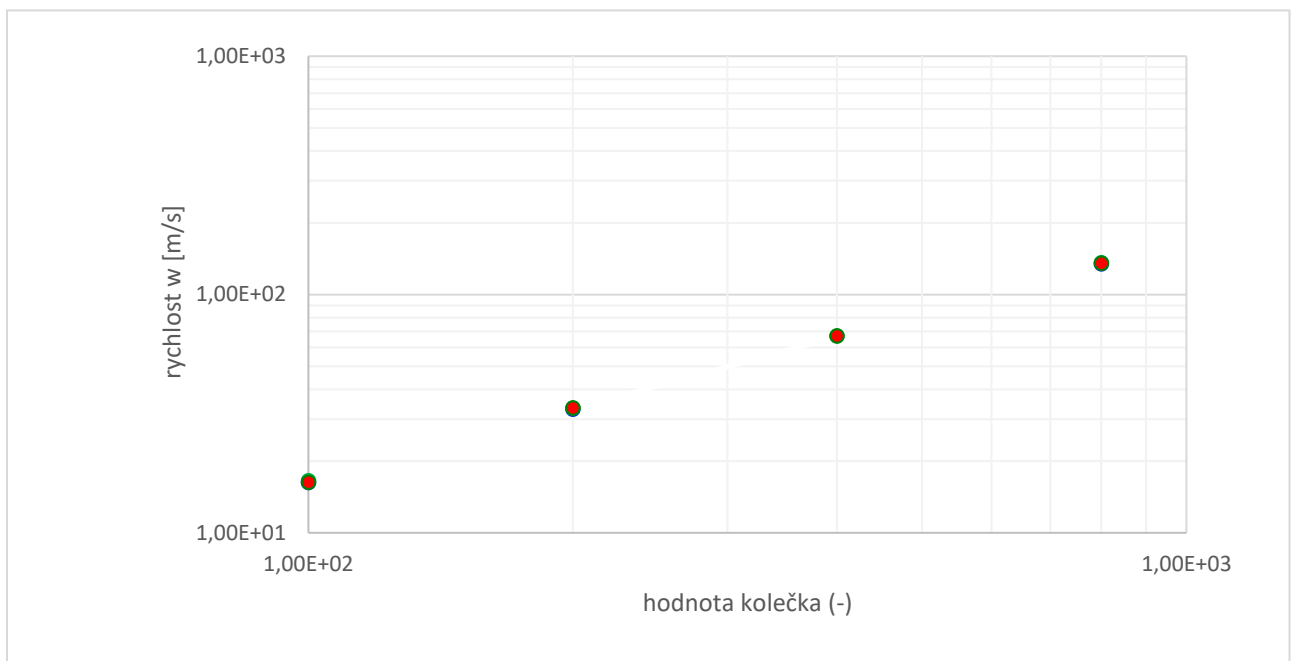


Obrázek 5 Schéma metody PIV; převzato z (22)

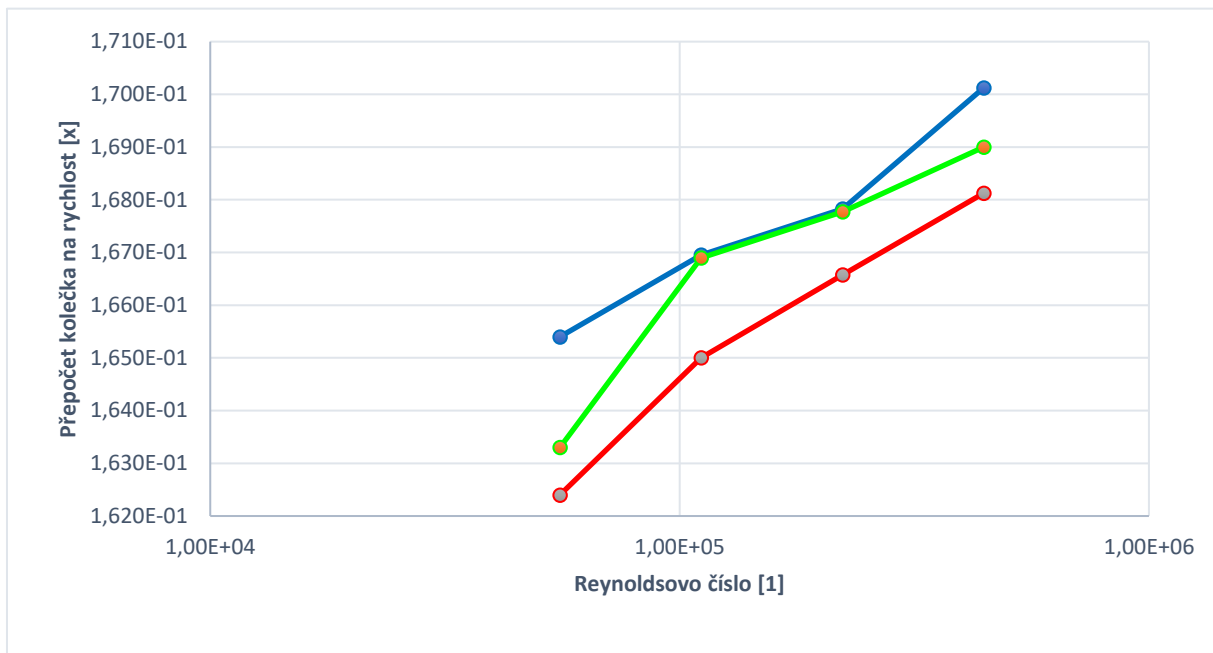
Ventilátor

Součástí aparatury byl vysokotlaký ventilátor, který řídí proud vzduchu. Jedná se o radiální vysokotlaký ventilátor se vzdáleným měničem kmitočtu HRD 2 FU 130/7,5 od firmy Elektror. Ventilátor je z hliníkové slitiny s výkonem 7.5 kW. Kmitočet bylo možné měnit přes řídicí skříň, kde se nacházel jednoduchý ovladač pro změnu výkonu ventilátoru. Jelikož hodnoty na řídicí skříni byly bez jednotek, bylo potřeba zjistit přepoččet rychlosti.

Experiment se konal ve čtyřech nastaveních: 100, 200, 400 a 800 (hodnoty na řídicí skříni). Za použití kamer a excelu bylo zjištěno, že referenční hodnota rychlosti $W_{ref} = 0,168 (\text{rychlost } w) \times \text{nastavení kolečka}$, ale není to zcela přesné. Z *Graf 2* se jeví funkce jako lineární, ale *Graf 3* ukazuje, že pro stejnou hodnotu Reynoldsova (Re) čísla jsou hodnoty podobné, avšak nestejně.



Graf 2 Závislost rychlosti na hodnotě kolečka



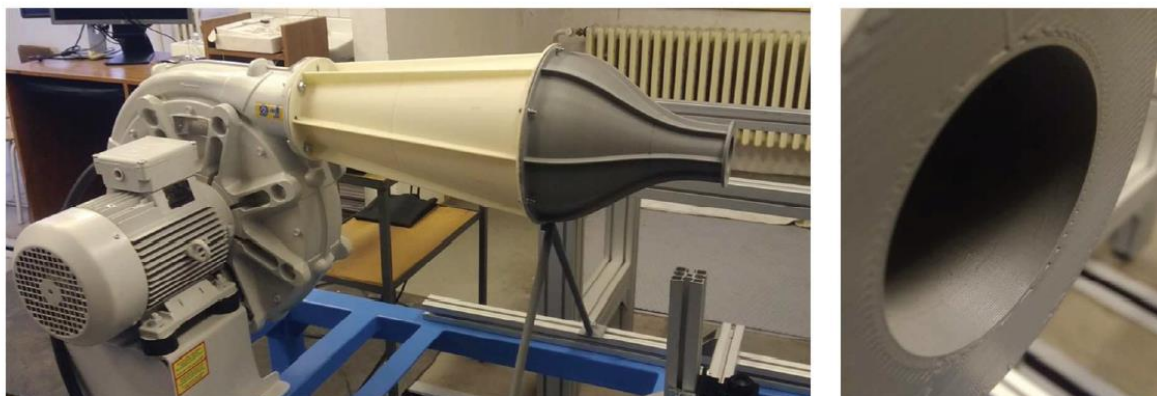
Graf 3 Ukazující nelinearitu závislosti na grafu 1

Kamery

Pro experiment byly použity CCD kamery MK II Flow Sense od firmy Dantec. CCD neboli charged-couple device představuje typ optoelektrického snímače, což znamená, že převádí optický signál na elektrický ve snímači. Elektrický signál je zdigitalizován a uložen v podobě informace pro další zpracování. CCD obrazové snímače jsou široce používány v profesionálních, lékařských a vědeckých aplikacích, kde jsou požadována vysoce kvalitní obrazová data (12).

Příprava a výroba nástavce na trysku

Pro přípravu a výrobu variant nástavců bylo zapotřebí změřit rozměry dosedací plochy na trysku. Konec trysky je ve tvaru kruhové příruby o vnějším průměru 90 mm, tloušťce 5 mm a vnitřním průměru 50 mm.



Obrázek 6 Ukázka trysky s ventilátorem; převzato z (13)

Pro přípravu modelu byl použit software Inventor a následně Fusion 360 s bezplatnou studentskou verzí od firmy Autodesk. Jedná se o modelovací software pro strojírenské navrhování a výkresy.

Návrh nástavců

Pro daný pokus bylo vyrobeno více variant nástavců. Konkrétně bylo zapotřebí navrhnout a vyrobit tři varianty. Varianty mají základní geometrii podobnou, pouze se liší počtem „překážek“ na vnitřní straně vnitřního průměru. Lze říct, že bylo potřeba navrhnout trysku základní a její dvě modifikace.

Parametry základní trysky

Tryska nabývá trubkovitého tvaru s vnitřním průměrem 50 mm, který je shodným s vnitřním průměrem nástavce. Je to z důvodu, aby mezi nástavcem a tryskou nevznikal žádný schod, který by negativně ovlivňoval výsledky měření. Vnější průměr byl zvolen 100 mm a celý nástavec má délku hlavní části těla 110 mm (do celkové délky nejsou započítány tři držáky pro upevnění nástavce na trysku).

Od konce nástavce (nasedající část nástavce je pomyšlený začátek) je vytvarována nasouvací část s průměrem 90 mm, dlouhá 10 mm s obvodovou tloušťkou 10 mm. Ve vzdálenosti 73.5 mm od konce nástavce začíná obdélníkově tvarovaný držák pro uchycení nástavce na trysku pomocí šroubů.

Z důvodu, že 3D tiskárna neumí tisknout převislé okraje, tak byly hrany na obou stranách nástavce sražené.

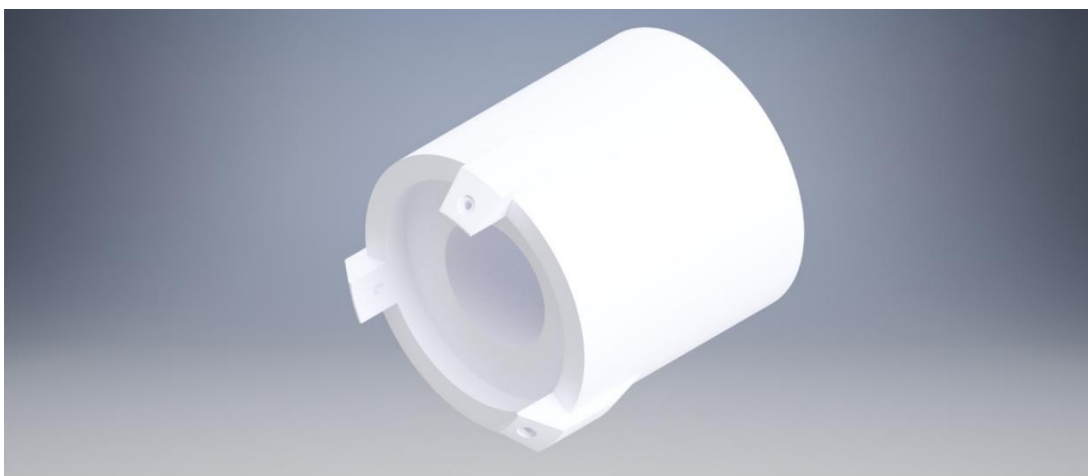
Na straně, kde se nachází držáky pro úchyt trysky jsou hrany sražené tak, aby vystupovali ze základního vnějšího průměru válce pod tupým úhlem. Úhel sražení mezi vnějším průměrem plochy nástavce a vnějším průměrem válce je 14,34 stupňů s délkou 17,179 mm.

Na druhém konci držáku je sražená plocha pro šroub M4x2. V návrhu modelu je díra, nikoliv závit z důvodu vlastností tiskárny, kde proces tisku není vhodný pro tvorbu závitů. V tomto případě byla obtisknuta nejprve díra s průměrem 3,6 mm a následně závitníkem udělán závit.

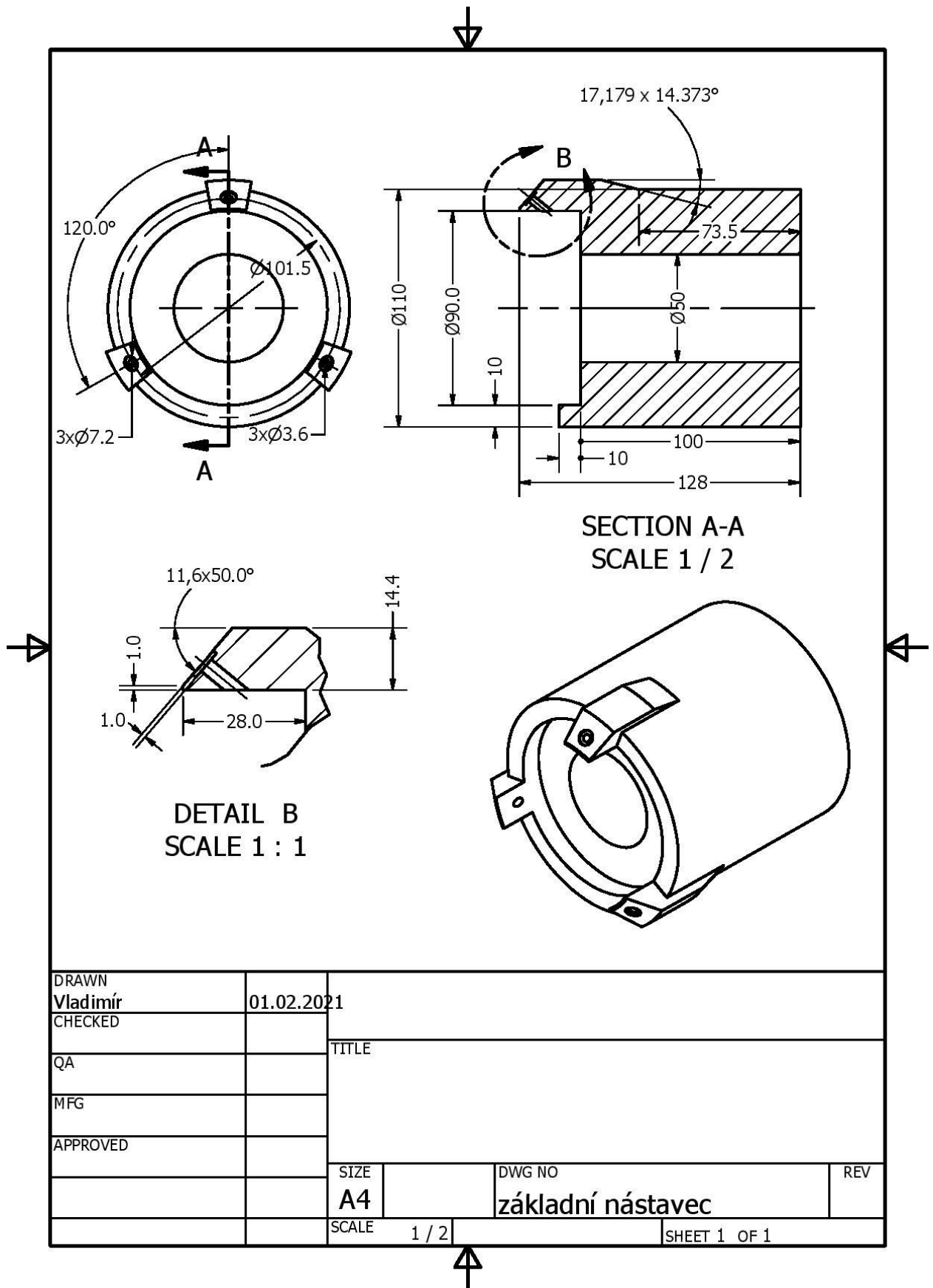
Kromě díry pro šroub je zde obtisknutý profil pro podložku hluboký 1 mm. Ploška pro šroub a podložku je sražená pod úhlem 50 stupňů ve směru od vnitřního průměru, s rozměry 90 mm v průměru a dlouhá 11 mm.

Celkem je držák dlouhý 54,5 mm, stupňovitě vysoký, nadále orotován kolem axiální osy o 20 stupňů. Celkově se jedná o 3 upevňovací místa (držáky) s rozstupem 120 stupňů po obvodě s roztečnou kružnicí o průměru 101,5 mm.

Výše zmiňovaný popis rozměrů základní trysky je znázorněn na obrázcích *Obrázek 7*, *Obrázek 8*.



Obrázek 7 Předpokládaný vzhled základního nástavce



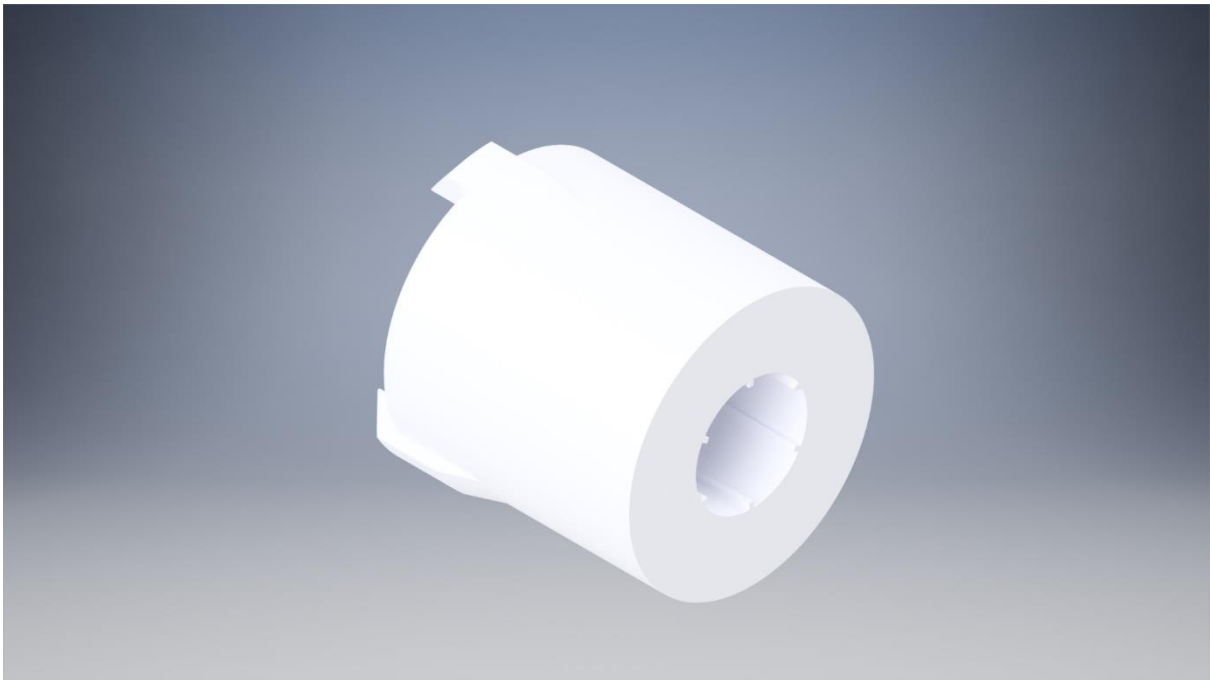
Obrázek 8 Konstrukční výkres základního nástavce

Modifikovaný nástavec 1

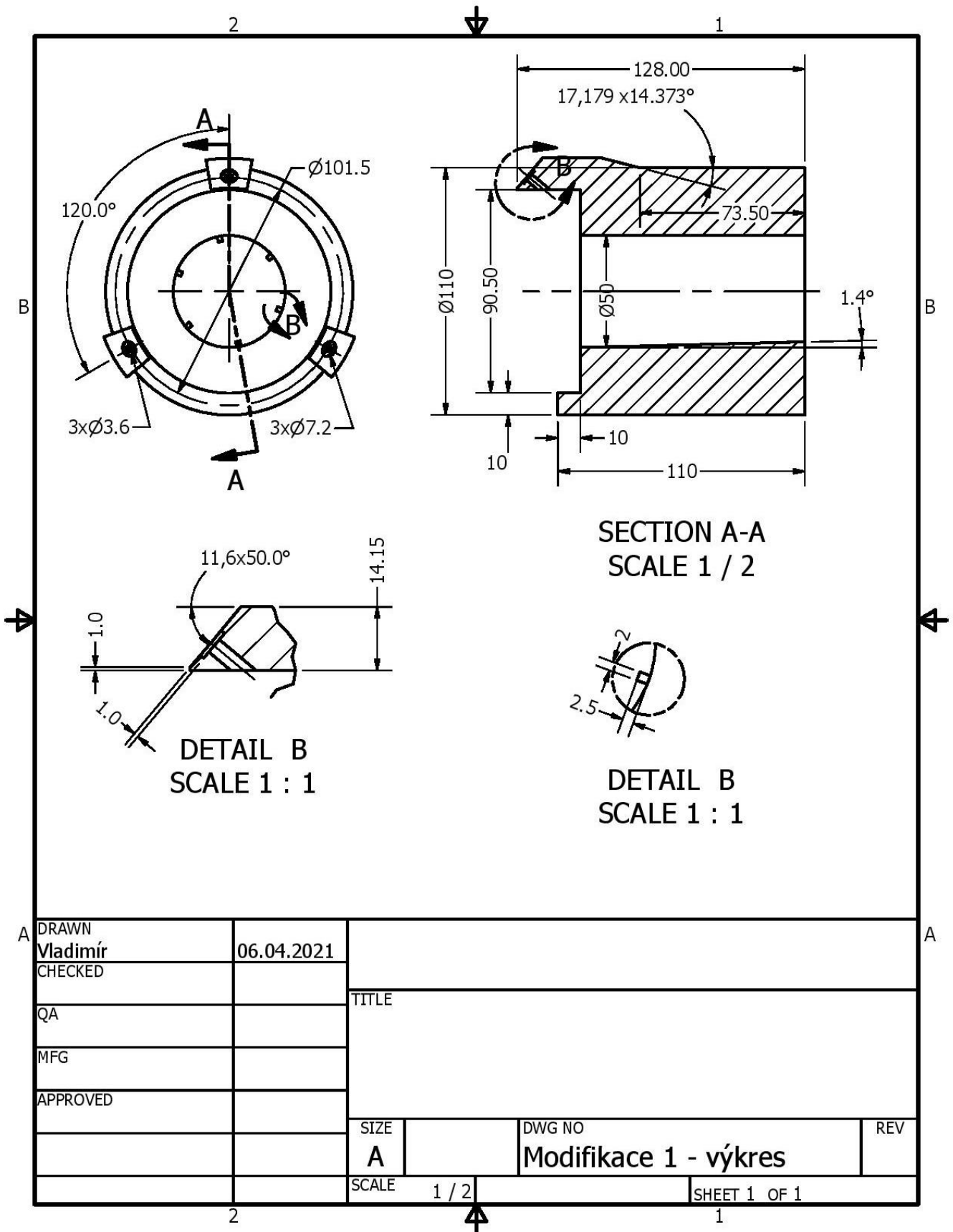
Jak již bylo zmíněno dříve, modifikace nástavce spočívá ve změně plochy vnitřního průměru. Učinili jsme tak změnou počtu drážek u každé modifikace.

Základní nástavec má vnitřní plochu hladce kruhovitou a následná modifikace je provedena na vnitřní plochy pomocí přidaných drážek. Drážky jsou ve formě obdélníků.

V případě *Modifikovaného nástavce 1* jde o šest obdélníků s rozměry 2,5 mm x 2 mm (výška x šířka). Drážky jsou sraženy pod úhlem, aby na dosedací ploše přecházeli spojitě (začátečné rozměry 0 mm x 0 mm) až na konec nástavce v již finálně zmíněný rozměr. Je také třeba zmínit, že drážky jsou po vnitřní ploše rozmístěny od sebe pod úhlem 60° .



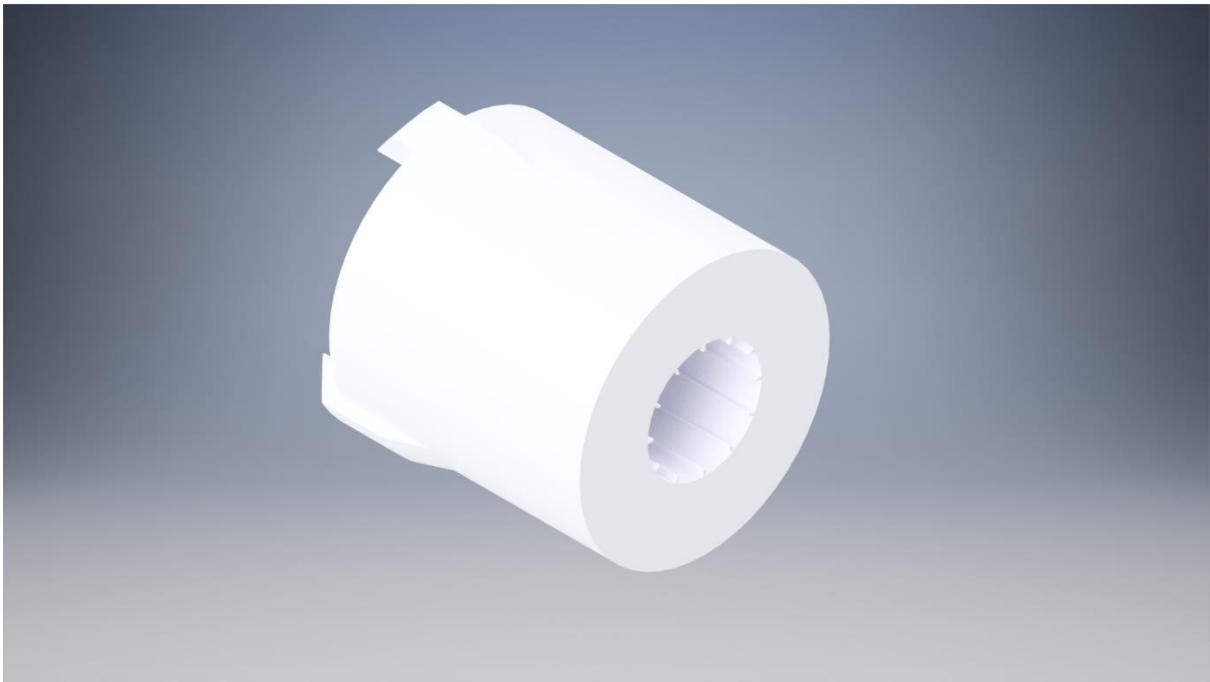
Obrázek 9 Předpokládaný vzhled modifikovaného nástavce 1



Obrázek 10 Konstrukční výkres modifikovaného nástavce 1

Modifikace 2

Poslední varianta nástavce se liší od *Modifikace 1* počtem drážek a jejich rozměry. Kdežto *Modifikace 1* měla drážky obdélníkové s rozměry 2,5 mm x 2 mm, *Modifikace 2* má menší rozměry 2,5 mm x 1 mm. Počet drážek vzrostl z šesti na dvojnásobek tj.12 drážek.



Obrázek 11 Předpokládaný vzhled modifikovaného nástavce 2

Výroba modelu

Po dokončeném návrhu nástavců bylo nutné výroby modelů pomocí 3D tisku. Modely byly tištěné na 3D tiskárnách, konkrétně na modelech Pro2 Plus od firmy RAISE 3D a Prusa i3 MK3S.

Pro možnou výrobu modelů bylo zapotřebí převést formát (.ipt), s kterým pracuje Autodesk Inventor na formát (STL) komunikující s 3D tiskárnou. Z tohoto důvodu byl použit program Fusion 360, který je od stejné firmy Autodesk, který dokáže pozměnit formát. Soubor STL ukládá informace o 3D modelu. Formát přemění strukturu modelu do trojúhelníkové mřížky. Čím složitější a podrobnější je struktura, tím více trojúhelníků je použito k reprezentaci modelu. Jakmile je model vytvořen, musí jej přeložit do „jazyka“ tiskárny, kterému 3D tiskárna rozumí. Informace o souboru STL popisují pouze geometrii modelu, neexistují žádné

specifikace týkající se textury, barvy nebo materiálu modelu. Tiskárna tím pádem všechny informace, které potřebuje k tisku. (14)

Tisk základního modelu

Základní model byl tisknut na tiskárně Prusa i3 MK3S. Doba tisku daného modelu trvala přibližně 16 h, avšak nastaly komplikace.

První komplikace spočívala ve přetržení filamentu, jež představuje materiál pro tisk. Kvůli tomuto byl model slepen pomocí epoxidového lepidla ze dvou částí.

Následně formát STL nebyl v dostatečné kvalitě. Síť trojúhelníků byla příliš hrubá, z tohoto důvodu kruhový profil (teoretický model) připomínal spíše mnohoúhelník. Mnohoúhelníkový tvar poté nešlo nasadit nástavec na kruhovitou trysku, proto se musel povrch po obvodu dosedací plochy zbrousit brusným papírem.

Kontrola geometrie

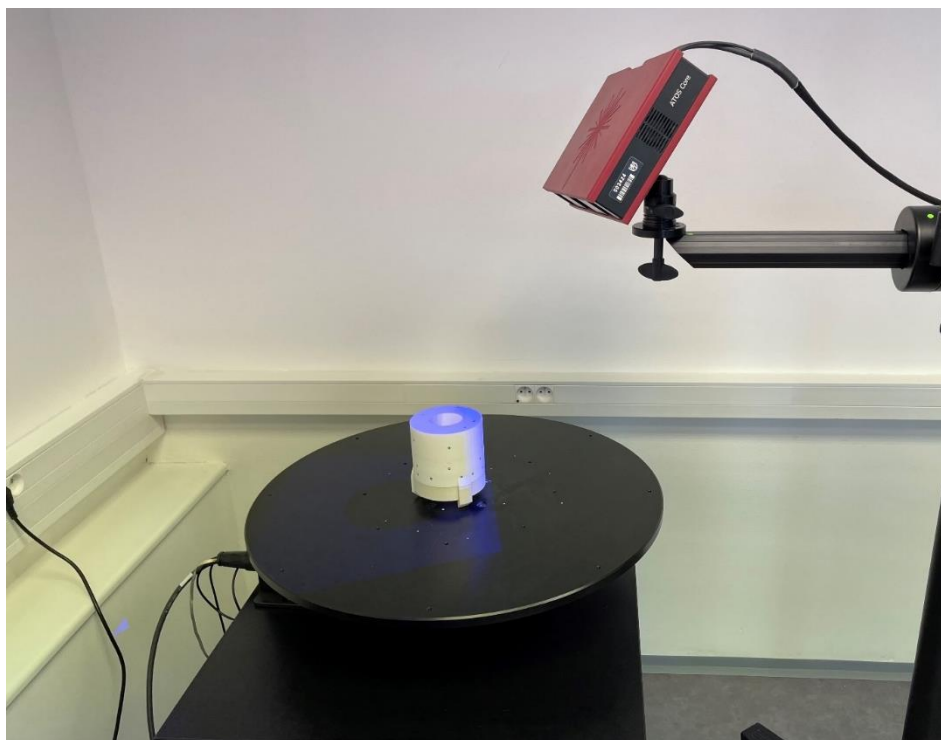
Teoretický model není vždy totožný s modelem reálným, proto je vhodné model zkontrolovat z pohledu metrologie.

Kontrola byla uskutečněna pro všechny varianty nástavců. Po vytisknutí se model označil body, ve formě lepících terčů, pro orientaci softwaru. Skener zachytí polohu modelu s terčíky a pamatuje si, kde se výchozí body vyskytují, a v jaké poloze se model nachází.

V případě, že je materiál lesklý, je potřeba leskle vyhotovený produkt zmatnit (materiál modelu lze částečně prosvítit – nepřesná data/ lesklý povrch všeobecně není ideální). Matného povrchu dosáhneme především pomocí křídý ve formě spreje.

Pro kontrolu rozměrů byl použit optický 3D scanner ATOS Core 300 a software GOM Inspect.

Průběh měření geometrie již vyhotovených modelů a podoby optického 3D scanneru lze vidět na *Obrázek 12* Kontrola rozměrů pomocí skeneru



Obrázek 12 Kontrola rozměrů pomocí skeneru

Kontrola základního nastave

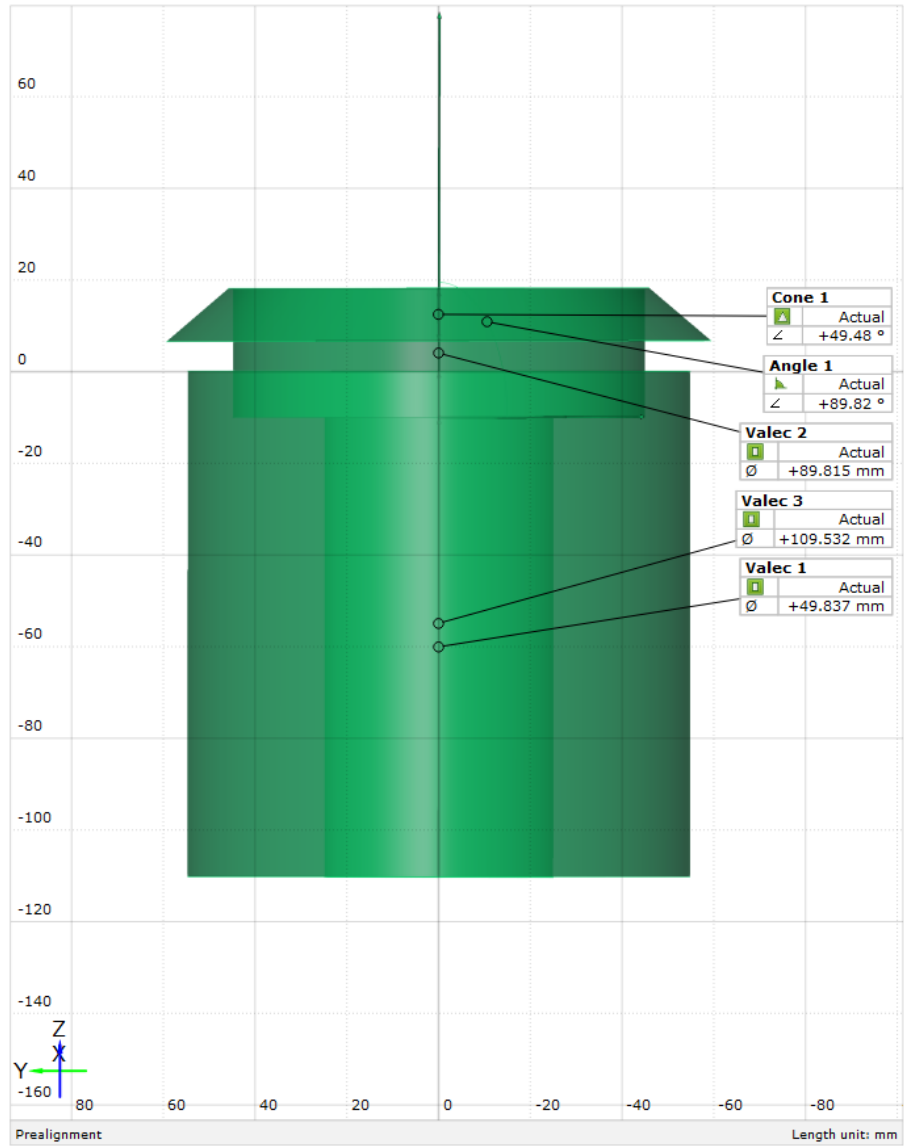
V případě základního nastave bylo potřeba zjistit, zda je součást kvalitně slepena. Špatně spojené kusy nastave by měly negativní vliv na měření a nastavec by se musel tisknout znovu (nekvalitní spoj by měl za následek tvorbu turbulentních struktur již na začátku – není předmětem zkoumání).

Na obrázcích *Obrázek 13 až Obrázek 15* lze vidět, jak se teoretický model liší od skutečného produktu, konkrétně kvalita spoje a také přesnost 3D tiskárny.

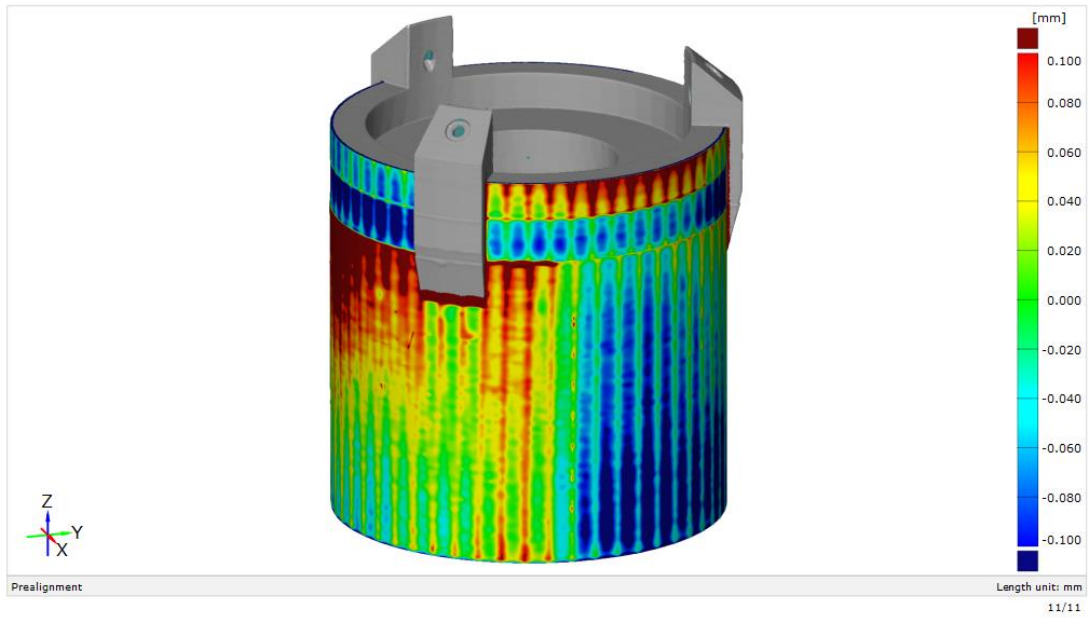
Jak již bylo zmiňováno dříve, nastavec skutečně vypadá jako mnohoúhelník, nicméně epoxidový spoj byl nalepen nad očekávání dobře.

Na *Obrázek 15* lze vidět špatně zvolenou jemnost formátu STL (tvar mnohoúhelníku).

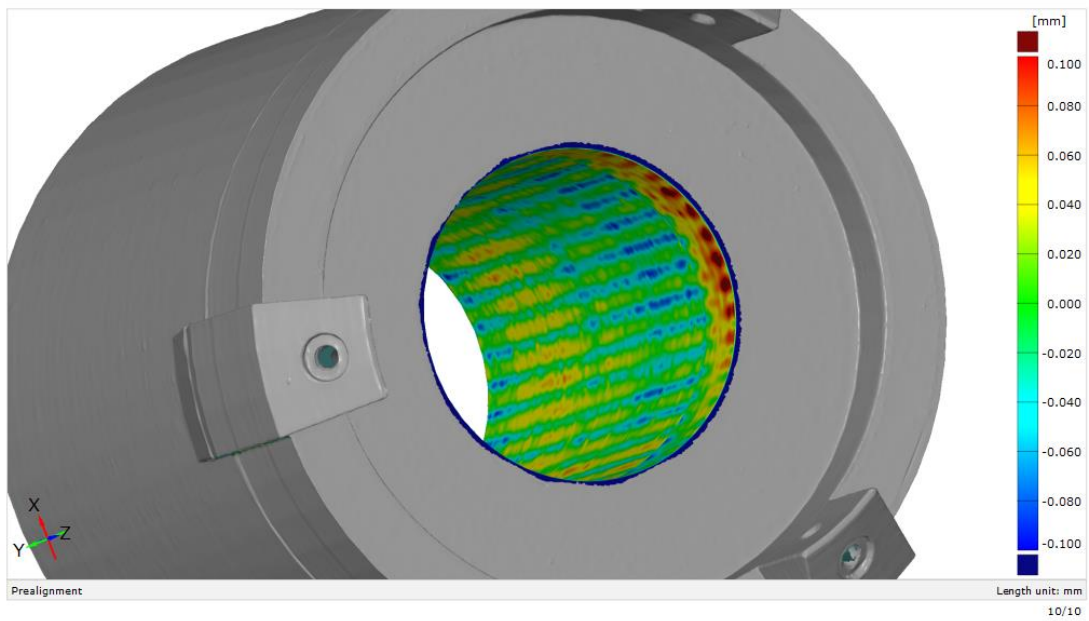
Barevná škála ukazuje odchylky materiálu, od ideálního tvaru. Červená barva naznačuje přebytek a modrá úbytek materiálu.



Obrázek 13 Kontrola rozměrů základního nástavce



Obrázek 14 Rozdíl vnějšího průměru mezi výrobkem a teoretickým modelem základního nástavce



Obrázek 15 Rozdíl vnitřního průměru mezi výrobkem a teoretickým modelem základního nástavce

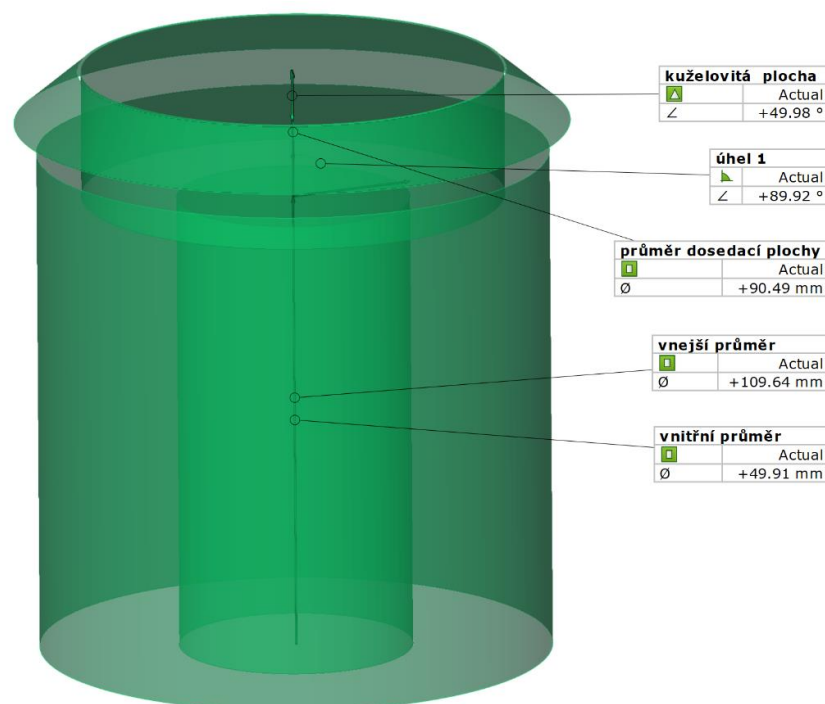
Kontrola modifikovaného nástavce 1

U modifikace č.1 byl dodatečně upraven formát STL, což vedlo ke zmenšení sítě.

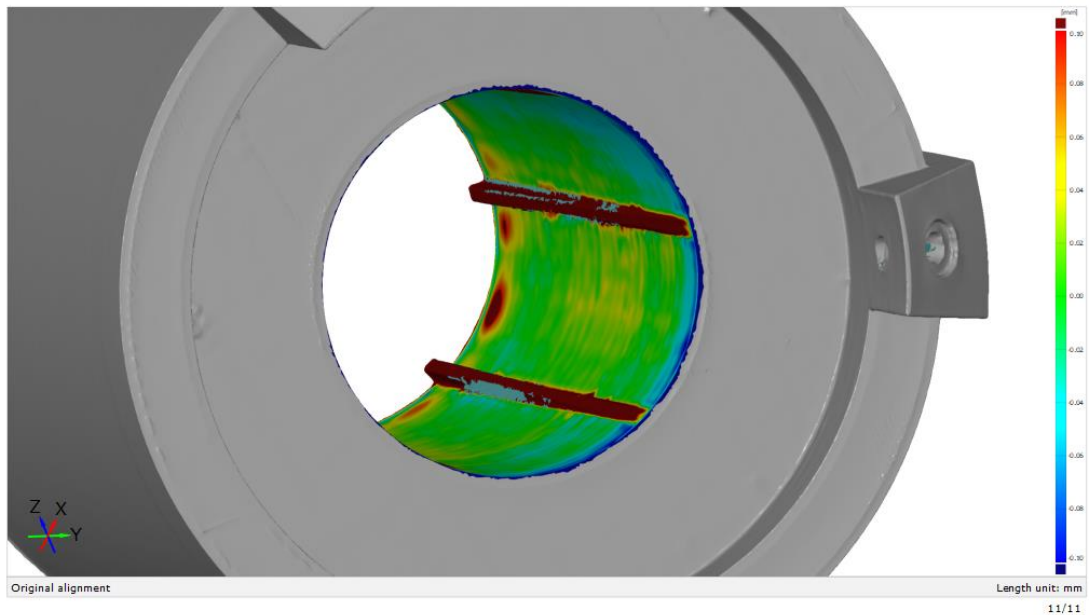
Byla opět provedena kontrola tvaru výtisku jako u základního nástavce. Byly zkontrolovány rozměry jednotlivých průměrů, kolmost dosedací plochy a kuželovitý tvar ploch držáků. Kromě geometrické tolerance *Obrázek 16*, lze také pozorovat materiálovou odchylku od ideálního tvaru vnitřního průměru *Obrázek 17*.

Z hlediska experimentu jsou nejdůležitější rozměry vnitřního průměru spolu s tvarem překážek, které tekutina bude obtékat. Pomocí softwaru GOM byl změřen vnější průměr 109,64 mm, vnitřní průměr 49,91 mm, průměr dosedací plochy 90,49. Kolmost dosedací plochy s jejím průměrem 89,92°. Od návrhu se rozměry liší v rozmezí 0,00-0,09 mm (úhel o 0,08°).

Lze říct, že model je dostatečně přesný pro naše podmínky experimentu. Opět je možné vidět barevnou škálu naznačující přebytek/úbytek materiálu, ale je potřeba zmínit, že drážky na vnitřním průměru jsou zahrnuty do odchylky vnitřního průměru (červená barva).



Obrázek 16 Kontrola rozměrů modifikovaného nástavce 1



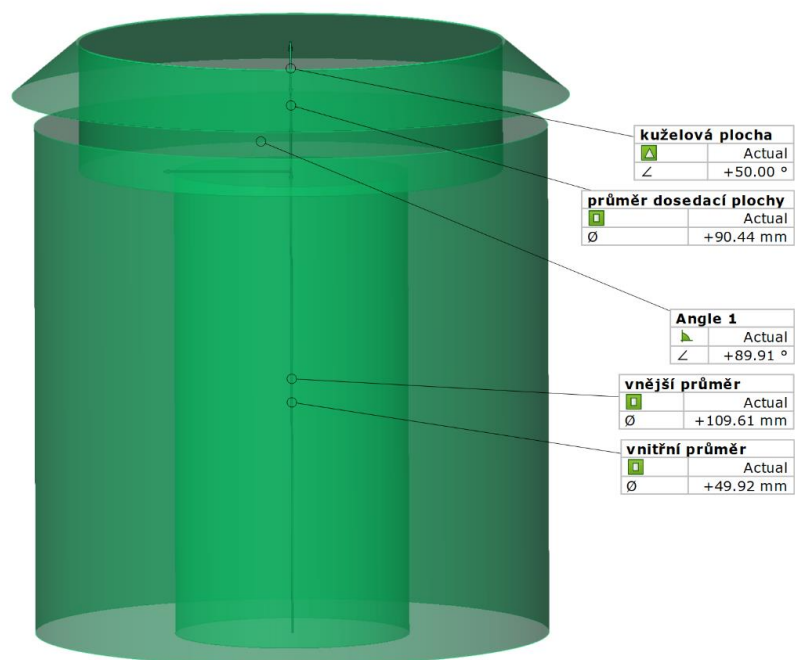
Obrázek 17 Rozdíl vnitřního průměru mezi výrobkem a teoretickým modelem modifikovaného nástavce 1

Kontrola modifikovaného nástavce 2

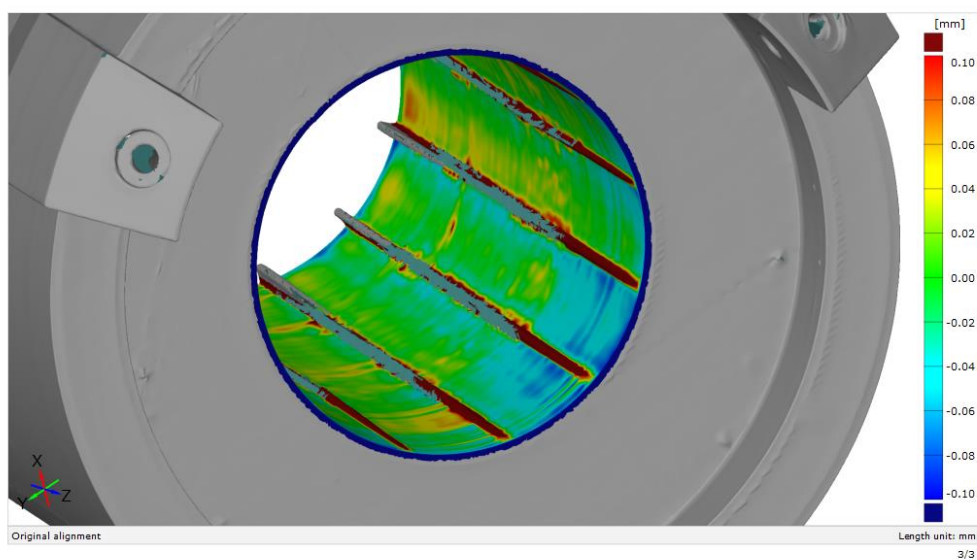
U tohoto nástavce byla opět provedena stejná analýza jako u *Základního modelu* a *Modifikovaného modelu 1*. Na *Obrázek 18* jsou vidět geometrické odchylky výtisku od teoretického modelu.

Kuželová plocha držáků byla vytisknuta bez odchylky. Kdežto na průměru se pohybovaly hodnoty v rozmezí od 0.11 mm (vnější průměr) do 0.6 mm.

Drážky na vnitřním průměru nástavce byly obtížně skenovány, proto jejich tvar nebyl zachycen úplně, lze vidět na *Obrázek 19* (tmavě-šedé fleky).



Obrázek 18 Kontrola rozměrů modifikovaného nástavce 2



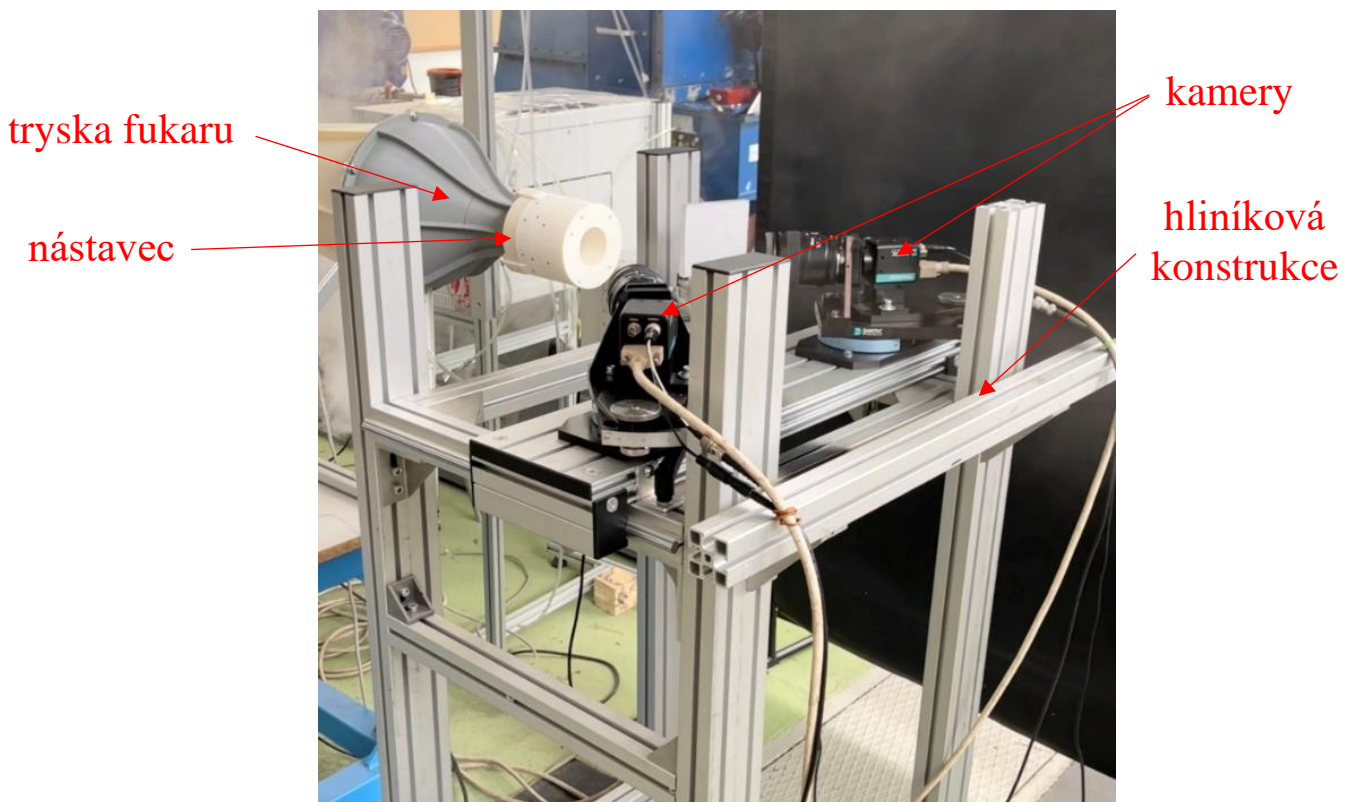
Obrázek 19 Rozdíl vnitřního průměru mezi výrobkem a teoretickým modelem modifikovaného nástavce 2

Příprava upevnění měřicího zařízení ke konstrukci aerodynamické tratě vzduchového paprsku

Pro možný začátek experimentu bylo potřebné vhodně rozmístit a složit hliníkové konstrukce *Obrázek 20* Uspořádání aparatury. Na stabilní konstrukci od firmy ALUTEC KK bylo možné upevňování ostatních komponentů pro experiment, jako jsou kamery, nástavce aj.

Po umístění a zaaretování hliníkové konstrukce do vodorovné polohy pomocí aretačních podložek zabudovaných v konstrukci, bylo možné upevnit vybavení pomocí matek a šroubů s válcovou hlavou pro inbus.

Na sestavu byly přichyceny držáky kamer a na ně samotné kamery. Kamery se nacházeli na prostředním rámu, jež byl posuvný. Ve směru hledí kamer se nacházel fukar s uklidňovací komorou, na které byl nasazen a upevněn vyrobený nástavec pomocí 3D tisku. Přesah podstavcových profilů byl nakonec vhodný pro umístění látky, která částečně zabraňovala vstupu slunečního světla do zkoumané oblasti (ve vzdálenosti 1x vnitřní průměru nástavce od jeho konce).



Obrázek 20 Uspořádání aparatury

Zajištění sycení stopovacími částicemi

Pro detekci částic tekutiny pomocí kamer bylo nutné obohatit tekutinu proudící ventilátorem o stopovací částice (aerosol), který pomáhá k zajištění dostatečného toku dat. Výběr vhodného sycení je pro měření důležité. V případě, jsou-li částice nadměrně veliké, může nastat problém v prosvícení částic laserem. V souvislosti s hmotností částice hůře reagují na změnu směru proudění.

Pro generování stopovacích částic byl použit atomizér SAFEX Fog Generator 2010 (220 VAC) od společnosti SAFEX. Při experimentu byla použita kapalina SAFEX Extra Clean, která je založena na bázi propylenglykolu a rostlinného glycerolu. Z hlediska nezávadnosti je produkt používán dokonce i v lékařství. Z tohoto důvodu nebylo možné získat detailnější složení.

Kalibrace

Před začátkem jakéhokoliv měření je zapotřebí provést kalibraci zařízení. V případě metody PIV, která využívá snímání proudového pole kamerami, je potřeba provést kalibraci kamer.

Princip měření je založen na snímání objektové roviny (tedy oblasti osvětlené laserovým řezem) dvojicí kamer, které snímají posunutí částic v této rovině pod různým úhlem. „Díky paralaxe dochází ke vzniku dvou odlišných vektorových polí z obou kamer. Tyto odlišnosti jsou dány složkou rychlosti, která je kolmá k rovině laserového řezu a při použití klasického systému s jedinou kamerou ji není možné určit. Na základě provedené kalibrace může být stanoveno skutečné rychlostní pole v rovině řezu, ale také je možné dodatečně určit třetí složku rychlosti, která je k této rovině kolmá. Nutnost kalibrace je tedy při použití dvojice kamer nezastupitelná.“

Kalibrace byla provedena posouváním dvourozměrného tištěného terčíku upevněného na hliníkovou konstrukci, kde se nacházela zkoumaná oblast. Tato oblast se nacházela ve vzdálenosti jednoho vnitřního průměru za koncem nástavce. Terčík obsahoval body, na které bylo potřeba zaostřit objektivy kamer. Nejprve byla zaostřena základní rovina a zachycen snímek. Poté se pomocí aretačního šroubu posouval terčík v axiálním směru (od nástavce a zpět). Kalibrace proběhla celkem v pěti rovinách (dvě roviny směrem od kamer, dvě roviny směrem ke kamerám a ve výchozí poloze). Ve všech zvolených rovinách proběhl výpočet měřítka pomocí mapové funkce, která spojuje rovinu obrazu s rovinou objektu. (15)

Měření

Pomocí metody PIV popsané v kapitole *Metoda PIV* bylo změřeno prostorové rozložení okamžitých rychlostí. Pro každý jednotlivý nástavec byla zaznamenána data pro čtyři různé referenčních rychlosti (viz. Kapitola *Ventilátor*).

Zaznamenaná data byla uložena ve formátu CSV, formát pro Excel. U každého rychlostního stupně bylo zachyceno alespoň 650 snímků pro jednu kameru.

V počátcích experimentu výsledky nebyly dostačující. Ve zkoumané rovině se objevoval šum. Chybná data se objevovala kvůli nedostačujícímu množství stopovacích částic. Po dostatečném zamoření místnosti byla chyba částečně odstraněna.

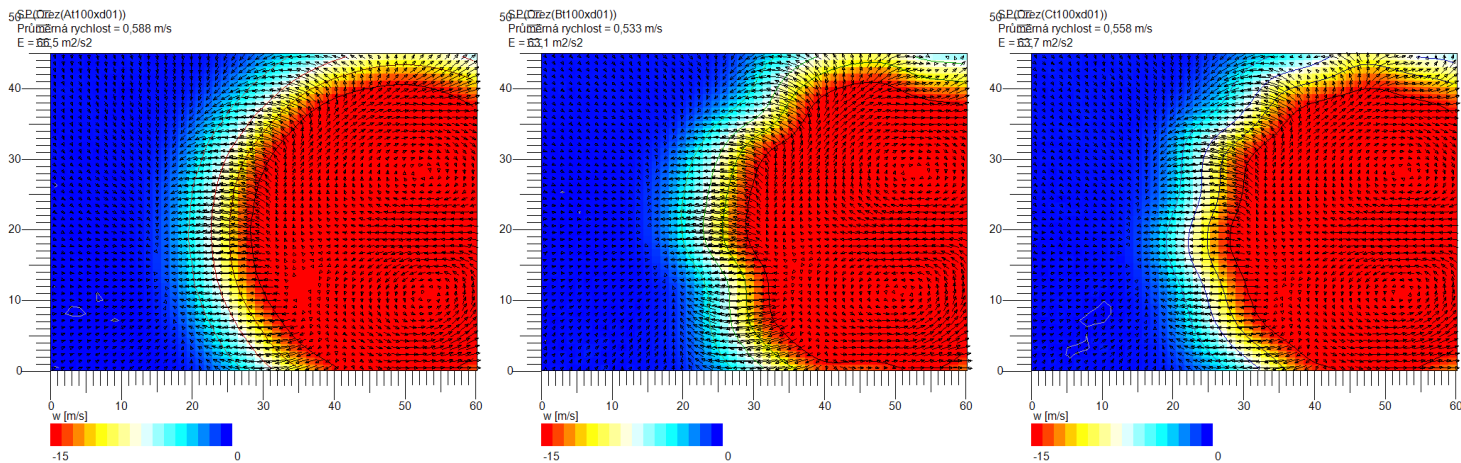
Pro měřené veličiny bylo použito středních hodnot, kde alespoň z 650 snímků byl utvořen snímek jeden. Časové intervaly mezi zaznamenáváním snímků byly 25 μ s, pro nastavení řídicí skříně 100, 12 μ s pro 200, 6 μ s pro 400 a 3 μ s pro 800.

Pozorované veličiny

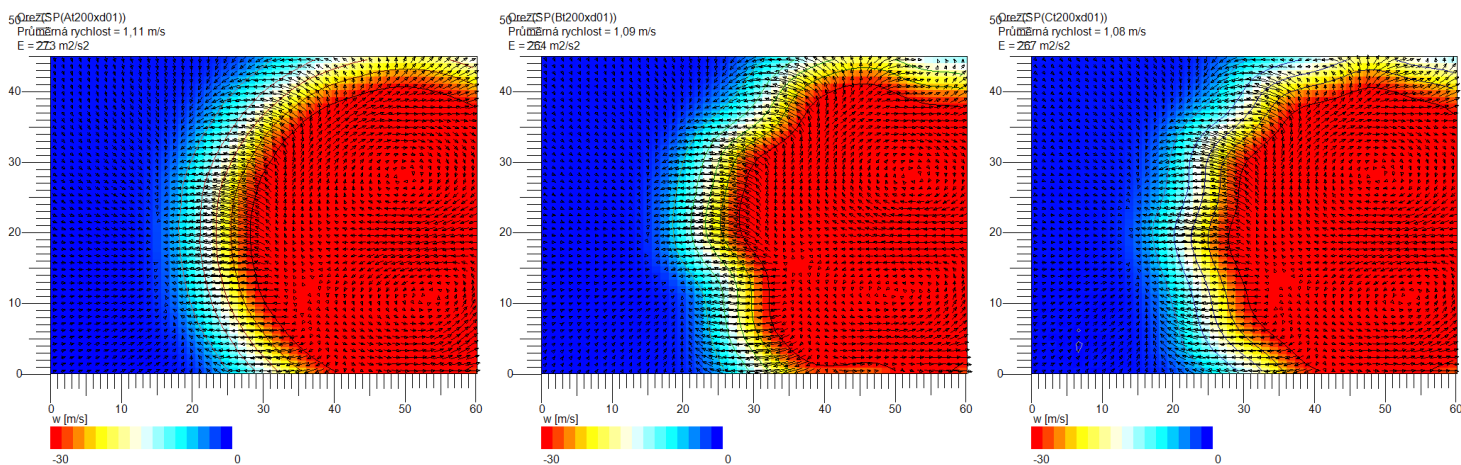
Střední rychlost

Střední rychlost je definována jako časový průměr rychlosti tekutiny v pevném bodě za přírůstek času Δt . Byla použita střední rychlost, protože okamžitá rychlost se mění v každém bodě a v čase. V případě okamžité rychlosti nelze jednoznačně určit potřebné vlastnosti daného proudění, a tudíž je nevhodná pro vyhodnocení experimentu (ukázka pole okamžité rychlosti na *Graf 8* (16)).

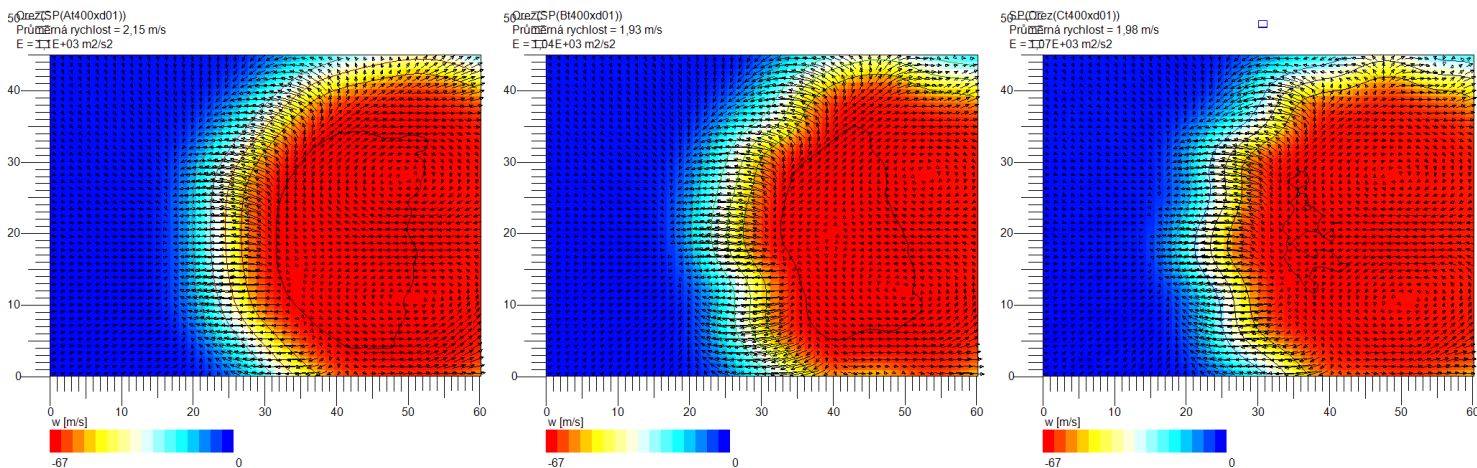
Na grafech *Graf 4* až *Graf 7* lze pozorovat střední rychlosti. Řádek značí rychlost (v hodnotách na řídicí skříně 100, 200, 400, 800) a sloupec druh nástavce (základní, modifikace 1, modifikace 2).



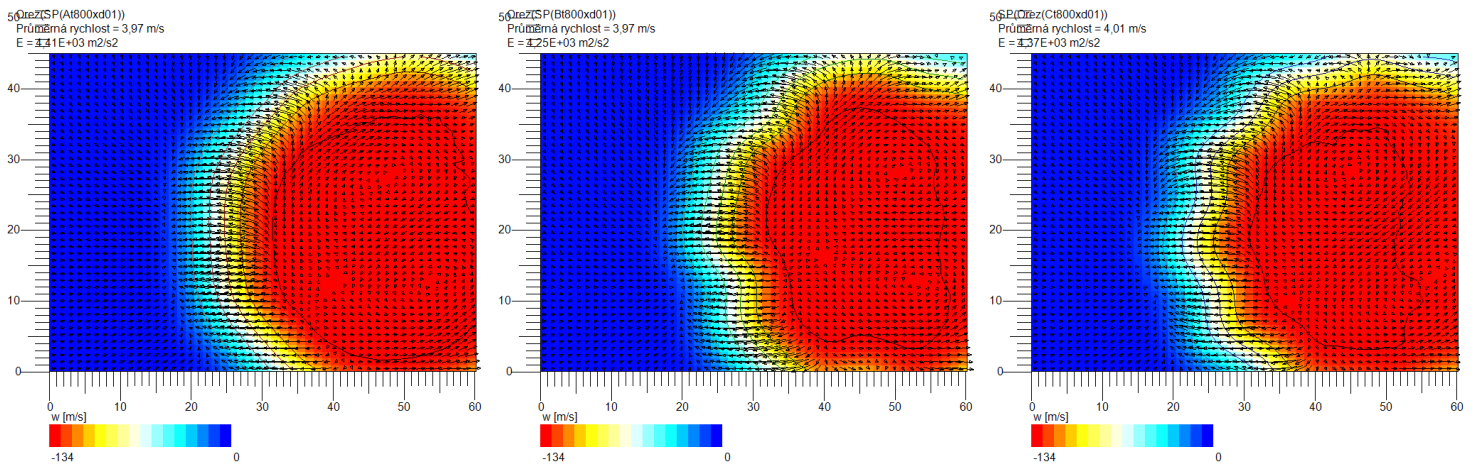
Graf 4 Porovnání střední rychlosti pro měřenou 1 a všechny nástavce



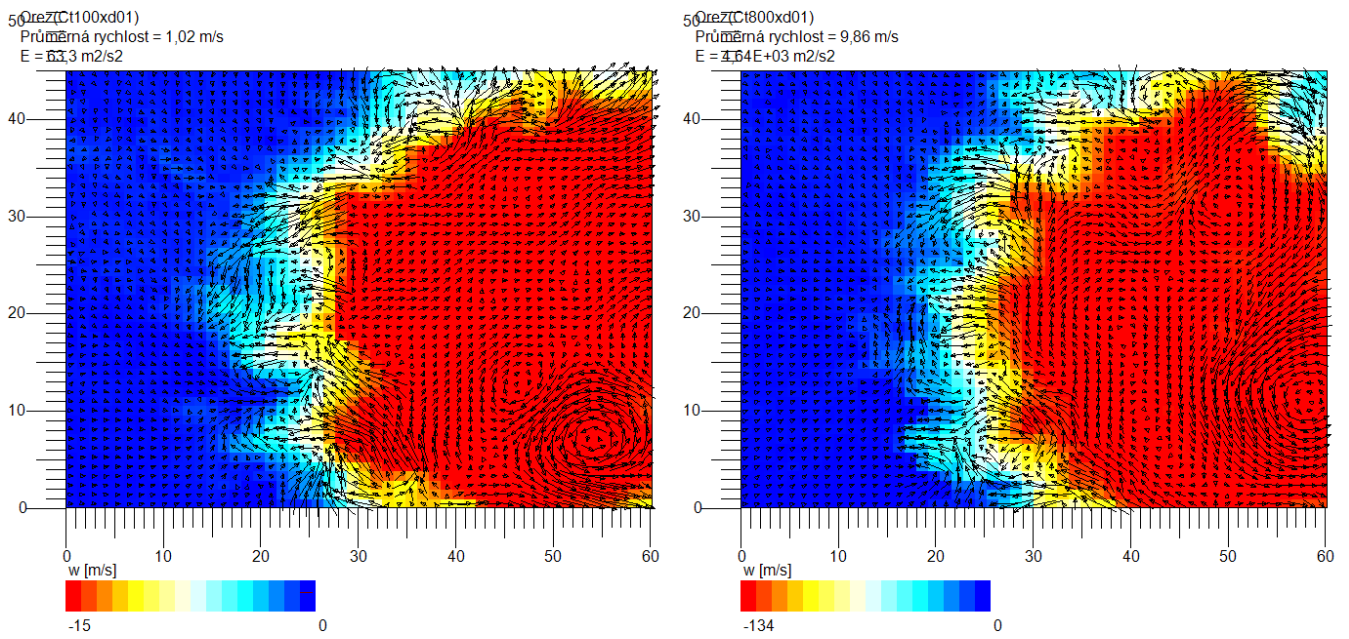
Graf 5 Porovnání střední rychlosti pro měřenou 2 a všechny nástavce



Graf 6 Porovnání střední rychlosti pro měřenou 3 a všechny nástavce



Graf 7 Porovnání střední rychlosti pro měřenou 4 a všechny nástavce



Graf 8 Ukázka okamžitého pole rychlosti

Vířivost

Vířivost je definována jako rotace vektoru rychlosti proudového pole a zároveň platí zachování hybnosti (nedochází ke změně úhlové rychlosti). Zachování momentu hybnosti se v ideální tekutině nemění (může odplynout, zkoncentrovat nebo zředit), ale v reálné tekutině může kvůli viskozitě disipovat, ale také vznikat.

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} \quad \text{Rovnice 2}$$

\vec{u} označuje rychlost jakožto vektorovou veličinu (na obrázku zleva doprava). Přičemž jsme měřili pouze v jedné rovině, tudíž známe gradienty rychlosti pouze v této jedné rovině a tomu odpovídající složku vířivosti ω_z , kterou budeme dále označovat jednoduše ω . Ta je z okamžitého prostorového rozložení rychlosti vypočtena následujícím způsobem:

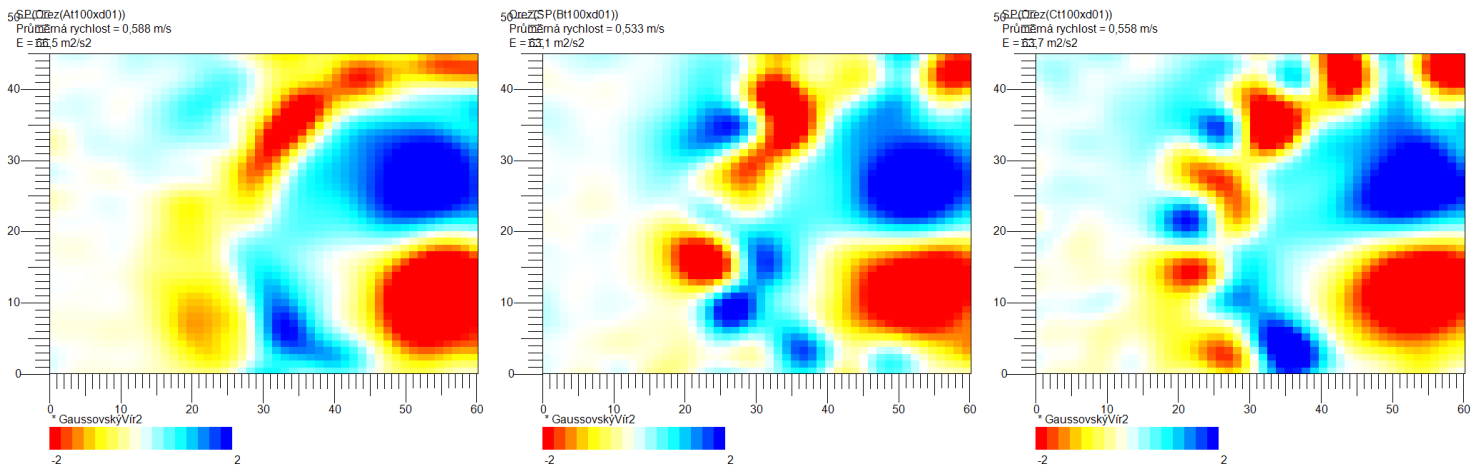
$$\omega(x, y) = \frac{u(x, y - \Delta y) - u(x, y + \Delta y)}{2\Delta y} - \frac{v(x + \Delta x, y) - v(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \quad \text{Rovnice 3}$$

Je evidentní, že už tento vztah v sobě obsahuje vyhlazování přes okolí $2\Delta x, 2\Delta y$. Důsledkem toho je i to, že enstrofie (viz. kapitola *Enstrofie*) při vyšší rychlosti vykazuje nižší hodnoty (normované na čtverec rychlosti), neboť víry jsou menší a naše rozlišení je nezachytí všechny (12).

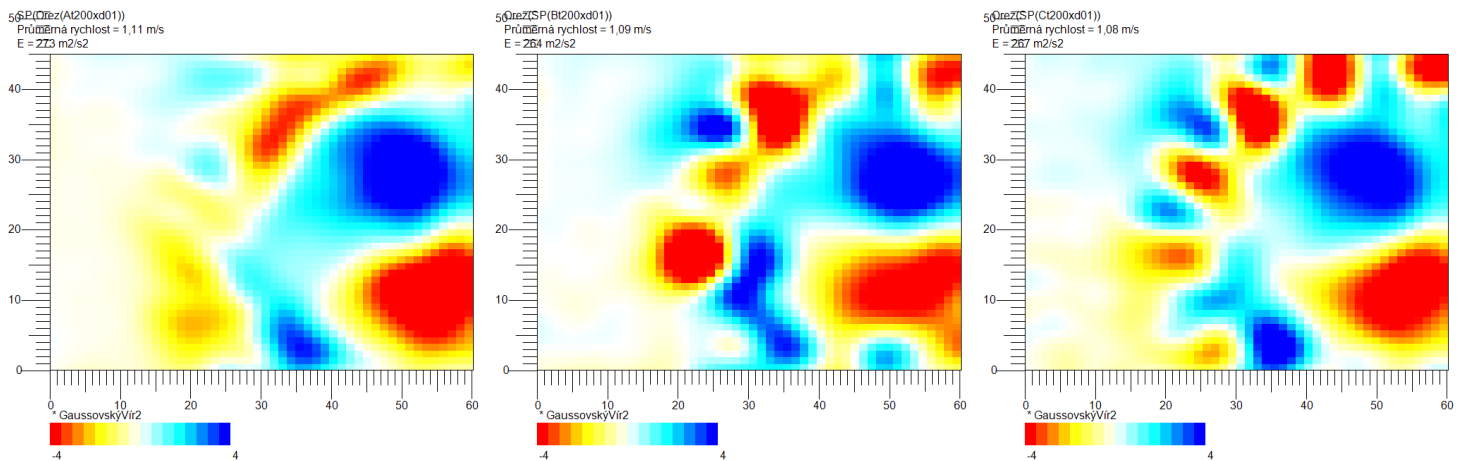
Na grafech *Graf 9* až *Graf 12* lze vidět porovnání vířivosti pro všechny změřené rychlosti a nástavce (stejně uspořádání jako u *Střední rychlosti*). „Pro porovnání vírů bylo použito vyhlazení vektorů za pomoci konvoluce s dvourozměrnou Gaussovou funkcí“. Barevná škála ukazuje na směr rotace vírů. Červená barva naznačuje směr rotace proti směru hodinových ručiček a modrá barva směr opačný. V grafech lze vidět dva víry přibližně u středu geometrie nástavce. Tento vír vznikl kvůli nedokonalosti uklidňovací komory.

U základního nástavce v oblasti podél vnitřního průměru zůstává vír jednotný. V případě nástavců s výstupky lze vidět, jak „jednotnost“ víru je narušena. „Jednotný vír“ se rozpadá v menší víry v oblastech výstupků a část menších vírů rotuje opačným směrem.

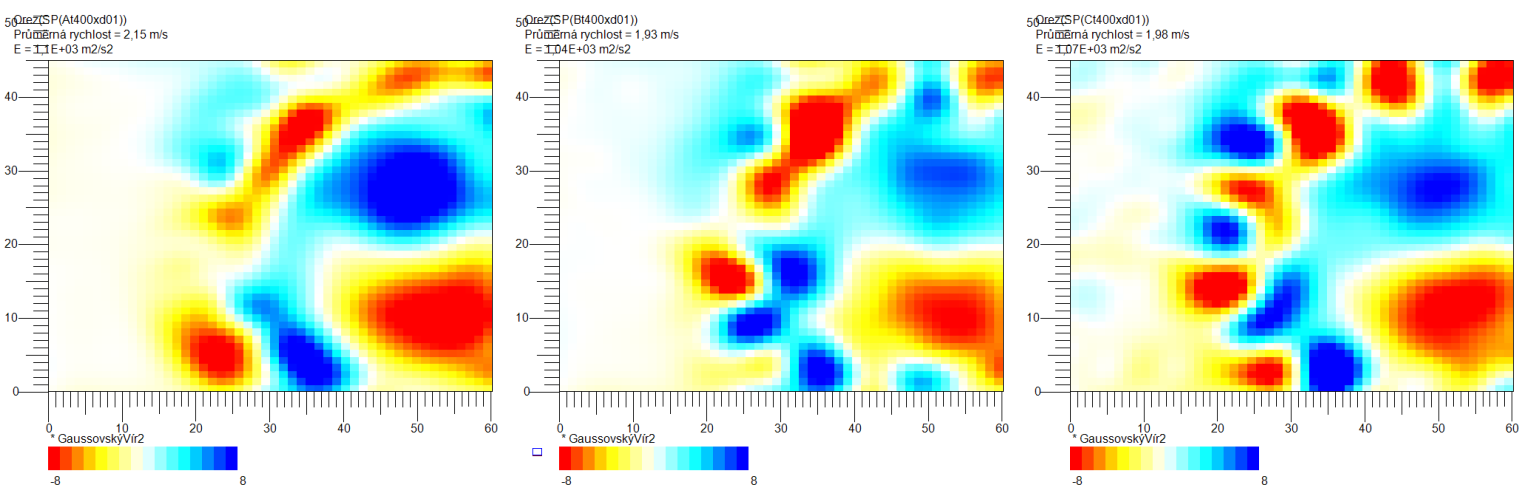
Střídavost barev naznačuje narušení mezní vrstvy. Při zvyšování rychlosti proudění je jev výrazně viditelnější.



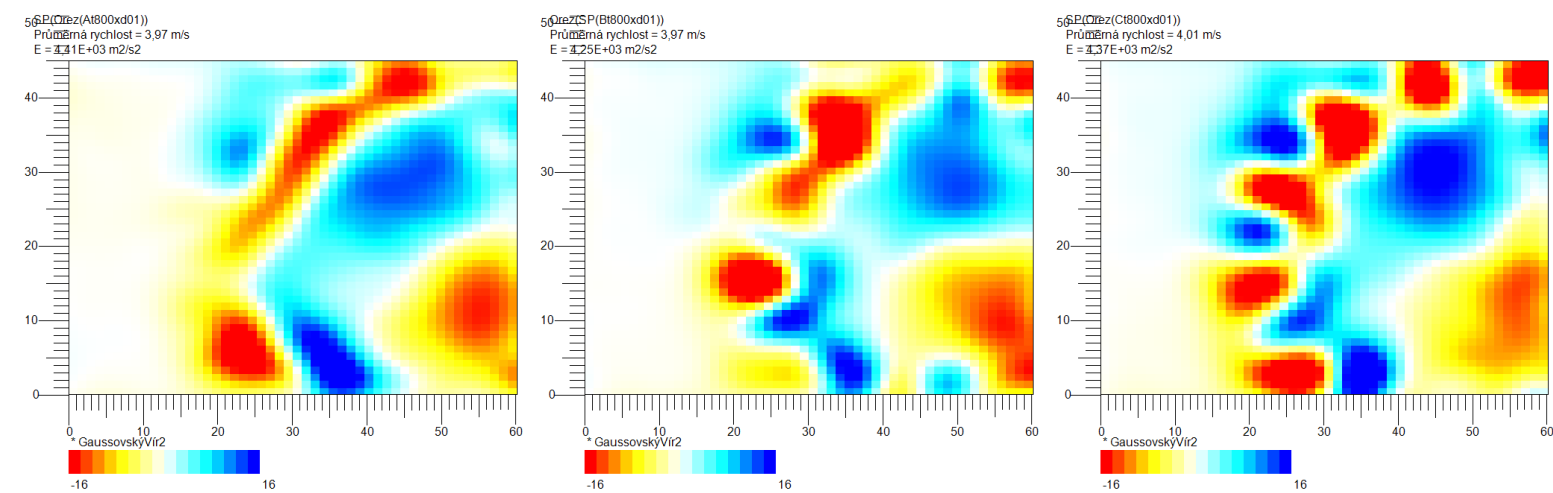
Graf 9 Porovnání střední vířivosti pro měřenou rychlost 1 a všechny nástavce



Graf 10 Porovnání vířivosti pro měřenou rychlost 2 a všechny nástavce



Graf 11 Porovnání střední vířivosti pro měřenou rychlost 3 a všechny nástavce



Graf 12 Porovnání střední vířivosti pro měřenou rychlost 4 a všechny nástavce

Turbulentní kinetická energie

Turbulentní kinetická energie (TKE) je pohybová energie fluktuací vůči střednímu lokálnímu pohybu vztažená na jednotku hmotnosti. Má spojitost s víry v turbulentním proudění, ale také s přístrojovým šumem. Jednotkou TKE jsou m^2s^{-2} . Turbulentní kinetická energie představuje polovinu střední hodnoty fluktuační rychlosti částic na druhou:

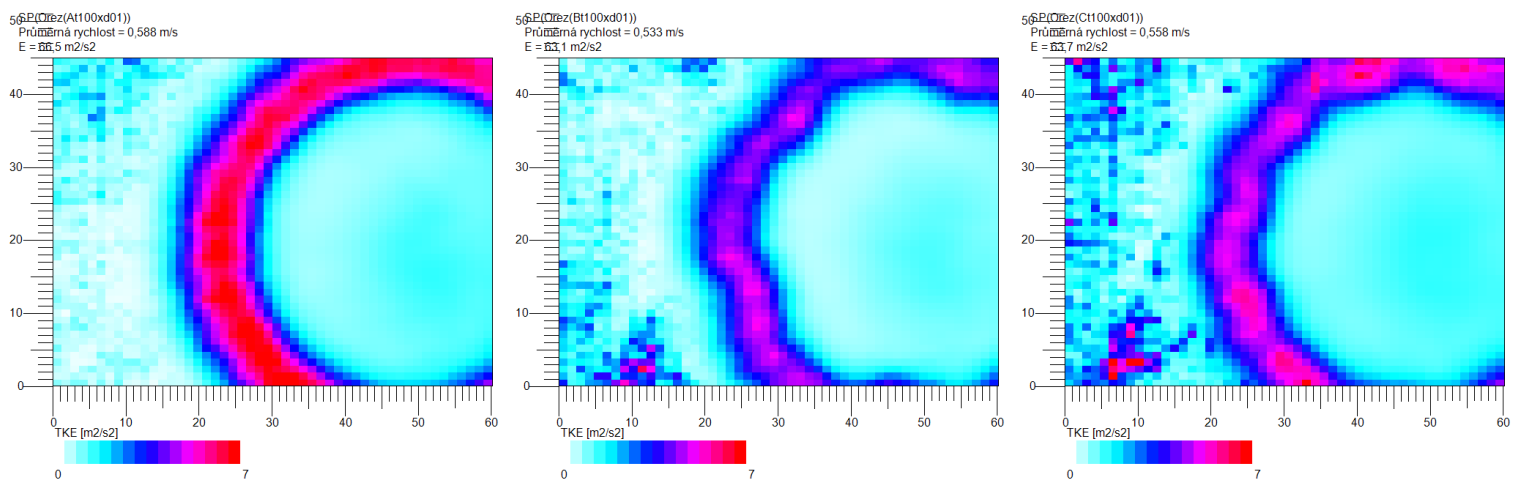
$$TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad \text{Rovnice 4 (8)}$$

kde \vec{u} označuje rychlost jakožto vektorovou veličinu, její složky po řadě označujeme $\vec{u} = (u, v, w)$, přičemž složka u je v použitých obrázcích zleva doprava, v zdola nahoru a w kolmo z roviny papíru. Fluktuační rychlost je označena čárkou $u' = u - \bar{u}$

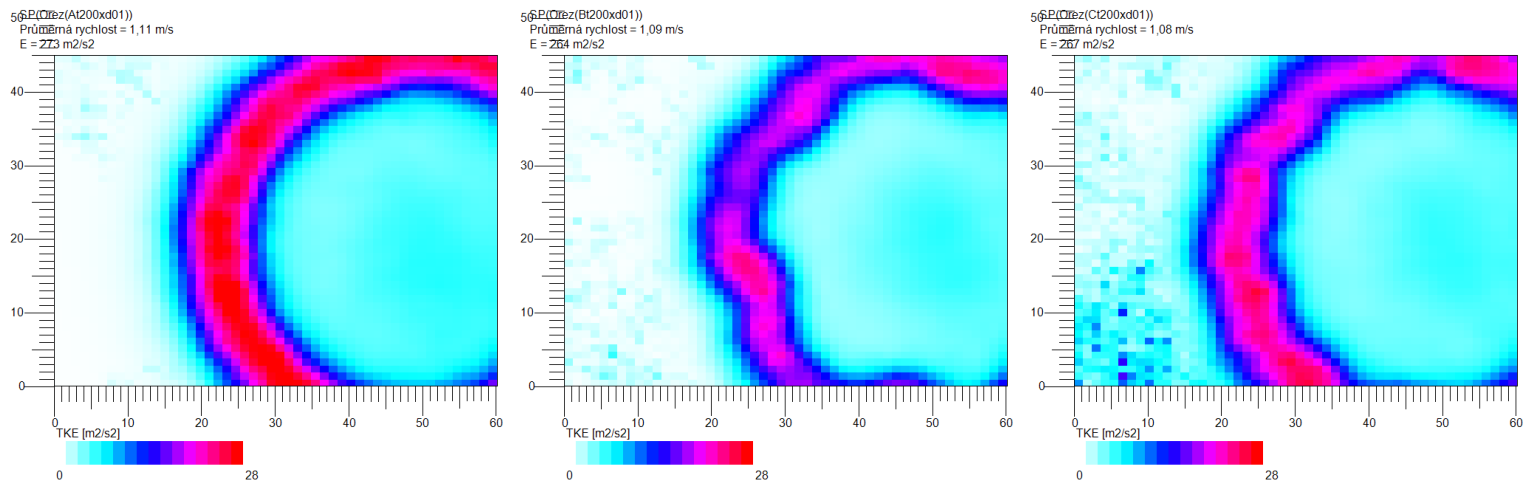
Na grafech *Graf 13* až *Graf 16* lze vidět porovnání TKE pro všechny změřené rychlosti a nástavce (stejně uspořádání jako u předešlých pozorovaných veličin). Z porovnání vidíme změnu TKE mezi změnou geometrie.

Přidáním výstupků na vnitřní průměr se snižuje TKE ve smykové vrstvě zkoumané oblasti (1x hodnota vnitřního průměru). Se zvyšující se rychlostí se efekt ztráty TKE zvyšuje.

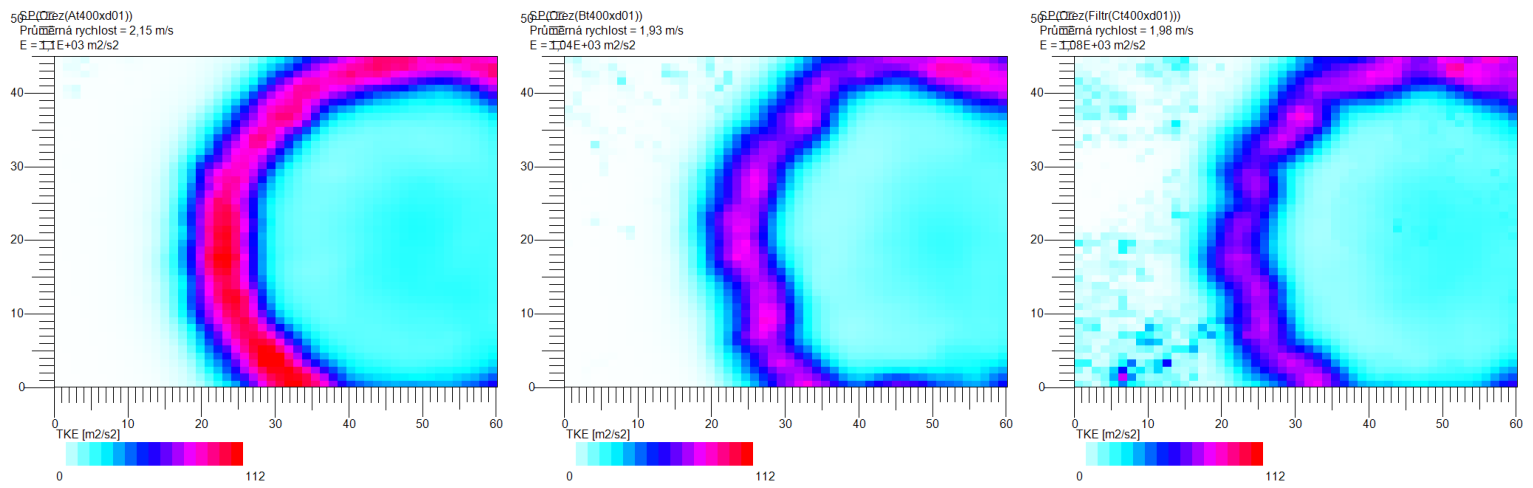
Navrhuje se možné vysvětlení, že se vytvořily sekundární víry podél výstupků, které můžou stabilizovat smykovou vrstvu proti velkým vírům vytvořených prostřednictvím Kelvinovo-Helmholtzovo nestability.



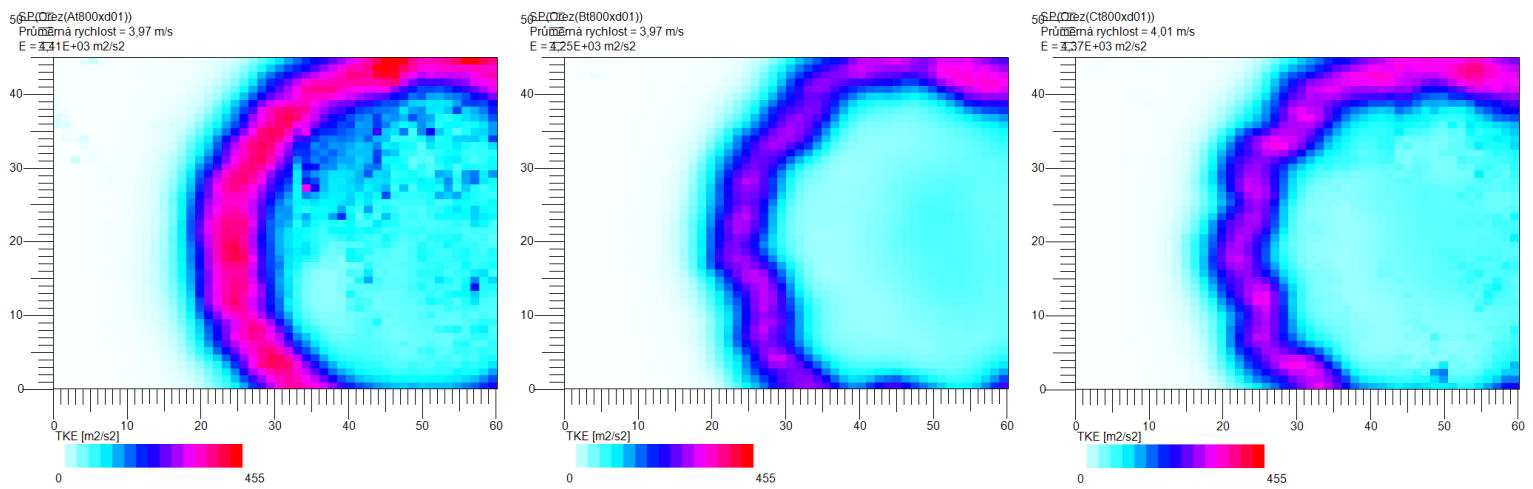
Graf 13 Porovnání TKE pro měřenou rychlost 1 a všechny nástavce



Graf 14 Porovnání TKE pro měřenou rychlost 2 a všechny nástavce



Graf 15 Porovnání TKE pro měřenou rychlost 3 a všechny nástavce



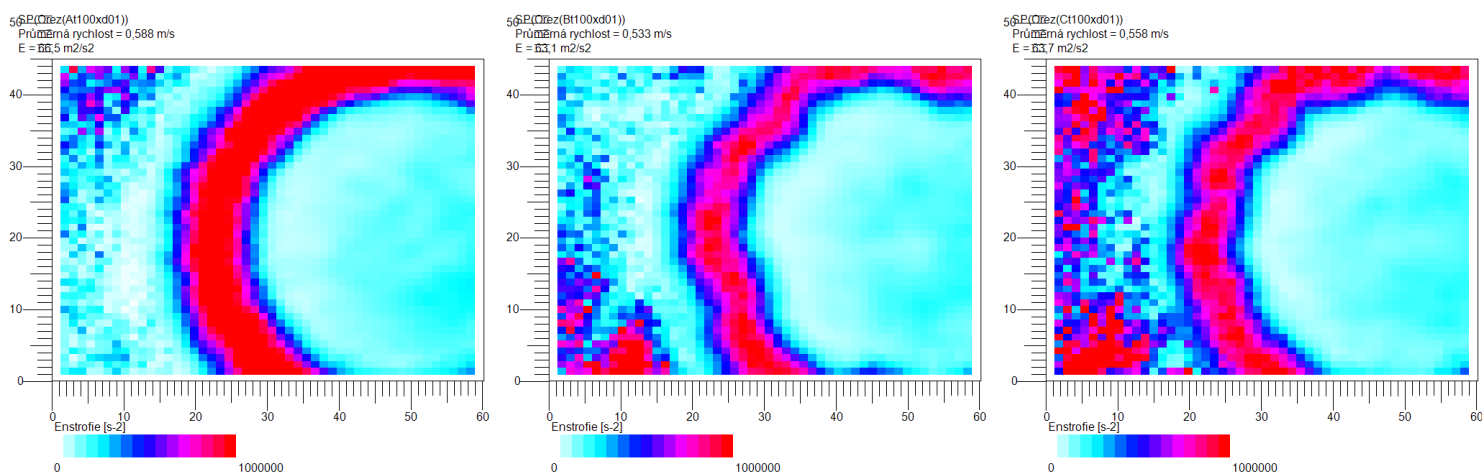
Graf 16 Porovnání TKE pro měřenou rychlost 4 a všechny nástavce

Enstrofie

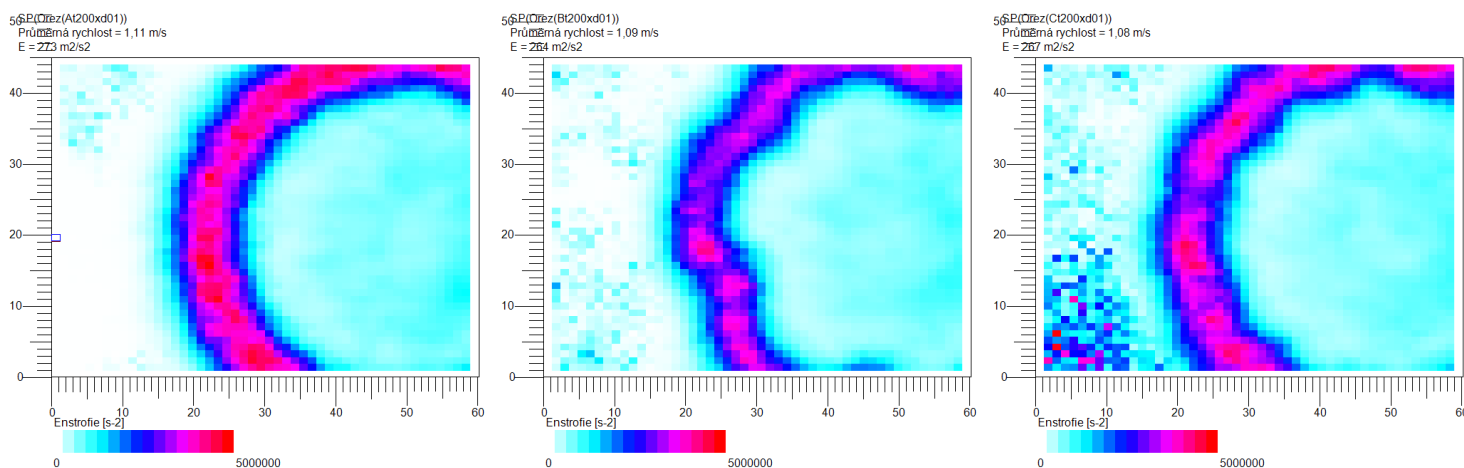
„Enstrofie je definována jako korelace střední hodnoty fluktuací vířivosti. Charakterizuje víření nestacionárního proudění“ (definice převzata z BP T. Kubíkové) (12).

Na grafech *Graf 17* až *Graf 20* lze porovnat vířivost pro všechny měřené rychlosti a nástavce. Na některých grafech je viditelný šum. Šum značí oblast s nízkým počtem stopovacích částic, a tím nekompletními daty. V oblasti mimo vnitřní průměr by měli být hodnoty enstrofie minimální.

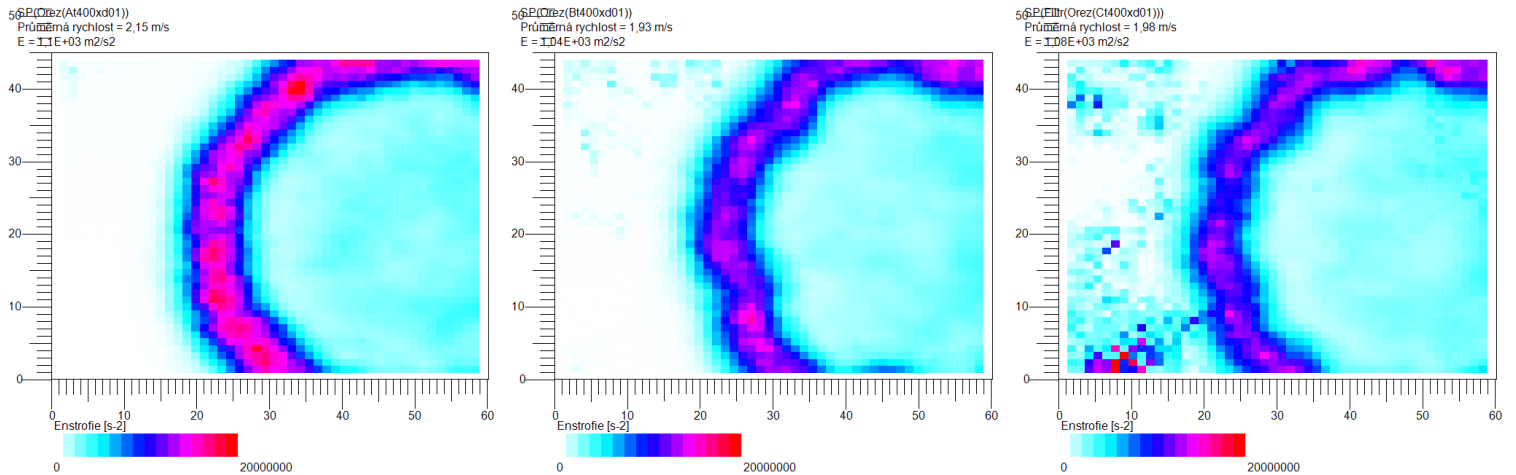
Při pohledu na grafy lze jednoznačně vidět, že maximální hodnoty enstrofie se nachází po obvodu vnitřního průměru. Při přidání výstupků a zvyšování rychlosti se oblast enstrofie zužuje.



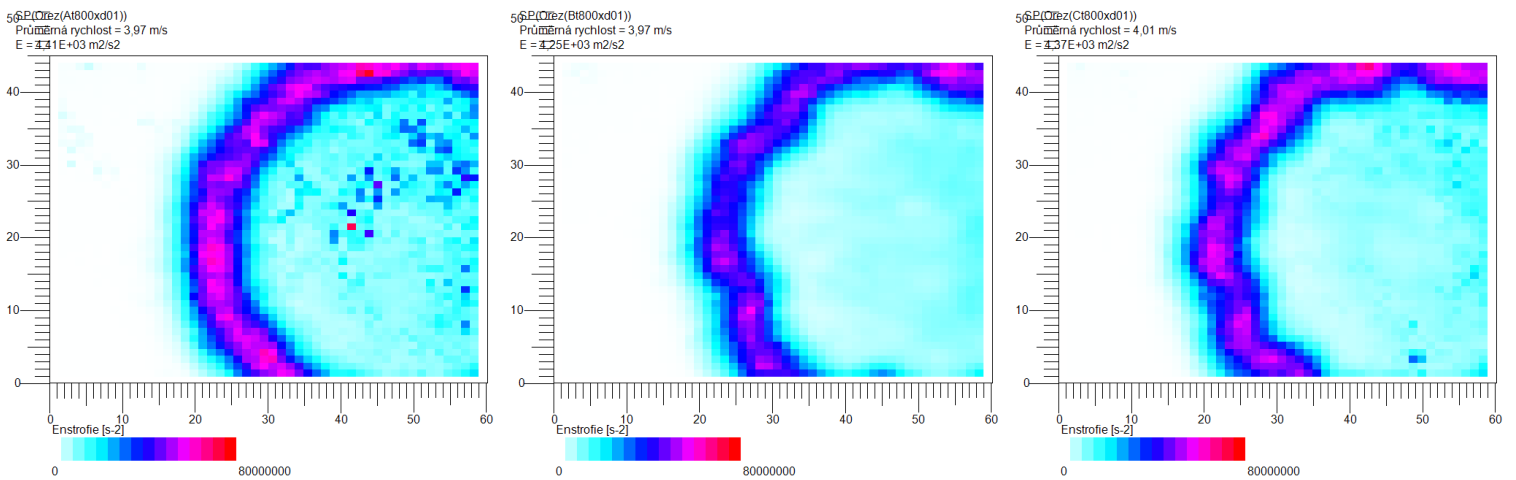
Graf 17 Porovnání enstrofie pro měřenou rychlost 1 a všechny nástavce



Graf 18 Porovnání enstrofie pro měřenou rychlost 2 a všechny nástavce



Graf 19 Porovnání enstropie pro měřenou rychlost 3 a všechny nástavce



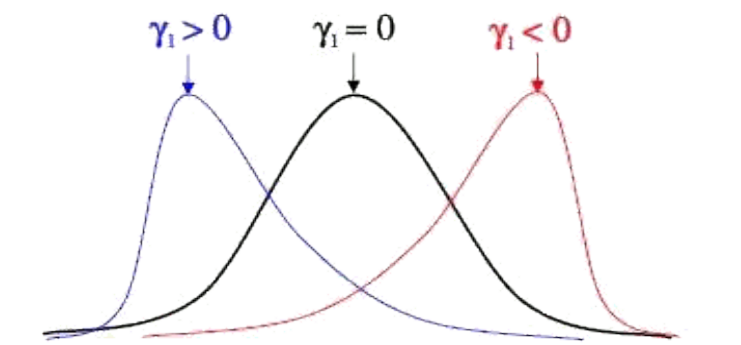
Graf 20 Porovnání enstropie pro měřenou rychlost 4 a všechny nástavce

Koeficient asymetrie

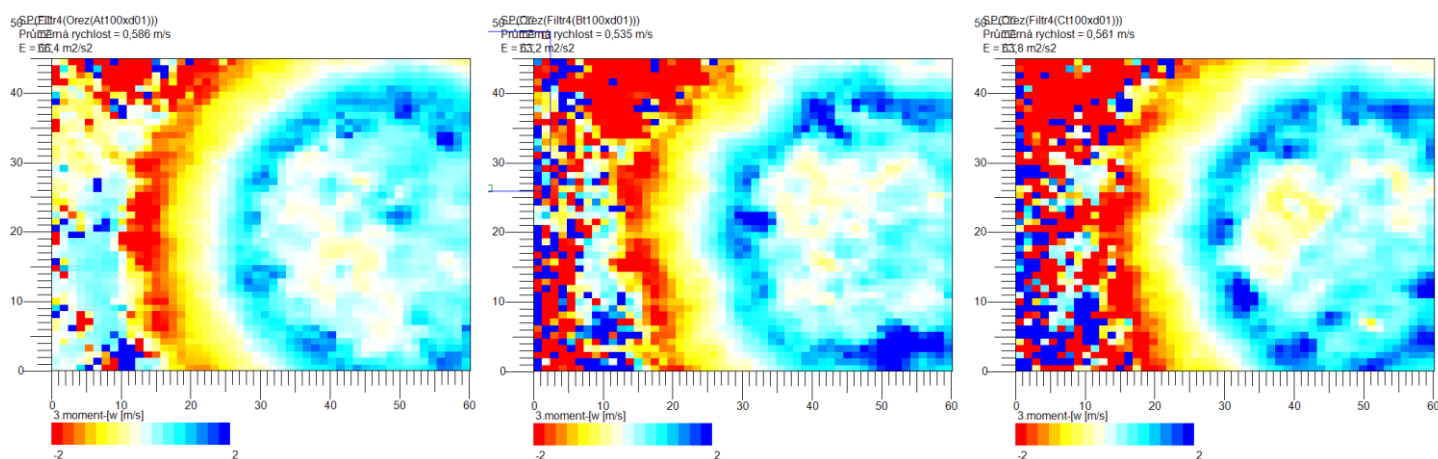
Šikmost, v anglickém jazyce též skewness, je charakteristika, jež nám udává, kterým směrem je proměnná asymetricky rozložena. Rozlišuje se šikmost kladná (pravostranná) a šikmost záporná (levostranná). O pravostrannou šikmost se jedná, když většina získaných hodnot se nachází pod průměrem, a naopak tomu je u šikmosti levostranné. Výsledný koeficient šikmosti udává míru a rozložení této asymetrie.

Na grafech Graf 21 až Graf 24 lze pozorovat šikmost pro všechny nástavce a zkoumané rychlosti (stejně uspořádání viz. *Střední rychlost*). Koeficient asymetrie je citlivý na šum. V grafech lze pozorovat velké množství těchto chybných dat, proto se v grafech zobrazuje barevná nespojitost (17). Na vnější straně za vnitřním průměrem převládá pravostranný

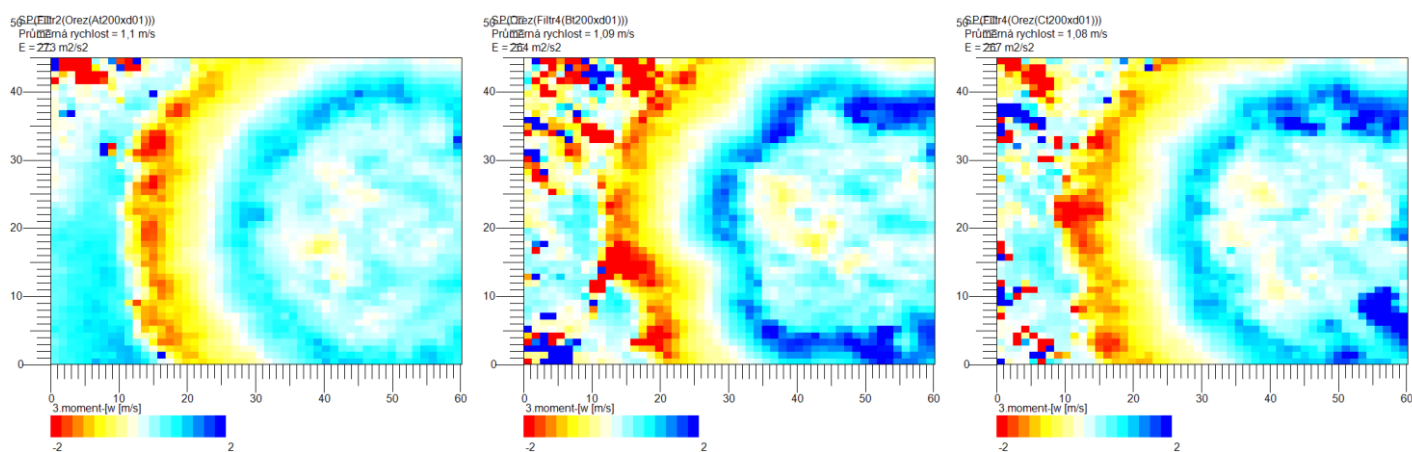
koeficient šikmosti, který se směrem k prstenci vnitřního průměru mění na šikmost levostrannou (oblast cca 30 mm). Levostranná šikmost se dále ke směru proudu paprsku více přibližuje k nulové hodnotě koeficientu šikmosti.



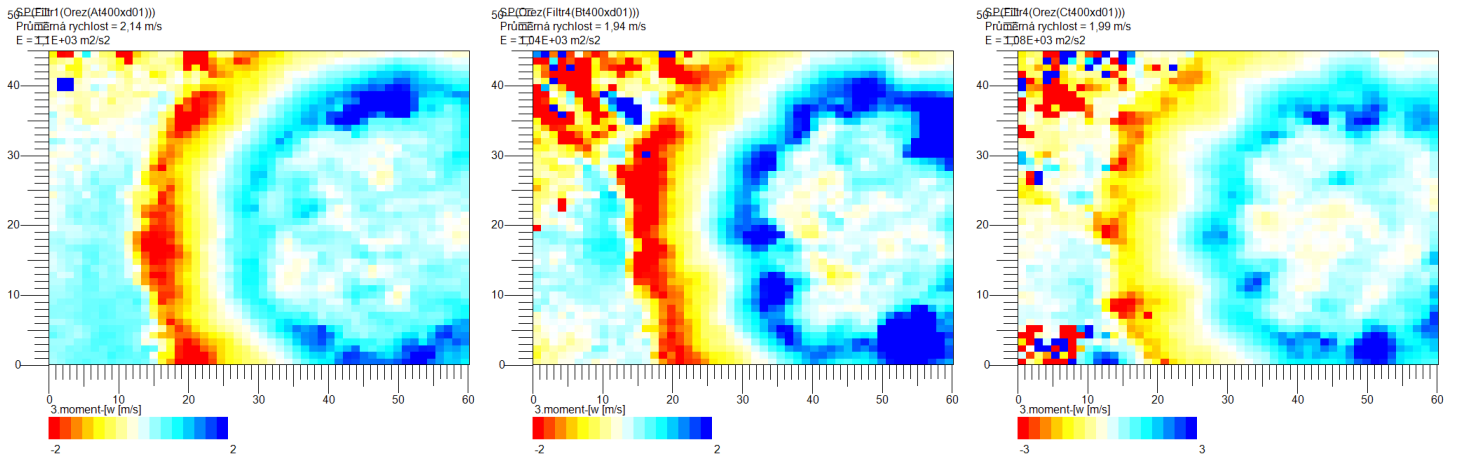
Obrázek 21 Vyobrazení koeficientu asymetrie; převzato z (18)



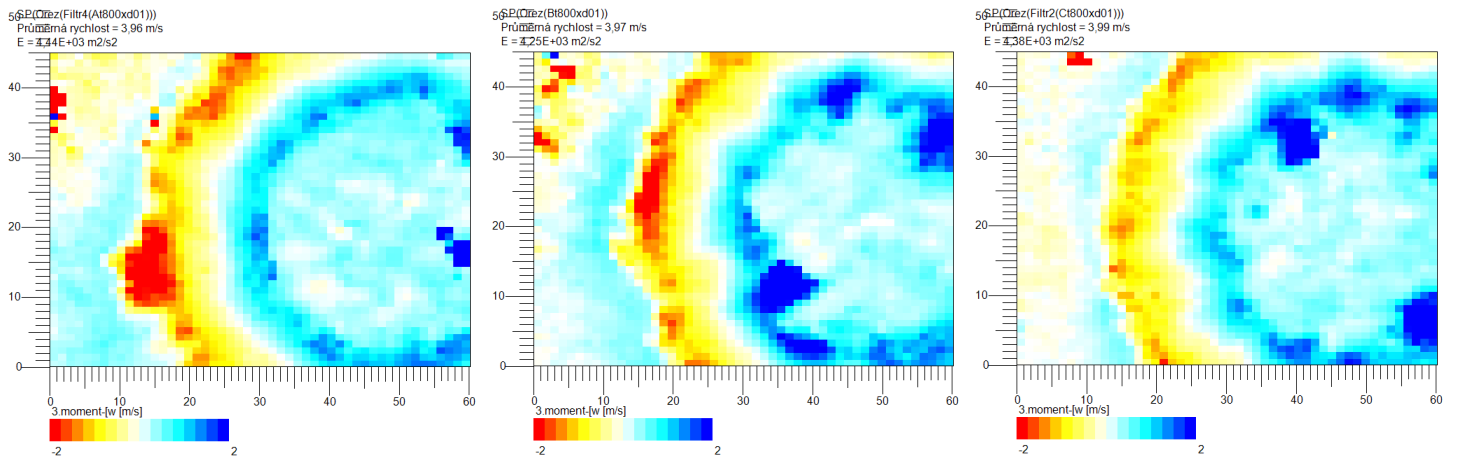
Graf 21 Porovnání koeficientu asymetrie pro měřenou rychlost 1 a všechny nástavce



Graf 22 Porovnání koeficientu asymetrie pro měřenou rychlost 2 a všechny nástavce



Graf 23 Porovnání koeficientu asymetrie pro měřenou rychlost 3 a všechny nástavce



Graf 24 Porovnání koeficientu asymetrie pro měřenou rychlost 4 a všechny nástavce

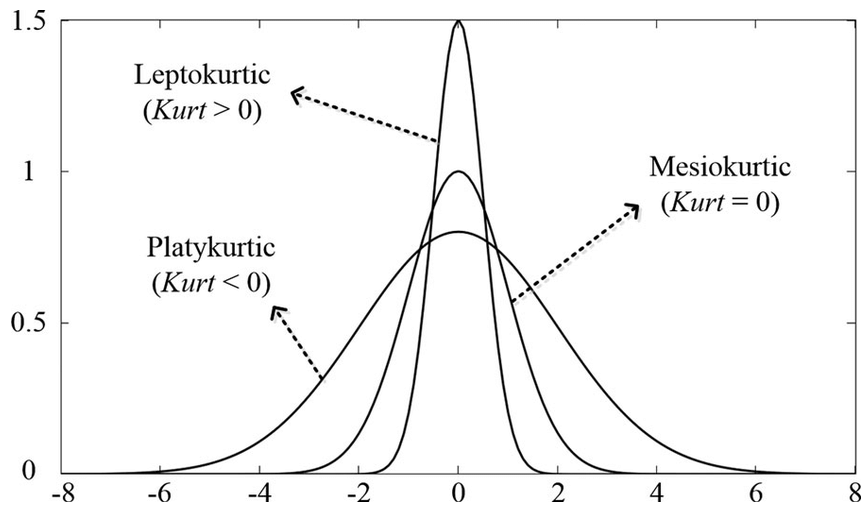
Koeficient špičatosti

Koeficient špičatosti neboli flatness, někdy označován též kurtosis, je charakteristická veličina, která ukazuje míru vzácnosti událostí odchylojících se od střední hodnoty a přispívajících ke směrodatné odchylce. Veličina porovnává distribuci náhodné veličiny s Gaussovským rozdělením (viz. Graf 25).

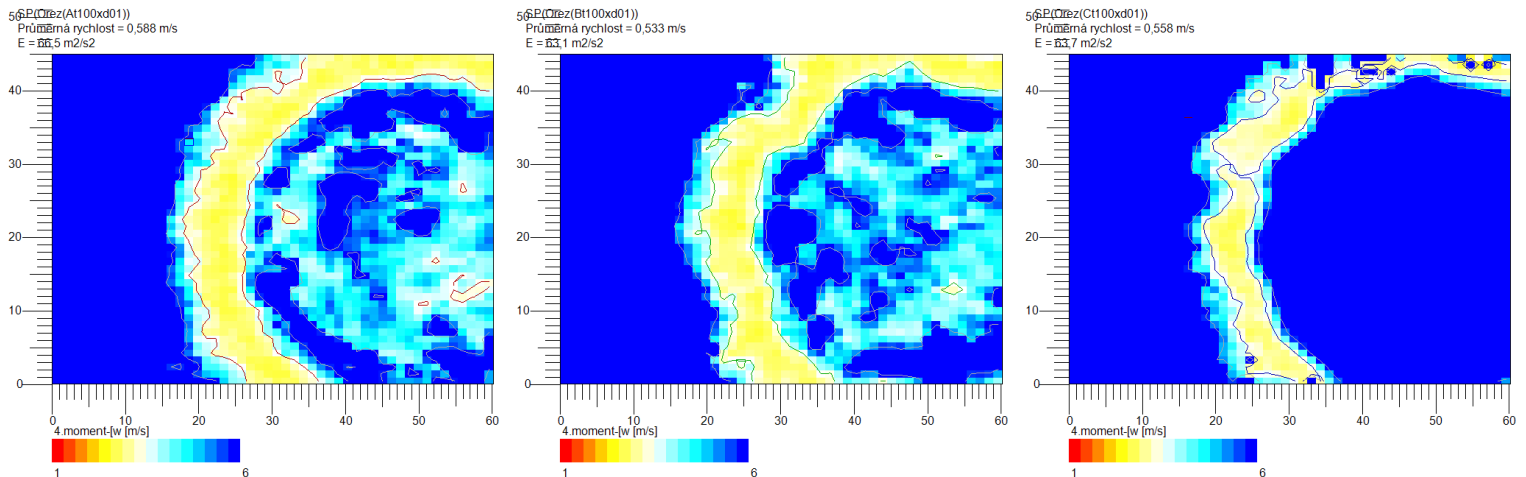
Gaussovské rozdělení, které se v přírodě vyskytuje nejčastěji má koeficient špičatosti roven číslu tři. Při určování konvence je na autorovi, zda tuto hodnotu čísla považuje za výchozí, nebo jej odečte, aby výchozím bodem bylo číslo nula. Na Grafu 25 je vidět, že

převzatý graf uvádí číselnou konvenci od nuly. U vyhodnocování výsledků se vycházelo ze základního vzorce pro koeficient špičatosti, kde barevná škála pro hodnotu 3 odpovídá referenčnímu bodu 0 na *Grafu 25*.

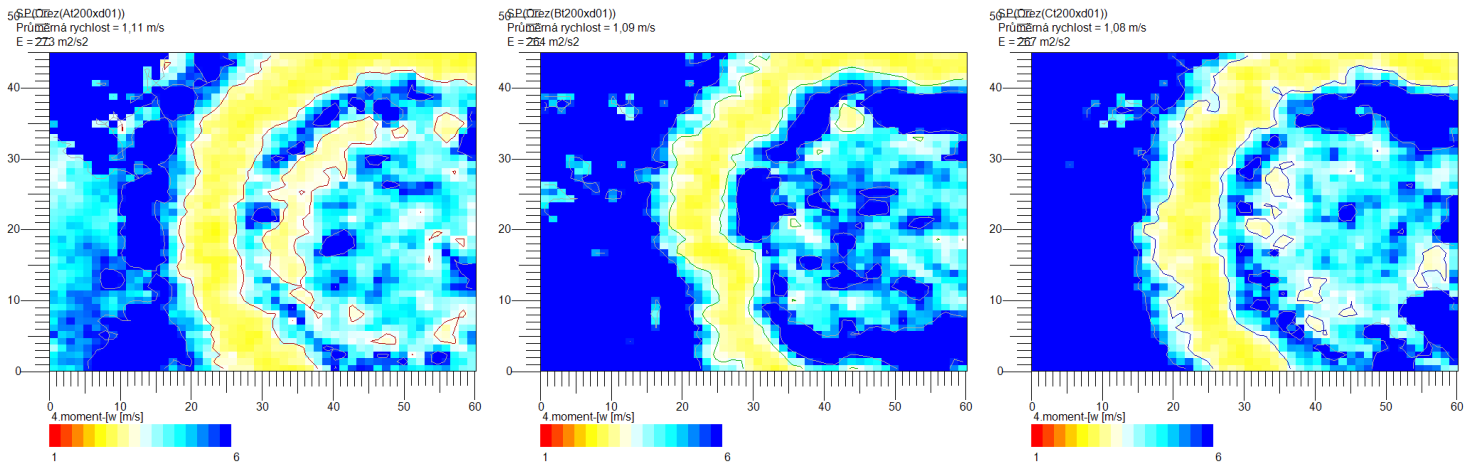
Na grafech *Graf 26* až *Graf 29* lze pozorovat špičatost pro všechny nástavce a měřené rychlosti. V prstenci vyvíjející se smykové oblasti lze vidět hodnoty koeficientu špičatosti blízké hodnotě tři, což značí že odchylky od lokálního průměru v rámci intervalu určeném lokální směrodatnou odchylkou mají podobnou četnost jako při Gaussovském rozdělení náhodné veličiny. V jádře paprsku a v okolní tekutině se odchylky od průměru přesahující rozumný násobek směrodatné odchylky vyskytují častěji a silněji, než by odpovídalo Gaussovskému rozdělení veličiny.



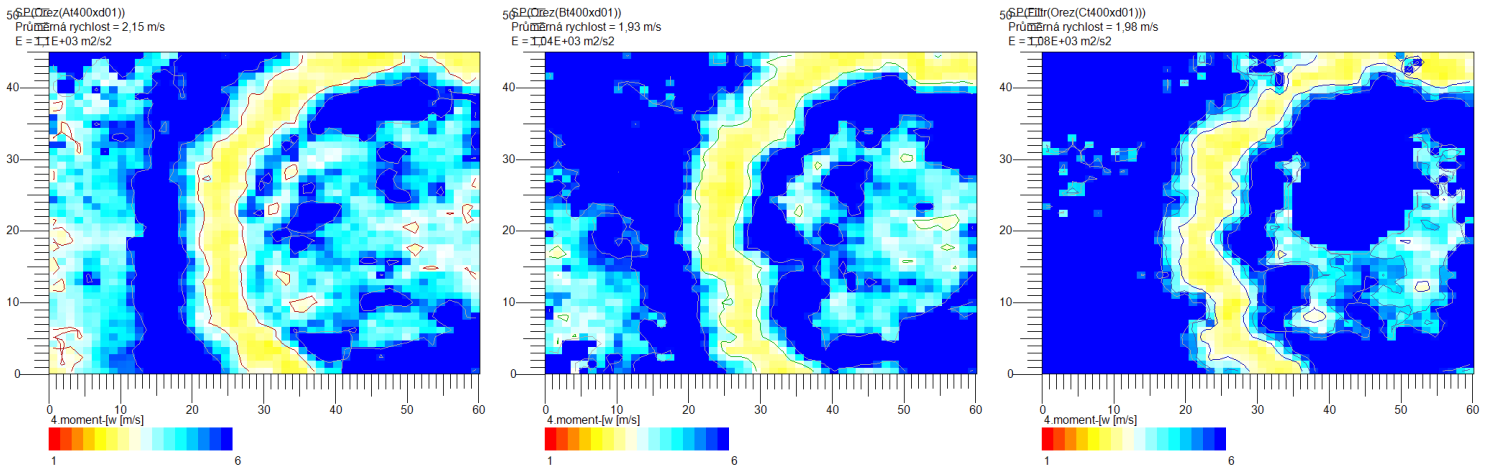
Graf 25 Vyobrazení koeficientu špičatosti; převzato z (24)



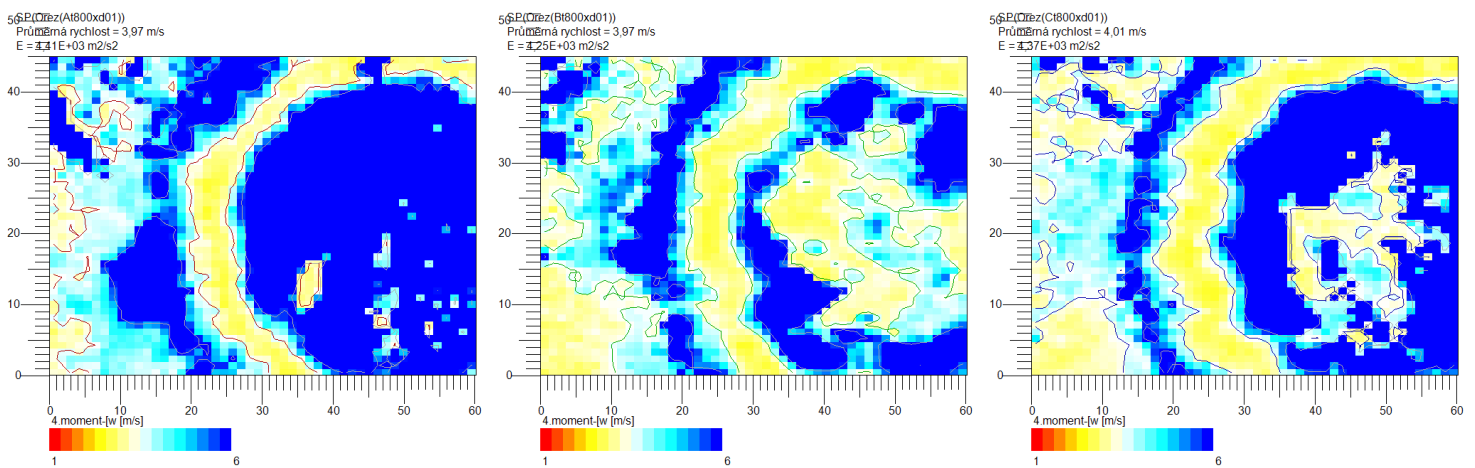
Graf 26 Porovnání koeficientu špičatosti pro měřenou rychlost 1 a všechny nástavce



Graf 27 Porovnání koeficientu špičatosti pro měřenou rychlost 2 a všechny nástavce



Graf 28 Porovnání koeficientu špičatosti pro měřenou rychlost 3 a všechny nástavce



Graf 29 Porovnání koeficientu špičatosti pro měřenou rychlost 4 a všechny nástavce

Koeficient anizotropie tenzoru Reynoldsových napětí

Koeficient anizotropie F udává, zda jsou fluktuace izotropní (malá hodnota) nebo anizotropní (velká hodnota). Stejně jako v případě Reynoldsova čísla se jedná o bezrozměrnou fyzikální veličinu. Při nízkém koeficientu mají fluktuace podobné vlastnosti bez závislosti na směru a naopak.

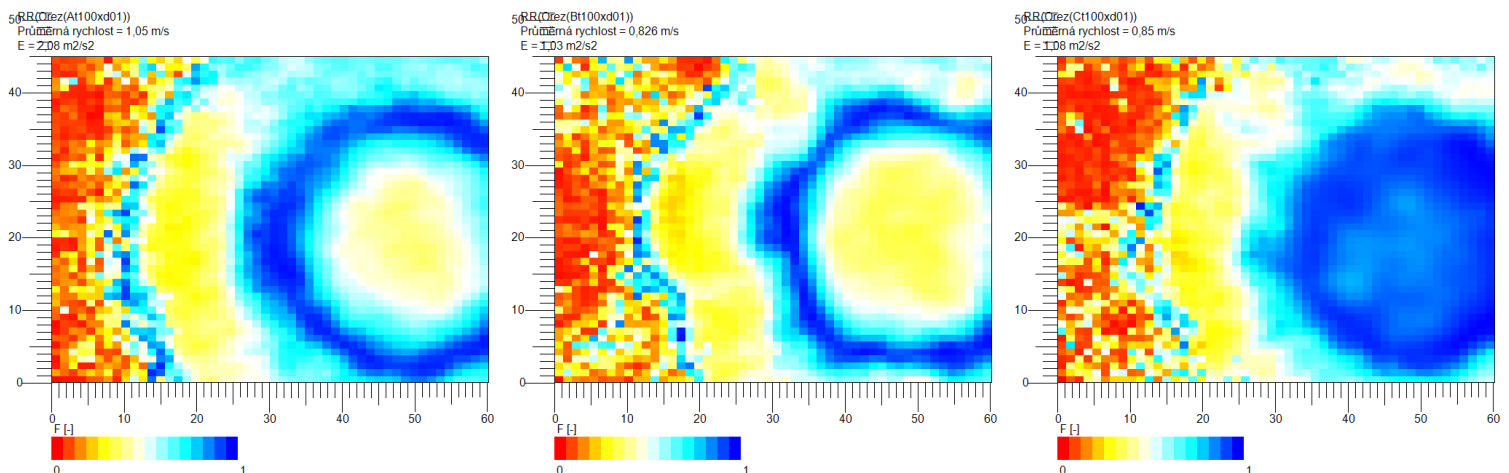
Reynoldsovo napětí je složkou celkového tenzoru napětí v tekutině získané z průměrování pomocí Navier-Stokesových rovnic, aby se zohlednily turbulentní fluktuace hybnosti tekutiny. Reynoldsův tenzor napětí je definován jako:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j}$$

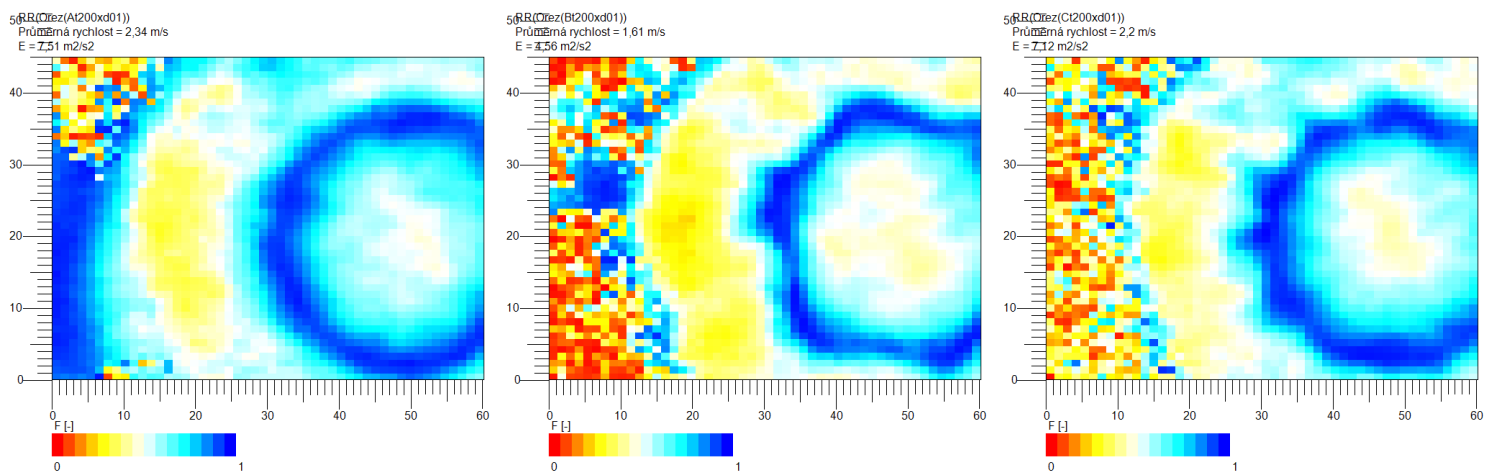
kde ρ znázorňuje hustotu tekutiny a u_i i -tou fluktuaci rychlosti. Indexy i, j označují směry působení. (19)

Na grafech *Graf 30* až *Graf 33* lze vidět porovnání koeficientu anizotropie pro všechny nástavce a měřené rychlosti. V případě *Graf 30* lze pozorovat šum, který se chová izotropně, ale nelze z toho vyvozovat fyzikální závěr.

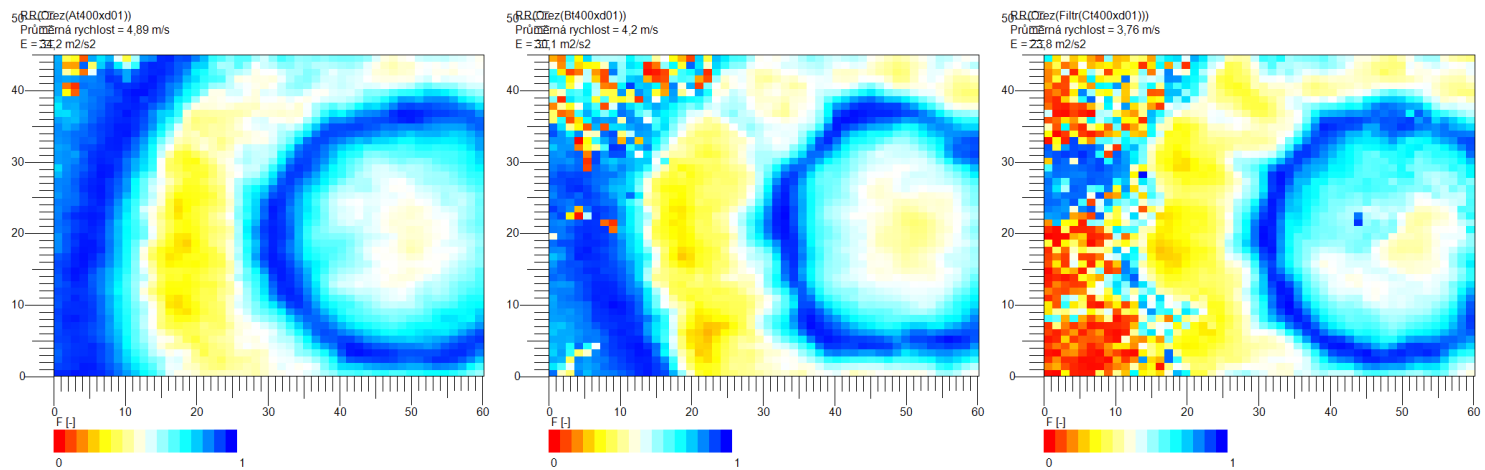
Všeobecně můžeme vypožorovat, že: ve smykové oblasti máme izotropnější chování, ale ne úplně izotropní (červená); uprostřed jádra máme opět izotropnější chování až na výjimky, které neumíme uspokojivě vysvětlit; na vnější části jádra (kruh o průměru cca 30 mm) pozorujeme silnou anizotropii způsobenou náhodnými turbulentními strukturami, které jsou vystřeleny směrem do jádra a tím pádem mají preferovaný směr, jež způsobí pozorovanou anizotropii.



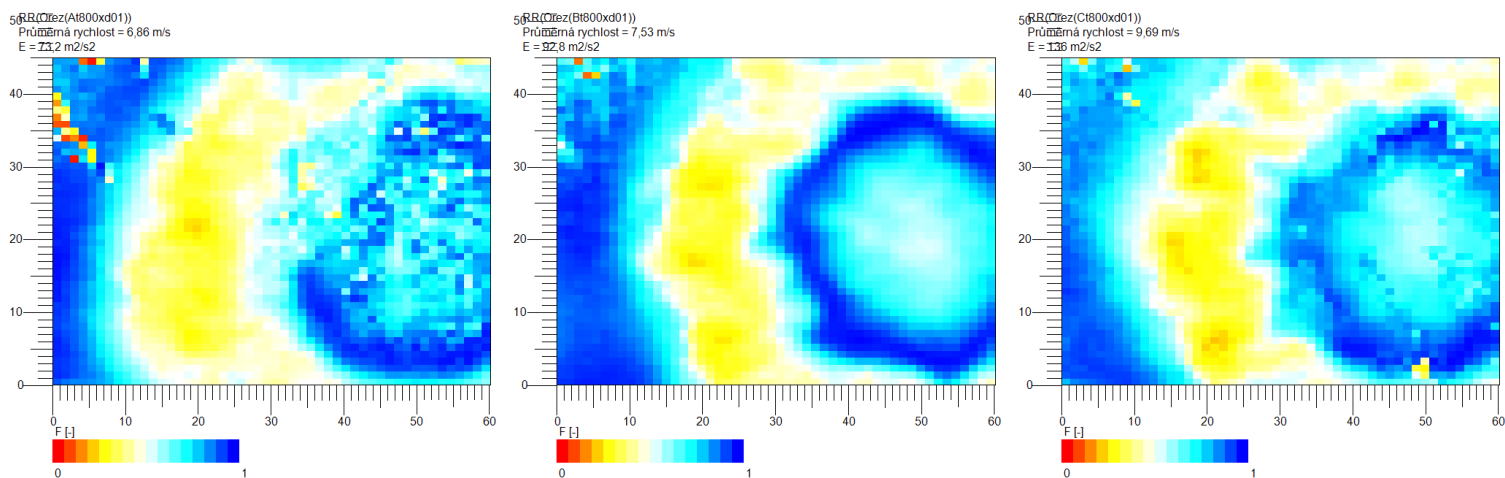
Graf 30 Porovnání koeficientu anizotropie Reynoldsových napětí pro měřenou rychlost 1 a všechny nástavce



Graf 31 Porovnání koeficientu anizotropie Reynoldsových napětí pro měřenou rychlost 2 a všechny nástavce



Graf 32 Porovnání koeficientu anizotropie Reynoldsových napětí pro měřenou rychlost 3 a všechny nástavce



Graf 33 Porovnání koeficientu anizotropie Reynoldsových napětí pro měřenou rychlost 4 a všechny nástavce

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo experimentálně prokázat vliv geometrie vnitřního průměru nástavce na strukturu proudění. Pro experiment byly vyrobeny celkově tři druhy nástavců, a to jeden základní a jeho dvě modifikace pomocí 3D tisku. Základní model nástavce měl vnitřní průměr hladký bez jakýkoliv výstupků. Modifikace spočívaly ve změně počtu a rozměru výstupků na vnitřním průměru.

Po sestavení aparatury a kalibraci bylo možné provést měření. Okamžitá vektorová pole byla zaznamenávána pomocí metody stereo-PIV. Jedná se o metodu particle image velocimetry se dvěma kamerami.

Měřená oblast se nacházela ve vzdálenosti jednoho vnitřního průměru (nástavce) za nástavcem. Tato forma měření se odehrávala pro pět zvolených rychlostí. Rychlost byla ovládána pomocí řídicí skříně s možnou změnou výkonu ventilátoru. Konkrétně se jednalo o rychlostní nastavení 100, 200, 400, 800. Pro každou měřenou rychlost bylo zaznamenáno alespoň 650 snímků. Snímky byly pořizovány při ozařování laserem v různé frekvenci, závislé na výkonu ventilátoru, a to v rozmezí 3–25 μs .

Po získání dat měřením bylo možné jejich následné vyhodnocení pomocí softwaru.

Pro čistější vyobrazení výsledků byla proveden filtrace snímků, které obsahovaly velké množství šumu (do určité míry). Po odstranění nežádoucích složek a vybrání zkoumané oblasti byla utvořena střední hodnota ze všech snímků a zvolena pozorovaná veličina např. turbulentní kinetická energie, vířivost, střední rychlost, enstrofie aj.

Z naměřených dat například u TKE lze vyvodit, že přidáním výstupku na vnitřní průměr se snižuje TKE ve smykové vrstvě zkoumané oblasti. Naskytuje se možné vysvětlení, že se vytvořili sekundární víry podél výstupků, které mohou stabilizovat smykovou vrstvu proti velkým vírům vytvořených prostřednictvím Kelvinovo-Hemholtzovo nestability. Tento jev se promítá i do jiných měřených veličin jako je vířivost, kde je jednoznačně barevně odlišen směr rotace vírů a rozpad smykové vrstvy.

I přes snahu eliminace nepříznivých jevů lze na vyhodnocených snímcích vidět šum, jež se promítl do vyhodnocení „náchylnějších veličin“ jako koeficient špičatosti a šikmosti. Za takovéto barevně nespojitě vyhodnocení může nedostatek stopovacích částic. Stopovací částice slouží k vyhodnocení rychlostních polí. Tento jev byl zapříčiněn velikostí prostorů, kde se

odehrával experiment. Prostory, ve kterých probíhalo měření dat jsou příliš rozměrné, proto nedošlo k rovnoměrnému rozložení sytících částic.

Validita dat je také limitována uklidňovací komorou za samotným ventilátorem. Z názorných grafů vířivosti lze pozorovat, že v samotném středu geometrie se tvoří dva opačně orientované víry, které má za následek již zmíněná nedokonalost uklidňovací komory.

Citovaná literatura

1. Uruba, V. *Turbulence*. 2014.
2. *Vivadifferences*. [Online] <https://vivadifferences.com/difference-between-lamina-flow-and-turbulent-flow/>.
3. Frisch, U. *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov*. s.l. : Cambridge University Press, 2010.
4. Pope, S.B. *Turbulent flows*. s.l. : Cambridge University Press, 2012.
5. Romano, G.P. *Large and small scales in a turbulent orifice round jet: Reynolds number effects and departures from isotropy*. s.l. : International Journal of Heat and Fluid Flow, 2020, Vol. 83.
6. Tropea, C, Yarin, A, Foss. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. s.l. : Springer, 2007.
7. Wang, Z.-. & Cheng, N. *Time-mean structure of secondary flows in open channel with longitudinal bedforms*. *Advances in Water Resources*. 2006, Vol. 29, 11, pp. 1634-1649.
8. List, E.J. *Turbulent jets and plumes*. *Annual Review of Fluid Mechanics*. Vol. 14, pp. 189-212.
9. Raffel, M. *Particle Image Velocimetry*.
10. Kubíková, Tereza. *Proudění vzduchu v okolí frézy studované metodou PIV*. 2020.
11. Duda, D. *Preliminary PIV measurement of an air jet*, *AIP Conference Proceedings*. 2018.
12. Sculpteo. [Online] <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/what-is-an-stl-file/>.
13. kke.zcu. [Online] https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/veda_a_vyzkum/funkcni_vzorky/vzorek_007.pdf.
14. Koudelka, Václav. *Optické měření proudění uvnitř skříně šroubového kompresoru*. 2020.
15. Hendl, J. *Přehled statistických metod. Analýza a metaanalýza dat*. 2009.
16. Wikisofia. [Online] https://wikisofia.cz/wiki/%C5%A0ikmost_a_%C5%A1pi%C4%8Datost.
17. Linhart. *Mechanika tekutin*. 2009. 978-80-7043-776-7.
19. dantecdynamics. [Online] <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/measurement-principles-of-piv/>.
20. Kelvin Helmholtz Instability in Planetary Magnetospheres. [autor knihy] Simon. W, Peter A. Delamere Jay R. Johnson.
21. Gilbert, Chris. *The Kelvin-Helmholtz Instability in Space*. 2017.
22. Eugeneoloughlin. [Online] <http://www.eugeneoloughlin.com/2020/03/kurtosis-and-flattening-curve.html>.