

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Fyzikální modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně
jaderného reaktoru

Autor: **Bc. Petr Klavík**
Vedoucí práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**
Odborný konzultant: **Ing. Michal Dostál**

Akademický rok 2016/2017

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:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Prof. Ing. Václavu Urubovi, CSc. za věcné připomínky během konzultací, cenné rady a odborné vedení. Také bych velmi rád poděkoval panu Ing. Michalu Dostálovi z firmy Škoda JS a.s. za ochotu, velmi cenné rady a vstřícnost při konzultacích při zpracování této práce.

ANOVAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Klavík	Jméno Petr	
STUDIJNÍ OBOR	2302T041 „Stavba jaderně energetických zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Uruba, CSc.	Jméno Václav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Fyzikální modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně jaderného reaktoru		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	104	TEXTOVÁ ČÁST	63	GRAFICKÁ ČÁST	41
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce se zabývá popisem jaderného reaktoru a jeho částí. Nejprve popisuje konstrukci palivových souborů se zaměřením na mísící mřížky a s tím spojenou problematiku proudění. Hlavní částí diplomové práce je provedení návrhu a realizace experimentálního zařízení navrženého pro vyšetření proudového pole za dvěma modely určených mísících mřížek z palivových souborů. Vyšetření proudového pole pomocí experimentální metody stereo PIV je také popsán v práci. Následně je provedeno měření. Závěr celé práce představuje porovnání vyhodnocených měření s výsledky numerické simulace.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Stereo PIV, Reynoldsovo číslo, experiment, rychlostní pole, proudění, objemový průtok, rychlostní profil, CFD, palivový soubor, mísící mřížka</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Klavík	Name Petr	
FIELD OF STUDY	2302T041 „Design of nuclear power equipment“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Uruba, CSc.	Name Václav	
INSTITUTION	ZČU – FST – KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Physical modeling of the flow in a fuel assembly in the nuclear reactor core		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	104	TEXT PART	63	GRAPHICAL PART	41
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This diploma thesis is focused on the description of the nuclear reactor and its parts. First, it describes the design of fuel assemblies with a focus on mixing grids and the associated problems of flow with it. The main part of the diploma thesis is design implementation and realization of the experimental device designed for the examination of the flow field behind two models of mixing grids from the fuel assemblies. Investigation of the flow field by using the experimental method stereo PIV is also described in the thesis. Subsequently, there is performed a measurement. The comparison of the appraised measurements with the results of the numerical simulation is the end of the whole thesis.</p>
KEY WORDS	<p>Stereo PIV, Reynolds number, experiment, velocity field, flowing, flow rate, velocity profile, CFD, fuel assembly, mixing grid</p>

Obsah

Seznam použitých veličin.....	10
1 Úvod	11
2 Jaderný reaktor typu VVER1000	12
2.1 Jaderná energetika.....	12
2.2 Popis reaktoru VVER 1000 a jeho základních komponent	13
2.2.1 Kontejnment	14
2.2.2 Jaderný reaktor a jeho části	14
2.3 Palivové soubory pro jadernou elektrárnu Temelín.....	18
2.3.1 Palivové soubory VVANTAGE 6	18
2.3.2 Palivové soubory TVSA-T typu mod. 1	19
2.3.3 Palivové soubory TVSA-T typu mod. 2.....	21
2.4 Mřížky.....	22
3 Experimentální metoda stereo PIV.....	23
4 Experimentální zařízení.....	24
4.1 Návrh experimentálního zařízení.....	24
4.1.1 Měřicí kanál.....	26
4.1.2 Měřicí prostor	28
4.1.3 Usměrnující prvek	28
4.1.4 Nádrže.....	29
4.1.5 Regulace průtoku kapaliny kanálem	30
4.1.6 Posuv nerezového kanálu	31
4.1.7 Hlavní čerpadlo.....	31
4.1.8 Konstrukce zařízení	31
4.1.9 Měření objemového průtoku v kanálu.....	31
4.1.10 Potrubní propojení	32
4.2 Návrh a výroba mřížek pro experiment	33
4.2.1 Návrh modelů mřížek	33
4.2.2 Výroba modelů mřížek	34
4.3 Konstrukce	35
5 Měření.....	40
5.1 Instalace měřicí aparatury	40
5.2 Kalibrace měřicí aparatury.....	41
5.3 Nastavení rychlosti v kanálu.....	42
5.4 Experimentální měření.....	42
5.5 Vyhodnocení měření.....	44

6	Výsledky.....	46
6.1	Výsledky mřížky mod. 1.....	47
6.2	Výsledky mřížky mod. 2.....	49
7	Porovnání výsledků experimentu s CFD.....	51
7.1	Porovnání výsledků mřížky mod. 1.....	52
7.1.1	Vzdálenost $z=5$ mm za mřížkou mod. 1.....	54
7.1.2	Vzdálenost $z=10$ mm za mřížkou mod. 1.....	57
7.1.3	Vzdálenost $z=20$ mm za mřížkou mod. 1.....	60
7.1.4	Vzdálenost $z=30$ mm za mřížkou mod. 1.....	63
7.1.5	Vzdálenost $z=50$ mm za mřížkou mod. 1.....	66
7.1.6	Vzdálenost $z=100$ mm za mřížkou mod. 1.....	69
7.1.7	Vzdálenost $z=200$ mm za mřížkou mod. 1.....	72
7.1.8	Vzdálenost $z=300$ mm za mřížkou mod. 1.....	74
7.2	Porovnání výsledků mřížky mod. 2.....	76
7.2.1	Vzdálenost $z=5$ mm za mřížkou mod. 2.....	78
7.2.2	Vzdálenost $z=10$ mm za mřížkou mod. 2.....	81
7.2.3	Vzdálenost $z=20$ mm za mřížkou mod. 2.....	84
7.2.4	Vzdálenost $z=30$ mm za mřížkou mod. 2.....	87
7.2.5	Vzdálenost $z=50$ mm za mřížkou mod. 2.....	90
7.2.6	Vzdálenost $z=100$ mm za mřížkou mod. 2.....	93
7.2.7	Vzdálenost $z=200$ mm za mřížkou mod. 2.....	96
7.2.8	Vzdálenost $z=300$ mm za mřížkou mod. 2.....	98
8	Závěr.....	100
	Seznam použitých zdrojů.....	101
	Seznam obrázků.....	103
	Seznam tabulek.....	104

Seznam použitých veličin

Značka veličiny	Jednotka veličiny	Název veličiny
A	$[m^2]$	Obsah
Dh	$[m]$	Hydraulický průměr
g	$[m/s^2]$	Gravitační zrychlení
L	$[m]$	Délka
Qv	$[m^3/s]$	Objemový tok
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
t	$[s]$	Čas
w_s	$[m/s]$	Střední rychlost
U, V, W	$[m/s]$	Složky rychlosti
V	$[m^3]$	Objem
x, y, z	$[m]$	Souřadnice
ρ	$[kg/m^3]$	Hustota
η	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita
ν	$[m^2/s]$	Kinematická viskozita

1 Úvod

Elektrická energie se stala v průběhu minulého století fenoménem, bez kterého si dnes lidé jen stěží dokážou život představit. Možností jak elektrinu vyrobit je celá řada. Nejmodernější přístup produkce elektrické energie je omezit výrobu klasickými zdroji s využitím fosilních paliv a prosazovat nové technologie, kterými jsou především obnovitelné zdroje méně zatěžující životní prostředí. Výroba elektrické energie v jaderných elektrárnách patří mezi dlouhodobě ověřený zdroj, který je zároveň ekologicky šetrný.

V České republice je v současné době provozováno šest jaderných reaktorů tlakovodního typu. Všechny jaderné bloky jsou stabilními a bezpečně pracujícími zdroji elektrické energie v ČR. Vzhledem k stále zvyšující se spotřebě energie, ekologickým dopadům spalování fosilních paliv či například potřebě zvýšení stability elektrizační soustavy je uvažováno o další stavbě jaderných elektráren na našem území. I z těchto důvodů je jaderná energetika velmi probírané téma současnosti.

Tepelná energie je získána štěpením jaderného paliva umístěného v palivových souborech v aktivní zóně jaderného reaktoru. Vzniklé teplo je odváděno proudícím chladicím médiem do parogenerátoru, kde se teplo spotřebuje na výrobu páry pro sekundární okruh jaderné elektrárny. Při provozování reaktoru tlakovodního typu musí být zajištěn dostatečný průtok chladicího média, který zajistí pouze jednofázové proudění chladiva. Jedním z faktorů mající vliv na zlepšení přestupu tepla z palivových proutků do chladiva jsou mísící mřížky umístěné v palivových souborech. Konstrukce mísící mřížky je velmi složitá. Skládá se z tenkých plechů, jež mají na svých koncích ohnuté lopatky, jejichž funkcí je specificky ovlivnit proudové pole chladicího média a zlepšit tím přestup tepla v aktivní zóně.

Cílem této práce je vytvoření návrhu fyzikálního modelu proudění chladicí tekutiny za mísící mřížkou vybraného palivového souboru a zjištění proudového pole v měřicím kanále za nimi pomocí experimentální metody stereo PIV. Výsledky experimentu budou sloužit především k validaci numerických výpočtů.

První část následujícího textu se zaměřuje na popis jaderného reaktoru a jeho částí, především se zabývá jednou z částí palivového souboru - mísící mřížkou. Dále se práce věnuje návrhu a realizaci experimentálního zařízení sloužící pro vyšetřování proudového pole proudícího média za dvěma typy mísících mřížek. Závěr práce se věnuje především provedení a vyhodnocení experimentálního měření. Následně je provedeno porovnání s výsledky shodné úlohy řešené pomocí CFD výpočtu, jež jsou dostupné v odkazované literatuře [1].

2 Jaderný reaktor typu VVER1000

2.1 Jaderná energetika

Historie jaderné energetiky spadá do roku 1954. V tomto roce byla spuštěna první jaderná elektrárna v Sovětském svazu ve městě Obninsk. Elektrárna disponovala elektrickým výkonem 5 MW. V reaktoru byl použit grafit jako moderátor a demineralizovaná voda jako chladivo. Od této doby prošla jaderná energetika dlouhým vývojem. Již v roce 1960 atakoval instalovaný elektrický výkon produkovaný v jaderných elektrárnách hranici 1 GW. Dlouhý vývoj v průběhu druhé poloviny minulého století zaznamenal mnoho zkušeností a poznatků s mnoha typy jaderných reaktorů. U osvědčených konstrukcí jaderných reaktorů bylo dosaženo vysokého stupně technické dokonalosti a zaznamenáno mnoho zkušeností. V roce 1990 bylo v provozu 426 reaktorů s elektrickým výkonem 320 GW a dalších 100 bylo ve výstavbě. Jejich produkce tvořila 19% světové produkce elektřiny. [2]

Na území České republiky jsou v současnosti provozovány dva typy reaktorů. Oba projekty se od sebe liší konstrukčním uspořádáním, výkonem a provozními parametry. Historie první jaderné elektrárny s typem tlakovodního reaktoru VVER 440/V213 sahá až do 70. let minulého století. První výrobní blok v Dukovanech byl uveden do provozu v květnu 1985. Poslední čtvrtý výrobní blok byl uveden do provozu v červenci 1987. Téhož měsíce dosáhla elektrárna maximálního projektového výkonu 1760 MW. [3]

Druhá jaderná elektrárna s typem tlakovodního reaktoru VVER 1000/V320 započala svoji historii v 90. letech minulého století. Původní stavební plán počítal se čtyřmi výrobními bloky v lokalitě Temelín. Z politických důvodů se vláda ČR v roce 1993 usnesla o dostavení pouze dvou výrobních bloků. První blok vyrobil první elektřinu v prosinci roku 2000. Na jaře roku 2003 se stala jaderná elektrárna s instalovaným výkonem 2000 MW největším energetickým zdrojem v České republice. [3]

Tabulka 1: Vybrané parametry VVER 440 a VVER 1000 [4]

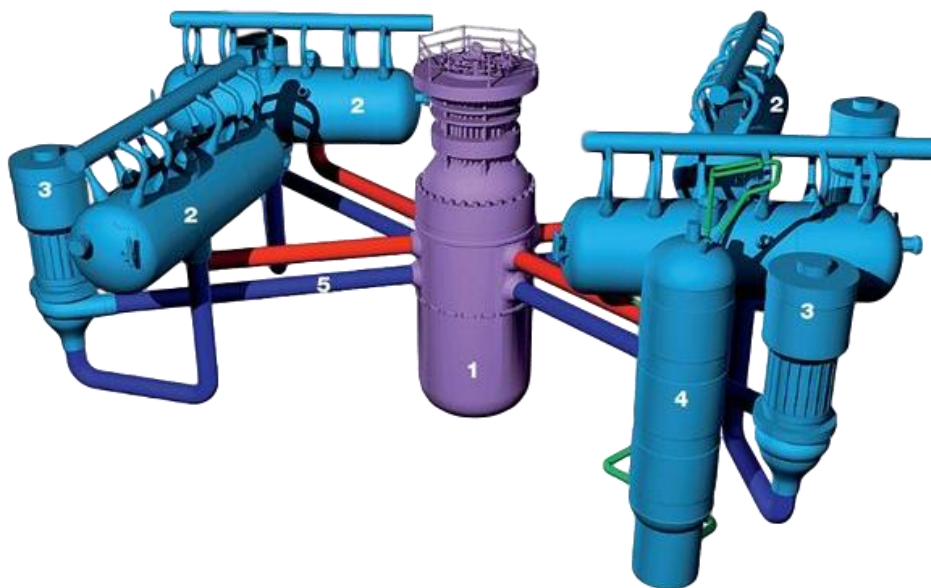
Parametry jaderných reaktorů našich elektráren		
	JE Dukovany	JE Temelín
typ reaktoru	VVER 440	VVER 1000
tepelný výkon	1444 MW	3120 MW
počet okruhů	6	4
průměr tlakové nádoby	3,56 m	4,5 m
výška tlakové nádoby	11,8 m	10,9 m
palivové soubory (PS)	312 + 37 HRK	163 ks
počet pal. proutků v PS	126	312
hmotnost paliva	42 t	92 t
moderátor a chladivo	demineralizovaná (lehká) voda	demineralizovaná (lehká) voda
tlak v reaktoru	12,25 MPa	15,7 MPa
teplota chladiva	267 - 297 °C	290 - 320 °C

Jaderné reaktory typu VVER patří mezi tlakovodní reaktory PWR. Tlaková nádoba reaktoru je tzv. obálkou aktivní zóny, která je tvořena jaderným palivem. Palivem je obohacený uran ve formě oxidu uraničitého UO_2 . Přírodní uran obsahuje pouze 0,7 %

štěpitelného izotopu U^{235} . Z tohoto důvodu je přírodní uran uměle obohacen pro použití v tlakovodním energetickém reaktoru. V reaktoru dochází k řízené štěpné reakci v palivu. Proces štěpení spočívá v rozpadu těžkého jádra izotopu uranu na dva nebo více odštěpků, současně dojde také k uvolnění dvou až tří rychlých neutronů a gama záření. Odštěpky jsou radioaktivní a nestabilní. Dále se rozpadají, dokud nedosáhnou stabilního stavu. Odštěpky se po reakci pohybují velkou rychlostí a narážejí do ostatních atomů paliva. Jejich kinetická energie je přeměněna na teplo. Palivo se zahřívá. V jaderném reaktoru je použit moderátor, který moderuje rychlé neutrony. Zpomalené neutrony mohou být zachyceny dalšími těžkými jádry izotopu uranu. Tímto štěpná reakce může pokračovat. Pro odvod tepla z paliva je v jaderném tlakovodním reaktoru využito chladiva. Tlakovodní reaktory používají jako chladivo demineralizovanou vodu, která zároveň moderuje rychlé neutrony. Chladivo proudí kolem palivových článků. Teplo z palivových článků přestupuje do chladiva. Ohřáté chladivo v parogenerátoru předává teplo vodě v sekundárním okruhu. V primárním okruhu chladivo nuceně obíhá pomocí hlavních cirkulačních čerpadel. Štěpná řetězová reakce je řízena změnou koncentrace kyseliny borité v chladivu, nebo pomocí změny polohy pomocí regulačních orgánů. [4], [5]

2.2 Popis reaktoru VVER 1000 a jeho základních komponent

Jaderný reaktor je druh energetického zařízení, ve kterém je uvolněná energie z jaderné štěpné reakce přeměněna na tepelnou energii. Ta je následně využita v sekundární části elektrárny pro výrobu elektrické energie. Z hlediska bezpečnosti se jaderná elektrárna rozděluje na více okruhů. Každý okruh elektrárny má své zaměření, podle kterého obsahuje příslušné technologické vybavení. Lehkovodní energetické reaktory typu VVER 1000 mají tři oddělené okruhy. První, a z hlediska bezpečnosti nejdůležitější, je primární okruh. V tomto okruhu se nachází reaktor propojený cirkulačním potrubím s hlavními cirkulačními čerpadly, parogenerátory a dále se všemi důležitými systémy primárního okruhu. Primární okruh je umístěn v ochranné obálce. Na tento okruh navazuje sekundární okruh. Přenos tepelné energie mezi oběma okruhy zajišťují parogenerátory, které na sekundární straně produkují páru pro pohon turbosoustrojí. V sekundárním okruhu se nachází turbosoustrojí s příslušným technologickým vybavením. Poslední terciární okruh slouží k odvodu tepla z kondenzátorů do chladicích věží.



Obrázek 1: Schéma primárního okruhu s reaktorem VVER 1000 [6]; 1-reaktor, 2-parogenerátor, 3-hlavní cirkulační čerpadlo, 4-kompenzátor objemu, 5-cirkulační potrubí

2.2.1 Kontejnment

Kontejnment tvoří ochrannou obálku primárního okruhu, která je vystavěna z oceli a betonu. Uvnitř kontejnmentu se nacházejí všechny zařízení primárního okruhu. Kontejnment slouží nejen jako ochrana primárního okruhu před vnějšími hrozbami (např. přírodní vlivy, teroristické útoky), ale i jako ochrana vnějšího prostředí před únikem radioaktivních látek v případě havárie, tím se řadí mezi systémy pasivní bezpečnosti. Kontejnment izoluje vnitřní hermetický prostor primárního okruhu a zachovává podtlak uvnitř.

2.2.2 Jaderný reaktor a jeho části

V této části budou popsány základní zařízení primárního okruhu se zaměřením na reaktor VVER 1000.

2.2.2.1 Horní blok

Lineární krokové pohony reaktoru VVER 1000, určené pro regulaci neutronového toku v aktivní zóně, jsou umístěny ve sběrném kolektoru vzduchového chlazení v konstrukci horního bloku. Pohony jsou připevněny na nátrubky ve víku tlakové nádoby. V horním bloku je celkem 61 pohonů. Konstrukce horního bloku slouží nejen k umístění pohonů, ale také k vyvedení všech kabelů vnitroreaktorového měření. [7]

2.2.2.2 Víko reaktoru

Víko tlakové nádoby reaktoru sestává z kovaného přírubového prstence a eliptického vrchlíku. Přírubový prstenec má na spodní straně drážky sloužící pro dosednutí na těsnící uzel a 54 průchozích otvorů pro svorníky. Víko tlakové nádoby je nasazeno na svorníky našroubované v tlakové nádobě. Předepnuté svorníky jsou zajištěny maticemi. V horní části eliptického vrchlíku se nacházejí nátrubky pro připojení lineárních krokových pohonů, nátrubky pro vyvedení vnitroreaktorového měření a nátrubek odvodu vzduchu. Víko tlakové nádoby slouží k uzavření a utěsnění tlakové nádoby reaktoru. Na horní část víka je umístěna konstrukce horního bloku. [7]

2.2.2.3 Tlaková nádoba

Tlaková nádoba reaktoru VVER 1000 je silnostěnná válcová nádoba, která se skládá ze šesti kovaných prstenců a eliptického dna. Jednotlivé díly jsou přivařeny k sobě. Horní část válcové nádoby je tvořena přírubovým prstencem, na který dosedá prstenec víka. Těsnící uzel sestává ze dvou těsnících kroužků a 54 otvorů se závitem M 170x6 pro svorníky. Pod přírubovým prstencem je horní a spodní hrdlový prstenec. Hrdlové prstence mají po čtyřech nátrubcích o rozměru JS 850 mm pro vstup a výstup chladiva z reaktoru a po dvou nátrubcích o rozměru JS 270 mm pro systém havarijního chlazení aktivní zóny. Pod spodním hrdlovým prstencem se nachází opěrný prstenec s opěrným kroužkem dosedajícím na nosný kroužek. Nosný kroužek je součástí železobetonové šachty. Na opěrný prstenec navazují horní a dolní hladké prstence. Na vnitřním povrchu horního hladkého prstence se nacházejí schránky pro svědečné vzorky. Dolní hladký prstenec má na vnitřním povrchu výstupy s vodícími péry pro vedení šachty reaktoru. Spodní část tlakové nádoby je zakončena eliptickým dnem. Kované díly tlakové nádoby byly vyrobeny z vysokojakostní legované oceli. Pro hladké prstence ve spodní části nádoby byla použita ocel s vyšší čistotou. Prstence se nacházejí v blízkosti aktivní zóny, a tudíž jsou vystaveny

vyššímu působení radiačního křehnutí. Na vnitřním povrchu tlakové nádoby byl zhotoven nerezavějící návar ve dvou vrstvách o tloušťce přibližně 8 mm. [7]

2.2.2.4 Vnitřní části

Vnitřní části se nacházejí uvnitř tlakové nádoby reaktoru. Vnitřní části tvoří: šachta reaktoru, plášť aktivní zóny a blok ochranných trub.

Šachta reaktoru

Šachta reaktoru je tenkostěnná válcová skořepina, zavěšena v tlakové nádobě reaktoru za přírubový prstenec. Shora je přitlačena přes pružný element víkem reaktoru. V šachtě reaktoru jsou umístěny zbylé vnitřní části spolu s palivovými soubory. Horní část stěny šachty reaktoru obsahuje perforace, kterými proudí chladivo z bloku ochranných trub do horkých větví primárního okruhu. Na vnitřní stěně mezi hrdlovými prstenci tlakové nádoby reaktoru je přivařen dělicí kroužek. Kroužek za nominálního stavu primárního okruhu doléhá na stěnu šachty a zabraňuje míchání chladiva na vstupu reaktoru a výstupu z něj. Spodní část šachty je zakončena eliptickým dnem obsahujícím perforace a otvory pro upevnění válcových podpěr palivových souborů. Podpěry jsou v horní části spojeny s distanční deskou kruhového tvaru pomocí svarového spoje. Na dně šachty se nachází celkem 163 podpěr, do jejichž horních částí jsou zasunuty palivové soubory. Podpěry mají v horní části perforace pro vstup chladiva do palivových souborů. Celá spodní část šachty slouží především ke zrovnoměření toku chladiva na vstupu do palivových souborů. [7]

Plášť aktivní zóny

Tvar palivových souborů, které tvoří aktivní zónu, je jiný než kruhový tvar šachty reaktoru. Plášť aktivní zóny vyplňuje tento prostor mezi aktivní zónou a šachtou. Plášť slouží nejen k uložení palivových souborů, ale také plní funkci reflektoru. Dále slouží ke snížení toku neutronů a radiačního záření aktivní zóny na tlakovou nádobu reaktoru. Plášť aktivní zóny je umístěn na distanční desce v dolní části šachty.

Blok ochranných trub

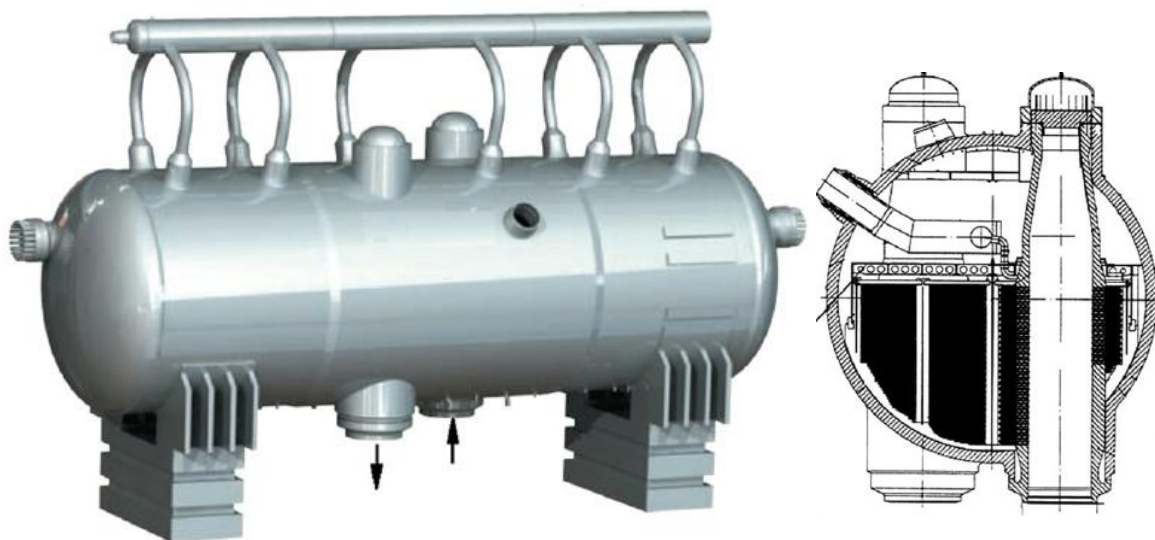
Blok ochranných trub zajišťuje polohy palivových souborů v aktivní zóně. Dosedá na hlavice palivových souborů a zabraňuje jejich nadnášení způsobené vztlakem chladiva. Dále slouží k vyvedení vnitroreaktorových měření a k vedení regulačních tyčí. Konstrukce bloku zrovnoměňuje tok chladiva po příčném průřezu před výstupem z reaktoru. Blok ochranných trub je konstrukce svařená ze tří kruhových desek, ochranných trubek a pláště.

Aktivní zóna

Aktivní zóna reaktoru se nachází ve spodní části šachty reaktoru. V aktivní zóně jsou umístěny palivové soubory. Aktivní zóna ruských projektů (VVER) se od projektů západních (PWR) liší tvarem palivových kazet a typem regulačních orgánů. Palivové soubory západních projektů mají čtvercové palivové soubory. Ruské projekty používají šestiúhelníkové palivové soubory. Spodní část aktivní zóny je tvořena distanční deskou, umístěnou na válcových podporách, pro uložení celkem 163 palivových souborů. Celková výška aktivní zóny reaktoru je 3,68 m. [7]

2.2.2.5 Horizontální parogenerátory

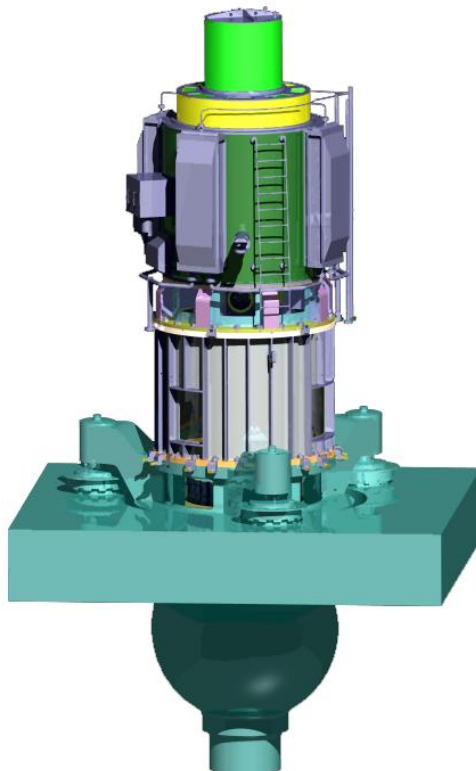
Parogenerátor je velká válcová nádoba oddělující primární a sekundární okruh. Jedná se o výměník tepla mezi chladivem vystupujícím z reaktoru a vodou okruhu sekundárního. Parogenerátor je součástí každé smyčky primárního okruhu. V parogenerátoru je na sekundární straně produkována pára, která je vedena parovody pro pohon turbosoustrojí. Produkce páry závisí na primárním a sekundárním okruhu na základě rozdílu teplot. Konstrukce parogenerátoru je buďto vertikální, nebo horizontální. Vertikální konstrukci používají západní výrobci jaderných elektráren. Horizontální konstrukce parogenerátoru je jeden z význačných prvků projektů VVER, viz obrázek 2. Obě konstrukční provedení mají svoje výhody a nevýhody a nelze stanovit, který typ je lepší. Jak již bylo výše zmíněno, parogenerátor je velký tepelný výměník. Uvnitř parogenerátoru se nacházejí trubky tvaru U spojující horký a studený kolektor. Těmito trubkami proudí chladivo primárního okruhu. Vnější strana trubek přichází do kontaktu s médiem sekundárního okruhu, vyprodukovaná sytá pára vstupuje do parovodů ústících do společného hlavního parního kolektoru. Umístění hlavního parního kolektoru je dle projektu rozdílné. [5]



Obrázek 2: Horizontální parogenerátor [8]

2.2.2.6 Hlavní cirkulační čerpadla

Hlavní cirkulační čerpadla patří mezi základní komponenty primárního okruhu. Zajišťují odvod tepla z aktivní zóny reaktoru tím, že vytvářejí nucenou cirkulaci chladiva mezi aktivní zónou reaktoru a parogenerátory. Umístěny jsou vždy na studené větvi za parogenerátorem. Konstrukčně se jedná o vertikální odstředivé čerpadlo s jedním stupněm, přímo poháněné synchronním elektromotorem o patřičném výkonu, viz obrázek 3. Hlavní cirkulační čerpadla zajišťují nejen odvod tepla z aktivní zóny reaktoru, ale také slouží při náhřevu reaktoru, kdy se využívá jejich čerpací práce. [5], [7]



Obrázek 3: Hlavní cirkulační čerpadlo [9]

2.2.2.7 Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu je vertikální expanzní nádoba s řízeným tlakem. Udržuje nominální hodnotu tlaku v primárním okruhu, kompenzuje objemové změny chladiva způsobené změnou teploty. Kompenzátor objemu je přímo propojen s horkou větví jedné smyčky cirkulačního potrubí. Kompenzátor objemu je jediným zařízením v primárním okruhu, kde je připuštěna jiná než kapalná fáze chladiva. V horní části neboli parní části kompenzátoru objemu je sprchovací systém napojený na studenou větev.

Malé změny tlaku chladiva jsou kompenzovány samoregulací. Při zvýšení tlaku chladiva se zvýší teplota sytosti, tudíž dojde ke snížení teploty chladiva pod teplotu sytosti a ke kondenzaci páry. Tím dojde ke zmenšení objemu chladiva a poklesu tlaku v primárním okruhu. Tento proces se uplatní i při malém snížení tlaku chladiva. Pro větší změny tlaku chladiva se uplatní systém elektroohříváků, nebo sprchovací systém. Systém elektroohříváků se uplatňuje pro zvýšení tlaku chladiva. Chladivo se začne v kompenzátoru objemu odpařovat, parní polštář zvětšuje svůj objem a zvyšuje tlak v primárním okruhu. V opačném případě se uplatní sprchový systém, který snižuje objem parního polštáře, a tím tlak v primárním okruhu.

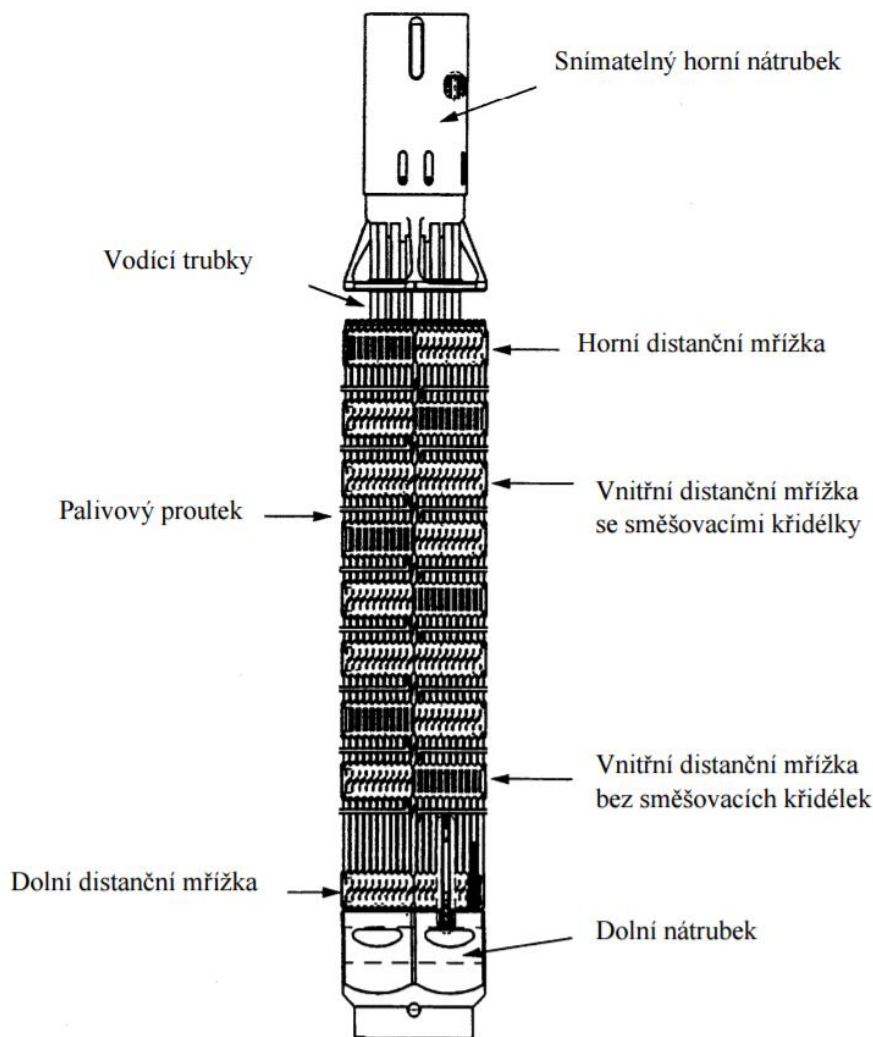
Celý primární okruh je chráněn před nedovoleným zvýšením tlaku. Při zvyšování tlaku nad dovolenou hodnotu, dojde nejprve k otevření odlehčovacích a poté hlavních pojistných ventilů kompenzátoru objemu. Ventily jsou potrubím připojeny k barbotážní nádrži. Barbotážní nádrž je tlaková nádrž s nižším tlakem, než jaký je v primárním okruhu. Přepuštěná pára v barbotážní nádrži kondenzuje. Teplota kondenzátu je do 50 °C. [5], [7]

2.3 Palivové soubory pro jadernou elektrárnu Temelín

První palivové soubory zavezené do aktivní zóny temelínského reaktoru byly vyrobeny americkou firmou Westinghouse. Zpočátku provozu byly objeveny problémy s palivovými soubory. Hlavním problémem byla konstrukční pevnost souboru, kdy docházelo k nadměrnému kroucení a ohybu celého souboru. Druhým problémem byl radiační růst palivových článků, čímž docházelo k netěsnostem na palivových proutcích. Na základě těchto závad byly palivové soubory konstrukčně modifikovány. Nicméně provozovatel elektrárny společnost ČEZ se rozhodl ke změně budoucího dodavatele paliva, kterým se stala ruská společnost TVEL. Původně bylo navrženo postupně vyměnit jen část palivových souborů s každou plánovanou odstávkou. Tento proces by znamenal, že po určitou dobu budou v aktivní zóně provozovány dva odlišné typy palivových souborů současně. Nakonec bylo od plánu postupné výměny paliva upuštěno a v roce 2010 byly při odstávce na prvním bloku elektrárny vyměněny všechny palivové soubory v aktivní zóně za nový typ. O rok později proběhla výměna i na druhém bloku. Palivo od americké společnosti Westinghouse bylo provozováno deset let. V současné době se uvažuje o náhradě modernizovaným typem palivového souboru od stejného výrobce. V následující části kapitoly 2.3 budou popsány zmíněné typy palivových souborů. [3]

2.3.1 Palivové soubory VVANTAGE 6

Americká společnost vyvinula tento typ palivových souborů pro jaderné elektrárny typu VVER. Palivový soubor je uspořádán v hexagonální mříži. Palivový soubor sestává z 312 palivových proutků, mezi kterými se nachází 18 pozic s vodíci trubkami a jednou centrální měřicí trubicou umístěnou ve středu souboru. Vodící trubky ze zirkoniové slitiny slouží pro vedení absorpčních proutků. V dolní části je umístěna patice, která slouží k usměrnění toku chladiva do souboru. K patici je připojena dolní distanční mřížka. Palivové proutky jsou po výšce palivového souboru fixovány čtyřmi druhy distančních mřížek. Distanční mřížka je složena ze vzájemně spojených pásků v kosočtverečném uspořádání. Celkem palivový soubor obsahuje 9 distančních mřížek, z nichž je 6 opatřeno směšovacími křídélky. Křídélka slouží k zintenzivnění proudu chladiva a zvýšení přestupu tepla z palivového proutku do chladiva. Palivový proutek se skládá ze zirkoniové trubky vyplněné keramickými tabletami UO_2 . Horní část palivového souboru je tvořena hlavicí, která slouží jako ochranné pouzdro pro svazek absorpčních proutků. V celé palivové vsázce se nachází přibližně 92 tun paliva. Schéma palivového souboru je zobrazeno na obrázku 4. [10]



Obrázek 4: Palivový soubor VVANTAGE 6, [10]

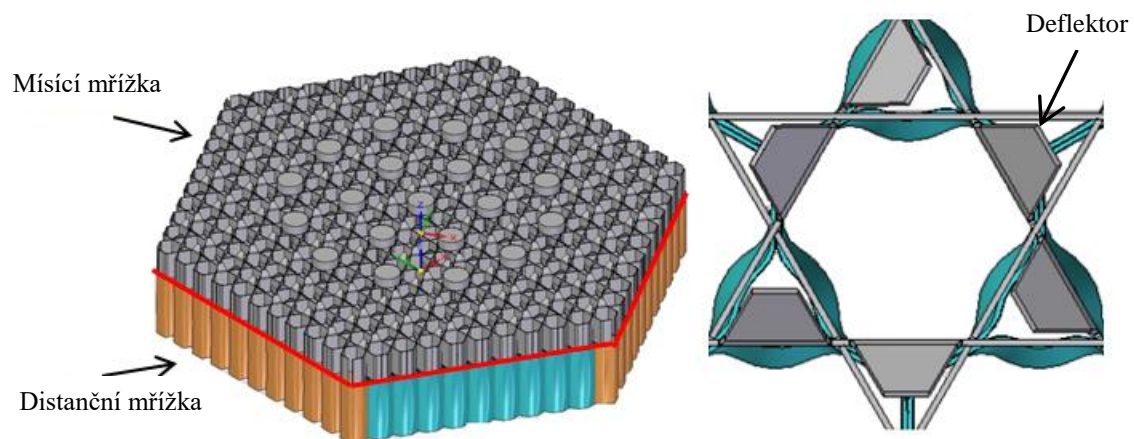
2.3.2 Palivové soubory TVSA-T typu mod. 1

Palivové soubory typu TVSA byly vyvinuty a vyrobeny ruskou společností TVEL. Označení TVSA-T je určeno pro palivový soubor vyvinutý pro jadernou elektrárnu Temelín. Tyto speciální soubory TVSA-T byly vytvořeny pro použití v aktivní zóně spolu s původními palivovými soubory VVANTAGE.

Palivový soubor TVSA-T s označením mod. 1 se liší od předchozího použitého typu VVANTAGE především svou konstrukcí. Soubor typu VVANTAGE se potýkal s problémem špatné tuhosti celé konstrukce. Nosný skelet neboli konstrukce souboru TVSA-T mod. 1 byla vyztužena pomocí úhelníků umístěných po výšce souboru. Na spodní části byly úhelníky připojeny svařem k dolnímu uzlu. Stejným druhem spoje byly spojeny s distančními mřížkami. Dolní uzel byl nasunut na dolní nátrubek a spojen šroubovým spojem, viz obrázek 6. Řešení celé konstrukce výrazně zvyšuje tuhost palivového souboru. Palivové články jsou pevně drženy ve svých polohách, stejně tak vodící trubky umístěné na 18 pozicích. Tímto nedochází k ohybu palivových článků a vodících trubek, které svou deformací mohou ovlivnit pohyb absorpčních orgánů.

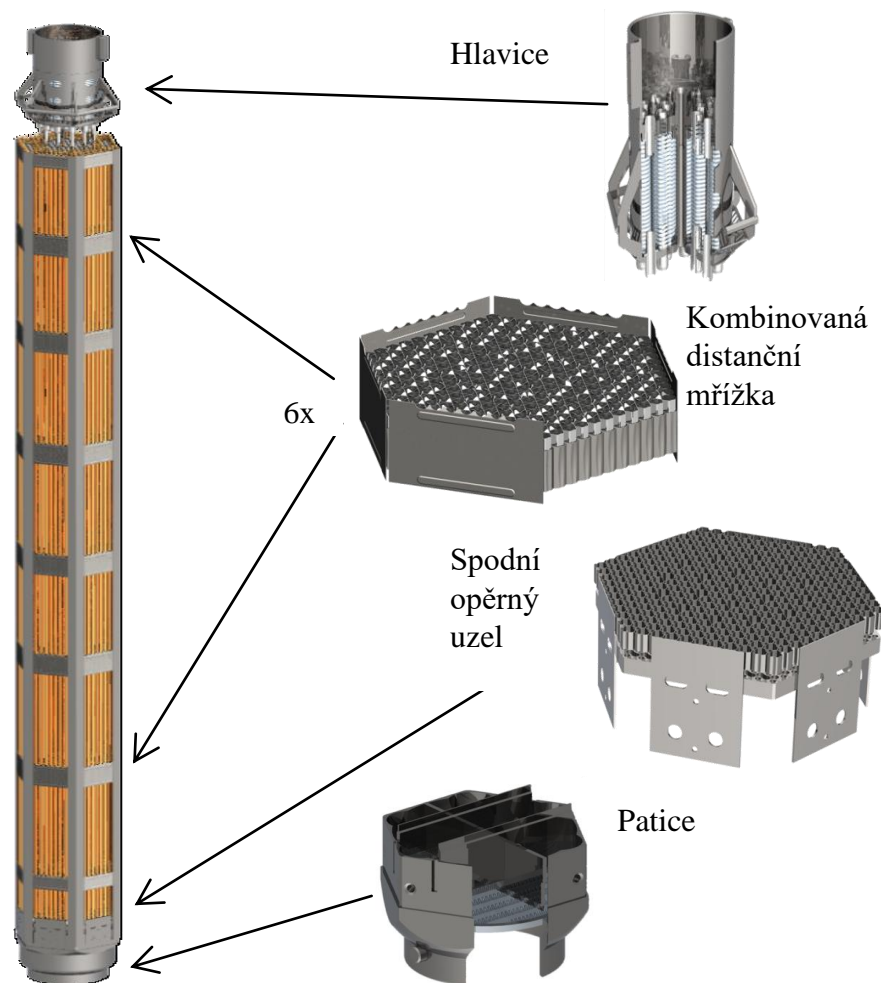
Palivový soubor sestává také z 312 palivových proutků a 18 vodících trubek. V ose souboru se nachází nosná trubka, která slouží pro umístění samonapájecích neutronových

detektorů. Nosná trubka je prostrčena skrze všechny mřížky. Mřížky jsou k trubce připojeny svarovým spojem. Takto umístěná nosná trubka spolu s šesti úhelníky zaručuje dostatečnou tuhost celého palivového souboru. Počet mřížek a jejich konstrukce se liší oproti původnímu souboru VVANTAGE 6. V palivovém souboru jsou umístěny celkem tři druhy distančních mřížek, které mají za funkci udržet palivové proutky v pevných polohách. Palivové proutky nemají po celou dobu v aktivní zóně konstantní rozměry. Distanční mřížky by navíc měly zabezpečit, že při změně jejich rozměrů nedojde k poškození povrchu proutků. Dolní distanční mřížka je umístěna ve spodní části palivových proutků nad opěrným uzlem. Horní distanční mřížka je umístěna na horním konci palivových proutků. Mezi krajními mřížkami se nachází šest kombinovaných distančních mřížek, které jsou složeny z distanční a mísící mřížky. Distanční mřížky plní funkci zajištění konstantní polohy palivových proutků a vodících tyčí. Mísící mřížky slouží pouze k vytvoření turbulentního proudu, čímž dochází k promíchání chladiva mezi palivovými proutky. Mísící mřížky mají na horní straně lopatky neboli deflektory ohnuté pod shodným úhlem s různou směrovou orientací. Palivový soubor typu mod. 1 obsahuje mísící mřížky s deflektory typu „swirling“, které generují proud rotující podél obtékaného proutku, viz obrázek 5.



Obrázek 5: Kombinovaná distanční mřížka, [11]

Palivový soubor obsahuje na svých koncích speciální nátrubky. Na spodní straně je umístěna patice obsahující debris filtr. Filtr slouží k zabránění vniknutí částic větších než 2 mm do palivového souboru. Takovéto volné částice by mohly omezit průtok chladiva kolem palivových proutků a způsobit lokální poškození paliva z důvodu nárůstu teploty. Na horním konci, respektive na výstupu z palivového souboru, je umístěna hlavice, která je nasazena na vodící trubky. Na následujícím obrázku je zobrazena konstrukce palivového souboru TVSA-T mod. 1. [10], [12]

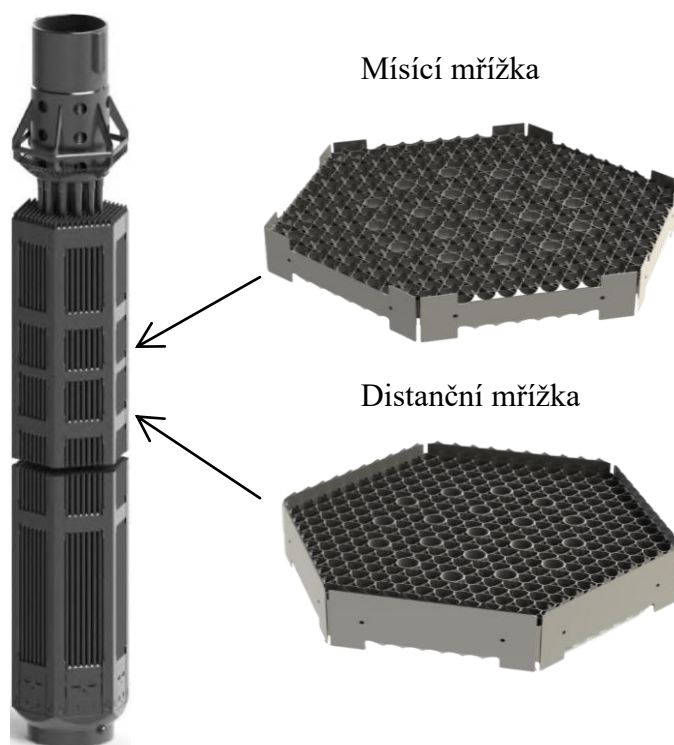


Obrázek 6: Palivový soubor TVSA-T mod.1 [11], [12]

2.3.3 Palivové soubory TVSA-T typu mod. 2

Palivový soubor TVSA-T typu mod. 2 nebyl doposud použit v aktivní zóně jaderné elektrárny Temelín. Tento typ byl vyvinut ruskou společností TVEL jako náhrada za současný typ mod. 1. Nový typ palivového souboru je podobné konstrukce jako předchozí. Nosná konstrukce palivového souboru se také skládá z 6 úhelníků, 18 vodicích trubek a centrální trubky. Dále ze 12 distančních mřížek, 3 mísících mřížek, patice, opěrného uzlu a hlavice. Spodní část neboli patice obsahuje také debris filtr popsany výše.

Odlišností je počet a provedení mřížek. Nový typ palivového souboru neobsahuje kombinované distanční mřížky, ale samostatné distanční mřížky, kterých je o 4 více a jsou rovnoměrně rozmístěné po výšce palivového souboru. Hlavní úpravou prošly mísící mřížky. Nejenom, že jejich počet byl snížen, ale jejich lopatky byly předělány. Lopatky neboli deflektory jsou nyní ohnuty pod jiným úhlem než původní typ souboru a umístěny tak, že generují proud, který proudí zleva doprava napříč mezi palivovými proutky. Toto konstrukční uspořádání lopatek mísící mřížky je označováno jako „row-through“. Mísící mřížky se nacházejí v horní části mezi distančními mřížkami. Změna mísících mřížek proběhla z důvodu optimalizace za účelem zvýšit účinnost těchto mřížek. Výsledky provedených výzkumů ukázaly, že nový typ mísící mřížky „row-through“ je efektivnější z hlediska odvodu tepla z palivových proutků do chladiva, než stávající typ „swirling“ [12]. Na obrázku 7 je zobrazena konstrukce nového palivového souboru TVSA-T mod. 2.



Obrázek 7: Palivový soubor TVSA-T mod.2 [12]

2.4 Mřížky

Práce se zabývá funkcí mísících mřížek jako činitele generování specifického proudu v kanále. Úlohou práce je vyšetření proudového pole za mísícími mřížkami v různých vzdálenostech a verifikovat udávaný charakter proudění za mřížkami.

Mísící mřížka z palivového souboru TVSA-T typu mod. 1 má pro všechny lopatky shodnou geometrii ohybu. Poloha lopatek udává charakteristický proud vznikající za mřížkou. Lopatky vytvářející rotující proud kolem palivového proutku jsou na vybraných pozicích. Kolem těchto středů vzniká otáčející se proud, který rotuje kolem palivového článku a mezi okolními šesti palivovými proutky, viz obrázek 8 vlevo.



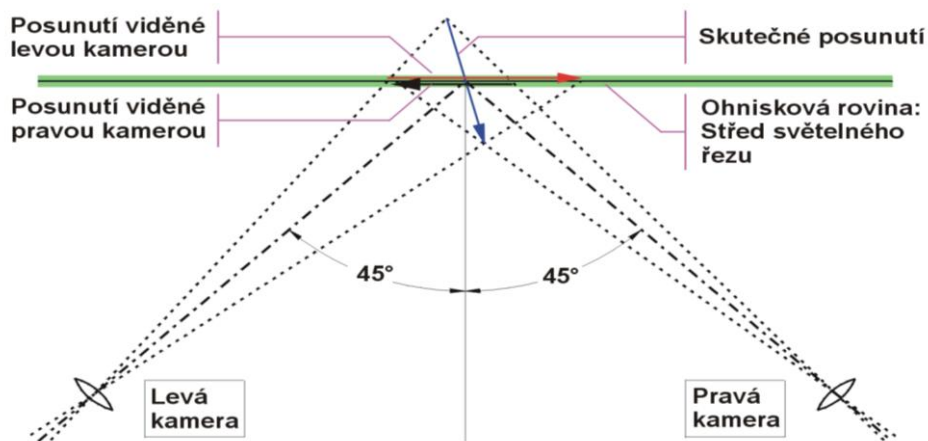
Obrázek 8: Umístění lopatek - vlevo mod.1, vpravo mod.2

Mísící mřížka typu mod. 2 vychází z předchozího typu. Mřížka má pozměněnou geometrii ohybu lopatek, dále jejich polohu a počet. Nově umístěné lopatky nevytváří rotující proud kolem jednoho palivového proutku, ale vytváří proud směřující k vedlejšímu proutku, viz obrázek 8 vpravo. I přes zmenšení úhlu ohybu a počtu lopatek, došlo ke zlepšení termohydraulických charakteristik. Hlavní výhodou mísící mřížky typu mod. 2 je, že chladivo za mřížkou proudí mezi řadami proutků a přispívá ke zvýšení přestupu tepla v místech na krajích palivových souborů.

3 Experimentální metoda stereo PIV

Název experimentální metody PIV je tvořen počátečními slovy Particle Image Velocimetry. Metoda PIV je druhem laserové anemometrie. Jedná se o bezkontaktní (nedestruktivní) metodu pro měření rychlostního pole v proudící tekutině v definované rovině měřeného prostoru. Měřicí aparatura zaznamenává vývoj v čase. Pomocí výkonné techniky jsou následně zaznamenaná data vyhodnocena. Princip metody PIV spočívá v zaznamenání polohy částic unášených proudem tekutiny, které jsou před měřením do tekutiny přimíchány. Částice svým tvarem a hmotností přesně kopírují měřený proud tekutiny. Výsledkem vyhodnocení záznamů poloh částic jsou vzdálenosti posunu částic. Rychlost proudu je pak dána vzdáleností, kterou částice urazí za definovaný časový úsek. Výsledek je prezentován ve formě 2D obrazu tvořeného polem vektorů. Standardní metoda PIV používá k záznamu jednu CCD nebo CMOS kameru a pulzní laser. Metoda PIV neurčuje rychlost sledováním jednotlivých zaznamenaných částic, ale využívá vzájemné korelace k určení nejpravděpodobnějšího posunutí v každé vyšetřované „interrogation area“. Podrobný popis celé metody PIV byl proveden v předchozí bakalářské práci [13].

Metoda stereo PIV vychází ze standardní PIV metody. Měřicí aparatura je shodná, jen obsahuje o jednu kameru více. Tato změna umožňuje zachytit všechny tři složky rychlosti ležící v rovině laserového řezu. Obě kamery snímají proudové pole, ale každá je umístěna pod jiným úhlem, viz obrázek 9. Výsledek je prezentován ve formě 3D vektorové mapy.



Obrázek 9 Schéma uspořádání kamer metody stereo PIV. [13]

Použití druhé kamery nese řadu obtíží spojených především se správným nastavením poloh kamer a objektivů vzhledem k měřené rovině proudového pole. Dále objektová rovina musí být zaostřena v celé obrazové rovině kamery. Technickým řešením je naklonění roviny CCD senzoru kamery vzhledem k rovině objektivu kamery, poté se všechny tři roviny protínají v jedné přímce v měřené rovině. Následně je nutné provést kalibraci. Popis nastavení měřicí aparatury před měřením a celé kalibrace je uveden v kapitole 5.

4 Experimentální zařízení

Pro zmapování rychlostního pole tekutiny za překážkou v kanálu pomocí předem stanovené experimentální metody je nutné mít vhodné zařízení, které splňuje veškeré předem stanovené parametry. V tomto případě je nezbytné, aby experimentální zařízení bylo vhodně navrženo nejen pro parametry úlohy, ale i pro podmínky kladené experimentální metodou.

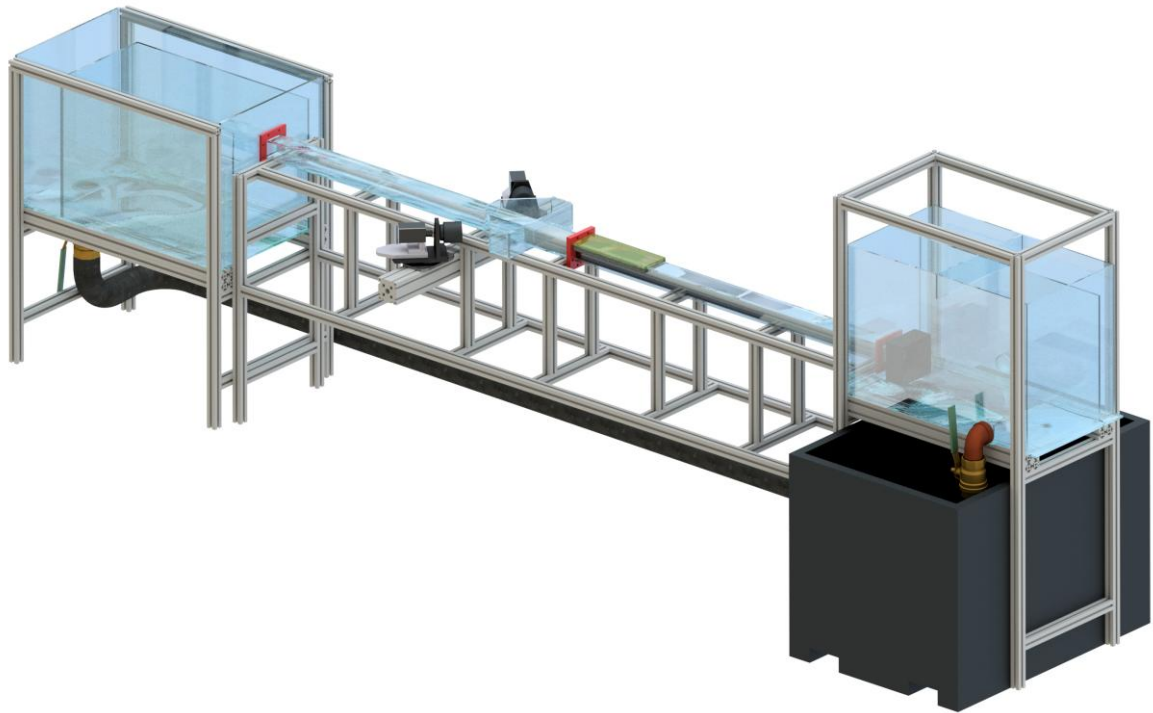
Úkolem tedy bylo, navrhnout experimentální zařízení, které splňuje všechny zadané požadavky. Experiment a především samotná výroba experimentálního zařízení je z ekonomického hlediska velmi nákladná. Pokud chceme očekávat kvalitní výsledek ve formě výstupních výsledků z měření, tak musí být kvalitně a promyšleně proveden samotný návrh celého zařízení. [13]

4.1 Návrh experimentálního zařízení

V této kapitole je popsán celý proces návrhu experimentálního zařízení a jednotlivých technických řešení. Experimentální zařízení muselo splňovat všechny zadané požadavky. Základní požadavek vyplýval ze zadání úlohy. Druhý požadavek vyplýval z metody stereo PIV. Mimo to byl kladen důraz na budoucí využitelnost zařízení. [13]

Při návrhu bylo využíváno zkušeností získaných při návrhu, vlastní realizaci experimentálního zařízení a měření vztahujícího se k bakalářské práci. Díky těmto zkušenostem nebylo nutné provádět několik návrhů. Byl vypracován jeden návrh experimentálního zařízení. Z původního zařízení zůstala zachována při tvorbě nového návrhu koncepce celé konstrukce a uspořádání jednotlivých komponent. Tato koncepce se u minulého zařízení osvědčila, z čehož plynou i výsledky z měření.

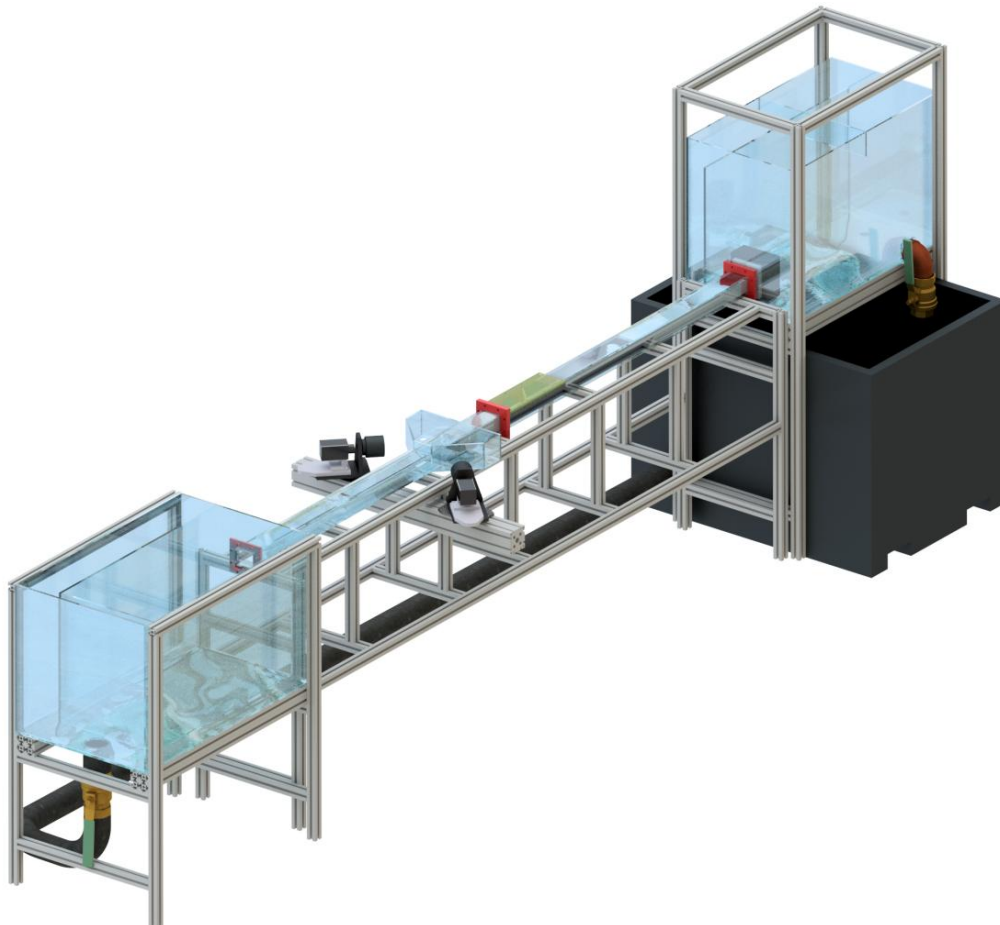
Hlavní důvod návrhu nového experimentálního zařízení plyne ze zadání úlohy. Stávající zařízení neumožňuje generovat v požadovaném měřicím kanále tak vysoké hodnoty průtoku. To je způsobeno především objemem všech tří nádob, které tvoří podstatnou část zařízení. Nový návrh musí tedy splnit podmínku vyšší hodnoty průtoku v měřicím kanále. Zadaná vyšší hodnota průtoku má přímý dopad nejen na objem nádob, ale také na čerpadlo, způsob měření rychlosti v měřicím kanále a regulaci rychlosti v kanále. Dále bylo při návrhu nutné brát v úvahu odlišnou měřicí experimentální metodu stereo PIV. To se týká především měřené oblasti v měřicím kanále a konstrukce upevnění dvou kamer. V neposlední řadě bylo nutné se vyvarovat všem drobným nedostatkům, které byly odhaleny u minulého experimentálního zařízení až v průběhu uvádění do provozu a měření. Jednalo se například o časově náročné vypouštění vody ze všech nádrží, obtížné nastavení průtoku měřicím kanálem, nepřesné měření teploty vody, opticky nevhodně navržený měřicí prostor, netěsnosti, úniky vody, nedostatečný výkon a přehřívání čerpadla. Všechny získané cenné zkušenosti s tvorbou návrhů, výrobou, montáží a následným měřením celkově zkrátily dobu návrhu. Především byla zvýšena výsledná kvalita a technická úroveň celého návrhu. Na následujícím obrázku číslo 10, 11 je výsledný návrh experimentálního zařízení.



Obrázek 10: Návrh experimentálního zařízení

Experimentální zařízení tvoří propojená sestava tří nádrží. Nádrže jsou zakomponovány do konstrukce z hliníkových profilů. Tento osvědčený koncept byl zachován. Zaprvé, horní nádrž a koncová nádrž svou konstrukcí vložené přepadové příčky udržují konstantní výšky hladin. Poté rozdíl hladin mezi horní a zadní nádrží vytváří hydrostatický tlak a tedy tok média kanálem, který spojuje obě nádrže. Zadruhé, konstantní rozdíl hladin zaručuje, že generované proudění v měřicím kanále je ustálené a stacionární. Poslední výhodou této koncepce je využití přepadové příčky v koncové nádobě k rozdělení nádrže na dva objemy. Objem za přepadem je využit pro měřicí metodu rychlosti v měřicím kanále. Třetí nádrž se nachází na nejnižším místě celého zařízení. Nádrž je označována jako hlavní nádrž a slouží k akumulaci veškeré kapaliny nacházející se v celém zařízení. V hlavní nádrži je umístěno ponorné čerpadlo. Nominální průtok čerpadla je vyšší než požadovaný průtok měřicím kanálem. Čerpadlo svou prací čerpá kapalinu z hlavní nádrže do horní nádrže. Množství čerpané kapaliny do horní nádoby je regulováno speciálním kulovým ventilem Ivar.TopBall 6/4". Pro odlehčení čerpadla při režimu velkého škrcení byl v návrhu zakomponován bypass. Kapalina dopravená do horní nádoby může měřicím kanálem proudit do koncové nádoby, kde se přes přepad vrací samospádem potrubím zpět do hlavní nádrže. Nebo přepadá přes přepadovou příčku umístěnou v horní nádobě zpět do hlavní nádoby. Jak je vidět z obrázku výše, horní nádrž je umístěna nad hlavní nádrží. Měřicí kanál, který spojuje horní a zadní nádrž, byl navržen, aby splnil požadavky zadané nejen měřicí úlohou, ale také požadavky kladené experimentální metodou stereo PIV. Celý kanál byl navržen z transparentních desek plexiskla spojených lepeným spojem. Kanál se skládá ze dvou stejně dlouhých částí. Obě části kanálu mají na koncích příruby umožňující připojení k nádobám pomocí šroubových spojů. První část kanálu má na konci vytvořený vstup do kanálu pomocí dělitelné horní části. Toto bylo navrženo pro snadné vkládání předmětů do kanálu v podobě měřené překážky. Pro vyšší budoucí využitelnost a také pro snadnou kalibraci experimentální metody stereo PIV použité před měřením byl do návrhu zakomponován vložený nerezový kanál. Tento kanál navržený z tenkého

nerozového plechu svými rozměry kopíruje vnitřní plochu měřicího kanálu z plexiskla, čímž je možné s velmi malou vůlí tento kanál zasunout do vstupní části měřicího kanálu. Vložený nerezový kanál je navržen pro snadnou, plynulou a přesnou změnu polohy měřené překážky. Překážka by dle návrhu měla být umístěná na jeho opačný konec od vstupu. Pro splnění optických požadavků kladených měřicí metodou stereo PIV bylo navrženo akvárium umístěné kolem měřicího kanálu v místě měření. Pro přesnou regulaci rychlosti v měřicím kanálu bylo navrženo šoupě obdélníkového tvaru umístěné na výstupu z kanálu do koncové nádrže. V následující části jsou popsány jednotlivé komponenty celé měřicí tratě.

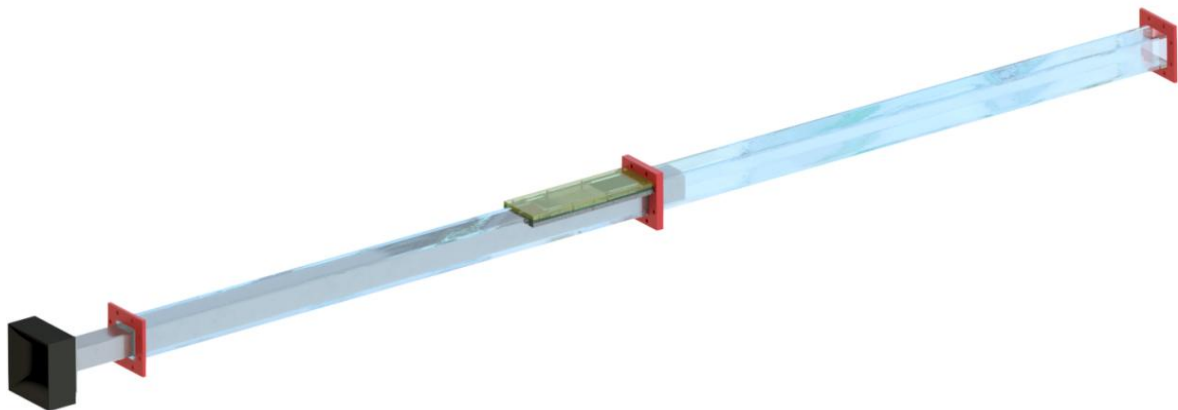


Obrázek 11: Návrh experimentálního zařízení

4.1.1 Měřicí kanál

Jako první rozměry byly stanoveny vnitřní rozměry měřicího kanálu. Rozměry byly stanoveny podle vnějších rozměrů vloženého nerezového kanálu s distanční mřížkou. Návrh distanční mřížky je popsán v kapitole (4.2). Ze stanovených rozměrů distanční mřížky byl nejprve navržen nerezový kanál. Při návrhu byl brán v potaz také způsob výroby a dostupná tloušťka nerezového plechu. Nerezový plech byl zvolen z důvodu vysoké odolnosti vůči vodě a vyšší pevnosti. Nejmenší dostupná tloušťka v požadovaném rozměru tabule na trhu byla 0,4 mm. Z hlediska výroby byl kanál navržen ze dvou částí. První část měla tvar písmene „C“ a druhou část při návrhu tvořil pásek, který měl být přilepen pomocí speciálního sekundového lepidla na krátké konce první části kanálu. Délka nerezového vloženého kanálu určuje vstupní délku, která by měla zajistit usměrnění

proudu od vstupu do kanálu až k měřenému místu, které je za výstupem z nerezového kanálu. Zkušenosti z experimentální praxe hovoří o minimální vstupní délce $40 \times Dh$ a pro výstupní délku je to hodnota $20 \times Dh$. Délka nerezového kanálu byla stanovena s ohledem na zmíněnou podmínku a z výsledků získaných v bakalářské práci na hodnotu 1800 mm. Výstupní délka kanálu byla stanovena stejným způsobem na hodnotu 1200 mm. V konstrukčním uspořádání sestavy kanálů je to nejmenší výstupní délka kanálu v případě, kdy je nerezový kanál zcela zasunutý. Celková délka spojeného vnějšího transparentního kanálu byla stanovena na hodnotu 3000 mm. Tento návrh surného kanálu byl zvolen především z důvodu zadání úlohy, kdy bude nutné plynule a přesně posouvat s distanční mřížkou o různé hodnoty v rozmezí minimálně 300 mm. Jednou z výhod bylo zachování konstantní vstupní délky kanálu pro jakoukoli polohu distanční mřížky. Nevýhoda vloženého kanálu je v omezení průtočného průřezu. Vliv tohoto omezení byl v návrhu snížen použitím velmi slabého plechu, jehož tloušťka činí pouze 0,4 mm. Návrh vnějšího kanálu byl z důvodu výroby rozdělen na dvě stejně dlouhé části. Obě části mají na koncích příruby, jejichž funkcí je kanály mezi sebou spojit a připojit k nádržím. Každá příruba má dva přesné otvory pro vystředění kanálů čepem a 6 průchozích děr pro šroubový spoj. Transparentní plexisklo bylo použito z důvodu optických požadavků metody stereo PIV. Ze zkušeností z předchozího měření byl kanál navržen z jednotlivých pásků spojených lepeným spojem tak, aby laserové paprsky byly co nejméně rozptýleny do roviny kamer. Transparentní kanál má také nespornou výhodu ve vizuální kontrole měřené oblasti při měření. Myšlenka snadného vstupu do kanálu shora byla ve finální podobě návrhu první části vnějšího kanálu zachována. Jedná se o obdélníkový vstup v horní části na konci první části transparentního kanálu v podobě vyjímatelné obdélníkové desky, která je na stranách upevněna deseti šroubovými spoji s křídlovými maticemi pro snadnou montáž a demontáž. Pro utěsnění všech spojů bylo navrženo gumové těsnění.



Obrázek 12: Sestava kanálů a usměrňujícího prvku

S návrhem měřicího kanálu byl současně stanoven průtok vody kanálem pro nejvyšší hodnotu Reynoldsova čísla dle zadání úlohy. Ze vztahu byla vyjádřena střední rychlost

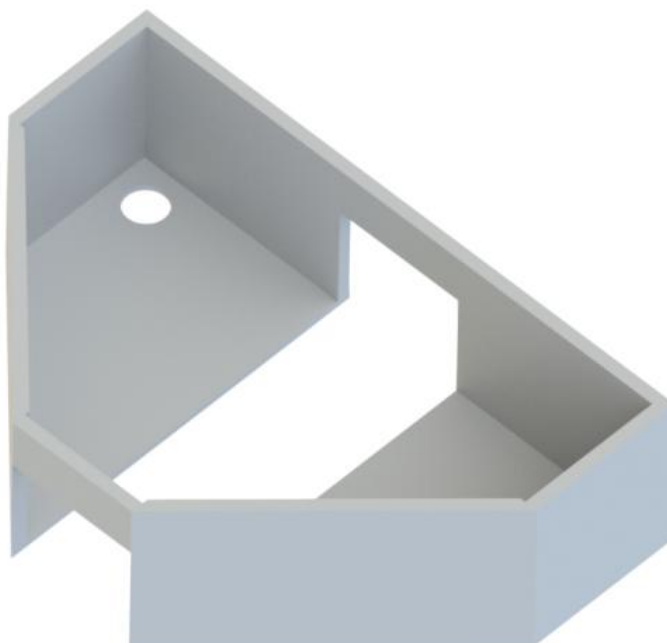
$$Re = \frac{w_s \cdot Dh}{\nu} \rightarrow w_s = \frac{Re \cdot \nu}{Dh} \quad (4.1.1-1)$$

$$Qv = A \cdot w_s \quad (4.1.1-2)$$

Z rychlosti bylo vypočteno průtočné množství pro představu o potřebě kapaliny. Tento údaj byl velmi důležitý pro představu o naddimenzování objemů nádrží a výkonu čerpadla.

4.1.2 Měřicí prostor

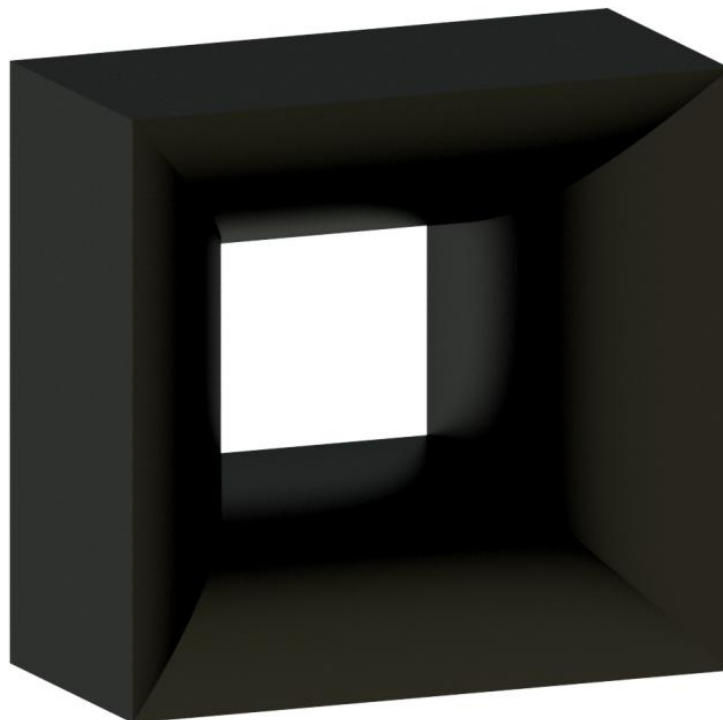
Při návrhu měřicího prostoru bylo důležité splnit podmínky kladené experimentální metodou stereo PIV. Tato metoda používá pro měření dvě kamery, které mezi sebou svírají úhel 90° a jsou umístěné podél kanálu. Objektiv kamery není kolmý k rovině kanálu. Pro zajištění optických vlastností byl navržen speciální prvek. Tento prvek svým tvarem umožňuje, že osa objektivu je vůči ploše kanálu kolmá a nedochází k optickému zkreslení. Návrh speciálního prvku byl pojmenován jako korekční nádoba. Návrh samostatné konstrukce je z důvodu možného posuvu po měřicím kanále. Korekční nádoba je nasunutá shora na měřicí kanál v místě měření. Návrh počítá, že tato nádoba bude vyrobená z transparentního plexiskla a spoj mezi kanálem bude zatěsněn silikonem. Prostor uvnitř bude posléze zaplněn destilovanou vodou. Kapalina slouží jako výplň prázdného prostoru a zajišťuje vhodné optické vlastnosti pro měření metodou stereo PIV. K snadnému vypouštění destilované vody slouží dva kulové ventily umístěné na spodních plochách. Navržený model korekční nádoby je zobrazen na obrázku 13.



Obrázek 13: Korekční nádoba

4.1.3 Usměrnující prvek

Pro zlepšení vtoku na začátku nerezového kanálu byl navržen usměrnující prvek. Prvek má tvar lemniskáty a přímo navazuje na nerezový kanál. Usměrnující prvek je připevněn čtyřmi šrouby k přírubě, která je umístěna na nerezovém kanále. Tvar součásti je složitý pro strojní výrobu třískovým obráběním. Návrh počítá, že usměrnující prvek bude vytisknut na 3D tiskárně z ABS plastu. Výsledný model usměrnujícího prvku se nachází na obrázku 14.



Obrázek 14: Usměrnující prvek

4.1.4 Nádrže

Při návrhu sestavy nádrží bylo vycházeno z maximálního průtoku vody kanálem daného ze zadání úlohy. Ze zkušeností z předchozího zařízení bylo nutné navrhnout zadní nádrž tak, aby část nádrže před přepadem byla schopná pojmout i větší průtoky vody proudící z kanálu a voda přetékala přes přepadové plochy rovnoměrně. Důležité bylo nejen, aby voda přetékala rovnoměrně, ale hlavně, aby nedocházelo ke změně konstantní výšky hladiny. To by negativně ovlivnilo rychlost vody v kanále a tím i kvalitu samotného měření. Zadní nádrž byla na základě těchto poznatků nejen zvětšena, ale také přibýly přepadové plochy. Objem části před přepadem se zvýšil dvakrát na hodnotu 200 litrů. Hlavní změnou v konstrukci bylo vložení dalších dvou přepadových příček. Toto uspořádání je vidět na obrázku níže. Druhá část nádrže slouží pro metodu měření průtoku. Popis této metody je v kapitole (4.1.9). Objem druhé části nádrže byl také navýšen, a to z důvodu větší přesnosti při odečítání výšky hladiny především pro vysoké průtoky kanálem. Pro snadné vypouštění vody ze vstupního prostoru zadní nádrže byl v návrhu zakomponován kulový ventil napojený hadicí na výstup ze zadní nádrže. Na výstupu ze zadní nádrže byl v návrhu umístěn velký kulový ventil, který slouží pro metodu měření průtoku. Návrh zadní nádrže umístěné v rámu je vidět na obrázku 15.



Obrázek 15: Návrh konstrukce rámu a zadní nádrže

Horní nádrž byla koncepčně zachována, jen vnitřní objem byl dvakrát navýšen na hodnotu 170 litrů. Pozměněn byl výstup z nádrže. Kanál je přímo napojen na horní nádrž ve spodní části boční stěny. Tato změna by měla přispět ke zlepšení a usměrnění proudu na kratší vzdálenosti od vstupu do kanálu. Horní nádoba byla také navržena z transparentního plexiskla. Ve finální tvorbě sestavy návrhu celého zařízení bylo zjištěno, že nastal problém se zasunutím nerezového kanálu do transparentního kanálu. V horní nádrži byl vytvořen na protější straně obdélníkový otvor pro snadné zasunutí dlouhého kanálu. Na otvor byla navržena obdélníková záslepka, která je v návrhu zafixována šesti šrouby a utěsněna gumovým těsněním. Do návrhu horní nádrže přibyl držák pro sondu měření teploty.

Hlavní nádrž se oproti předchozímu zařízení liší nejvíce. Díky zvětšení objemů horní a zadní nádrže bylo nutné patřičně naddimenzovat i hlavní nádrž. Hlavní nádrž musí sloužit k akumulaci veškeré vody v okruhu a také k rozmíchání sytících částic, které slouží pro měření experimentální metodou stereo PIV. Navržení nádrže z plexiskla o požadovaném objemu by bylo velmi nákladné, a proto je pro návrh zamýšleno použití průmyslově vyráběné nádrže z PVC o objemu 1 100 litrů. Nádrž byla vybrána podle objemu a podle rozměrů tak, aby bylo možné ji zakomponovat do konstrukce zařízení. Zvolené hlavní čerpadlo ponorného typu bylo umístěno do hlavní nádrže. Novinkou bylo přidání druhého čerpadla sloužícího pro vypouštění vody z okruhu. Umístění vypouštěcího čerpadla bylo zvoleno na nejnižší část, tedy na podlahu laboratoře vedle hlavní nádrže. Čerpadlo je k hlavní nádrži napojeno přes hadici a kulový vypouštěcí ventil umístěný na spodní části nádrže.

4.1.5 Regulace průtoku kapaliny kanálem

Původně použitý speciální regulační kulový ventil Ivar.TopBall 6/4" umístěný na výstupu z transparentní trubice kruhového průřezu byl pro tento účel nevyhovující. Především byl změněn tvar kanálu z kruhového průřezu na obdélníkový, dále ze zkušeností s obtížnou regulací průtoku pomocí tohoto ventilu. Pro regulaci průtoku kapaliny v kanále bylo navrženo šoupě. Regulace průtoku kanálem závisí na poloze šoupěte v průtočné části.

Šoupě bylo v návrhu umístěno na vstup do zadní nádrže. Konstrukce tohoto regulačního prvku byla navržena velmi jednoduše. Regulační prvek se skládá ze speciální příruby z plexiskla přišroubované na vstup do zadní nádrže spolu s přírubou na výstupu z transparentního kanálu. Šoupě bylo navrženo z desky plexiskla obdélníkového tvaru tak, aby šlo těsně zasunout do speciální příruby. Plynulá regulace polohy šoupěte byla navržena pomocí pohybového šroubu. Toto řešení regulace vyniká nízkými náklady na výrobu a současně plynulou regulací průtoku v kanálu.

4.1.6 Posuv nerezového kanálu

Ze zadání úlohy vyplývá naměřit více poloh měření pro různé průtočné rychlosti v kanále a pro dva druhy mísících mřížek. Z těchto důvodů bylo důležité navrhnout přesné pohybování nerezového kanálu v transparentním měřicím kanále i při změně mísící mřížky. Podobným způsobem, jako u pohybu regulačního šoupěte bylo použito pohybového šroubu. Tento šroub byl připevněn k táhlu vstupujícího do horní nádrže přírubou transparentního kanálu. Druhý konec táhla byl připojen k přírubě připevněné na začátku nerezového kanálu uvnitř horní nádrže. Táhlo procházející přírubou a stěnou horní nádoby bylo utěsněno hydraulickou manžetou.

4.1.7 Hlavní čerpadlo

Celému návrhu nejprve předcházelo určení průtoků ze zadaných hodnot Reynoldsova čísel. Z nejvyšších hodnot byla stanovena hodnota průtoku. Pro to, aby bylo měřicí zařízení schopné generovat stanovenou hodnotu průtoku, byla pro celý návrh konzervativně stanovena maximální hodnota průtoku. Tato maximální návrhová hodnota byla vyšší o 30 %. Navýšení bylo stanoveno z důvodu pokrytí všech hydraulických odporů a ztráty při škrcení. Podle toho bylo vybráno výkonné ponorné čerpadlo značky Grundfos typ Unilift AP50B. Maximální generovaný průtok čerpadlem je dle štítku výrobce 24 m³/h. Čerpadlo je jednofázového provedení.

4.1.8 Konstrukce zařízení

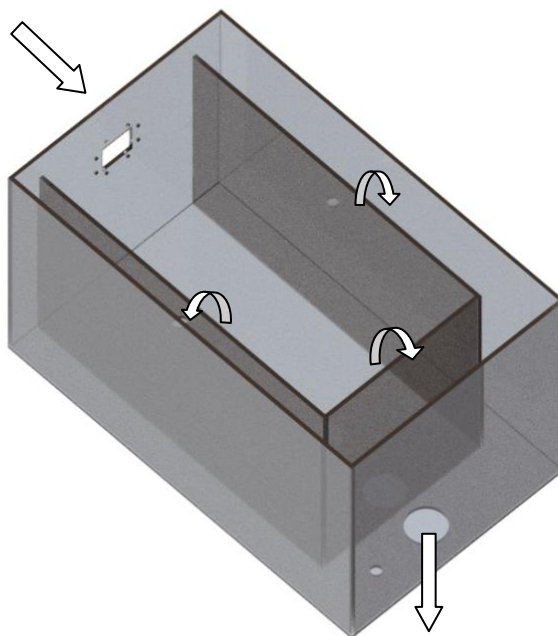
Celá konstrukce zařízení byla navržena z hliníkových profilů o rozměru 40x40 mm s šířkou drážky 8 mm. Délka celé konstrukce činí 4 860 mm, šířka je 1 000 mm a výška je 1 750 mm. Tuhost konstrukce v místě kanálu byla zvýšena přidáním většího počtu příček.

4.1.9 Měření objemového průtoku v kanálu

Měření průtoku kapaliny v kanále je velmi obtížné. Existuje několik metod a měřicích zařízení pro měření průtoku. Většina z nich je velmi finančně nákladná a všechny nelze použít pro tento konkrétní případ. Významnou zkušeností z minulého měření bylo použití speciální „kýblové“ metody pro měření průtoku kanálem. Hodnoty průtoku změřené „kýblovou“ metodou byly téměř shodné s výsledky získaných experimentální metodou PIV a byly ověřeny výsledky z numerické simulace. Tato metoda je navíc velmi jednoduchá a oproti ostatním finančně dostupná. [13]

„Kýblová“ metoda spočívá v měření objemu kapaliny, která přiteče do nádoby z měřicího kanálu za časový úsek. Jestliže je znám průtočný průřez kanálu, lze snadno vypočítat průměrnou rychlost kapaliny v kanále. Pro tuto metodu byla navržena speciální (koncová) nádrž popsána výše. Velký kulový ventil umístěný na výstupu z přepadové části nádoby

a napojený na vratné potrubí slouží pro uzavření výstupu z nádrže. Nejprve je kulový ventil nastaven do polohy zavřeno. V přepadové části zadní nádrže začne stoupat hladina. Když hladina stoupne na nulovou hodnotu na rysce číselné stupnice umístěné na straně nádrže, tak je spuštěno měření času. Výška, do které za daný časový úsek kapalina vystoupá, udává po vynásobení plochy podstavy přepadové části zadní nádrže objem vyteklé kapaliny. Ihned po měření musí dojít k otevření kulového ventilu. Kapalina samospádem teče potrubím do hlavní nádrže. Schéma toku kapaliny je zobrazeno na obrázku 16.



Obrázek 16: Schéma toku kapaliny v zadní nádobě

4.1.10 Potrubní propojení

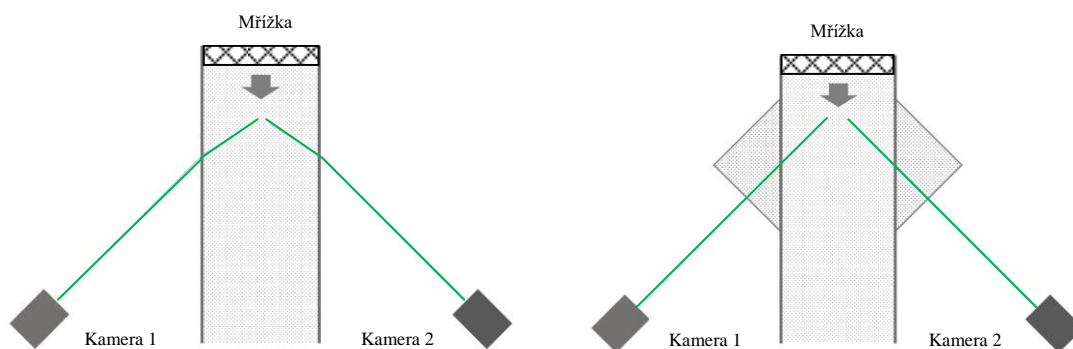
Propojení ponorného čerpadla s horní nádrží bylo provedeno pomocí tlakových hadic s vnitřním hladkým povrchem. Pro snížení ztráty škrcením byla zvolena hadice o průměru 50 mm. Celá potrubní trasa od čerpadla až do horní nádrže včetně bypassu byla navržena ve stejném průměru. Napojení hadice na horní nádobu bylo navrženo pomocí PVC-U průchodky, která se jednoduchou montáží prostrčí vstupním otvorem v horní nádobě a protikusem dotáhne. Tento typ průchodky byl použit i pro výstupní část horní nádoby a pro připojení kulového ventilu k výstupu ze zadní nádrže. Propojení zadní nádrže s hlavní nádrží bylo navrženo pomocí hadice o vnitřním průměru 75 mm.

CAD modely experimentálního zařízení a výrobní dokumentace jsou uloženy na příloženém CD.

4.2 Návrh a výroba mřížek pro experiment

4.2.1 Návrh modelů mřížek

Tématem (úkolem) této práce bylo fyzikálně vyšetřit proudové pole za mísící mřížkou z palivového souboru typu mod. 1 a mod. 2. Obě konstrukce mřížek mají tvar šestiúhelníku. Pro fyzikální vyšetření proudového pole byla zvolena experimentální metoda stereo PIV. Tato metoda bude popsána v kapitole 3. Důvodem použití zmíněné experimentální metody bylo navázat na dosavadní zkušenosti získané v předchozí bakalářské práci [13] se standardní metodou PIV. Tato optická metoda měření proudového pole v kanále má svá omezení. Jelikož se jedná o nedestruktivní metodu, která neovlivňuje vyšetřované proudové pole, musí být především dodrženy požadavky na optické vlastnosti měřeného prostoru. To znamená, že osy objektivů kamer by měly být umístěny kolmo k rovinné ploše měřicího prostoru (kanálu), viz obrázek 17. Pro šestihranný tvar mřížky by musel být vyroben speciální tvar měřicího transparentního prostoru. Takovýto speciální šestihranný kanál není možné vyrobit vzhledem k jeho požadovaným optickým parametrům a vzhledem k ekonomickému hledisku. Z tohoto důvodu byly obě mřížky upraveny tak, aby mohly být vloženy do kanálu obdélníkového průřezu, který je svým tvarem vhodný pro měření. Nutno podotknout, že vyšetřované mřížky nebudou obsahovat makety palivových proutků. Umístěním proutků do mřížky by nebylo možné použít pro měření zmíněnou experimentální metodu.

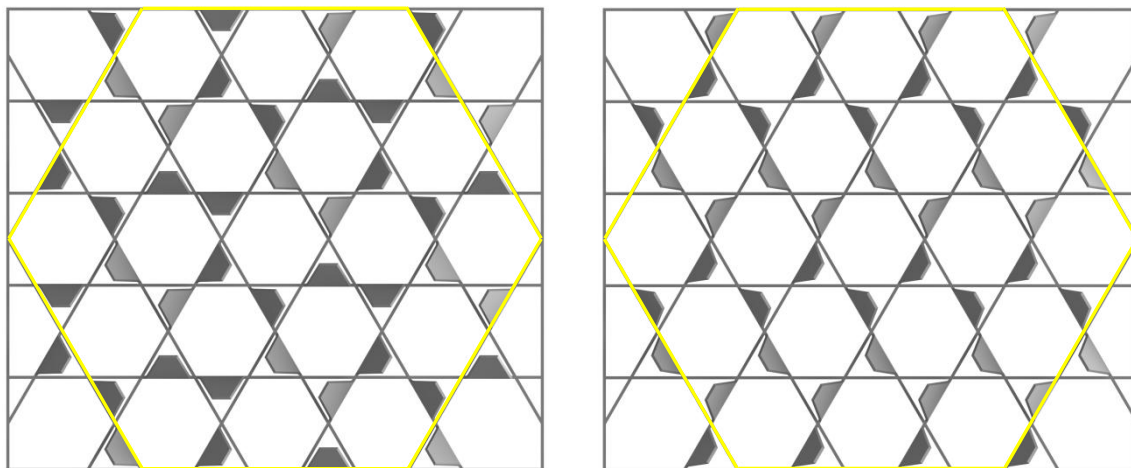


Obrázek 17: Vliv optických vlastností na měření

Mřížky byly upraveny rozšířením do obdélníkového tvaru se zachováním původních rozměrů. Tato úprava byla nutná z důvodu snížení nákladů na výrobu kanálu a především k dosažení co nejlepších výsledků při měření metodou stereo PIV. Úprava mřížek je graficky zobrazena na obrázku 18.

Na začátku návrhu mřížek byl pokus mřížky vytisknout na 3D tiskárně. Tato varianta byla sice snazší na výrobu a levnější, bohužel přesnost vytištěného povrchu a hlavně tuhost lopatek při zachování původních rozměrů byla nevyhovující.

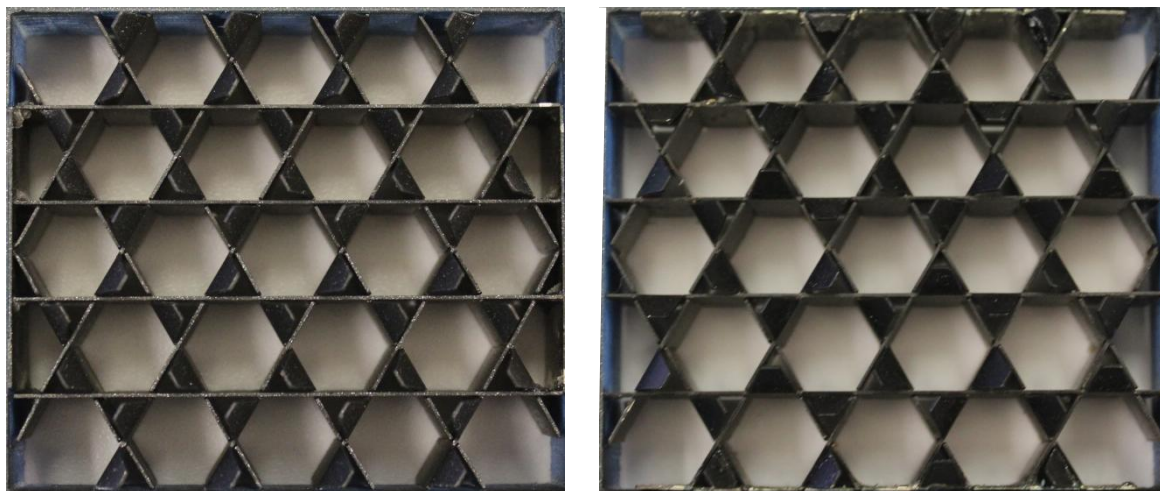
Návrh mřížek vycházel z původního konstrukčního řešení, kdy mřížky jsou sestaveny z jednotlivých plíšků zasazených do sebe. Toto konstrukční řešení bylo zvoleno nejen z důvodu vysoké pevnosti celé konstrukce mřížky, ale především z důvodu zachování co nejpodobnějšího tvaru skutečné mřížky. Tvorba konstrukčního návrhu byla velmi důležitá, neboť rozhodovala o výsledném sestavení jednotlivých vyrobených dílů a především o přesnosti celé mřížky.



Obrázek 18: Upravený tvar mřížek

4.2.2 Výroba modelů mřížek

Dle návrhu byly pomocí laserového paprsku vypáleny přesné tvary jednotlivých částí mřížek i s lopatky. Jako materiál byl použit nerezový plech o stejné tloušťce jako skutečné mřížky. Pro vytvoření ohybu lopatek byl vyroben přípravek. Přípravek zaručuje ohnutí každé lopatky pod shodným úhlem. Úhly ohybu lopatek se pro obě mřížky liší. Na závěr byly vypálené a očištěné plíšky s ohnutými lopatkami zasazeny navzájem do sebe, čímž vznikla mřížka. Obě mřížky jsou svými rozměry shodné, jen se liší lopatkami, viz obrázek 19.



Obrázek 19: Sestavené mřížky

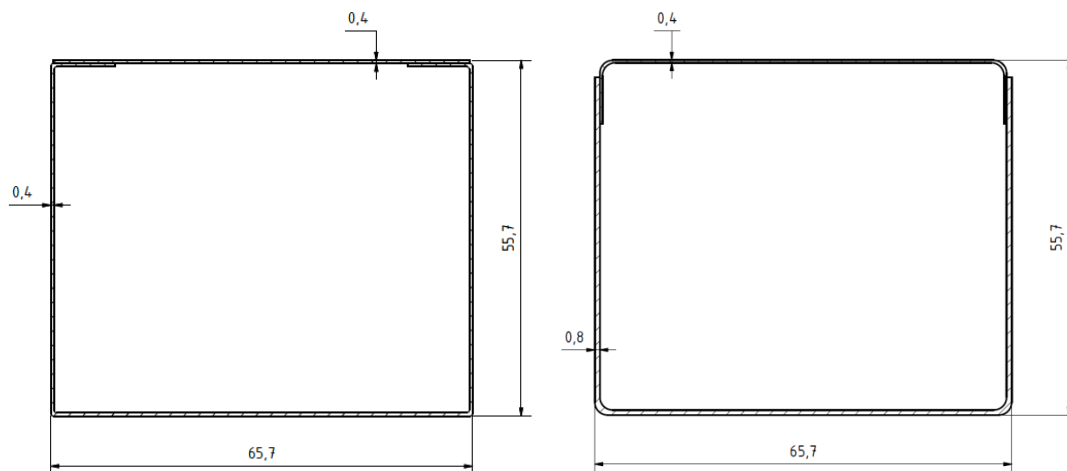
4.3 Konstrukce

Po vytvoření finální verze celého experimentálního zařízení a schválení návrhu začala tvorba výrobní dokumentace všech komponent. Celé zařízení bylo složeno z velkého počtu komponent. Proto byl vytvořen seznam komponent, plán výroby a plán montáže. Nejprve byly zpracovány výrobní výkresy a návodky pro komponenty z plexiskla, které byly přednostně zadány do výroby. Na základě dobrých zkušeností s výrobou komponent z plexiskla byla oslovena stejná firma. Poté následovalo zadání výroby nerezového kanálu. Dlouhou dobu trvalo hledání dodavatele materiálu pro výrobu mřížek. Vlastní zkušenosti získané při výrobě a kompletaci předchozího zařízení byly využity. Mezitím, co byly vyráběny komponenty z plexiskla a nerezový kanál, započaly práce s výrobou a sestavením rámu experimentálního zařízení. Pro tvorbu rámu byly použity hliníkové profily. Nejprve byly nařezány na požadované délky a poté byl celý rám smontován. Na rám byly přimontovány stavěcí prvky pro vyrovnání nerovností v laboratoři.

Po vyrovnání rámu v laboratoři byla umístěna hlavní nádrž. V hlavní nádrži bylo nutné vytvořit otvory pro připojení hadice z výstupu ze zadní nádrže a vypouštěcího kulového ventilu napojeného na vypouštěcí čerpadlo. Následně bylo do nádrže nainstalováno ponorné čerpadlo. Na rám v oblasti měření byl namontován přípravek pro upevnění kamer. Dodané nádrže vyrobené z transparentního plexiskla byly namontovány do konstrukce rámu. Horní nádrž byla připojena k sestavě ventilů od výtlaku čerpadla a bypassu. Na výstupu ze zadní nádrže byl nainstalován kulový ventil propojený hadicí s hlavní nádrží. V této době byla dodána sestava transparentního měřicího kanálu a také nerezový kanál. Nerezový kanál byl dodán neslepený a neodpovídal výrobním výkresům. Nejprve bylo nutné obě části kanálu spasovat k sobě a poté styčné plochy slepit speciálním sekundovým lepidlem. Sestava transparentního měřicího kanálu byla smontována a nainstalována na rám, kde byla nejprve šrouby připojena k horní nádrži. Zadní nádrž byla přisunuta ke konci kanálu. Přiložením speciální příruby pro regulační šoupě na vstupní vnitřní stěnu zadní nádrže byl spoj šrouby připojen a dotažen k přírubě kanálu.

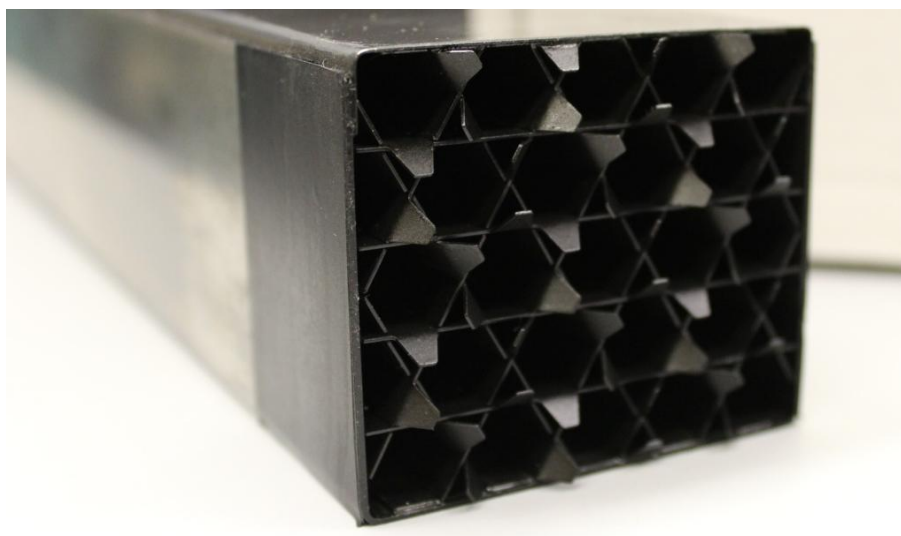
Slepený nerezový kanál byl zasunut do měřicího kanálu. Jen část horní nádrže byla naplněna vodou po výstup z kanálu, kde bylo zasunuto regulační šoupě. Malý lokální test netěsnosti měl sloužit pro zjištění netěsností ve spojích sestavy kanálu. Navržené gumové těsnění bylo dobře vyrobené a při testu nebyly zjištěny žádné úniky. Překvapením byla dokonalá těsnost zasunutého regulačního šoupěte. Po vypuštění vody bylo zjištěno, že slepený nerezový kanál se začal rozpadat. Tímto nastal značný problém. Kanál byl odvezen na specializované svářečské centrum. Pro záchranu kanálu nepomohla ani moderní metoda svařování elektronovým paprskem, ani svaření metodou TIG. Důvodem byl velmi slabý nerezový plech a špatná prvotní výroba. Z rad odborníků byla navržena nová konstrukce nerezového kanálu skládající se také ze dvou částí, viz obrázek níže. Ohýbání nového kanálu bylo prováděno na počítačem řízeném stroji. Výsledkem bylo dosažení velmi přesných rozměrů a úhlů shodných s návrhem kanálu. Pro dosažení požadovaných rozměrů kanálu i po slepení, byl smontován nový fixační přípravek. Obě části byly slepeny lepidlem Loctite SI 5960, a poté byly několik dní zafixovány pro dosažení pevnostních vlastností spoje. Tento problém výrazně prodloužil datum prvního spuštění a především samotné experimentální měření. Nový nerezový kanál byl velice přesný. Jeho zasunutí do měřicího kanálu kladno menší odpor, navíc nerezový kanál doléhal na všechny stěny vnějšího kanálu. Na nerezový kanál byla vodním paprskem zhotovena příruba. Příruba byla přimontována na vstupní část nerezového kanálu třemi

šrouby. Zasunutý kanál s přírubou byl připojen k táhlu procházející skrz horní nádobu. Usměrňující prvek na vstup nerezového kanálu byl vytištěn na 3D tiskárně KliKla 1.0.

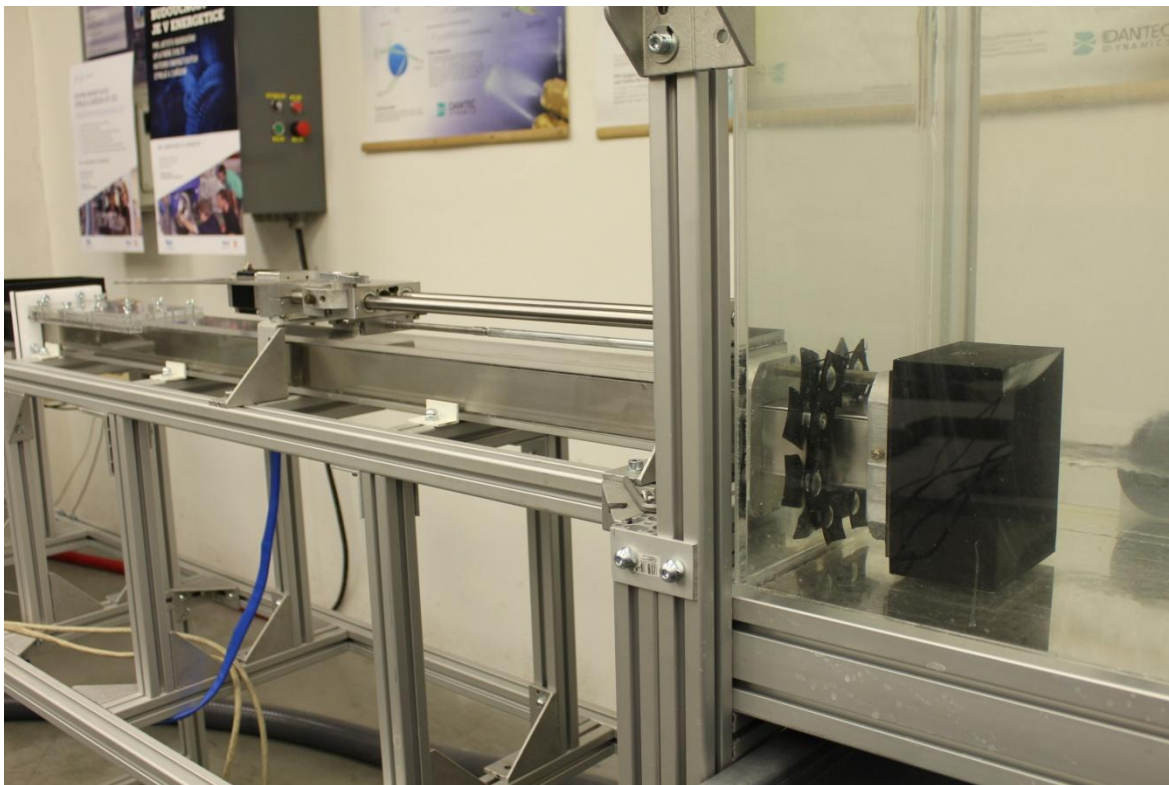


Obrázek 20: Vlevo první návrh nerezového kanálu, vpravo finální návrh kanálu

Posun nerezového kanálu byl v návrhu vyřešen použitím pohybového šroubu. Tento návrh byl při tvorbě konstrukce pozměněn náhradou mechanického pohybového šroubu za počítačem ovládané traverzové zařízení. Toto zařízení bylo umístěno nad měřicí kanál za vstupem z hlavní nádrže pomocí hliníkových profilů, viz obrázek 22. Posuvník traverzového zařízení byl přírubou připojen k táhlu, které se už od návrhu neliší. Krokový dvoufázový motor byl připojen k ovládací jednotce Microcon CD40x s kontrolorem M1486. Tato jednotka byla následně kabelem typu RS232 propojena s počítačem. Pro pohybování posuvníkem byl napsán vlastní program v prostředí Inmotion PC Utilities, verze 1.3. Změna polohy kanálu je ve vlastním programu dána zapsáním příkazu s počtem kroků, které má vykonat krokový motor. Ostatní parametry a příkazy jsou zachovány a nemění se. Pro vizuální kontrolu posunu bylo umístěno měřítko s milimetrovou stupnicí. Přesnost posuvu v řádech tisícín milimetru poskytuje možnost provést tímto postníkem kalibraci experimentální metodou stereo PIV. Hlavní zjištěnou výhodou byla velmi snadná, rychlá a přesná obsluha experimentálního zařízení z jednoho místa. Na obrázku 21 je vidět vyrobený nerezový kanál s vplenou mísící mřížkou mod. 1.

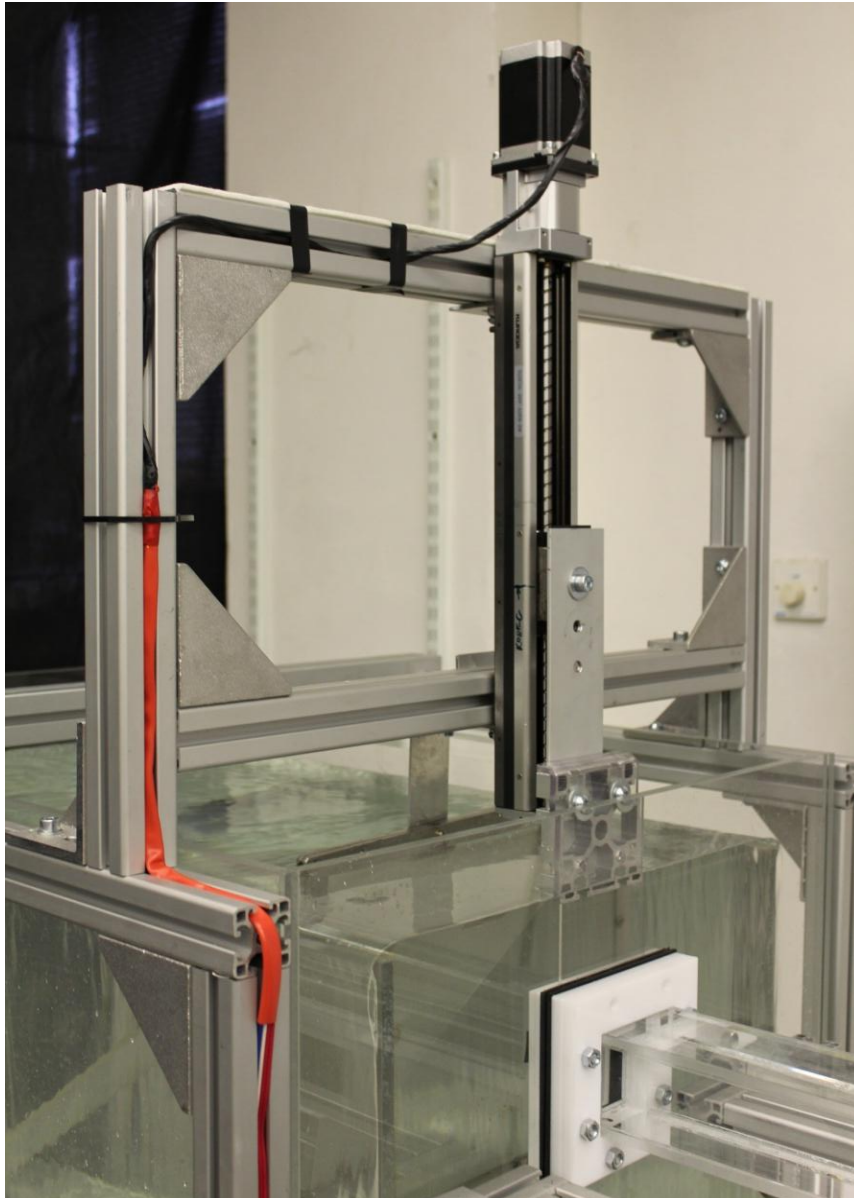


Obrázek 21: Vyrobený nerezový kanál s mřížkou mod.1



Obrázek 22: Konstrukce pro posuv nerezového kanálu

Z tohoto důvodu bylo traverzové zařízení nainstalováno také na ovládání regulačního šoupěte. Pro instalaci traverzového zařízení byla na rám zadní nádrže namontována konstrukce, viz obrázek 23. Odlišný typ traverzového zařízení, ale se stejným typem krokového motoru, byl připojen ke shodné ovládací jednotce Microcon CD40x s kontrolorem M1486 a ovládán shodným programem. Přesnost posuvu šoupěte byla shodná s přesností posuvu nerezového kanálu. Hlavní výhodou byla rychlá a přesná změna polohy v řádu sekund. Použitím elektronicky řízených posuvníků bylo nyní umožněno při měření ovládat polohu míchací mřížky a rychlost vody v kanále, snadno a rychle z jednoho místa.



Obrázek 23: Konstrukce pro posuv regulačního šoupěte

Měření teploty je zajištěno přístrojem Anritsu Meter Anritherm HL s měřicí sondou. Sonda byla zasunuta do držáku v horní nádobě. Měřicí zařízení bylo umístěno na rám vedle horní nádrže tak, aby hodnota zobrazená na displeji byla čitelná od stolu obsluhy měření. Umístění měřicího přístroje a sondy je vidět na obrázku 24.



Obrázek 24: Měřicí přístroj se sondou

Na závěr byla naplněna hlavní nádoba do 4/5 vodou. Pomocí čerpadla byla voda čerpána do horní nádrže, regulační šoupě bylo zasunuté. Voda přepadala přes přepad a samospádem se vracela do hlavní nádrže. Mezitím byly odzkoušeny dva kulové ventily mezi čerpadlem a horní nádrží. Následně byla ověřena funkčnost posuvu kanálu a regulačního šoupěte, čímž byla voda přepuštěna i do koncové nádrže. Zároveň byla sledována těsnost všech spojů. Závěrem bylo provedeno vyzkoušení měření průtoku „kýblovou“ metodou. Celé experimentální zařízení je vidět na obrázku 25.



Obrázek 25: Pohled na experimentální zařízení

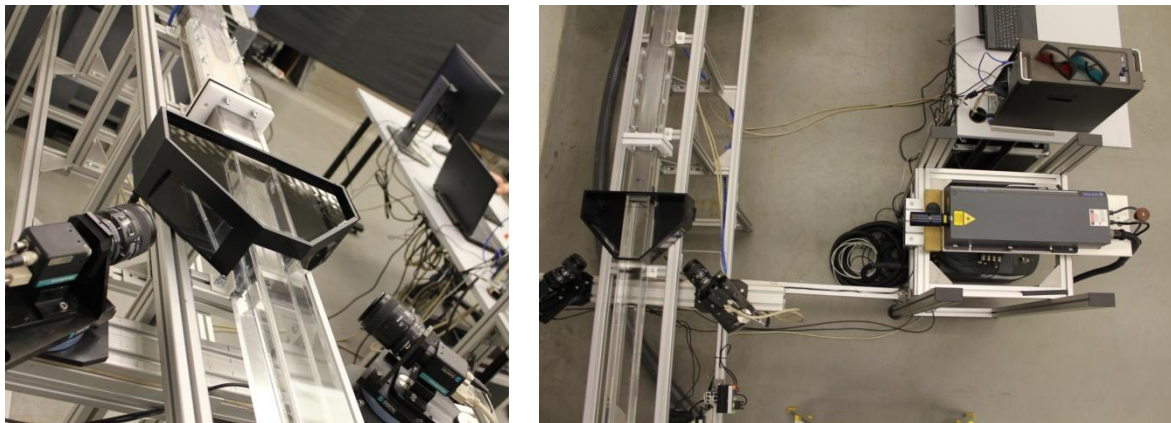
5 Měření

Po sestavení celé konstrukce, kompletaci všech komponent zařízení a následném otestování všech funkcí experimentálního zařízení byla umístěna na konec nerezového kanálu mísící mřížka pro provedení testu na zjištění skutečné maximální možné rychlosti, která může být v kanále dosažena. Při měření maximálního průtoku bylo zjištěno, že při plném otevření regulačního šoupěte bylo ponorné čerpadlo schopné s rezervou doplňovat horní nádrž bez poklesu konstantní hladiny v nádrži. Maximální průtok byl naměřen $6.2 \text{ dm}^3/\text{s}$. Během tohoto měření bylo zjištěno, že voda vstupující do horní nádoby způsobuje víření a poloha konstantní hladiny je tímto ovlivněna. Dále bylo zjištěno, že voda vystupující do koncové nádoby při velkém průtoku nepřepadá přes všechny přepadové příčky rovnoměrně. Víření na vstupu do horní nádoby bylo omezeno vložením usměrňujícího prvku, který byl vyroben z nerezového síta vloženého za vstupem. Tento prvek viditelně zklidnil vstupující proud vody do nádrže. Konstrukce zádní nádrže byla upravena vložením prvku, který výstupní proud vody směřuje ke spodní části nádoby. Tato úprava usměrnění výstupního proudu z kanálu zrovnoměnila přepad vody přes všechny tři plochy přepadu. Navíc bylo přidáno nerezové síto, které ještě přispělo k usměrnění proudu především při vyšších hodnotách průtoku.

Měřicí experimentální zařízení bylo komplexně vyzkoušené a zjištěné nedostatky odladěny. Poté následovala fáze nainstalování komponent měřicí aparatury stereo PIV popsané v následující kapitole.

5.1 Instalace měřicí aparatury

Sestavené a odladěné zařízení bylo připravené k instalaci všech komponent měřicí aparatury. Nejprve byl vyroben rám z hliníkových slitin pro umístění laserového zařízení. Rám byl podobné konstrukce používané dříve při měření, jen byl upraven pro stávající potřeby měření. Na rám byl připevněn laserový přístroj. Do rámu pod laser byl umístěn generátor laseru s chlazením v jedné skříně propojené speciálním vodičem. Vedle konstrukce s laserem byl umístěn pracovní stůl, na který byl umístěn hlavní počítač s monitorem a notebook pro ovládání posuvníků.



Obrázek 26: Vzájemné umístění kamer a laseru

V kapitole Návrhu byl popsán měřicí prostor. Tento prvek byl nasazen na transparentní měřicí kanál v místě měření. Ze zkušeností s odlesky světelného listu (generovaného laserem) do roviny kamery byl měřicí prostor zakryt matnou černou folií. Tato úprava

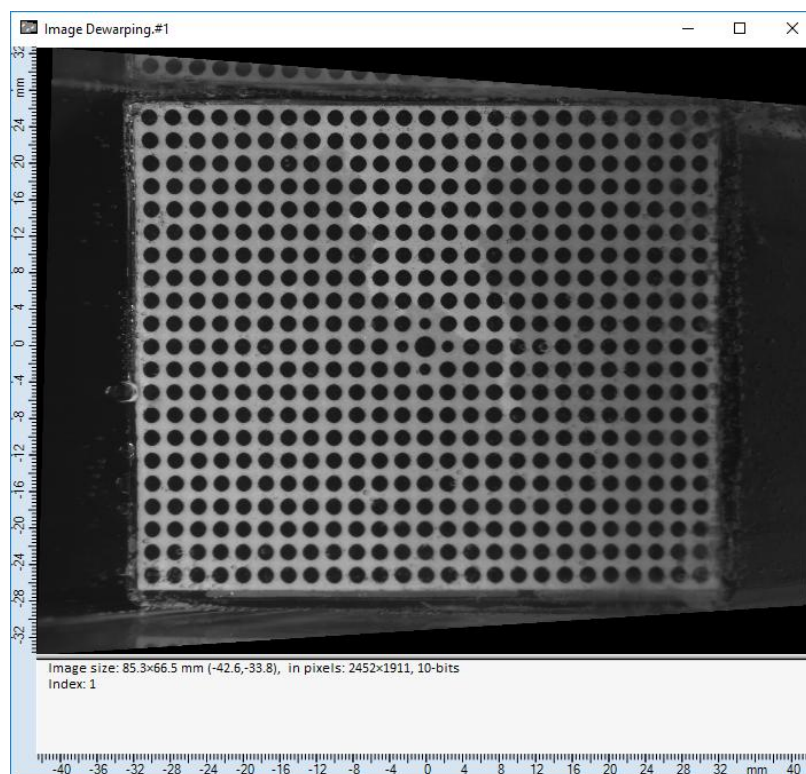
by měla následně při měření snížit odlesky a zvýšit kvalitu zaznamenaného obrazu. Upravený měřicí prostor byl kolem kanálu utěsněn silikonem a napuštěn destilovanou vodou. Kamery s objektivy připevněné na otočné přípravky byly nainstalovány na rám. Jejich vzdálenosti od měřicí roviny byly předem známy z přípravného měření. Všechny komponenty byly propojeny příslušnými vodiči.

Použité komponenty měřicí aparatury [13]

- Dvakrát kamera s CCD senzorem (FlowSense 4M), rozlišení 2048 x 2048 pixelů
- Dvakrát objektiv - Nikon AF Micro Nikkor 60mm f/2.8D
- Laserové zařízení - dvoudutinový Nd:YAG laser Solo - 200TX, 2 x 200 mJ, 15Hz

5.2 Kalibrace měřicí aparatury

Kalibrace měřicí aparatury byla provedena ve dvou fázích. V první byly nastaveny kamery a světelná rovina. Do kanálu byl vložen kalibrační terčik umístěný na konci hranolu, který byl připojen k posuvníku. Terčik byl zasunut do místa v měřicím kanálu, kde mělo následně probíhat měření. Laser byl nastaven podle kalibračního terčíku tak, že poloha roviny světelného řezu byla identická s rovinou terčíku. Následně byly nastaveny kamery zaostřením objektové roviny do celé obrazové roviny každé kamery. Druhá fáze kalibrace probíhala v systému *DynamicStudio*. K vyhodnocení byl použit kalibrační model „PinHole“ a standardní bodový terčik o výchozích rozměrech 100x100 s roztečí bodů 2,5 mm, viz obrázek 27. Terčik byl pro kalibraci upraven na rozměry kanálu a snímán v sedmi rovinách. První rovina byla ve vzdálenosti $z=0$ mm. Poté byl terčik posunut traverzovacím zařízením vždy o 0,5 mm pro tři roviny ve směru proudu. Stejným způsobem byl terčik posunut na opačnou stranu pro zbylé tři roviny.



Obrázek 27: Pohled na vložený kalibrační terčik v kanále

5.3 Nastavení rychlosti v kanálu

Nová konstrukce regulace průtoku v kanálu ovládaná přes PC umožňuje rychlé a snadné nastavení přesné polohy regulačního prvku, a tím i požadovaného průtoku. Předem bylo domluveno, že měření bude pro 4 rozdílné rychlosti. Kvůli zkrácení přípravy před každým měřením, byla zaznamenána poloha regulačního prvku pro každou rychlost. Měření rychlosti bylo prováděno pomocí „kýblové metody“.

Pomocí časového měřiče byla měřena doba, po kterou kapalina postupně plnila přepadový prostor zadní nádrže. Z naměřených hodnot byl vypočítán objemový průtok a následně stanovena střední hodnota rychlosti vztažena na průřez nerezového kanálu. Pro získání co nejpřesnější hodnoty rychlosti bylo provedeno několik desítek měření. Mezi nimiž byla nastavena optimální poloha regulačního prvku. Na závěr byla provedena měření času pomocí kamerového záznamu, ze kterého byla přesněji stanovena doba, za kterou hladina v zadní nádrži stoupne o 300 mm. Tento způsob stanovení času byl časově náročný, ale pomocí něj bylo možné nastavit přesnější polohu regulačního prvku pro požadovanou hodnotu rychlosti. Tabulka 2 zobrazuje výsledné hodnoty pro každou ze 4 rychlostí.

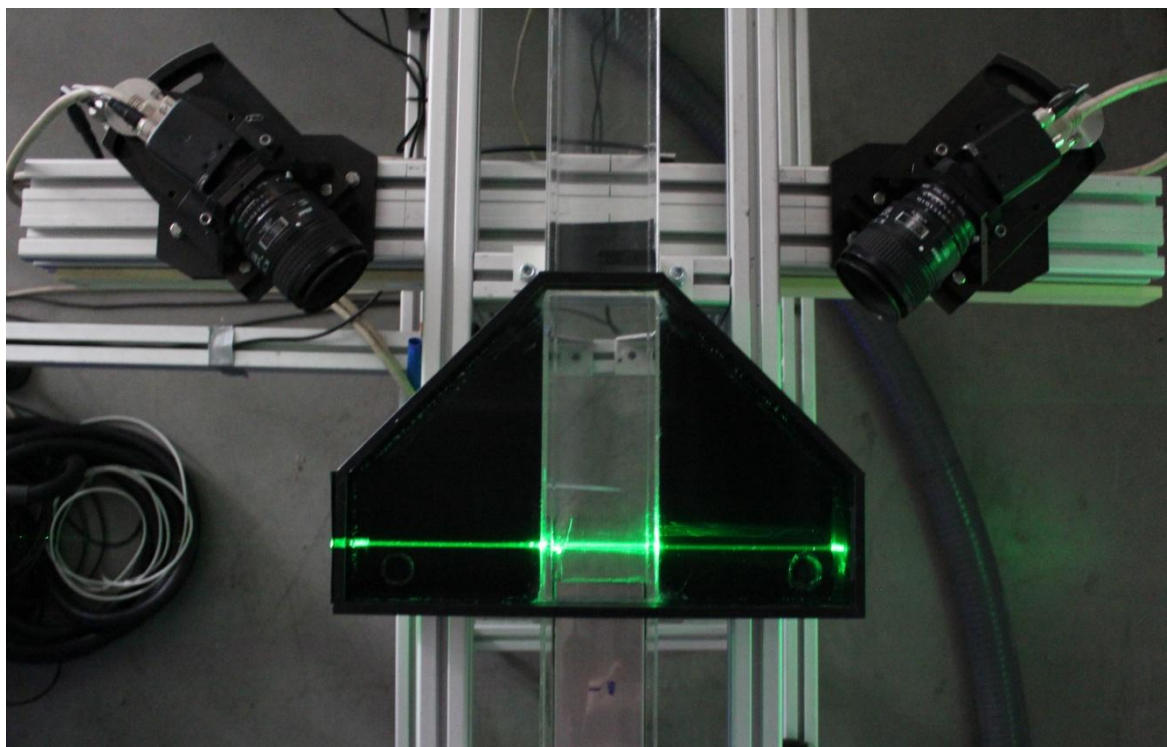
Tabulka 2: Výsledné hodnoty naměřené "kýblovou metodou"

	Teplota	Čas	Výška sloupce	Objem		Objemový průtok		Střední rychlost	Reynolds number
	[°C]	[s]	[mm]	[cm ³]	[dm ³]	[dm ³ /s]	[m ³ /s]	[m/s]	[-]
měření 1	24,1	29,2	300	61589,4	61,589	2,109	0,0021	0,601	39785
měření 2	24	21,8	300	61589,4	61,589	2,825	0,0028	0,805	52120
měření 3	24,2	17,5	300	61589,4	61,589	3,519	0,0035	1,003	64926
měření 4	24,8	14,6	300	61589,4	61,589	4,218	0,0042	1,202	79569

5.4 Experimentální měření

Před samotným měřením byla voda nasycena částicemi. Byly použity polyamidové částice PSP-20 o velikosti 20 μm od firmy Dantec. Částice byly nejprve rozmíchány v malém množství destilované vody smíchané se smáčedlem. Poté byl roztok rozmíchán v hlavní nádrži. Při sycení bylo zjištěno, že požadovaná hustota sytících částic odpovídá přibližně množství 1g na 1m³ kapaliny. Po nasycení bylo provedeno demonstrační měření, které mělo prokázat, že experimentální zařízení bylo připravené na skutečné měření a případně odhalit nedostatky.

Měření probíhalo v několika dnech, celkem bylo provedeno 130 měření. Každé měření se skládá z 242 dvojsnímků pro každou kameru. Nejprve byla naměřena mřížka mod. 2 a poté mřížka mod. 1. Pro každou mřížku bylo provedeno několik měření v různých vzdálenostech od mřížky. Tato měření byla navíc provedena pro 4 různé rychlosti shodné pro obě mřížky. Před každým měřením byla zaznamenána teplota vody měřená v horní nádobě, teplota vzduchu v laboratoři, „spouštěcí rychlost laseru“, čas mezi snímky, poloha mřížky, poloha regulačního šoupěte a další. Hodnoty pro každé měření byly zaneseny do tabulky. Tabulka pro svou velikost se nachází na přiloženém CD. Na začátku měření jiné rychlosti v kanálu, byla provedena úprava hodnoty času mezi snímky podle doporučení metody PIV. Z doporučení plyne, že posuv částic ve vyhodnocovaných „interrogation areas“ má být do ¼ délky této oblasti. Na obrázku 30 je jeden snímek z levé kamery.



Obrázek 28: Pohled shora na měřený prostor

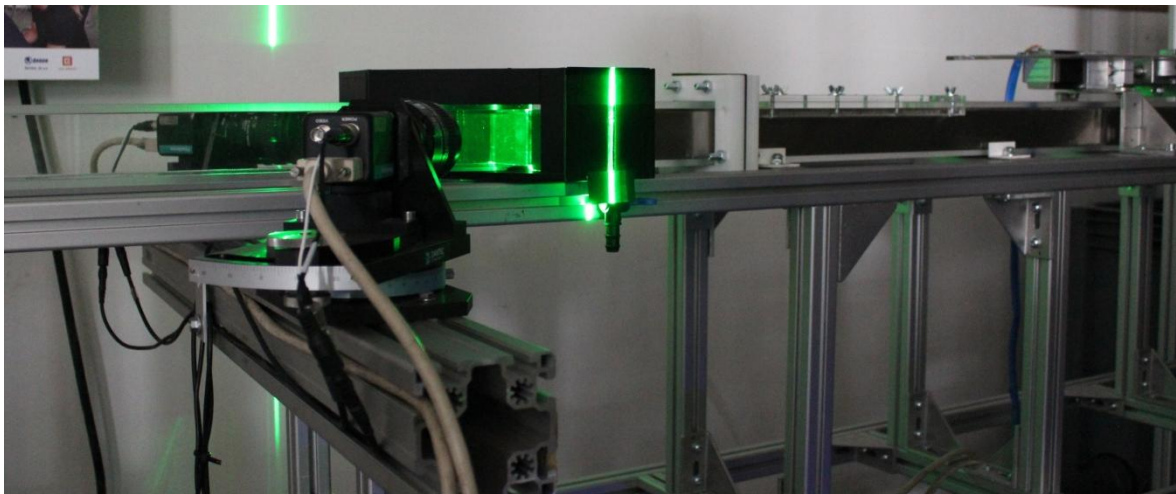
První byla vyšetřována mřížka mod. 2. Mřížka vlepená na konec nerezového kanálu byla zasunuta do transparentního kanálu v nejmenší měřené vzdálenosti 5mm od světelné (laserové) roviny. Postup před každým měřením byl shodný. Nejprve byl v programu na posuv nerezového kanálu zadán příkaz s počtem kroků. Mezitím, než došlo k posuvu kanálu o požadovanou hodnotu, byla zaznamenána teplota vody a vzduchu v laboratoři. Poté bylo provedeno měření a následně uloženo do PC. Tento postup byl opakován pro každé měření týkající se shodné rychlosti v kanále. Po každém posunutí kanálu o celkovou vzdálenost 50 mm byla pro ověření hodnoty průtoku kanálem provedena „kýblová metoda“. Když byly naměřeny všechny požadované vzdálenosti za mřížkou, byl v programu pro regulační šoupě zadán předem známý parametr o počtu kroků, který odpovídal poloze regulačního šoupěte a tudíž i hodnotě průtoku kanálem. Po každé změně polohy regulačního šoupěte následovalo kontrolní měření průtoku.

Tabulka 3: Vybraná část z tabulky obsahující parametry zaznamenané při měření

čas měření	t lab.	atm. tlak	průměrná teplota media	t vody	č. měř.	typ mřížky	vzdálenost kanálu naměřená	h šou pět	čas kýblovky	rychl ost v kanál	w kanálu	Re	prům. ěr. Re	V průtok	m průtok	průměr. m průtok	spoušť rychlost	počet snímků	čas mezi snímky			
m/d/ h:min	[°C]	[hPa]	[°C]	[°C]			[mm]	[mm]		[m/s]	[m/s]	[-]	[-]	[m ³ /s]	[kg/s]	[kg/s]	[Hz]		[μs] e-6			
4,8/xx:xx	22,4	1022	24,89	24,8	50	mod.2.	5	22	29,2	0,6	0,6011	39597	39597	0,002109	2,1031	2,1031	7,4	100	650			
4,8/xx:xx	22,5			51	10	22	39597	2,1031												7,4	100	650
4,8/xx:xx	22,9			52	20	22	39597	2,1031												7,4	100	650
4,8/xx:xx	22,9			53	30	22	39597	2,1031												7,4	100	650
4,8/xx:xx	23,1			54	50	22	39687	2,1031												7,4	100	650
4,8/xx:xx	23			55	100	22	39687	2,1031												7,4	100	650
4,8/xx:xx	23			56	150	22	39687	2,1031												7,4	100	650
4,8/xx:xx	22,5			57	200	22	39776	2,103												7,4	100	650
4,8/xx:xx	22,5			58	250	22	39776	2,103												7,4	100	650
4,8/xx:xx	22,5			59	300	22	39776	2,103												7,4	100	650

Druhá v pořadí vyšetřovaná mřížka mod. 1 byla vlepena do nerezového kanálu místo mřížky mod. 2. Postup celého měření byl totožný jako u mřížky mod. 2. Při měření

průtoku bylo zjištěno, že typ mřížky nemá vliv na změnu průtoku v kanále, a tudíž polohy regulačního šoupěte pro danou rychlost jsou shodné pro obě mřížky.



Obrázek 29: Pohled ze strany na měřený prostor

5.5 Vyhodnocení měření

V této kapitole je popsán postup vyhodnocení naměřených dat, aplikovaný stejným způsobem na všech 130 provedených měření. Vyhodnocení bylo provedeno v softwaru *DynamicStudio 5.1* od společnosti Dantec. Před vyhodnocením byla po uložení naměřených dat provedena vizuální kontrola snímků z obou kamer.

V postupu vyhodnocení byla první použita funkce „*Image Min/Max*“ z kategorie funkcí zpracování obrazu. Funkce slouží ke stanovení střední hodnoty ze stupnice šedí z naměřených snímků jedné kamery, respektive slouží k extrahování všech světelných skvrn objevujících se na všech pořízených snímcích. Výsledkem funkce je vygenerovaný jeden snímek, který neobsahuje světlé polohy sytících částic. Tato funkce byla využita především k nalezení odlesků v naměřených záznamech.

Následně byla použita druhá funkce „*Image Arithmetic*“. Funkce má několik možností použití. V našem případě byla použita pro odečtení vygenerovaného snímku s odlesky od každého naměřeného snímku. Výsledkem je nový soubor obsahující upravené snímky měření. Snímky obsahují pouze světlé polohy sytících částic. Stejný proces byl aplikován i na snímky z druhé kamery.

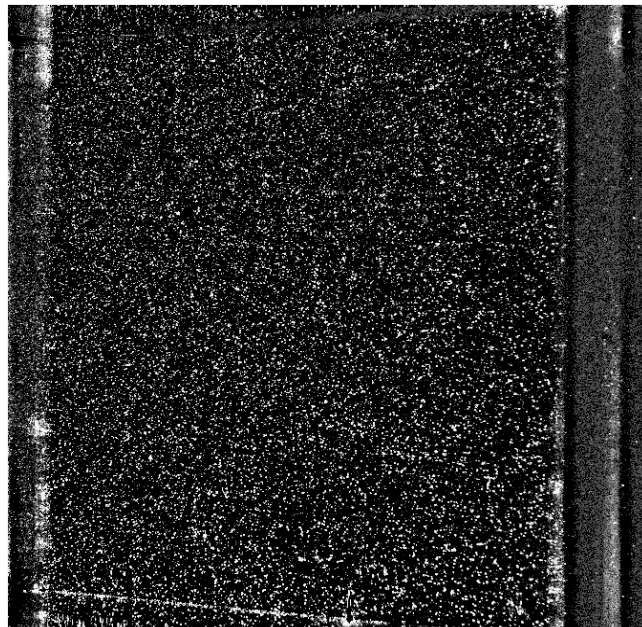
Po úpravě pořízených záznamů byla aplikována funkce „*Adaptive PIV*“. Jedná se o automatickou adaptivní metodu pro výpočet vektorů rychlosti z naměřených snímků. Metoda postupně upraví velikost a tvar „*interrogation area*“ pro přizpůsobení se místním hustotám a gradientům toků. Tato funkce umožňuje nastavení více parametrů. Při analýze byly použity výchozí parametry. Výsledkem je nový soubor zahrnující vektorová pole. Funkce byla použita i na snímky z druhé kamery.

Následně byla použita funkce „*Stereo PIV Processing*“, která vypočítá třetí složku posunutí v rovině měření z vektorových polí obou kamer a výsledků kalibrace systému. Výsledkem je vektorová mapa pro každý pár snímků, kde vektory prezentují složky rychlostí U a V . Třetí složka může být zobrazena jako skalární mapa pod vektorovou mapou.

Funkce „*Universal Outlier Detection*“ byla použita k detekci a nahrazení falešných vektorů. Analýza detekce probíhá na základě normalizovaného středního testu pomocí okolních vektorů.

Provedením předešlých funkcí byl vytvořen soubor obsahující vektorová pole rovnající se počtu naměřených snímků. Pro výsledné vyhodnocení byla použita funkce „*Vector Statistics*“. Tato metoda statisticky vypočítá ze všech vektorových polí výsledné jedno vektorové pole. Grafické výsledky jsou prezentovány jako vektorová mapa středních vektorů rychlosti, dále je možné vypočítat řadu dalších statistických veličin. Grafický výsledek byl použit pro porovnání výsledků experimentu s CFD v kapitole 7.

Poslední použitá funkce „*Profile Plot*“ umožňuje vytvořit graf v libovolném řezu vektorové mapy nebo skalární mapy. Funkce byla použita pro vytvoření grafů v požadovaných řezech a následném vygenerování numerických hodnot pro vyhodnocení v programu Excel. [14]



Obrázek 30: Naměřený snímek z levé kamery

6 Výsledky

Kapitola výsledky se zabývá zhodnocením analýzy naměřených dat. Celkem bylo vyhodnoceno všech 130 měření. V následujících podkapitolách výsledků je presentována výsledná struktura proudění za daným typem mřížky v daném řezu. Podrobné vyhodnocení všech výsledných rychlostních polí a složek rychlostí zobrazených pomocí grafů v několika řezech bude uvedeno v kapitole 7. Výsledky z experimentálního měření budou podrobně porovnávány s výsledky CFD výpočtu. Uvedené příklady prezentují vyhodnocené střední rychlostní pole v různých vzdálenostech za mřížkou. Vektory znázorňují složky rychlosti v rovině měření, barvou je znázorněna složka kolmá k rovině měření.

V následující části jsou zhodnoceny faktory, které mají jistý vliv na výsledek měření daný metodu PIV. Značný vliv na výsledek měření mají dva faktory, které byly nastaveny vždy před každým měřením. Jedná se o hustotu sytících částic a dobu mezi dvojicí snímků. S odkazem na experiment, který provedli, Keane a Adrian [13] [14], byly oba faktory nastaveny dle výsledného doporučení. Zmíněný experiment ukázal, že pro získání 95% platné detekční rychlosti by mělo být v každé vyšetřované oblasti alespoň 8 částic. Zadruhé musí být posunutí částic menší než velikost vyšetřované oblasti, obecně omezené na $\frac{1}{4}$ její velikosti. Toto doporučení zabraňuje pohybu částic dostatečně daleko, aby nebyly přítomné v obou vyšetřovaných oblastech. Hustota sytících částic se v průběhu měření neměnila.

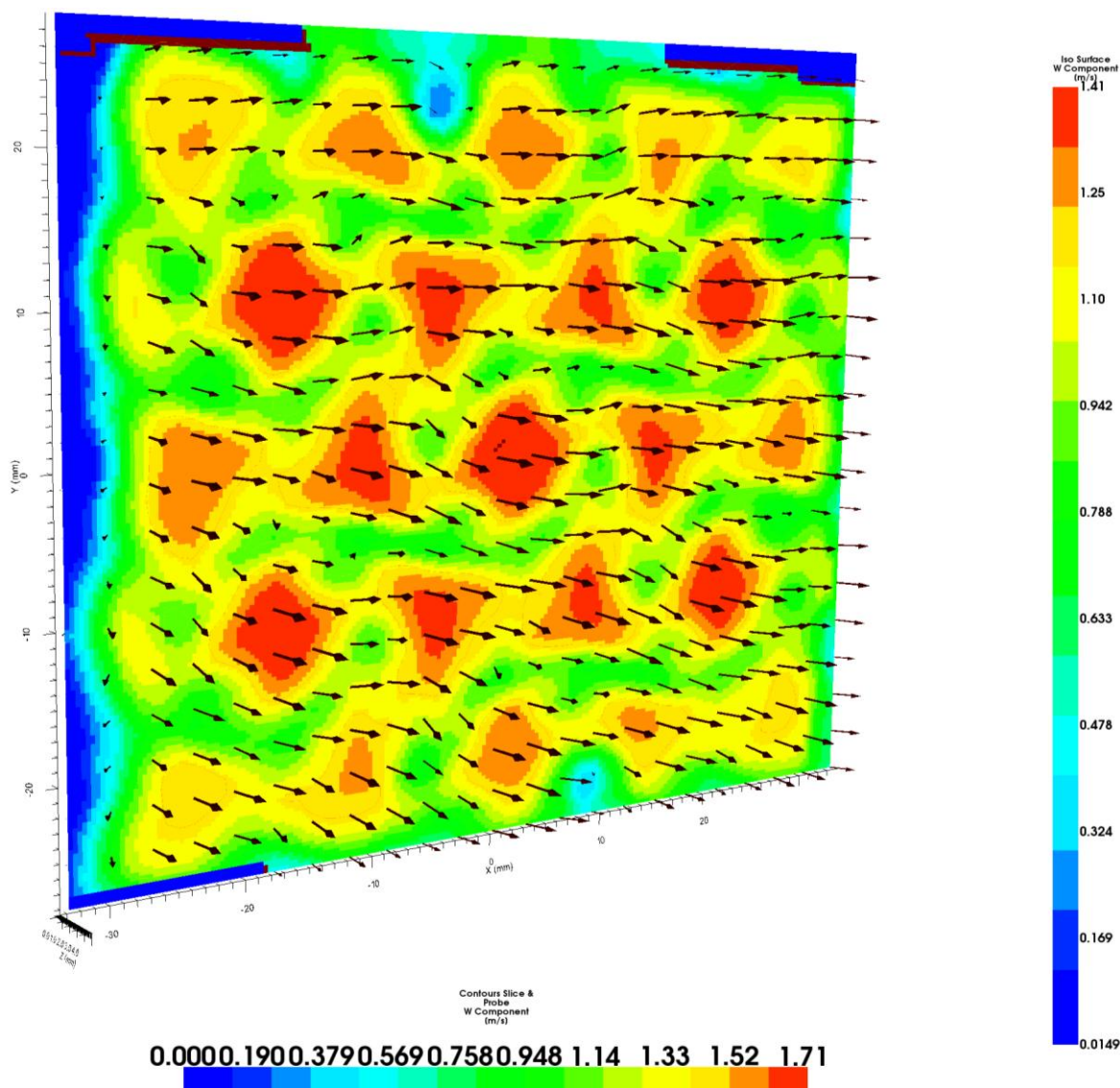
Při uvažování rozměru měřené oblasti 50 x 50 mm (ve skutečnosti 56 x 66 mm) je fyzická velikost pixelu v obrazové rovině přibližně 25 μm . V případě měření byly použity částice o rozměru 20 μm . Z toho lze usuzovat, že při mírně nastaveném rozostřeném snímání to nezpůsobuje výrazný vliv na výsledek měření.

Jak již bylo zmíněno u popisu metody PIV, tak rychlost (neboli posuv) není určena sledováním jednotlivých zaznamenaných částic, ale je využito vzájemné korelace k určení nejpravděpodobnějšího posunutí v každé vyšetřované oblasti. Z toho vyplývá, že čím více bude při měření pořízeno snímků s požadovanou kvalitou, tím bude výsledné posunutí v každé vyšetřované oblasti přesnější. Použitý systém pro měření umožňoval nastavení maximálně 242 dvojsnímků pro každou kameru. Každé měření obsahuje celkem 482 dvojsnímků. Tento počet dvojsnímků spolu s velikostí měřené oblasti a vysokého rozlišení obou kamer by dohromady měl zaručit dosažení kvalitního výsledku měření.

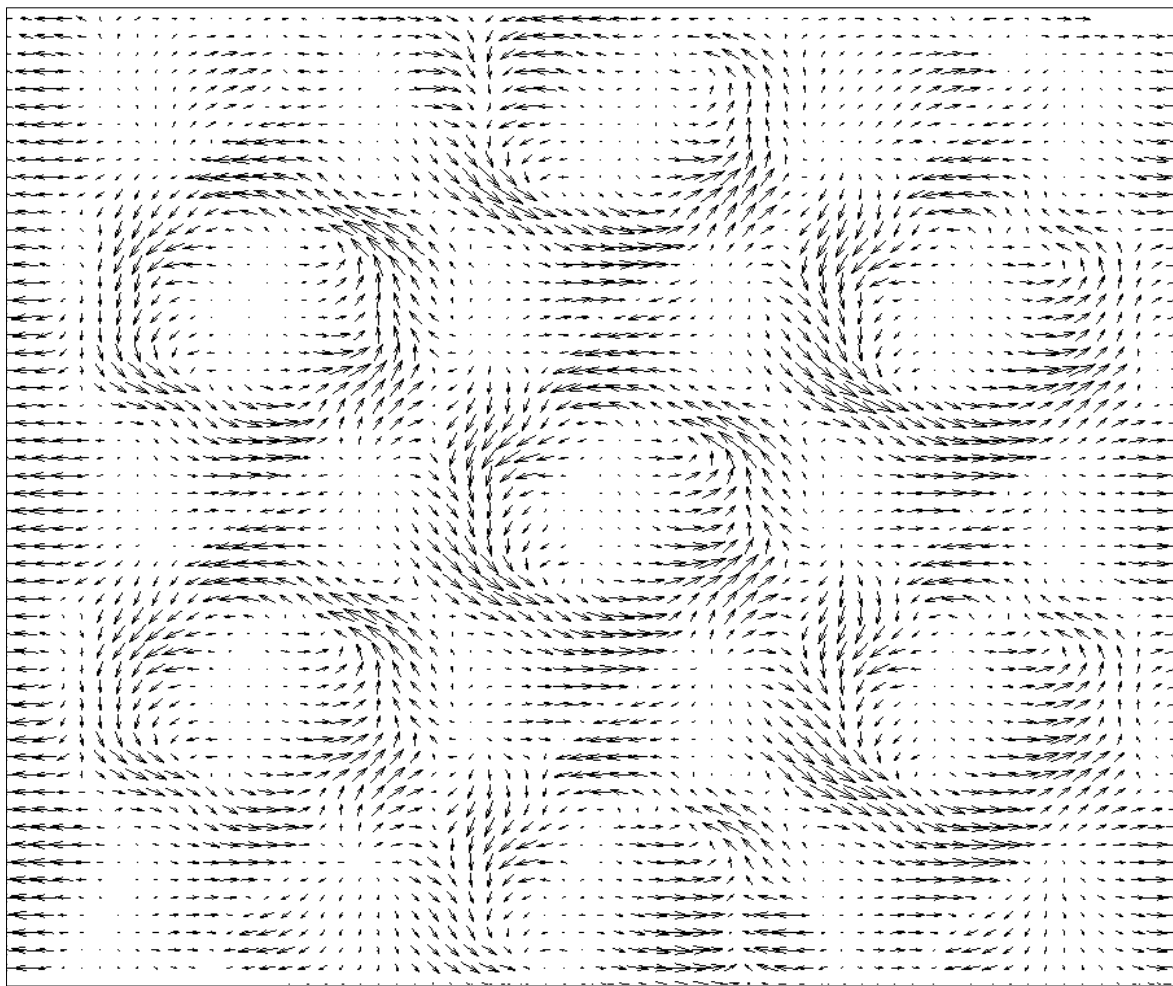
Výše zmíněné faktory nejsou jediné, které ovlivňují výsledek měření. Je nutné zmínit další, které s měřením pomocí metody PIV nesouvisí. Prvním faktorem, který má značný vliv, je měřicí prostor, dále samotná mřížka. Vyrobená mřížka není 100% identická s navrženým modelem. To samé platí pro úhly ohybu lopatek. V neposlední řadě má vliv nastavená hodnota průtoku „kýblovou metodou“ a měnící se teplota vody v průběhu měření.

6.1 Výsledky mřížky mod. 1

Proudové pole za mřížkou mod. 1 bylo v kanále vyšetřováno pro čtyři rychlosti 0,6 m/s, 0,8 m/s, 1 m/s a 1,2 m/s. Pro každou rychlost byla provedena měření ve vzdálenostech 5mm, 10mm, 20mm, 30mm, 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm a 300mm za mřížkou. Jen rychlost 1m/s byla měřena po 10mm do vzdálenosti 300mm. Výsledné struktury v daných vzdálenostech jsou pro všechny vyšetřované rychlosti velmi podobné. Na obrázku 31 se nachází výsledný řez ve vzdálenosti 10 mm za mřížkou zobrazující složku rychlosti W ve směru proudu pomocí kontur. Metoda PIV má svá omezení. Jedno z nich je, že nelze s dostatečnou přesností měřit proudové pole v blízkosti stěn. Tmavě modrá barva zobrazené kontury vyplývá z tohoto omezení. Z následujícího obrázku 32 je patrné, že vektorové pole v rovině řezu x, y má stejný charakter roztáčení proudu kolem místa pro palivový článek, jako je prezentováno společností TVEL. V blízké vzdálenosti za mřížkou jsou složky rychlostí ve směru x, y výrazné. Se zvyšující se vzdáleností od mřížky dochází k ustálení charakteru proudu. To je způsobené absencí palivových článků a rozměry kanálu. Podrobné vyhodnocení pro rychlost 1 m/s je v následující kapitole. Výsledky všech měření jsou na příloženém CD.



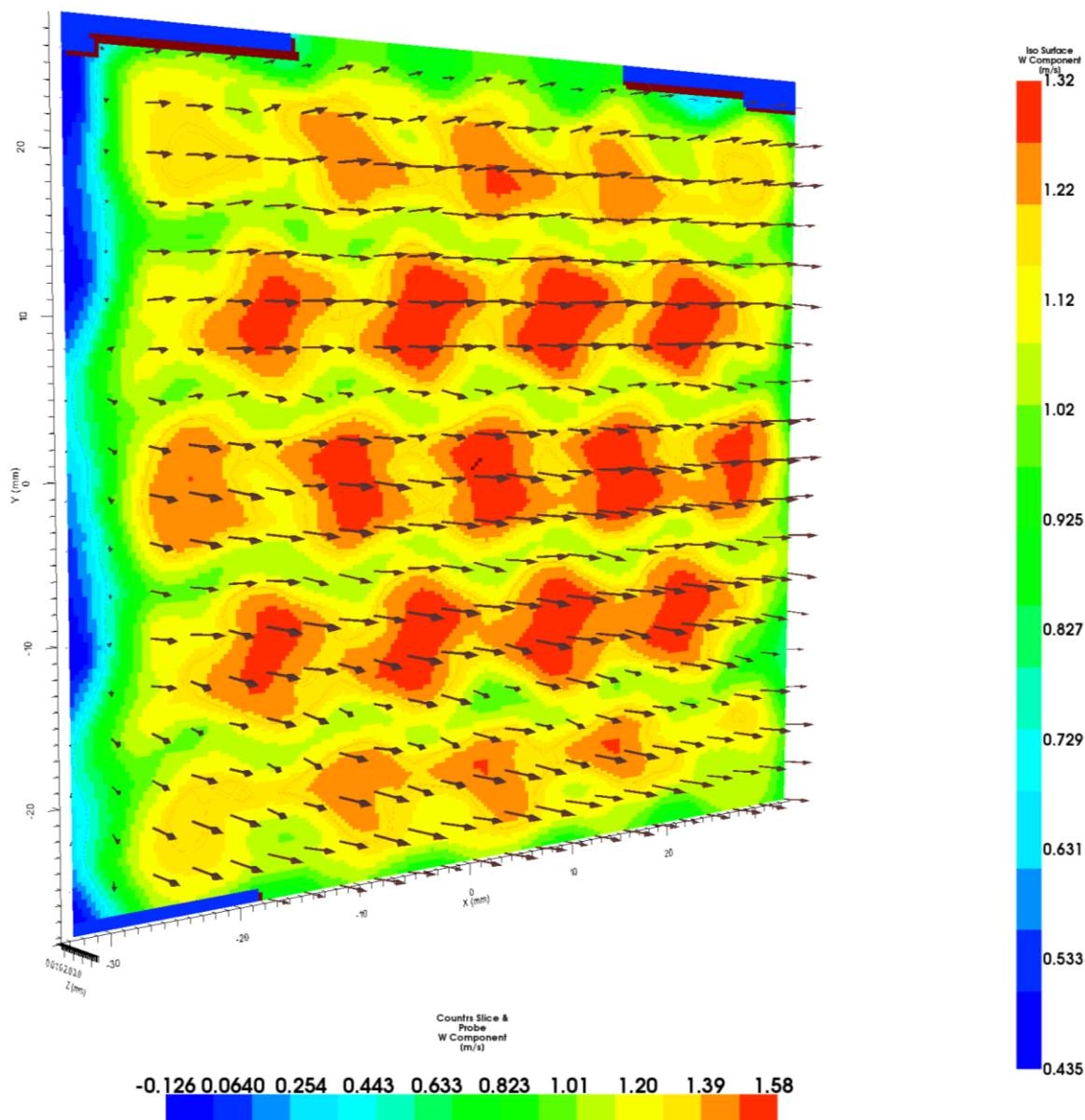
Obrázek 31: Výsledný řez mod.1 pro rychlost 1,2 m/s, $z=10$ mm



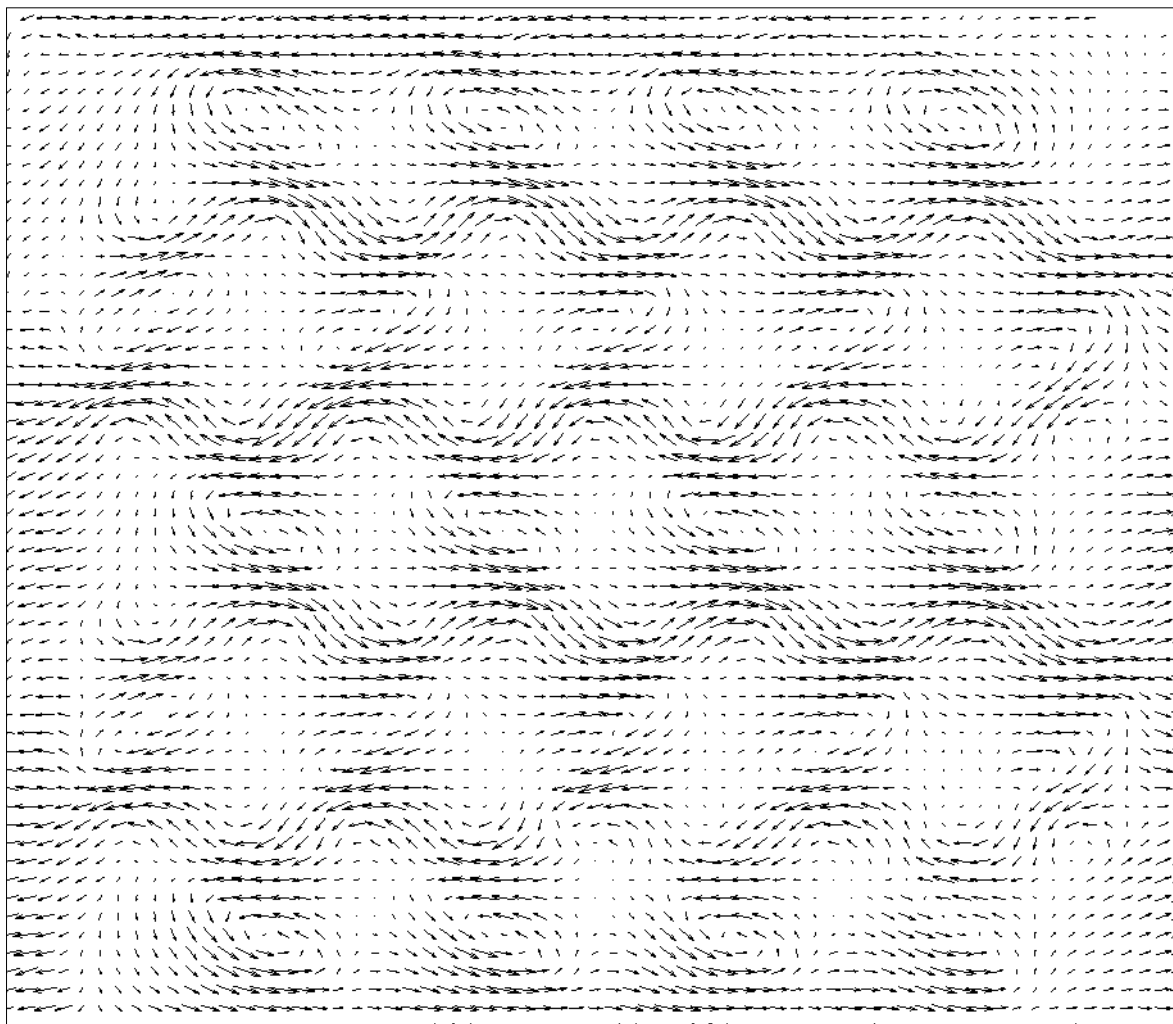
Obrázek 32: Vektorové pole - mod.1, $v=0,8\text{m/s}$, $z=10\text{mm}$

6.2 Výsledky mřížky mod. 2

Mřížka mod.2 byla vyšetřena stejným způsobem jako mod.1. Na obrázku 33 se nachází výsledný řez ve vzdálenosti 10 mm za mřížkou zobrazující složku rychlosti W ve směru proudu pomocí kontur. Z výsledků vyplývá očekávaný charakter proudu za mřížkou. Geometrie a umístění lopatek vytváří proud směřující ve směru x , viz obrázek 34. V blízké vzdálenosti za mřížkou jsou složky rychlostí ve směru x , y výrazné. Se zvyšující se vzdáleností od mřížky dochází k disipaci a dále se uplatňuje složka rychlosti W ve směru hlavního proudu. Podrobné vyhodnocení pro rychlost 1 m/s je v následující kapitole. Výsledky všech měření jsou na přiloženém CD.



Obrázek 33: Výsledný řez mod.2 pro rychlost 1,2 m/s, $z=10$ mm



Obrázek 34: Vektorové pole - mod.2, $v=0,8\text{m/s}$, $z=10\text{mm}$

7 Porovnání výsledků experimentu s CFD

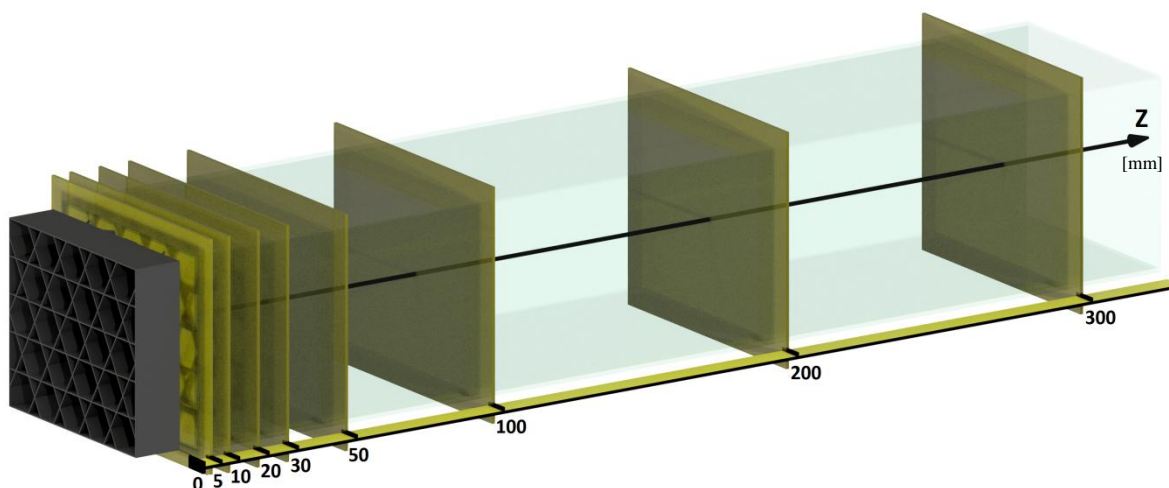
Tato kapitola se věnuje porovnání výsledků experimentu s výsledky CFD výpočtu pro oba typy mísících mřížek. Popis a výsledky získané CFD výpočty jsou k dispozici v odkazované literatuře. [1]

Porovnání výsledků obou metod bylo v této práci provedeno pouze pro vstupní rychlost proudění 1 m/s. V porovnání jsou uvedeny výsledné struktury proudění v jednotlivých vyšetřovaných řezech, ve kterých jsou vyhodnoceny také jednotlivé složky rychlosti v dané vzdálenosti po výšce kanálu. Porovnání výsledků všech zbývajících rychlostí je uloženo na příloženém CD.

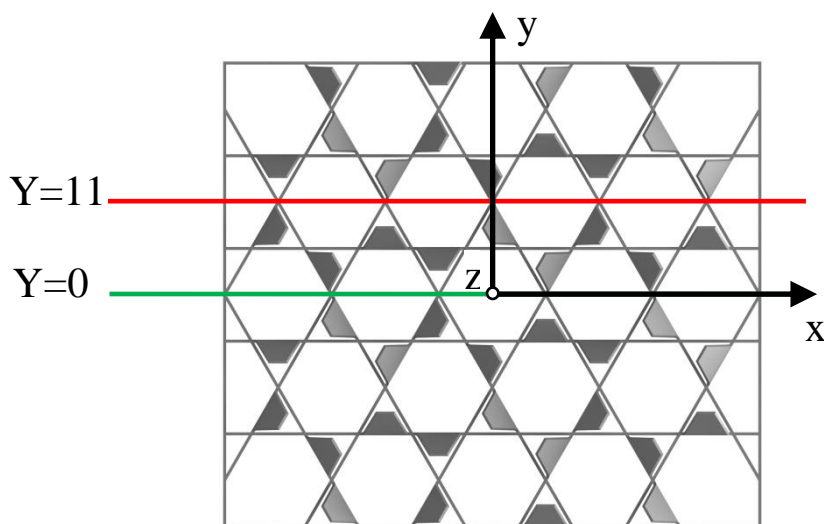
Výsledné struktury proudění jsou tvořeny pomocí vektorů rychlosti. Vektory znázorňují složky rychlosti v rovině kolmé na hlavní směr proudění a barvou je znázorněna složka ve směru hlavního proudu. Dále jsou samostatně porovnávány složky rychlostí (U , V , W) ve formě grafů ve vyšetřovaných řezech a vždy v dané výšce pro dvě úsečky. Komparace je rozdělena do dvou částí podle typu mřížky.

7.1 Porovnání výsledků mřížky mod. 1

K porovnání výsledků obou metod bylo zvoleno osm společných vyšetřovaných rovin kolmých ke směru proudu. Vyšetřované roviny náleží souřadnicím x , y . Zvolené roviny vzhledem k poloze mřížky mod. 1 jsou zobrazeny na obrázku 35. Pro porovnání jednotlivých složek rychlostí (U , V , W) bylo zvoleno dvou úseček, které jsou vidět na obrázku 36. Poloha úseček byla zvolena z důvodu vyšetření a porovnání složky rychlosti ve směru y . Mřížka typu mod. 1 generuje roztáčeující se proud kolem místa pro palivový článek. Podíl na tvorbě specifického proudu ve vyšetřovaných úsecích má složka rychlosti U ve směru osy y . Složka rychlosti V ve směru osy x nemá vliv na tvorbu roztáčeného proudu ve vyšetřovaných úsecích.



Obrázek 35: Vyšetřované roviny vzhledem k poloze mřížky mod. 1



Obrázek 36: Poloha úseček pro porovnání složek rychlostí

Na následujících stránkách jsou porovnány struktury a jednotlivé složky rychlostí. Z porovnání je patrné, že výsledky CFD výpočtu jsou podobné s výsledky naměřenými experimentem. Podoba výsledků vypovídá o správně nastaveném experimentálním měření. Obě metody vycházely ze shodného návrhu modelu mřížky a vstupních parametrů,

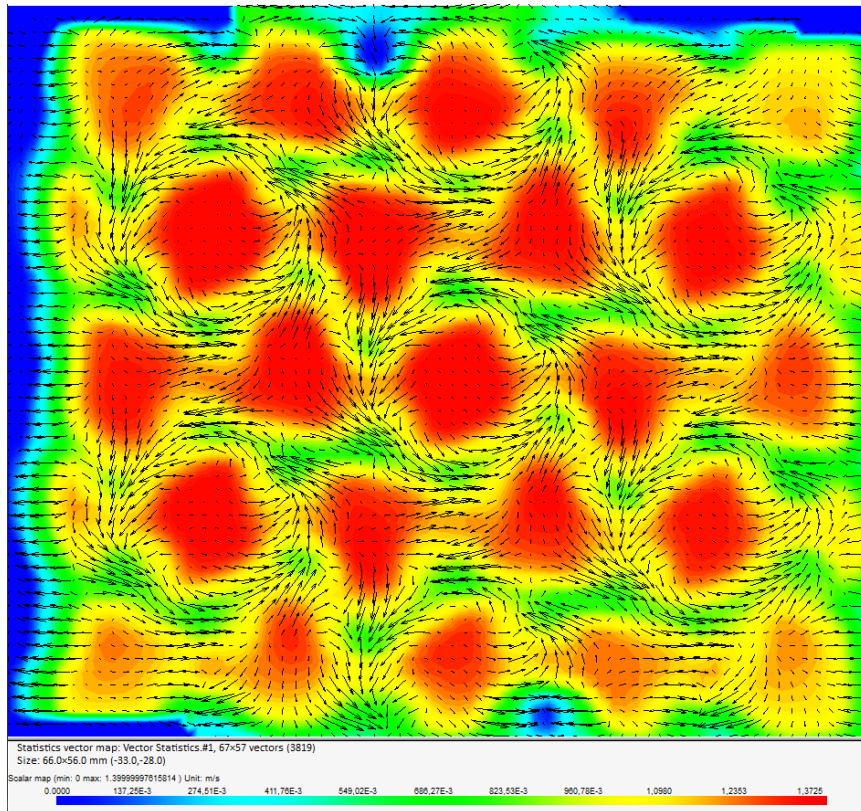
konečná podoba vyrobených částí měřicího prostoru a samotné mřížky nebyla absolutně shodná. I přes tyto výrobní nepřesnosti dané technologií výroby, jsou výsledky souhlasné.

Při prvotním porovnání výsledků byly zjištěny odlišné maximální rychlosti ve směru proudu. Po přesném přeměření všech rozměrů bylo zjištěno, že jednotlivé části mřížky byly vyrobeny z plechu o 0,1 milimetru silnějšího. Na základě rozměrové změny vyrobené mřížky musel být CFD výpočet upraven tak, aby model odpovídal vyrobené mřížce. Po úpravě CFD modelu došlo ke snížení rozdílu maximálních rychlostí ve směru proudu. Z porovnaných výsledků je stále patrná odchylka, která se pohybuje v rozmezí do 7% z uvedených rychlostí. Na straně experimentu je tato odchylka ovlivněna mnoha faktory. Hlavním faktorem je nastavená hodnota průtoku kanálem pomocí „kýblové metody“. Odchylka je dále způsobena skutečnými rozměry vyrobené sestavy kanálů a v neposlední řadě samotnou experimentální metodou. Během měření dané mřížky s nastavenou konkrétní vstupní rychlostí byla před každým měřením zaznamenána změna teploty vody, která byla způsobena prací čerpadla. Ze zaznamenaných teplot byla vypočtena průměrná teplota pro celé určité měření. Průměrná hodnota by mohla být příčinou odchylky, neboť z ní byly stanoveny vlastnosti vody pro výpočet.

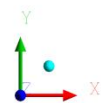
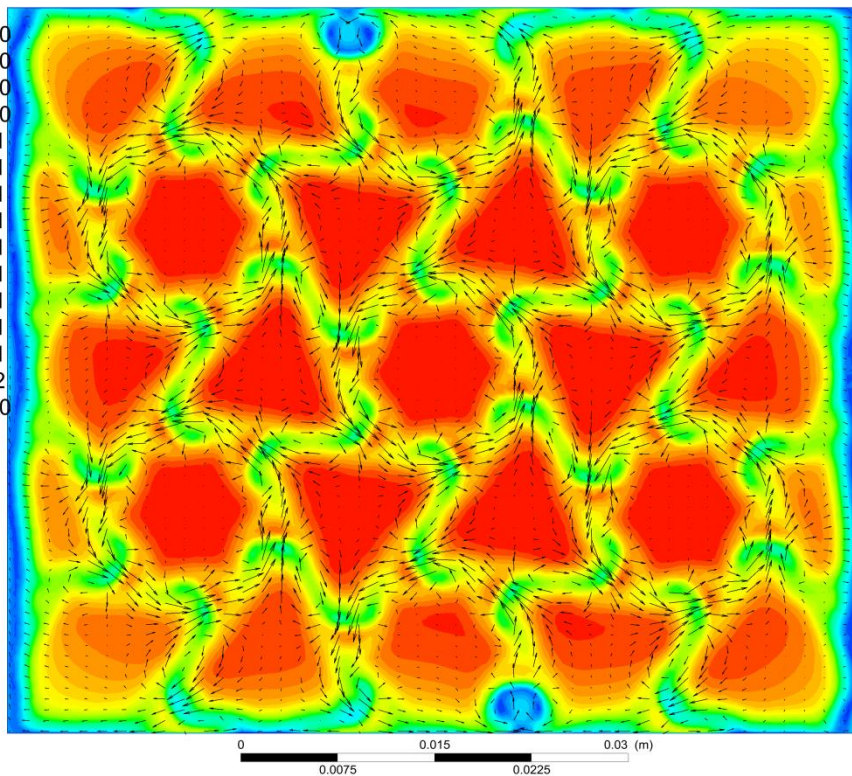
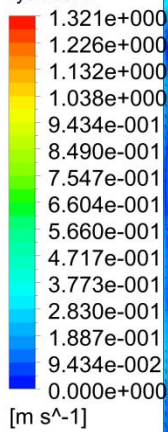
V malé vzdálenosti za mřížkou se charakter proudění a především velikosti jednotlivých složek rychlostí výrazně mění s každou desetinou milimetru. Použitý způsob umístění mřížky na konci nerezového kanálu má vliv na skutečnou vzdálenost mřížky od vyšetřované roviny. Z výsledků je patrné, že mřížka pravděpodobně nebyla zcela kolmo zafixována ke stěnám kanálu a její poloha byla mírně horizontálně nakloněná. Toto vyplývá z rozdílné velikosti složky rychlosti U ve směru x . Tato složka ve vyšetřovaných polohách dle CFD výpočtu by měla být co nejmenší. K výsledkům pro porovnání rychlosti U je důležité podotknout, že se zvětšující se vzdáleností jsou rychlosti velmi malé. Zbylé dvě složky rychlosti V , W jsou pro vlastnosti mřížky důležité a v porovnání se jejich průběhy velmi podobají.

Z porovnaných výsledků je patrné, že od vzdálenosti 100 mm za mřížkou dochází k potlačování příčných rychlostí. Začíná se prosazovat hlavní proud. Od této vzdálenosti už nejsou porovnány rychlosti ve směru x . Pro poslední dvě porovnávané roviny ve vzdálenosti 200 a 300 mm od mřížky jsou příčné rychlosti téměř nulové a nemají vliv na hlavní proud. Z tohoto důvodu byly porovnány jen rychlosti ve směru hlavního proudu, jejichž průběhy jsou velmi podobné. [1]

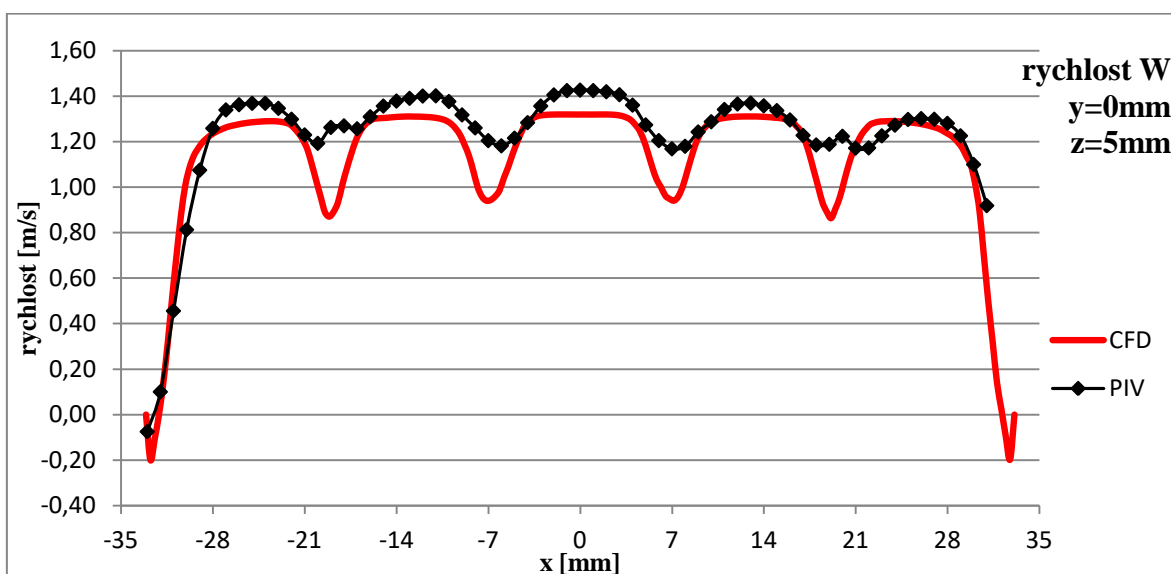
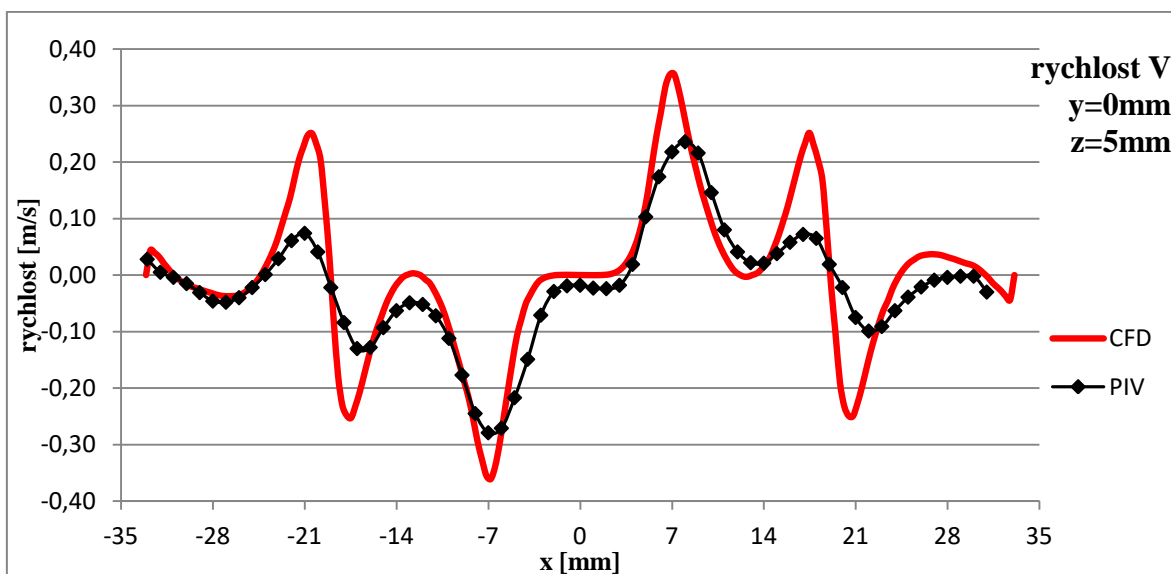
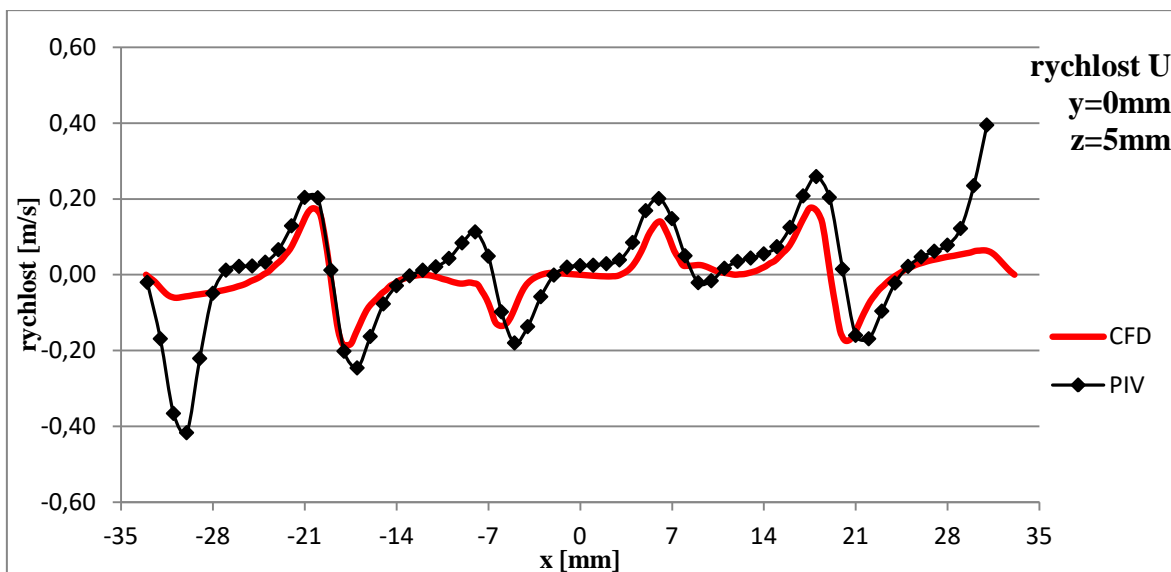
7.1.1 Vzdálenost $z=5$ mm za mřížkou mod. 1



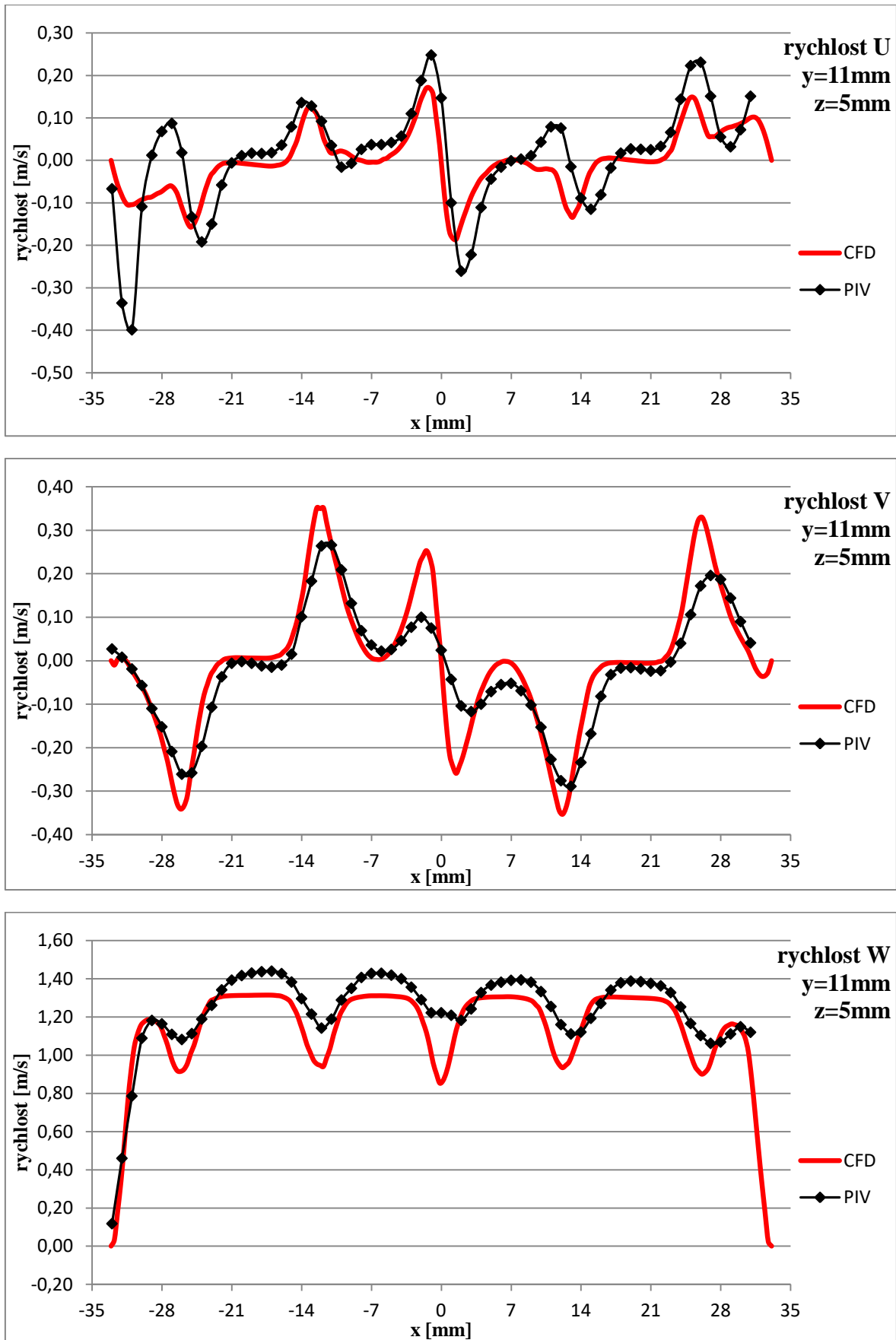
Velocity
rychlost w



Obrázek 37: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1m/s, vzdálenost 5mm

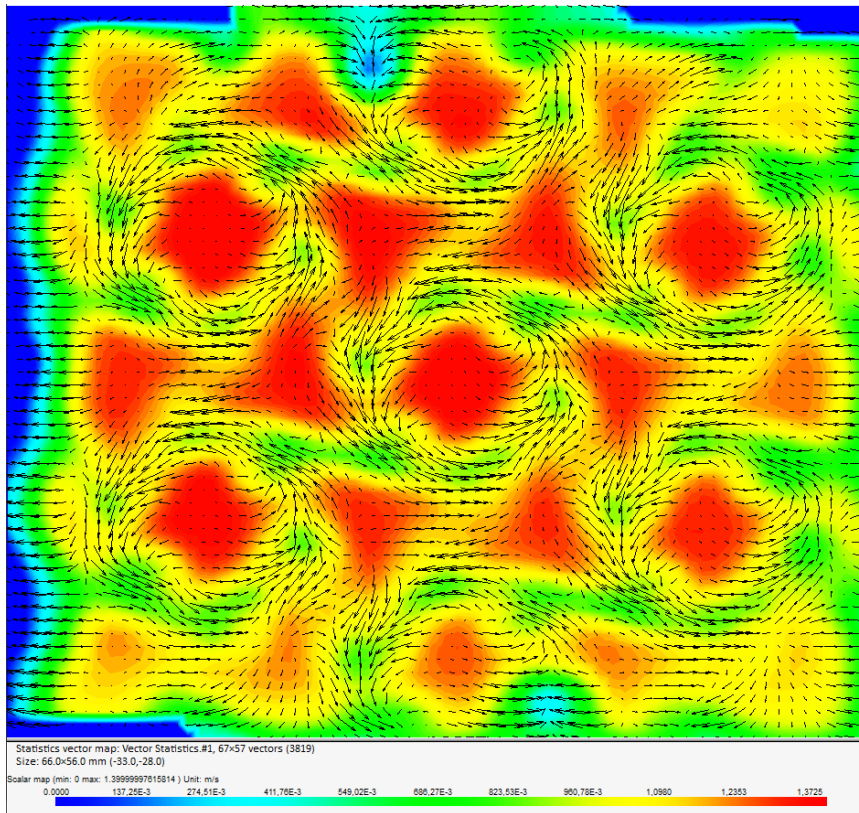


Obrázek 38: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z=5 mm, y=0 mm

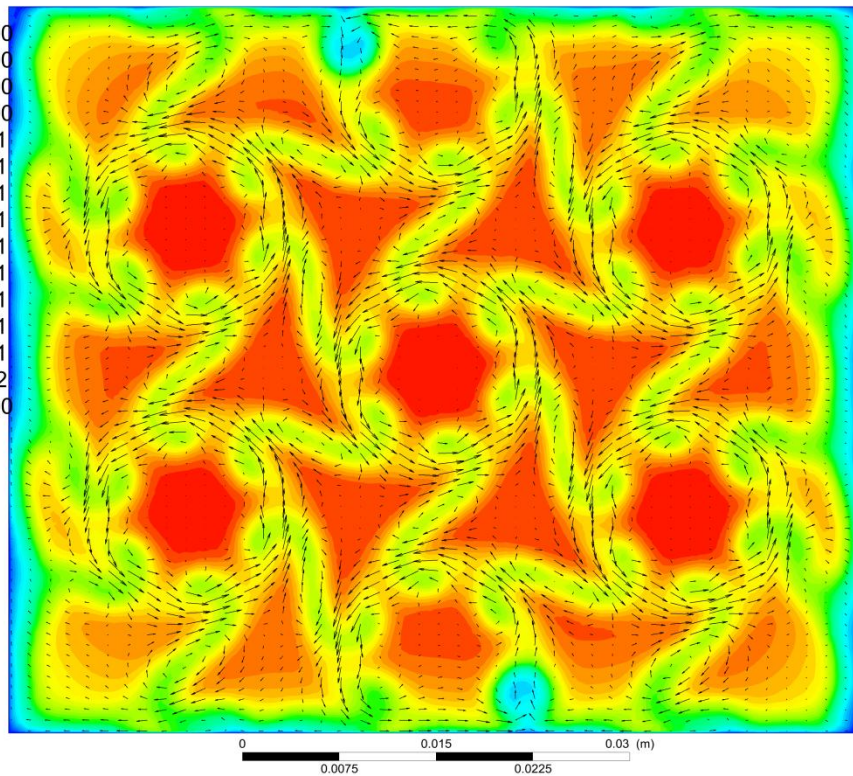


Obrázek 39: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, $z=5\text{ mm}$, $y=11\text{ mm}$

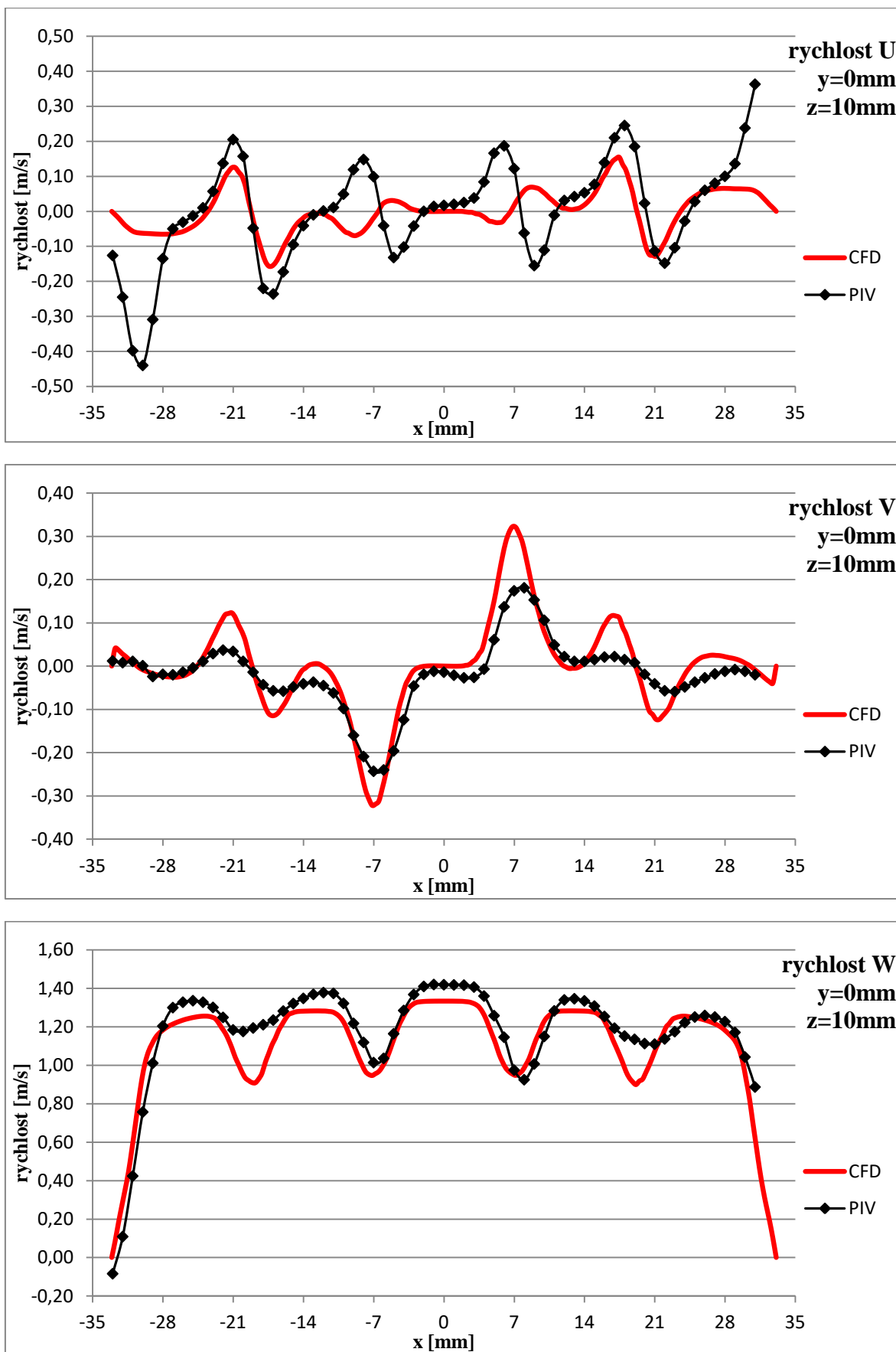
7.1.2 Vzdálenost $z=10$ mm za mřížkou mod. 1



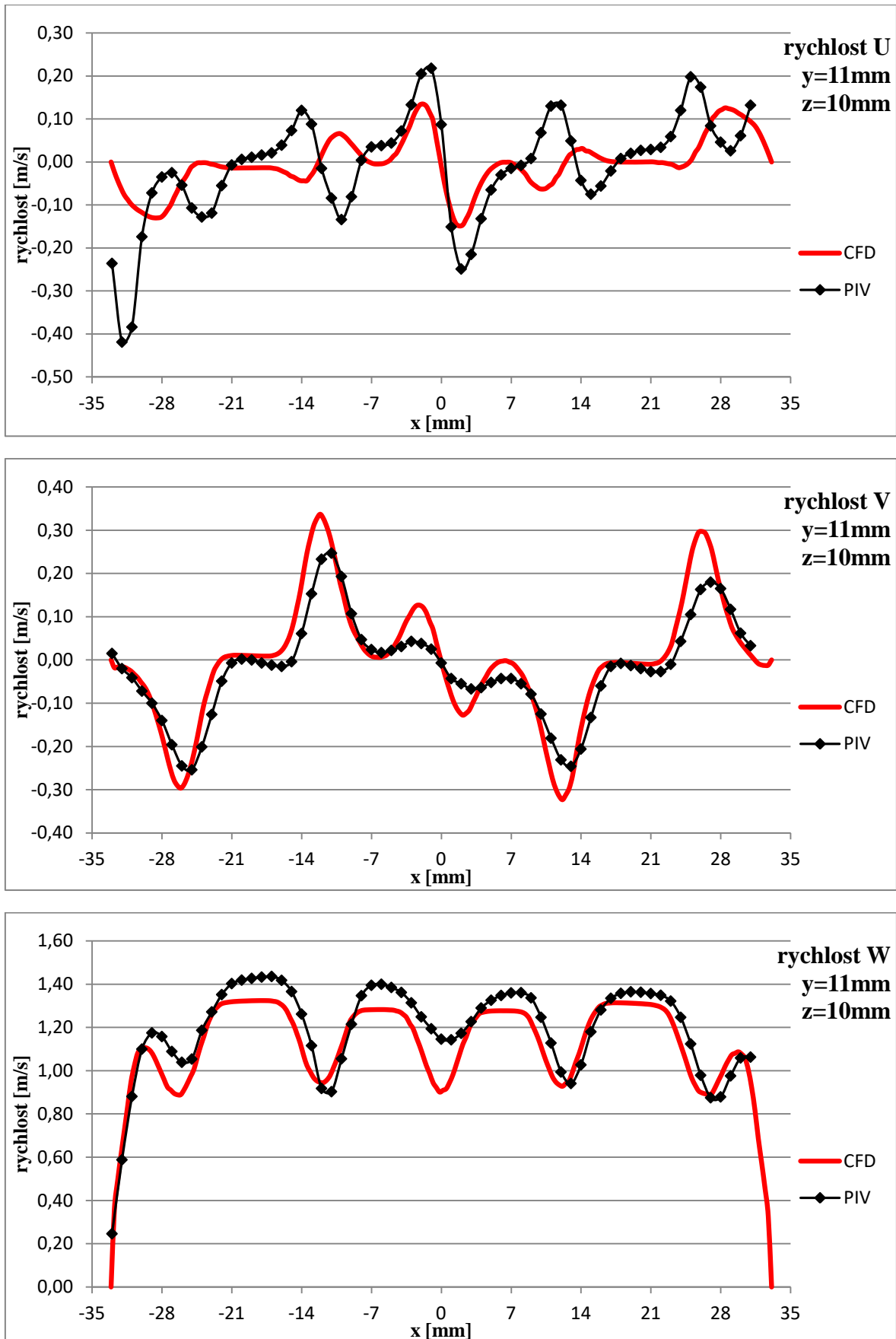
Velocity
rychlost w
1.334e+000
1.238e+000
1.143e+000
1.048e+000
9.525e-001
8.573e-001
7.620e-001
6.668e-001
5.715e-001
4.763e-001
3.810e-001
2.858e-001
1.905e-001
9.525e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 40: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 10 mm

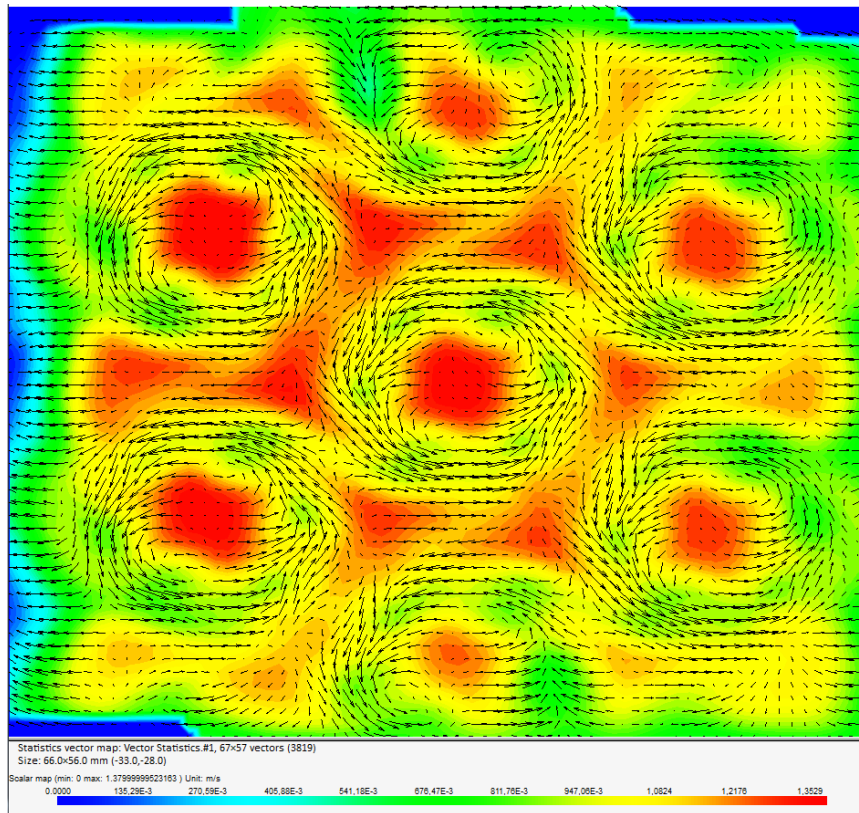


Obrázek 41: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, $z = 10$ mm, $y = 0$ mm

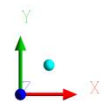
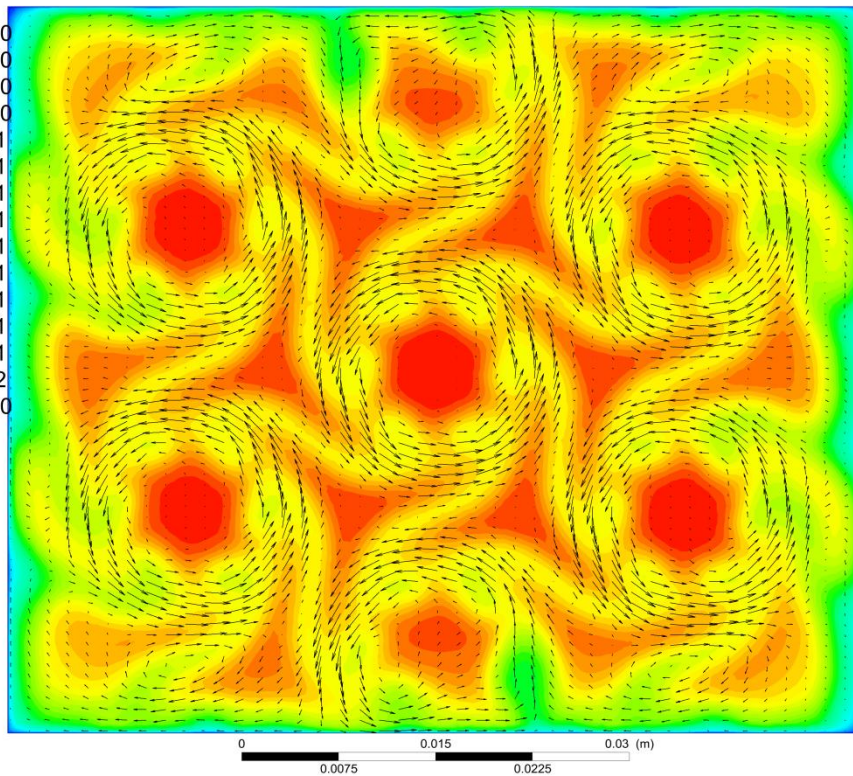
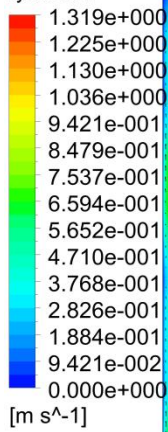


Obrázek 42: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, $z=10\text{ mm}$, $y=11\text{ mm}$

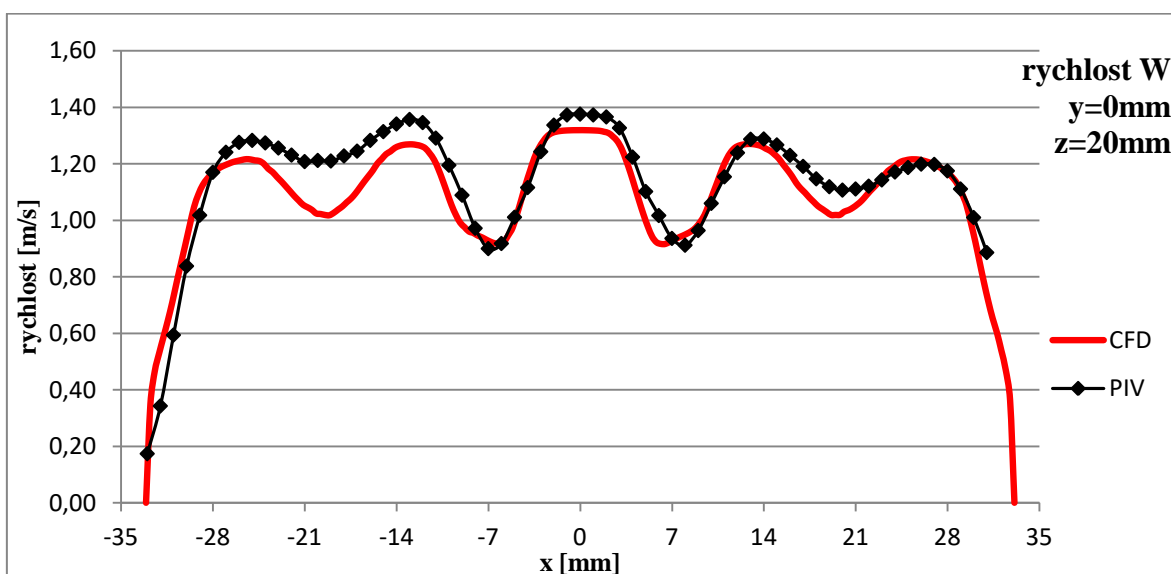
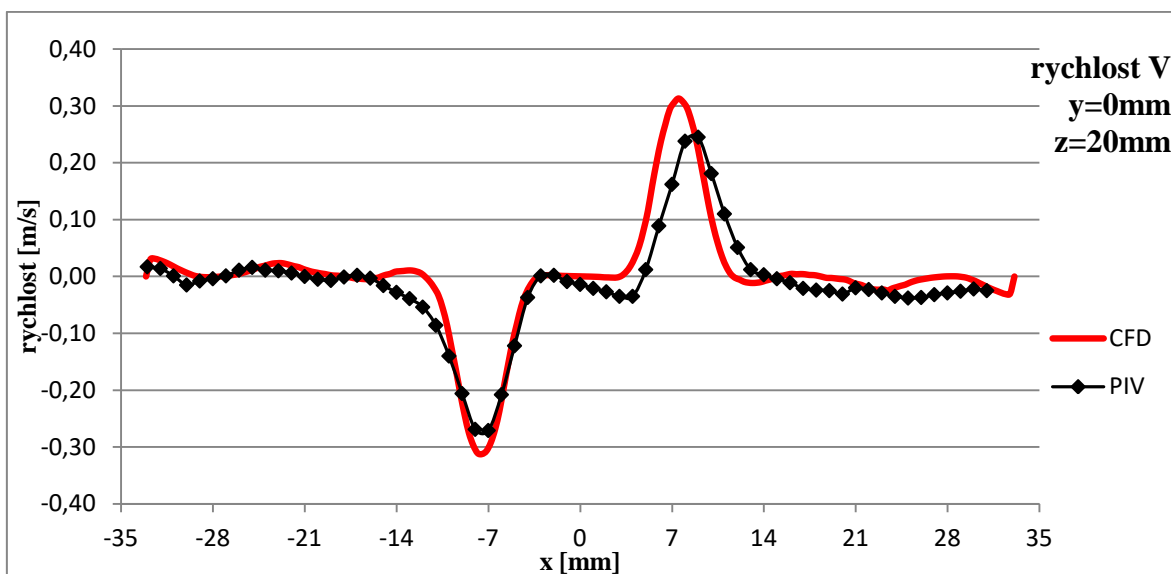
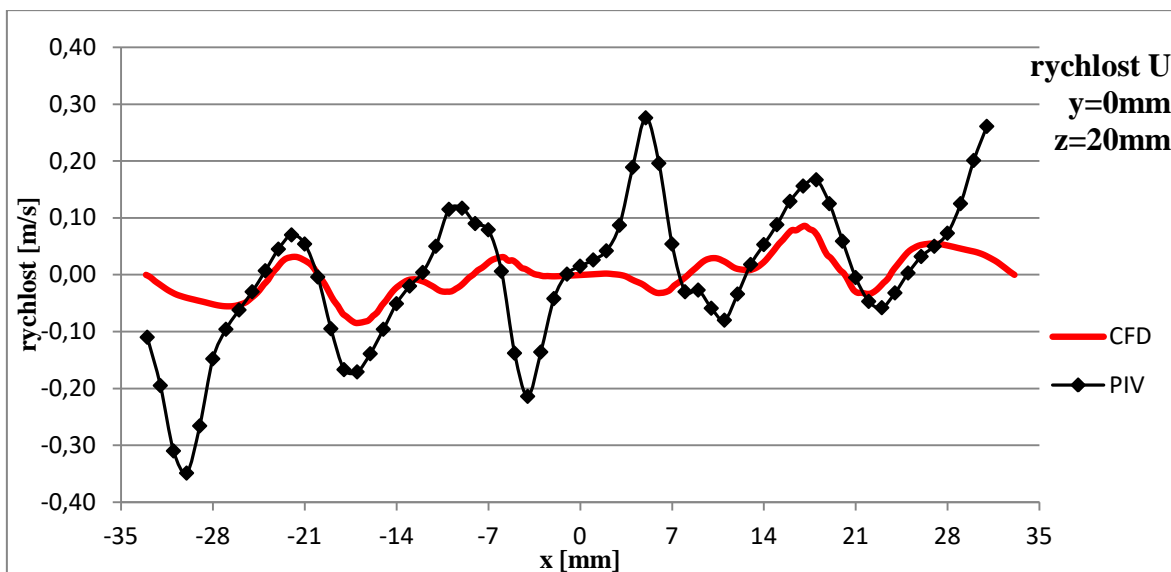
7.1.3 Vzdálenost $z=20$ mm za mřížkou mod. 1



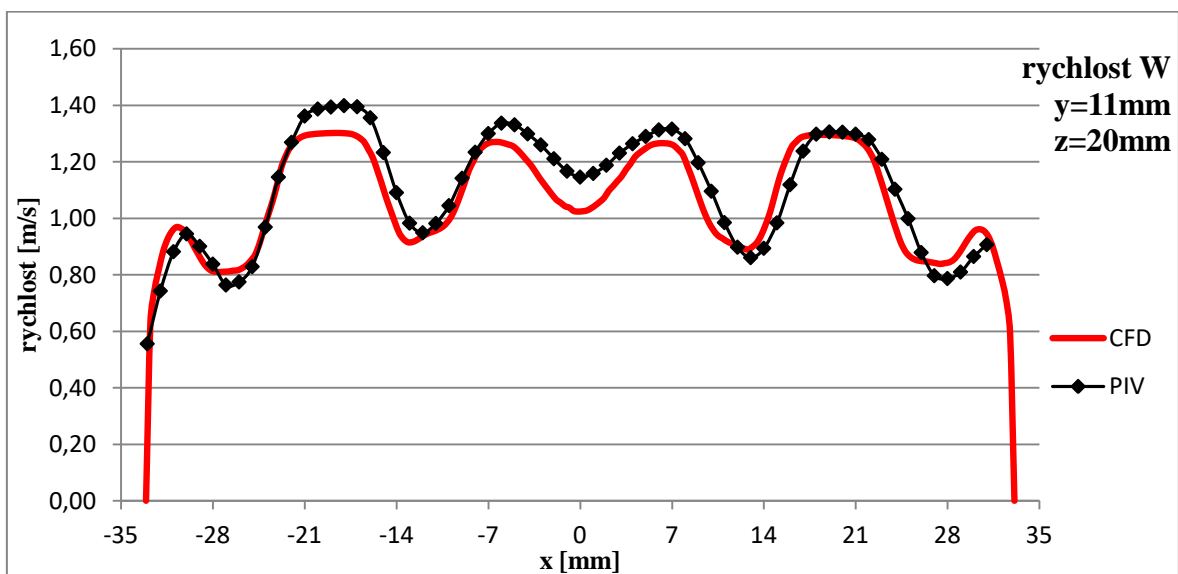
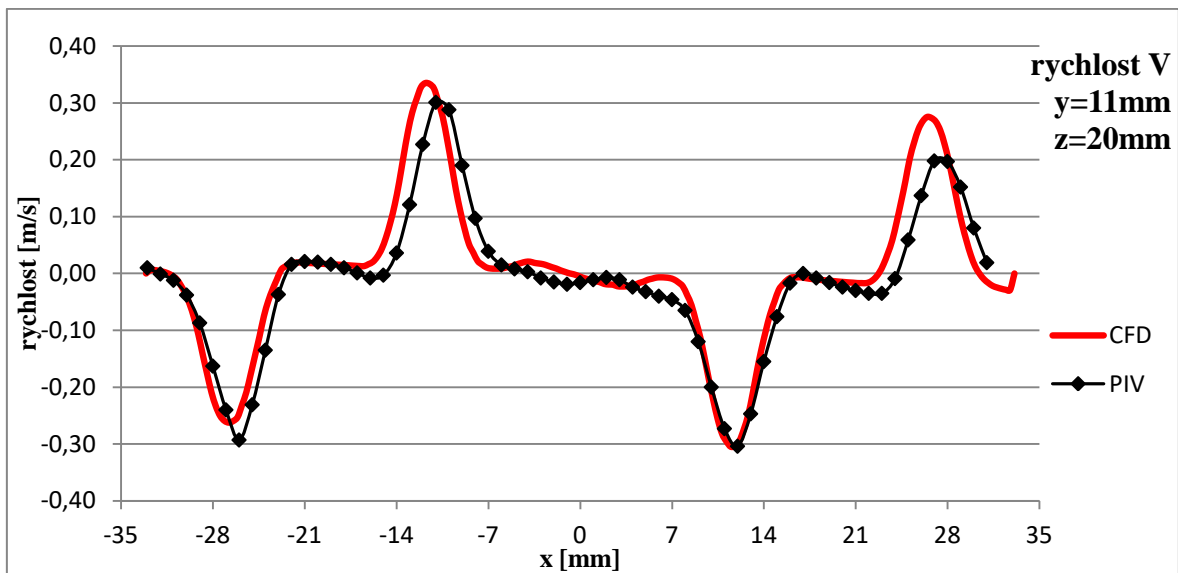
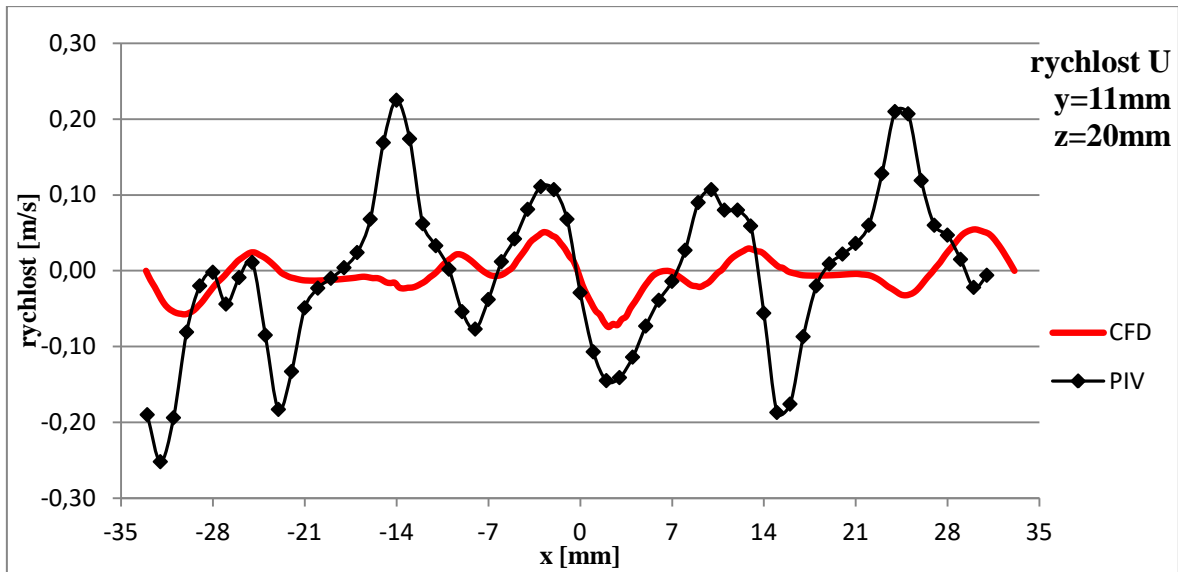
Velocity
rychlost w



Obrázek 43: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 20 mm

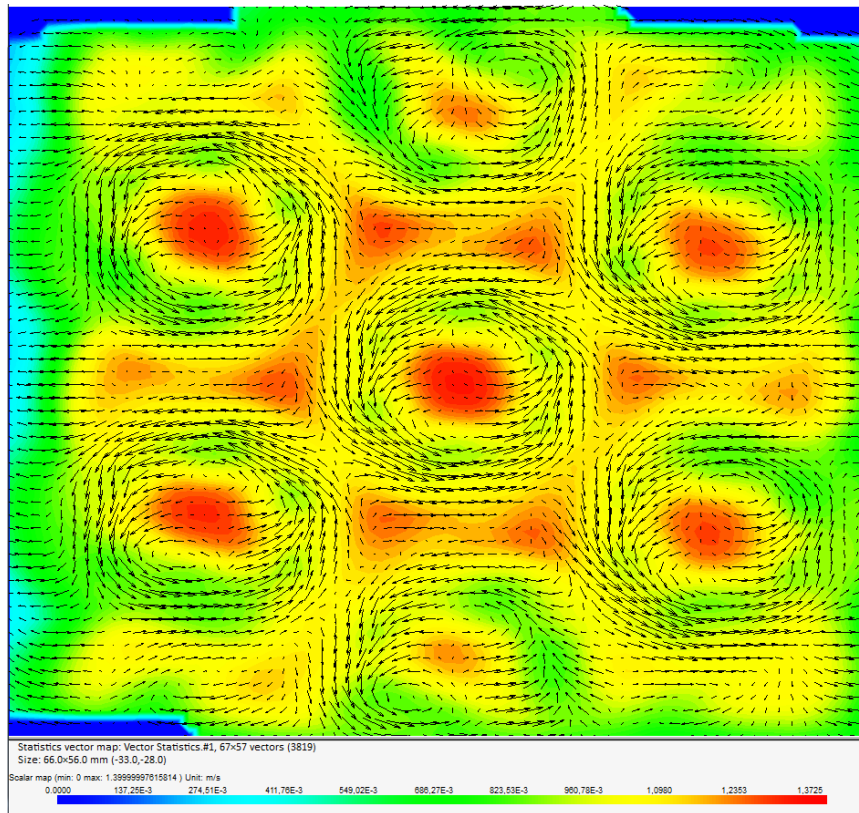


Obrázek 44: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 20 mm, y=0 mm

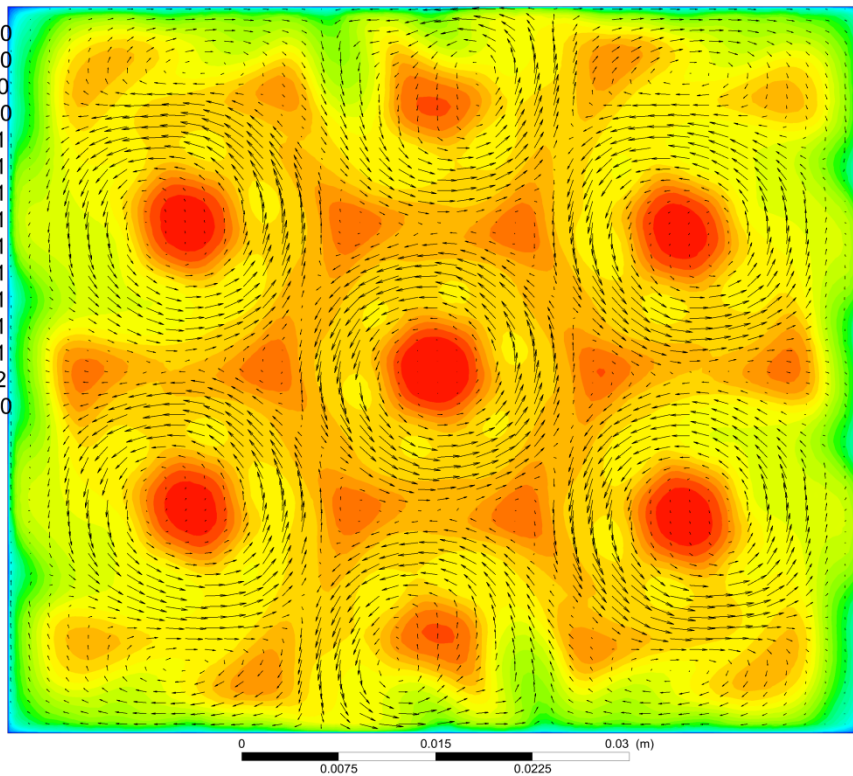
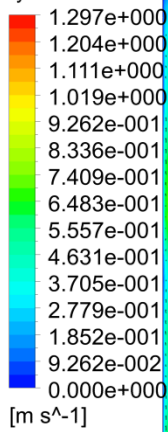


Obrázek 45: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 20 mm, y=11mm

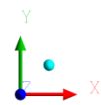
7.1.4 Vzdálenost $z=30$ mm za mřížkou mod. 1



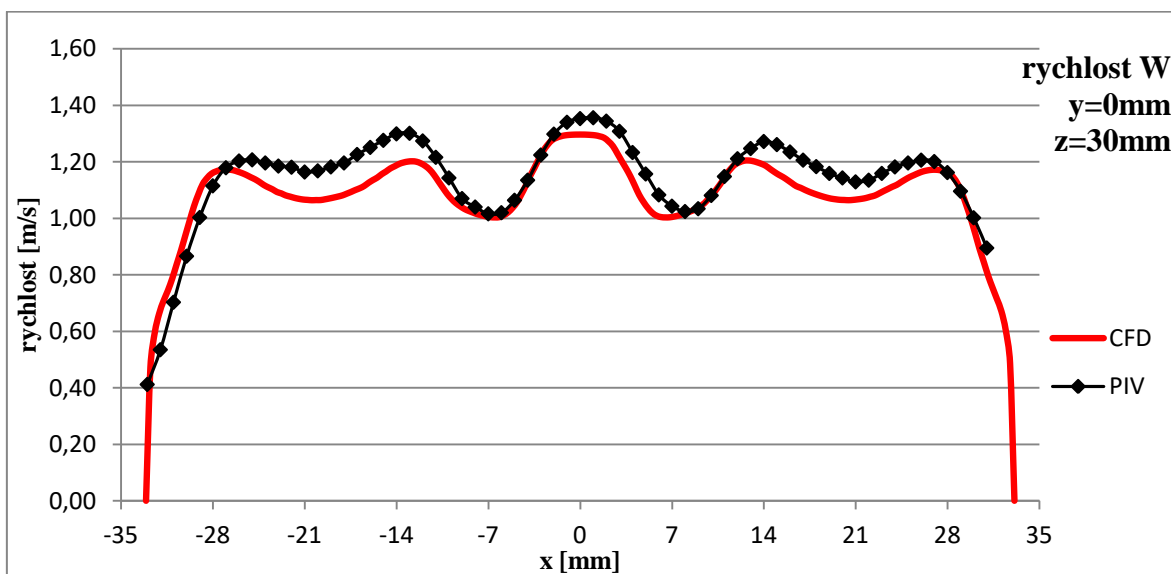
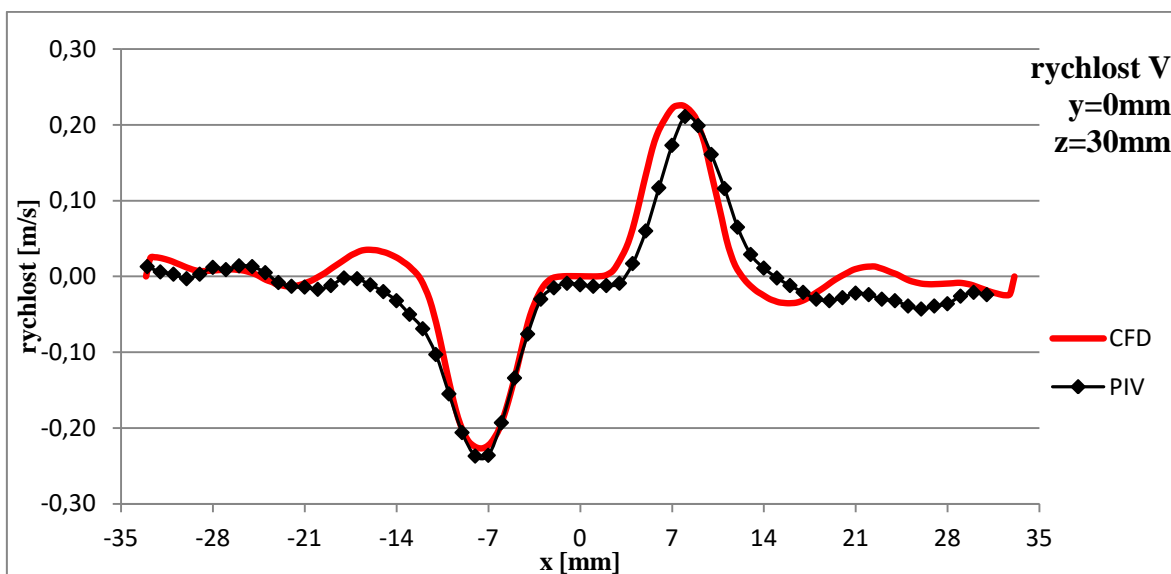
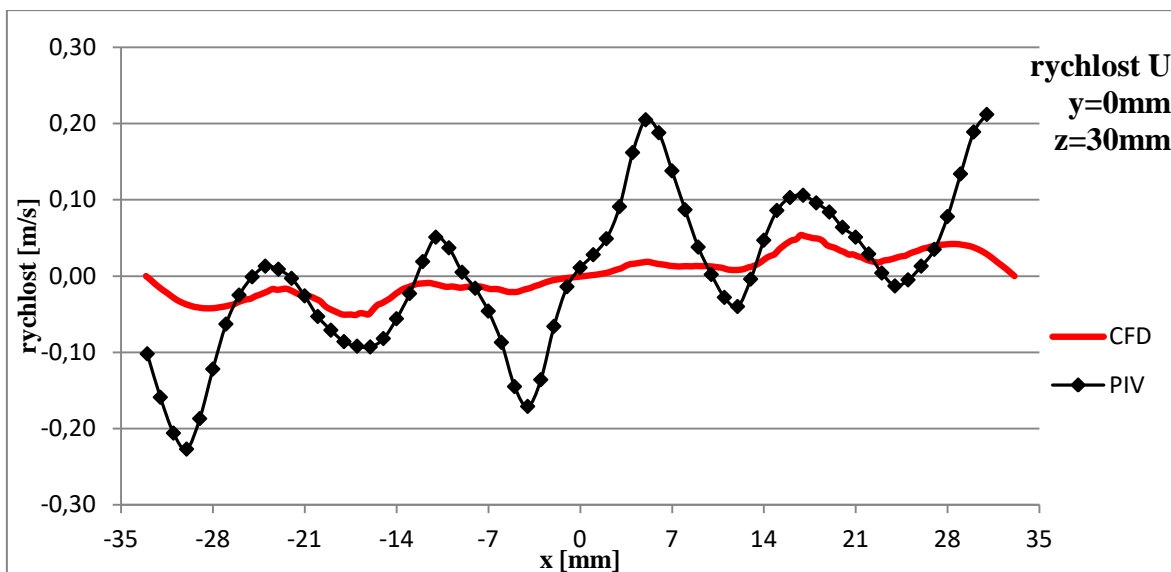
Velocity
rychlost w



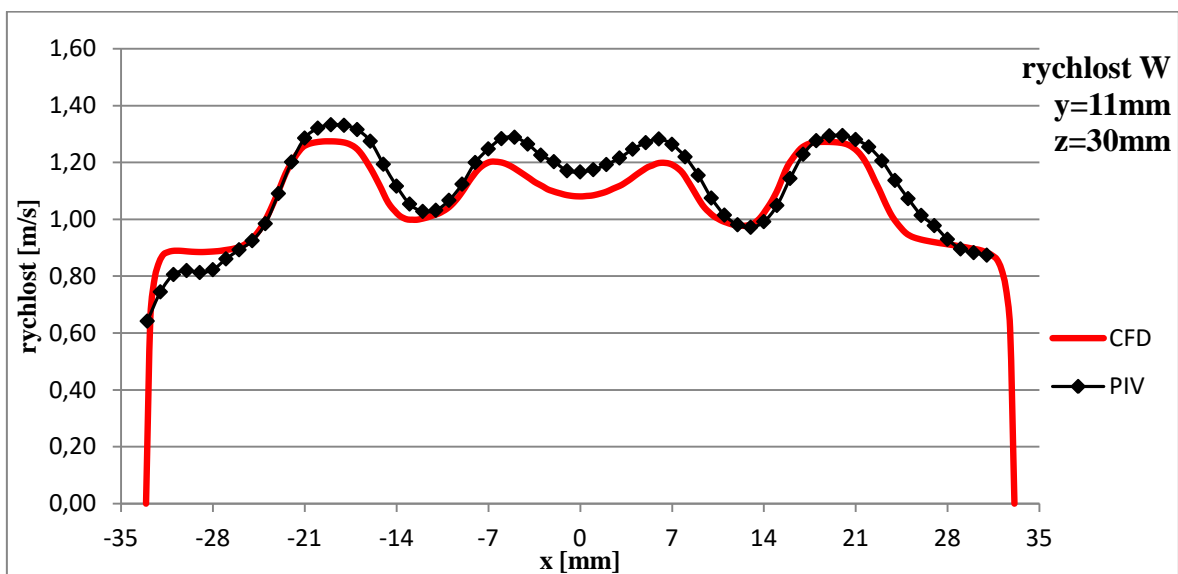
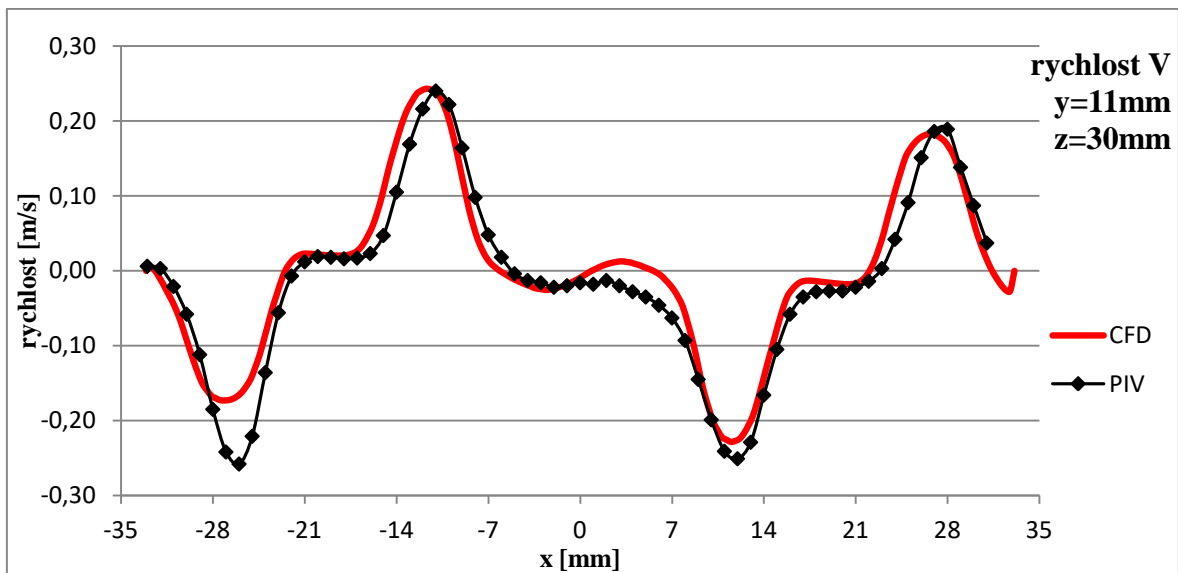
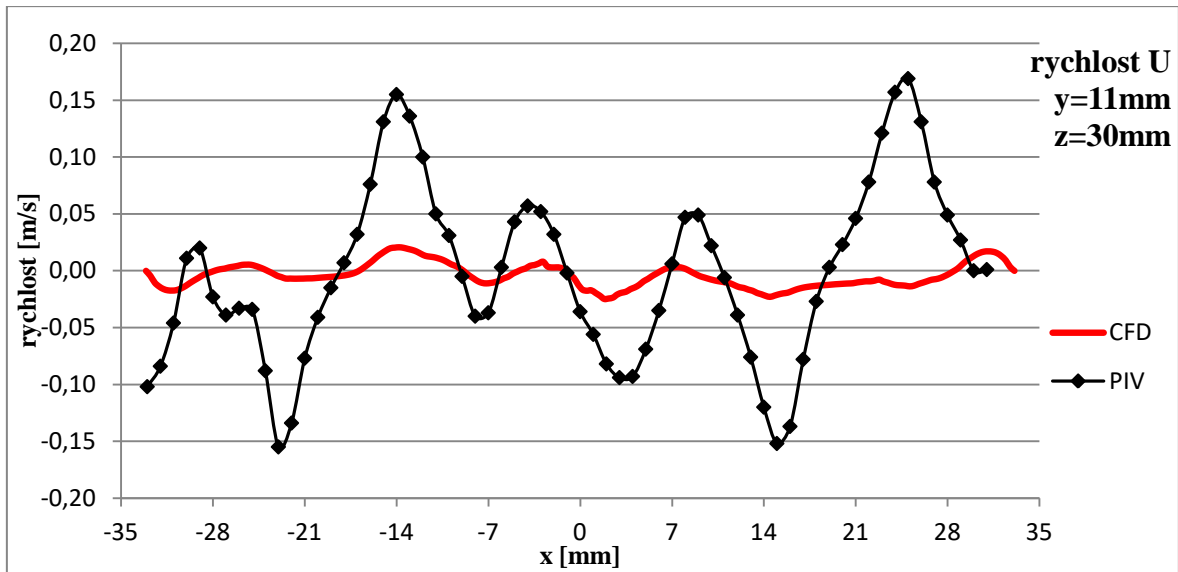
ANSYS
R16.2
Academic



Obrázek 46: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 30 mm

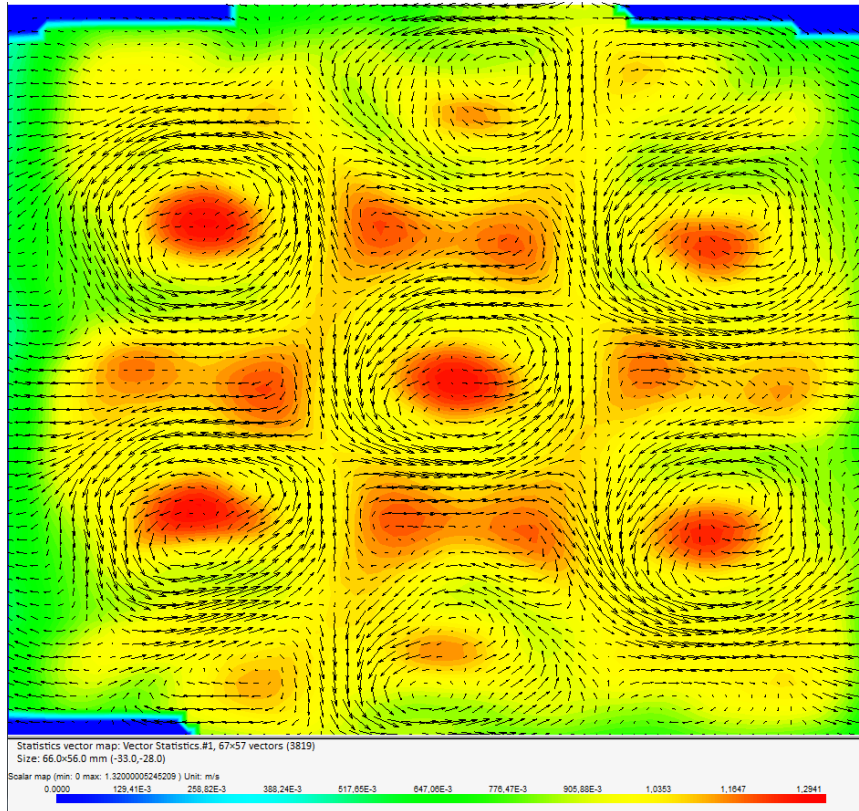


Obrázek 47: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 30 mm, y=0mm

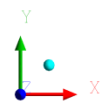
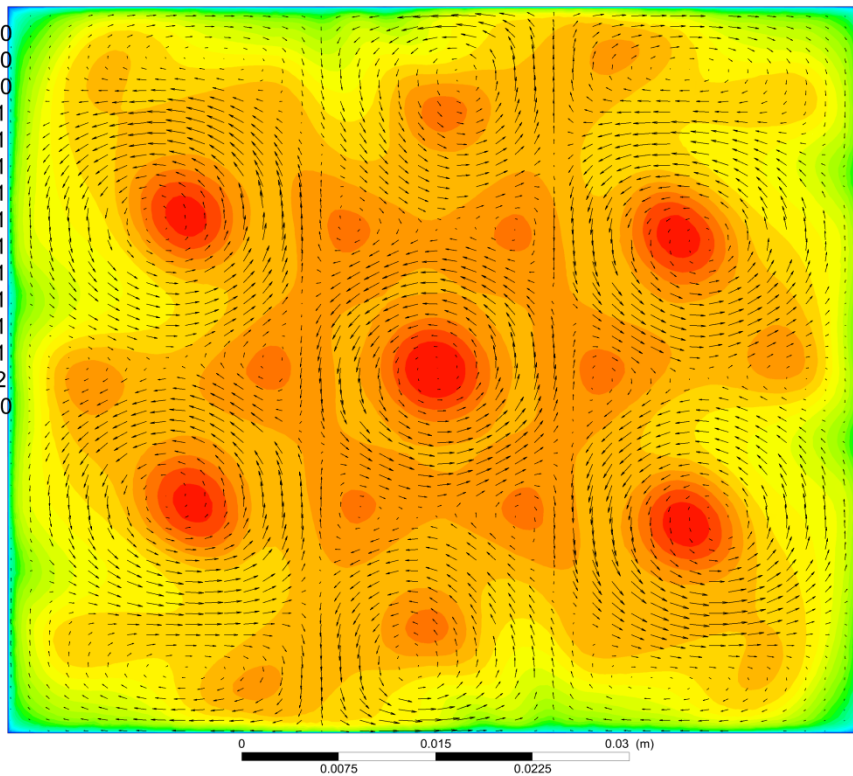


Obrázek 48: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 30 mm, y=11mm

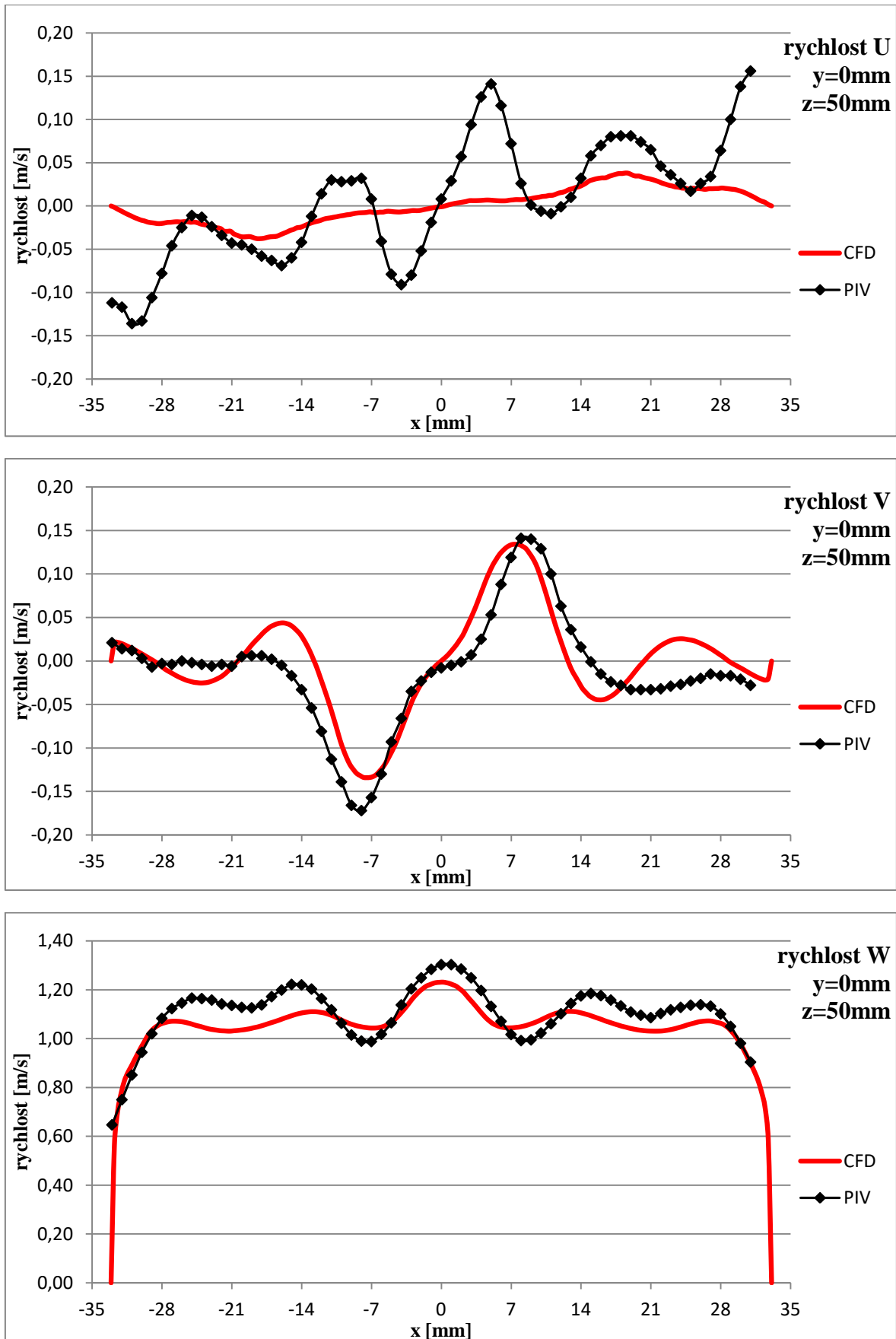
7.1.5 Vzdálenost $z=50$ mm za mřížkou mod. 1



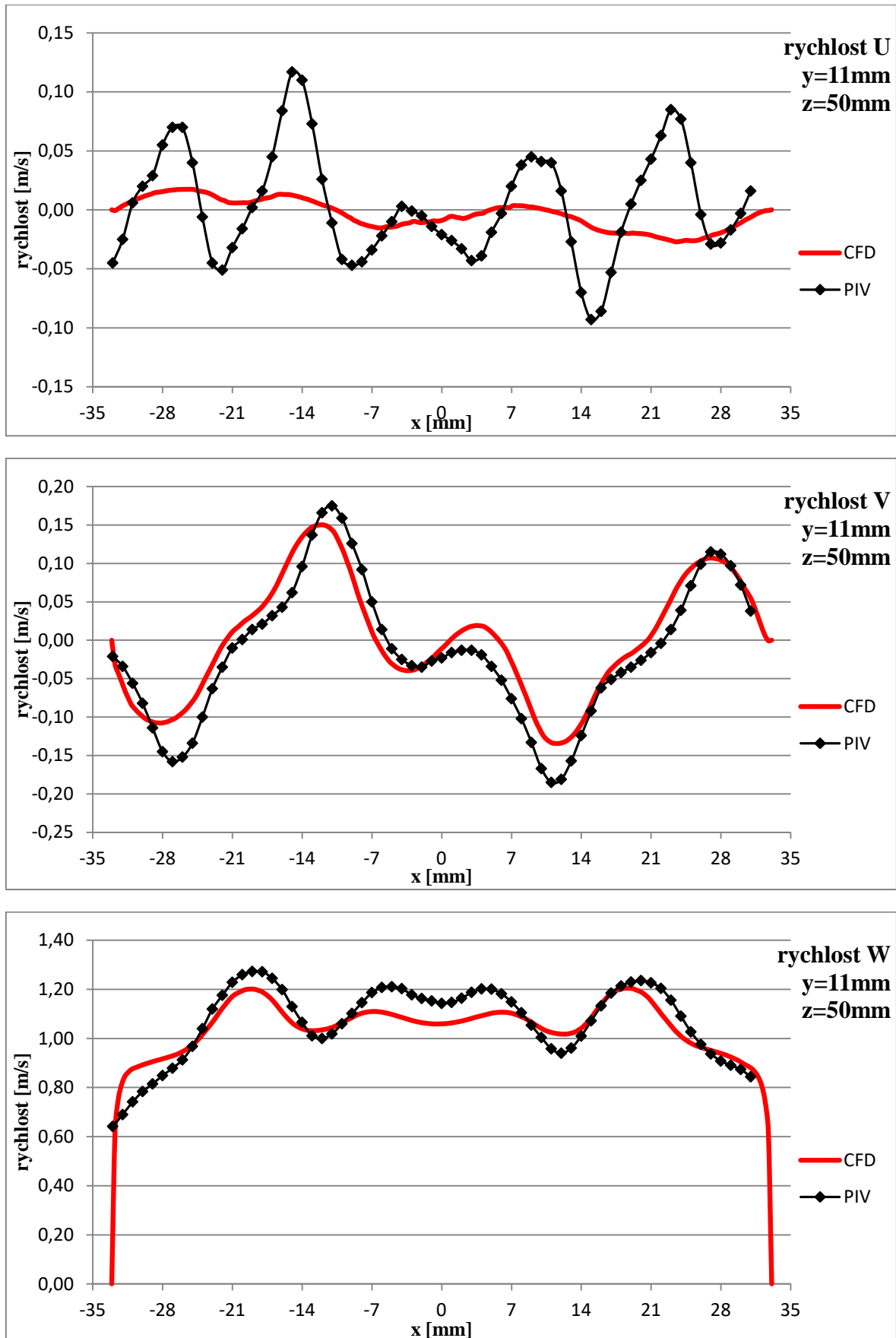
Velocity
rychlost w
1.231e+000
1.143e+000
1.055e+000
9.674e-001
8.794e-001
7.915e-001
7.035e-001
6.156e-001
5.276e-001
4.397e-001
3.518e-001
2.638e-001
1.759e-001
8.794e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 49: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 50 mm

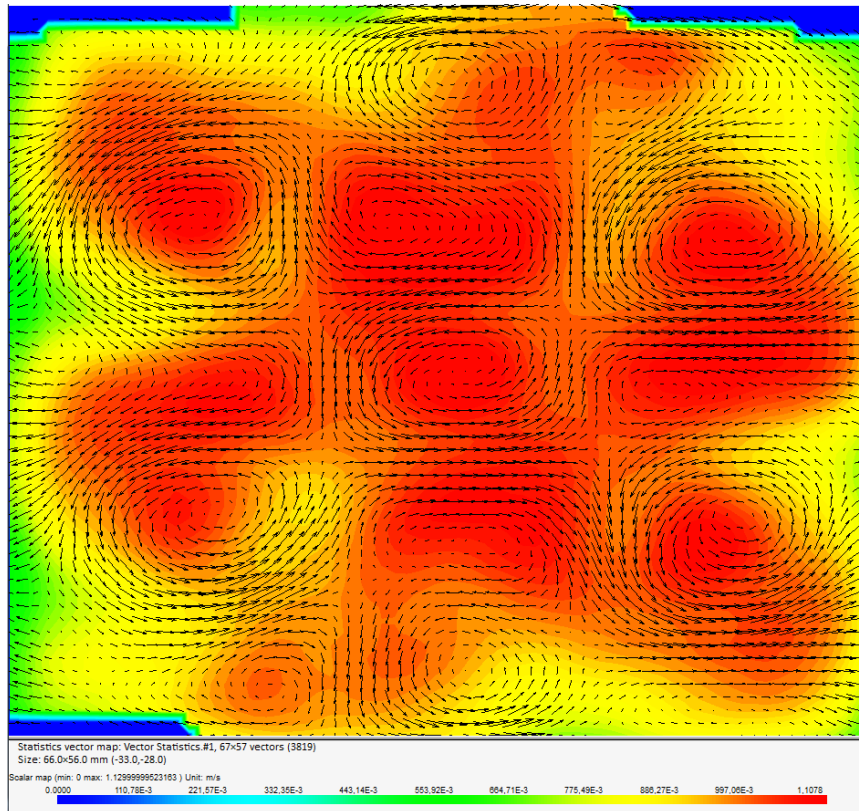


Obrázek 50: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, $z=50\text{ mm}$, $y=0\text{mm}$

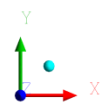
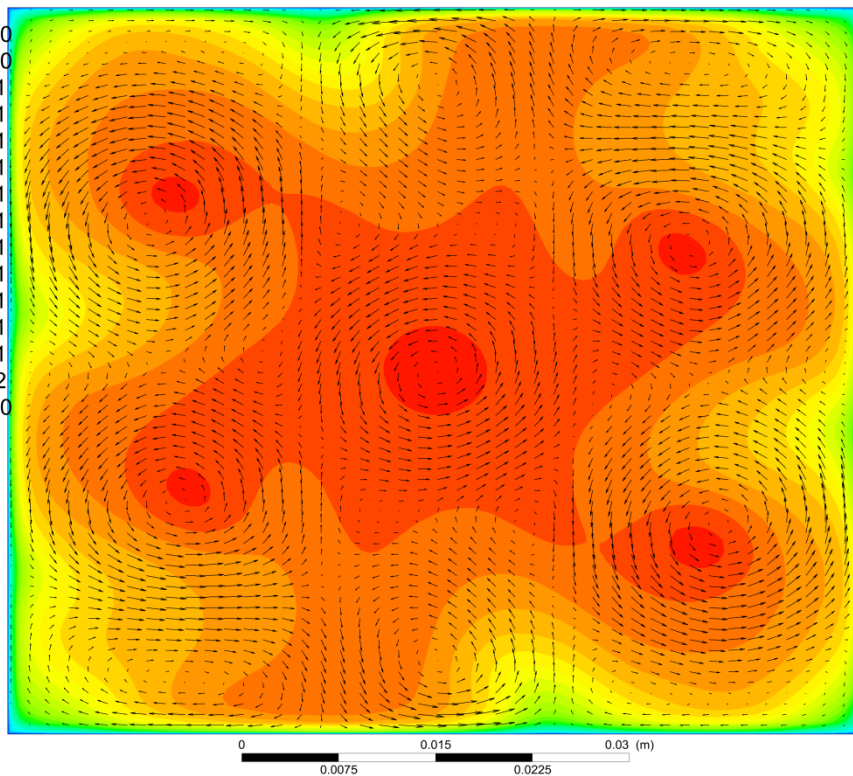


Obrázek 51: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 50 mm, y=11mm

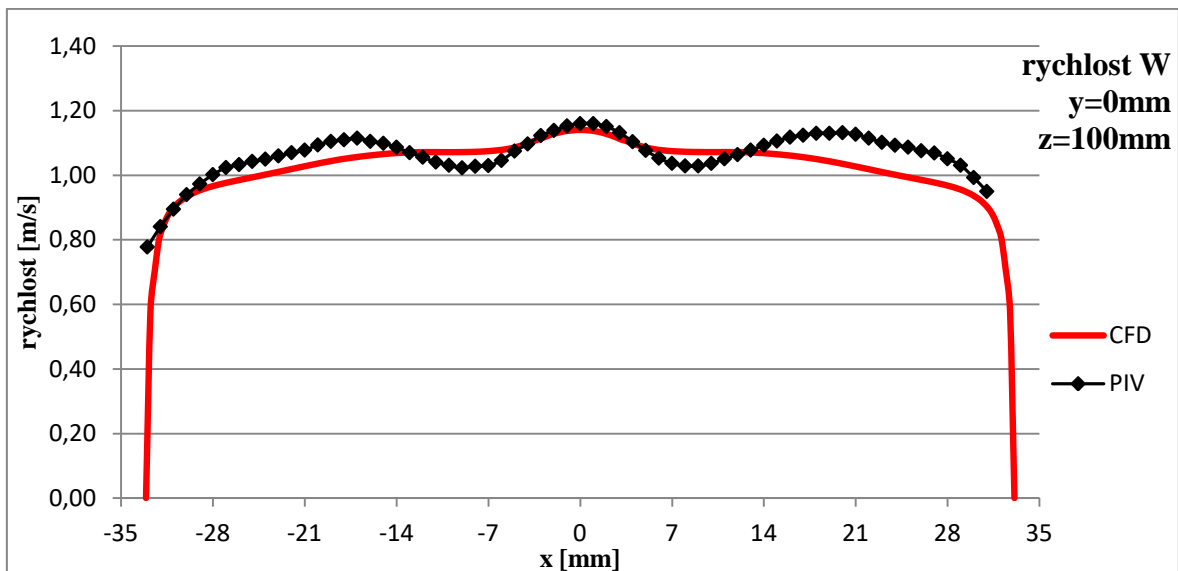
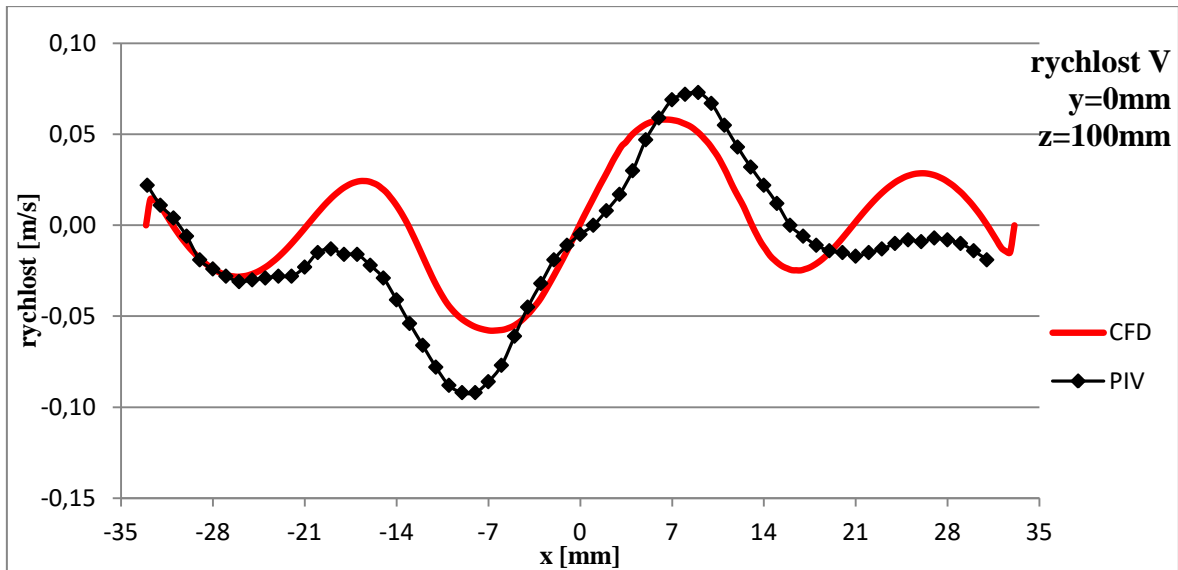
7.1.6 Vzdálenost $z=100$ mm za mřížkou mod. 1



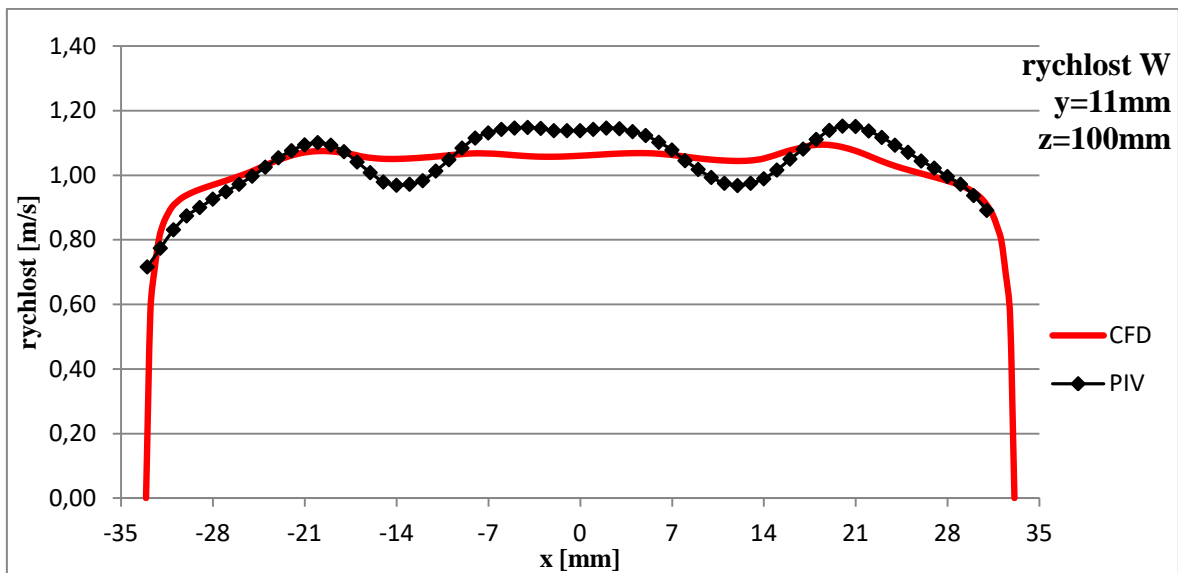
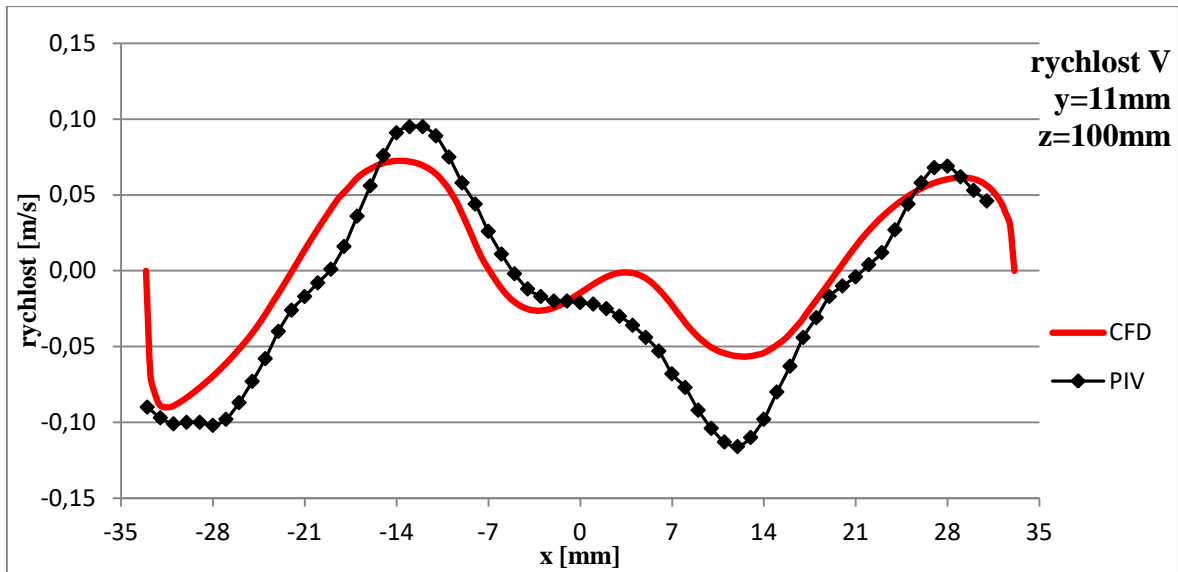
Velocity
rychlost w
1.140e+000
1.059e+000
9.775e-001
8.961e-001
8.146e-001
7.331e-001
6.517e-001
5.702e-001
4.888e-001
4.073e-001
3.258e-001
2.444e-001
1.629e-001
8.146e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 52: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 100 mm

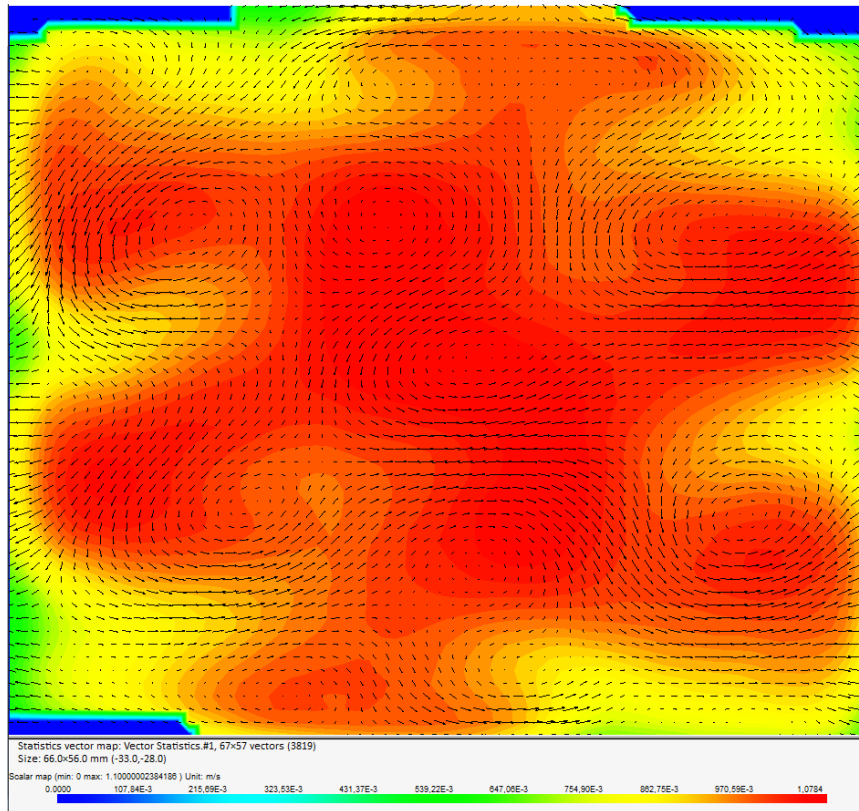


Obrázek 53: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 100 mm, y=0 mm

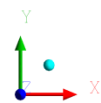
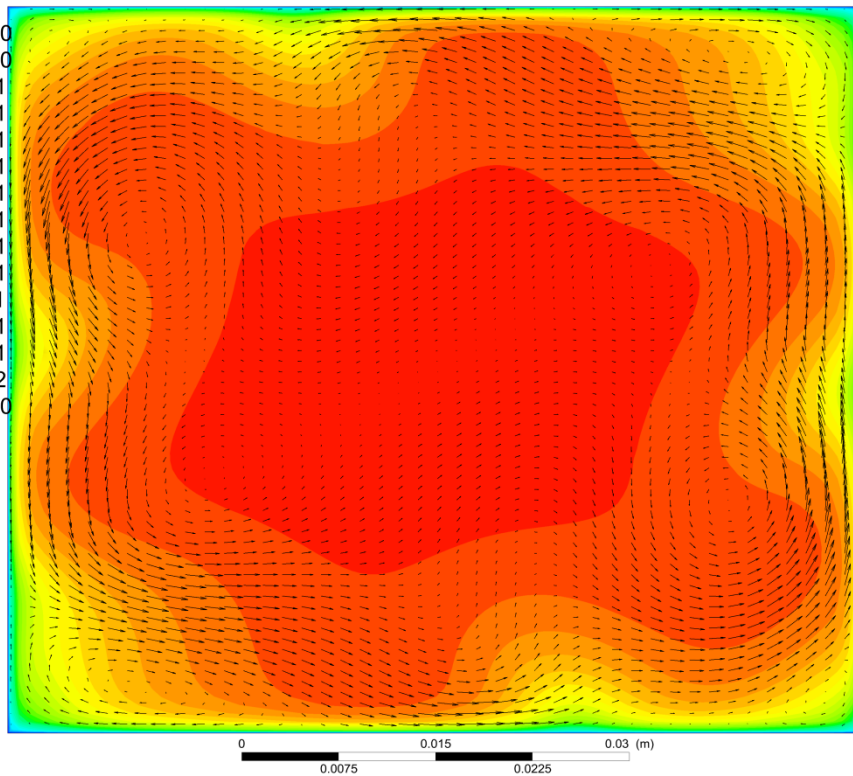


Obrázek 54: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, $z = 100$ mm, $y = 11$ mm

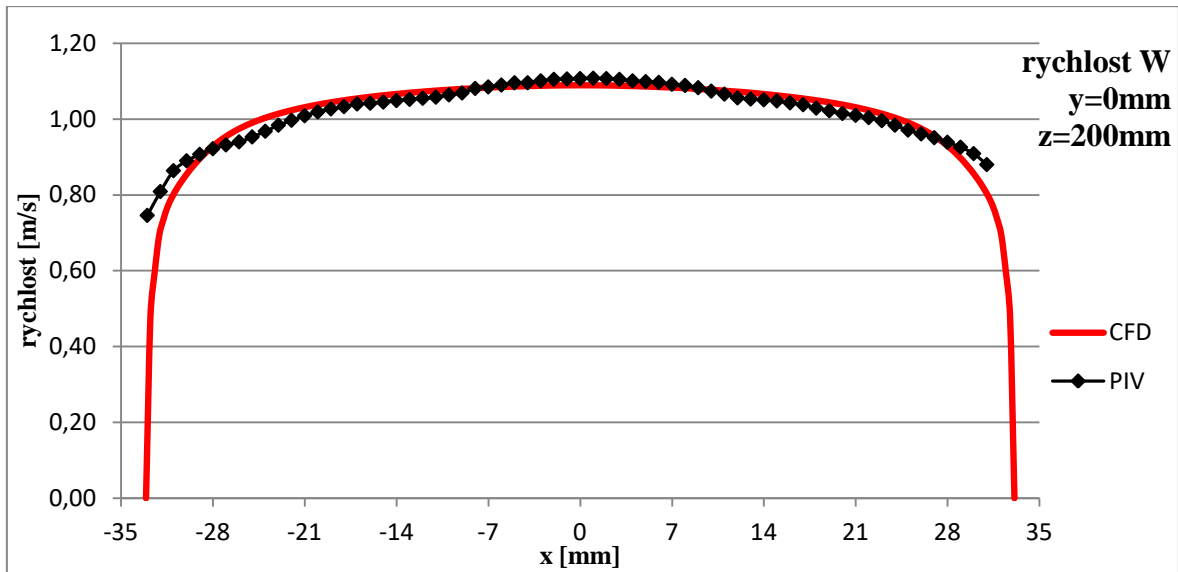
7.1.7 Vzdálenost $z=200$ mm za mřížkou mod. 1



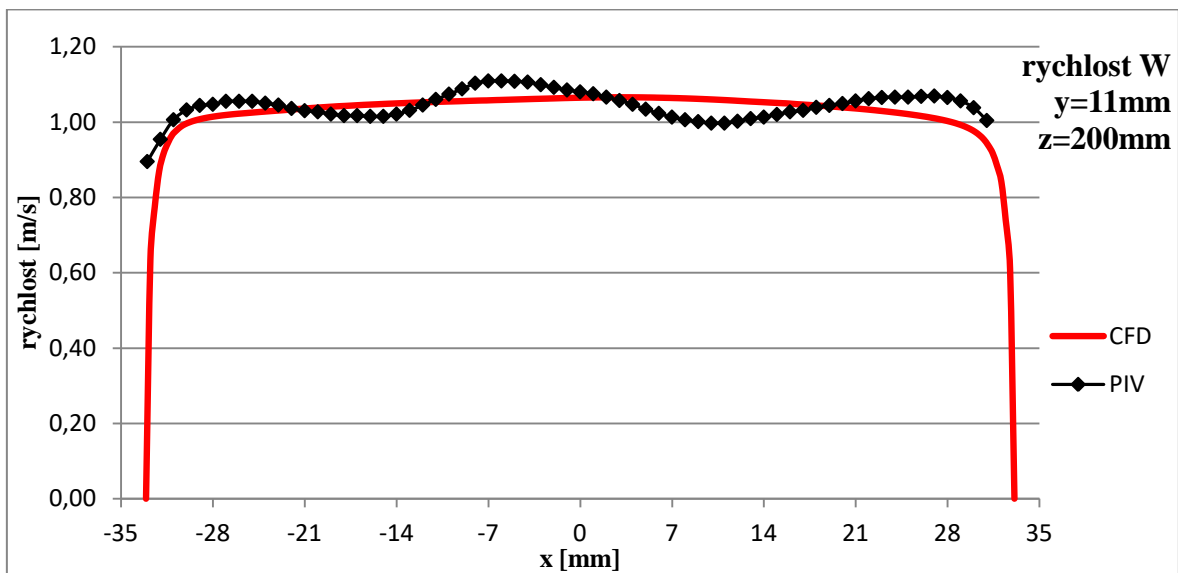
Velocity
rychlost w
1.089e+000
1.012e+000
9.337e-001
8.559e-001
7.781e-001
7.003e-001
6.225e-001
5.447e-001
4.669e-001
3.890e-001
3.112e-001
2.334e-001
1.556e-001
7.781e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 55: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 200 mm

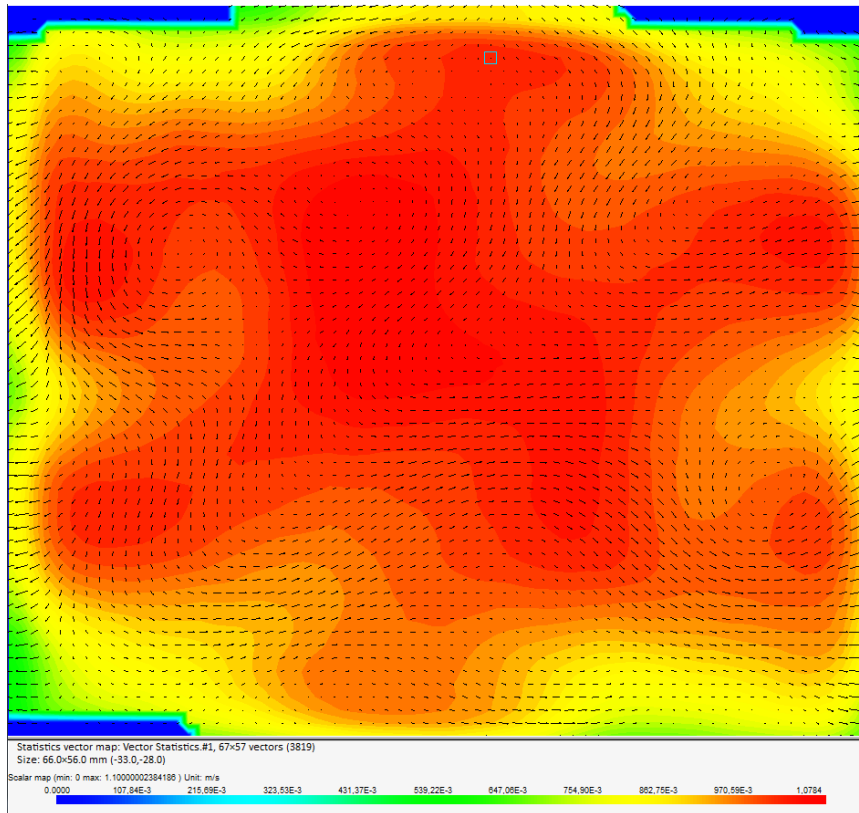


Obrázek 56: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 200 mm, y=0 mm

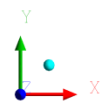
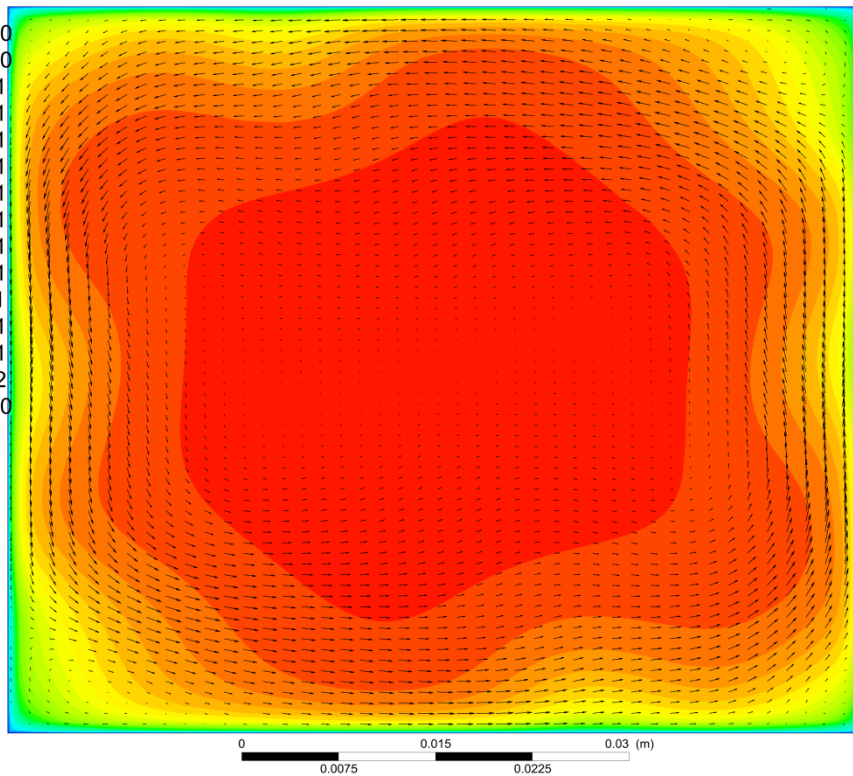


Obrázek 57: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 200 mm, y=11 mm

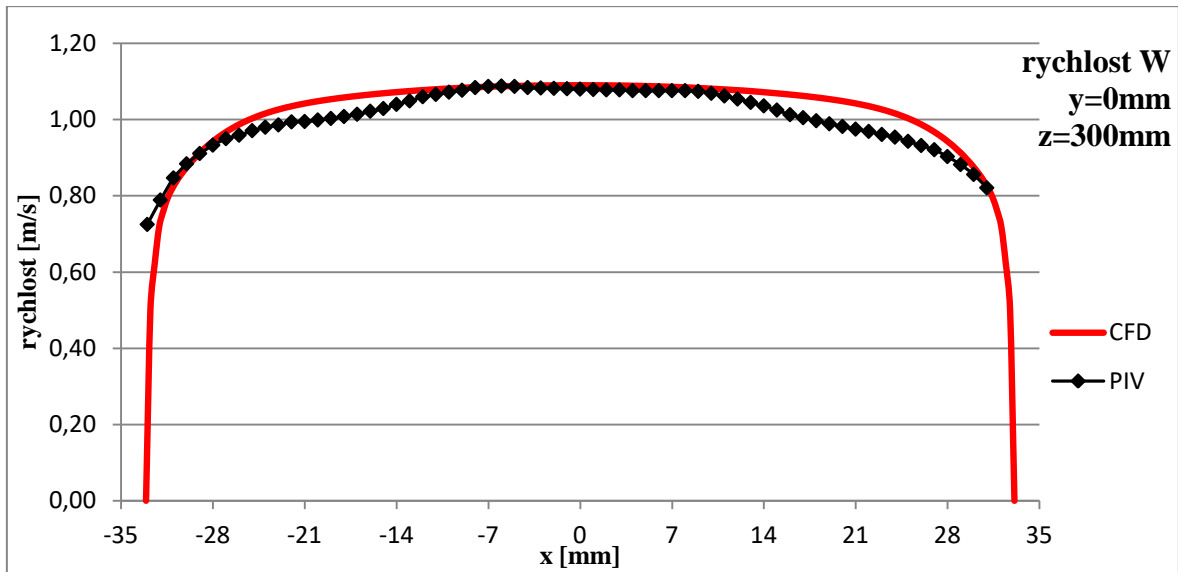
7.1.8 Vzdálenost $z=300$ mm za mřížkou mod. 1



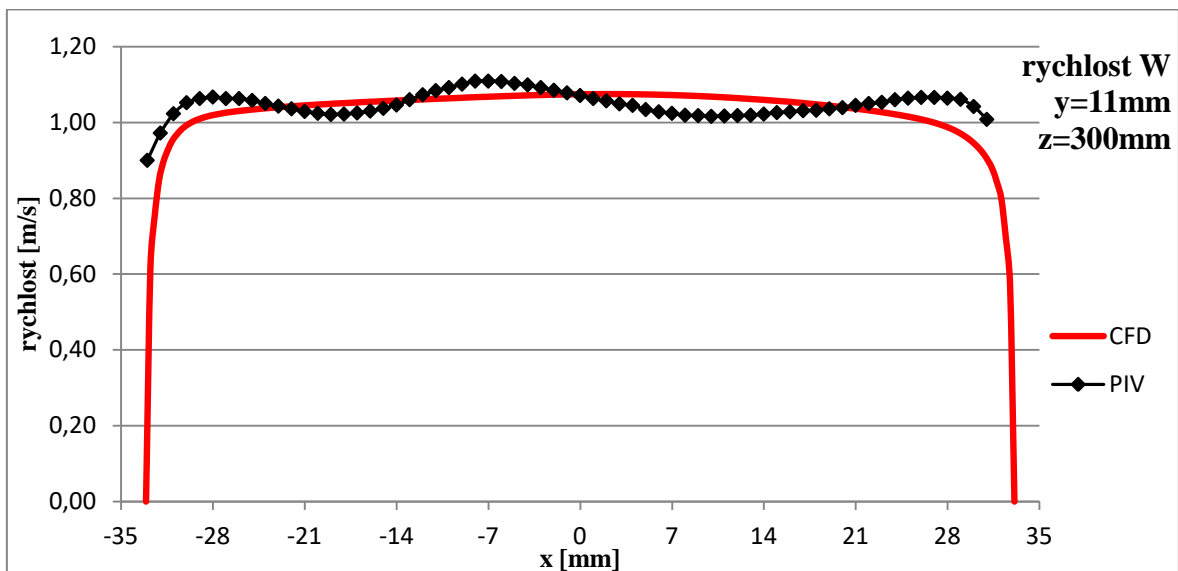
Velocity
rychlost w
1.090e+000
1.012e+000
9.344e-001
8.565e-001
7.786e-001
7.008e-001
6.229e-001
5.451e-001
4.672e-001
3.893e-001
3.115e-001
2.336e-001
1.557e-001
7.786e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 58: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 300 mm



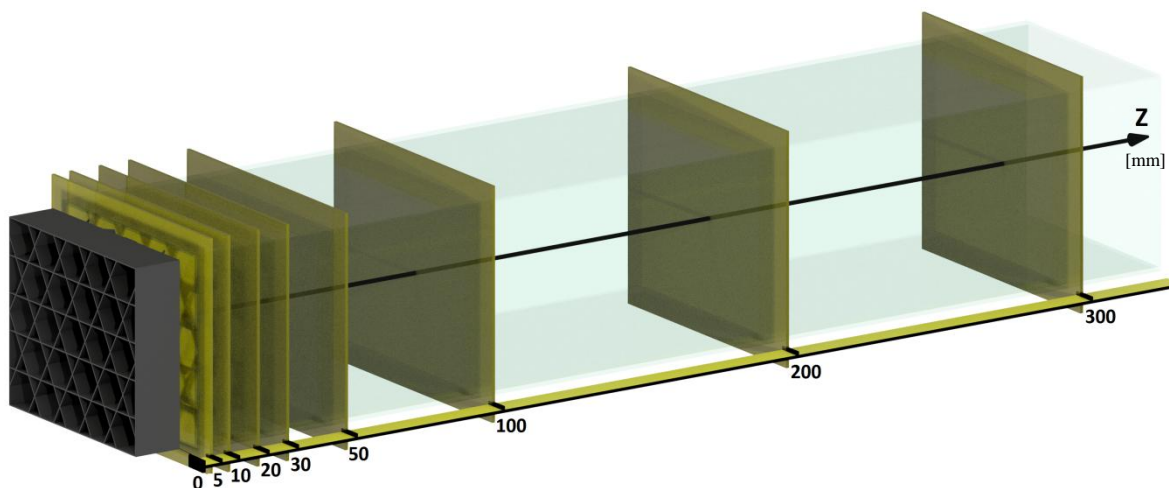
Obrázek 59: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 300 mm, y=0 mm



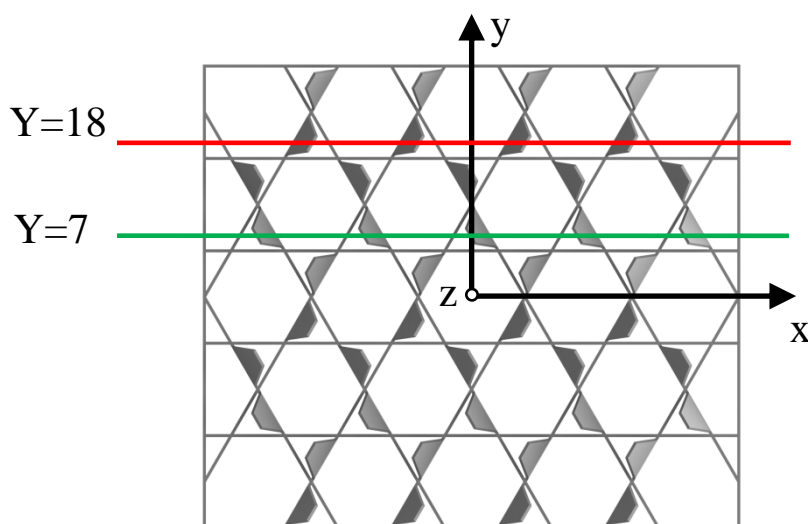
Obrázek 60: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 300 mm, y=11 mm

7.2 Porovnání výsledků mřížky mod. 2

Pro porovnání výsledků bylo zvoleno osm společných vyšetřovaných rovin kolmých ke směru proudu. Vyšetřované roviny náleží souřadnicím x , y . Zvolené roviny vzhledem k poloze mřížky mod. 2 jsou zobrazeny na obrázku 61. V každé z vyšetřovacích rovin jsou následně zjištěny jednotlivé složky rychlostí ve dvou úsečkách, které jsou vidět na obrázku 62. Poloha úseček byla zvolena z důvodu vyšetření a porovnání složky rychlosti ve směru x . Mísící mřížka typu mod. 2 generuje proud, který se podílí na přesouvání chladiva mezi palivovými články.



Obrázek 61: Vyšetřované roviny vzhledem k poloze mřížky mod. 2



Obrázek 62: Poloha úseček pro porovnání složek rychlostí

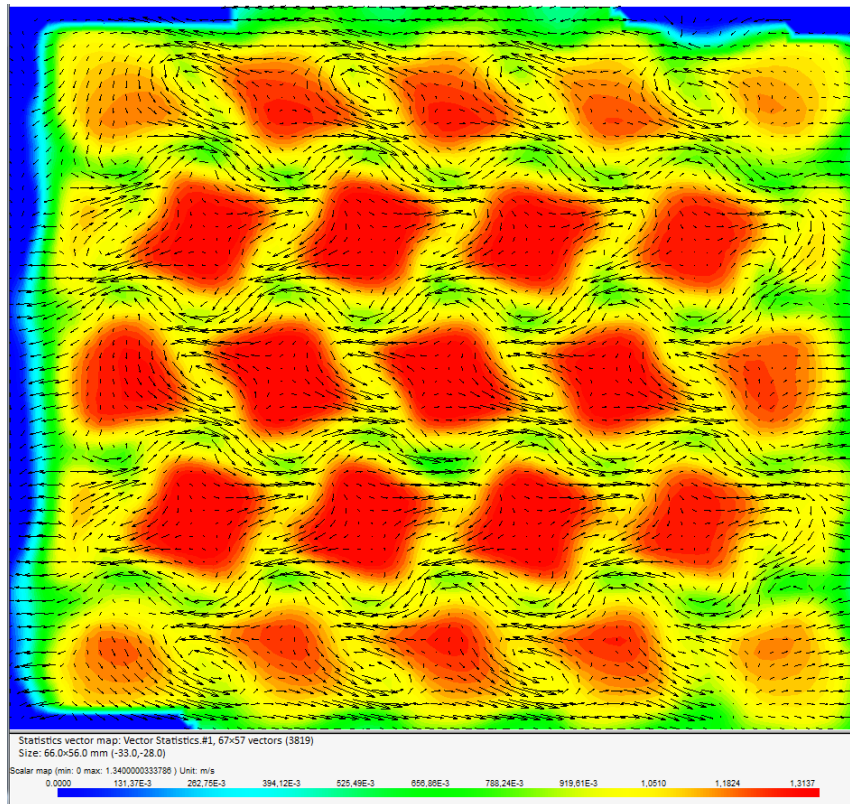
Na následujících stránkách jsou v každé z osmi rovin porovnávány struktury vektorů příčných rychlostí U , V a třetí složka rychlosti W je stejným způsobem zobrazena pomocí barevné škály. Oproti předchozímu typu mřížky mod. 1 je u této mřížky důležitá složka rychlosti ve směru x . Tato složka rychlosti U je nejvýraznější v blízkosti za mřížkou. S postupnou vzdáleností hodnota klesá, ve vzdálenosti 30 mm dosahuje jen polovinu původní rychlosti. Pro porovnání zmíněné rychlosti U byly polohy obou úseček posunuty tak, aby procházely středy konců lopatek ve dvou řadách s opačným umístěním lopatek.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.1, i zde byla vyrobená mřížka typ mod. 2 svými rozměry odlišná od návrhu. CFD model mřížky mod. 2 musel být také upraven. Z porovnaných výsledků je i zde vidět mírná odchylka v maximálních rychlostech proudu. Vzhledem ke stejnému průběhu obou měření, lze usuzovat, že faktory mající vliv na výsledek měření byly shodné. Hlavním faktorem byla nastavená hodnota průtoku kanálem pomocí „kýblové metody“, dále zmíněné geometrické a rozměrové nepřesnosti vyrobené sestavy kanálů a samotné mřížky. Mřížka mod. 2 byla vlepena stejným způsobem na konec nerezového kanálu jako mřížka mod. 1. Výsledné umístění mřížky mohlo mít vliv na skutečnou vzdálenost mřížky od vyšetřované roviny. Tento vliv by byl výrazný především v malé vzdálenosti za mřížkou, kde se charakter proudění a především velikosti jednotlivých složek rychlostí výrazně mění s každou desetinou milimetru.

Z porovnaných výsledků je patrné, že vyrovnání proudu dochází u experimentu na větší vzdálenosti od mřížky, oproti výsledkům CFD výpočtu. Rozdílné vyrovnání by mohlo být způsobeno tím, že vyšetřované úsečky ve zvolených polohách neodpovídají skutečné poloze umístěné mřížky v nerezovém kanále. Druhou možností je více disipativní model oproti změřenému proudění v kanále. Posledním faktorem, který může mít vliv na porovnané výsledky, je samotné zobrazení výsledků ve formě vektorového pole s barevnými konturami. Výsledky obou metod byly zpracovány v odlišném softwaru.

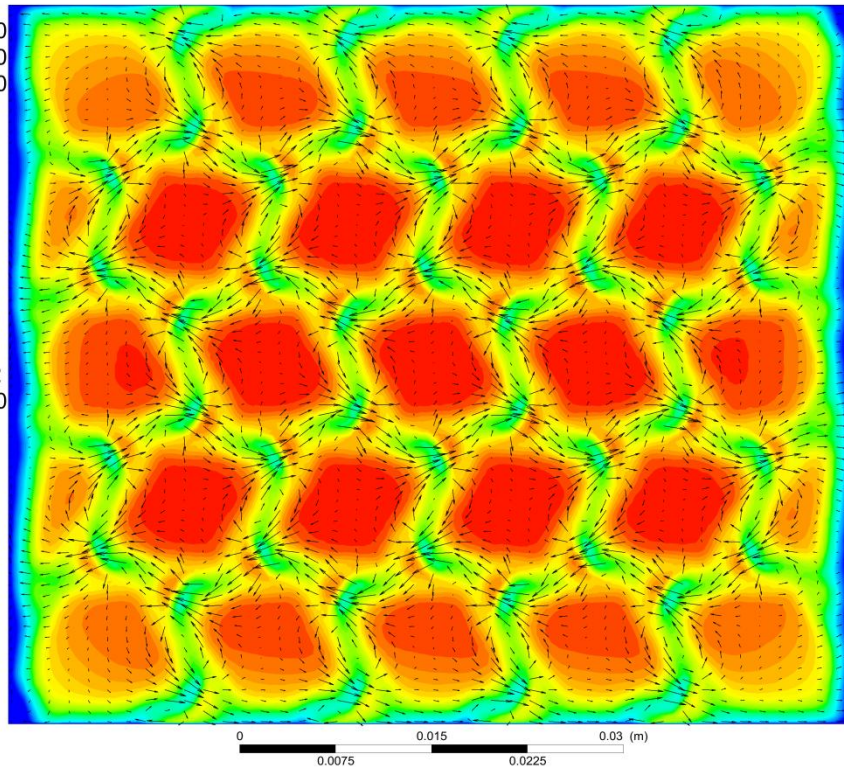
Na základě komparace výsledků je patrné, že od vzdálenosti 100 mm za mřížkou dochází k výraznému potlačování příčných rychlostí. Začíná se prosazovat hlavní proud. Od této vzdálenosti už nejsou porovnány rychlosti V ve směru y , protože jejich hodnoty jsou menší než 0,05 m/s. Od vzdálenosti 200 mm za mřížkou jsou příčné rychlosti U , V téměř nulové a nemají vliv na hlavní proud. Z tohoto důvodu byly pro poslední dvě vyšetřované roviny porovnány jen rychlosti W ve směru hlavního proudu, jejichž průběhy jsou velmi podobné. Ve vzdálených rovinách se na kraji oblasti vyskytuje deformace rychlostního profilu, která je pravděpodobně způsobena zachováním proudu vytvořeného mřížkou. [1]

7.2.1 Vzdálenost $z=5$ mm za mřížkou mod. 2

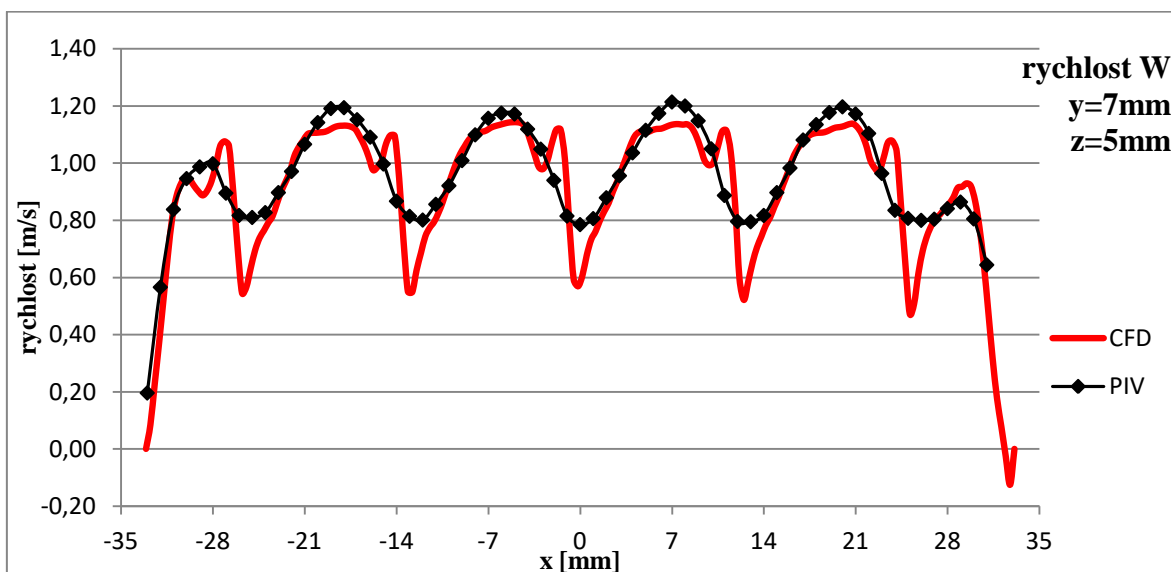
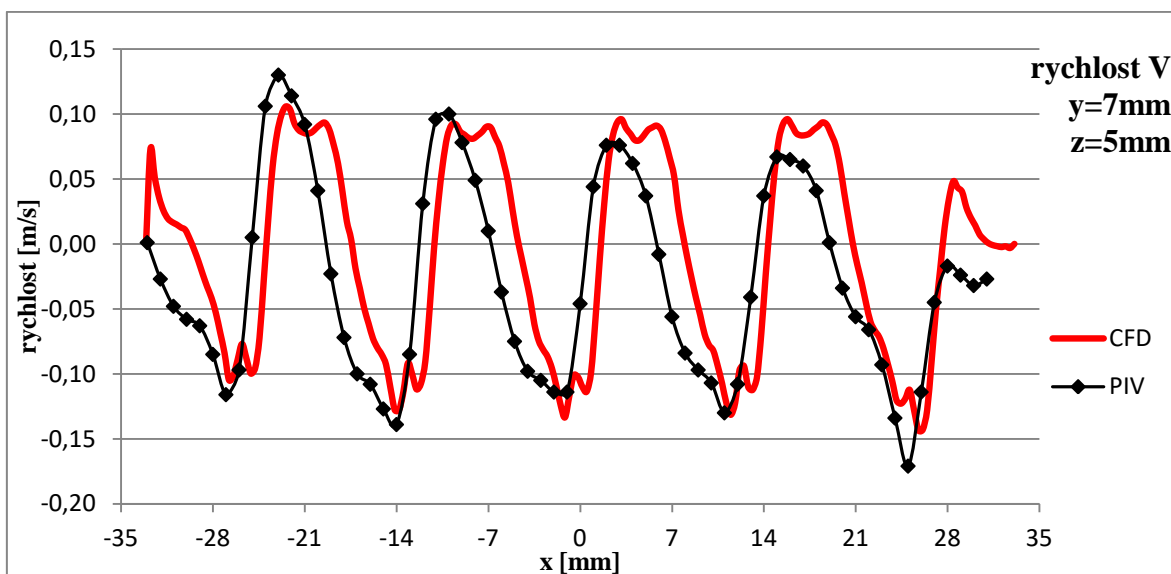
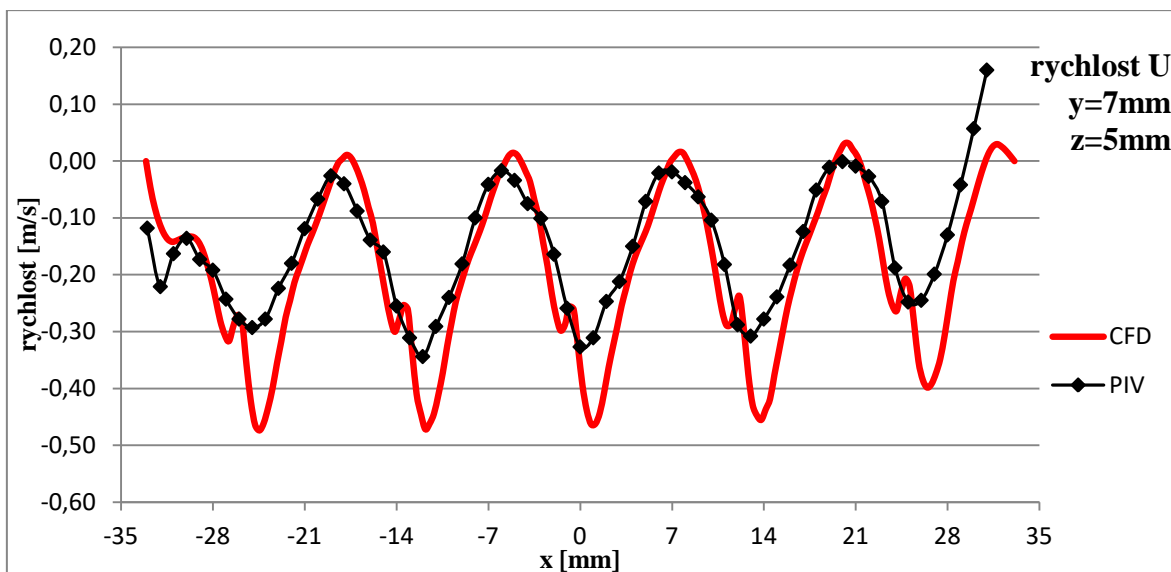


Velocity w
rychlost w
[m s⁻¹]

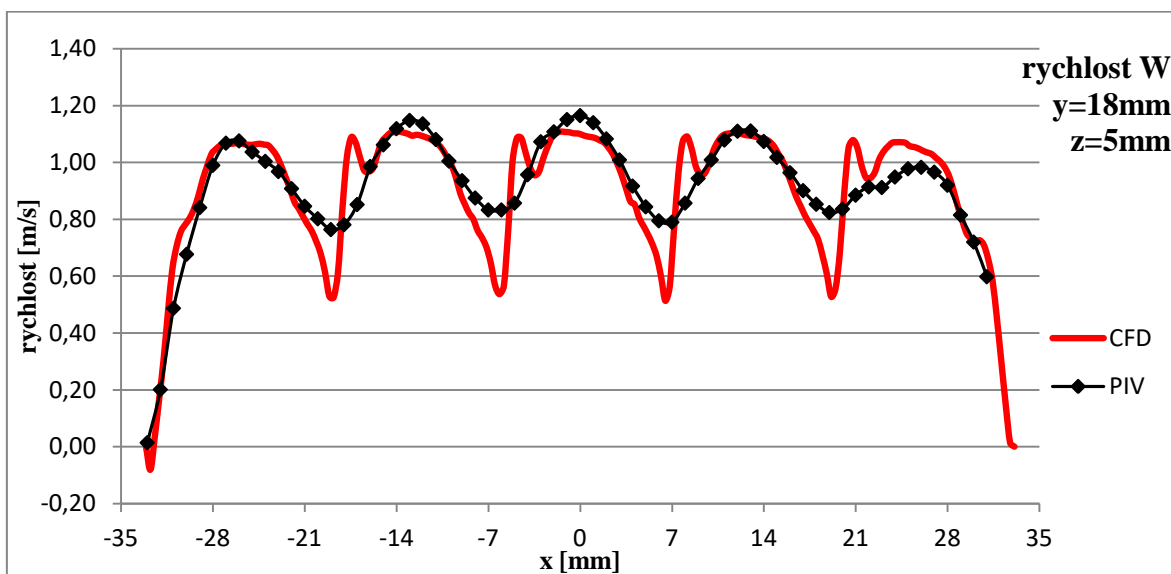
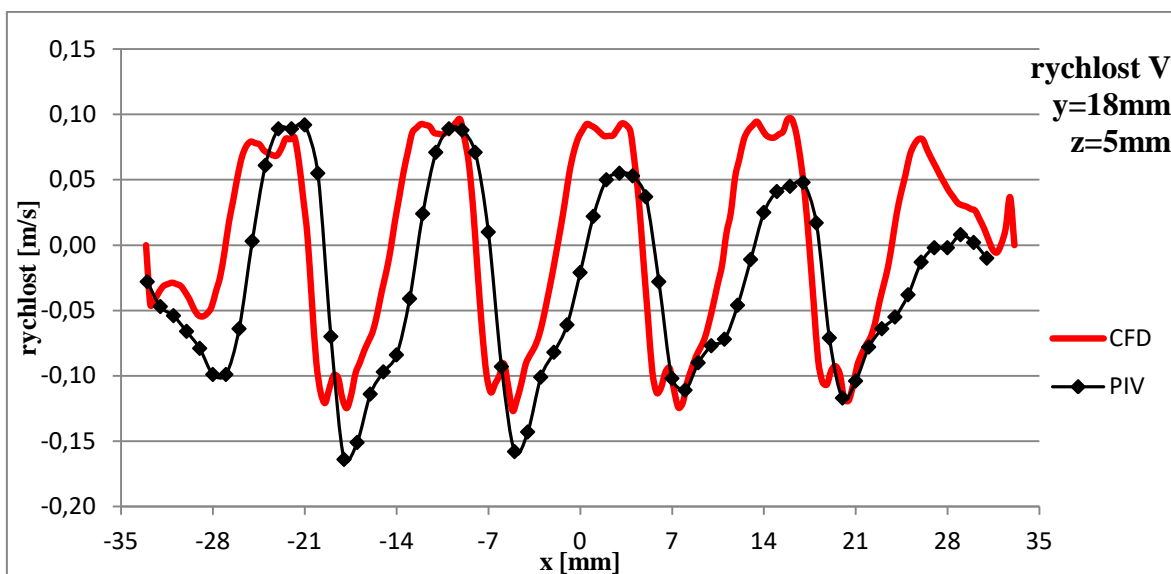
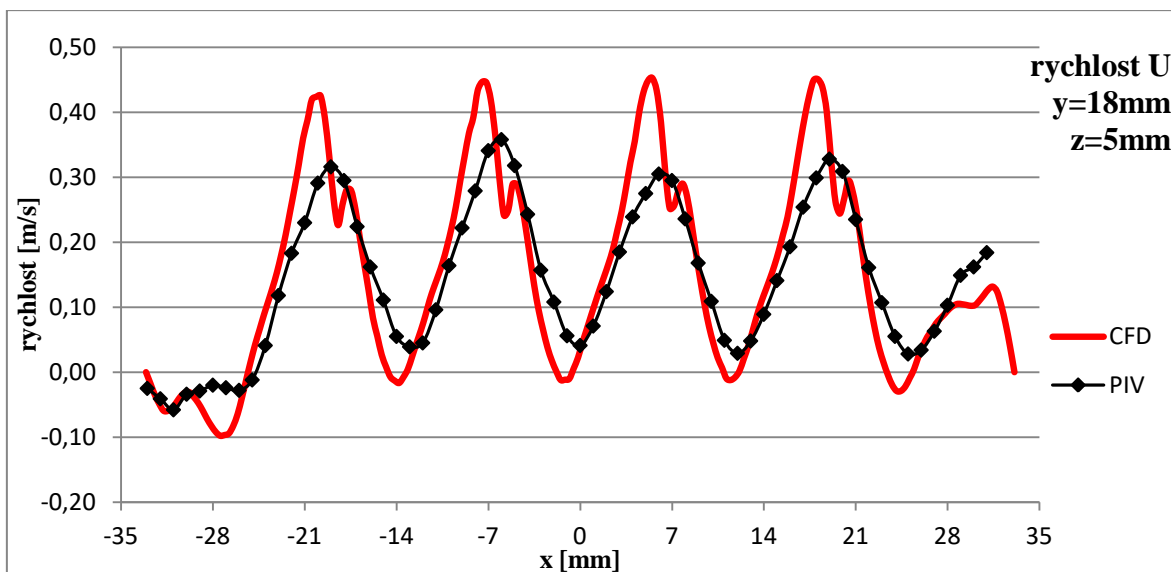
1.263e+000
1.173e+000
1.083e+000
9.924e-001
9.021e-001
8.119e-001
7.217e-001
6.315e-001
5.413e-001
4.511e-001
3.609e-001
2.706e-001
1.804e-001
9.021e-002
0.000e+000



Obrázek 63: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1m/s, vzdálenost 5 mm

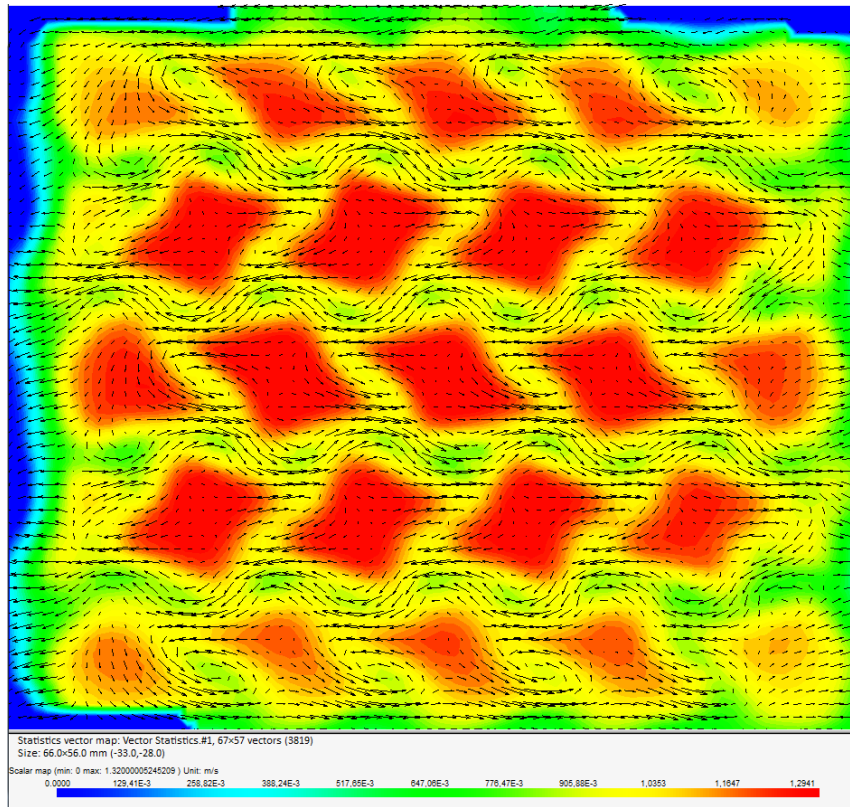


Obrázek 64: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, $z=5\text{ mm}$, $y=7\text{ mm}$



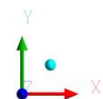
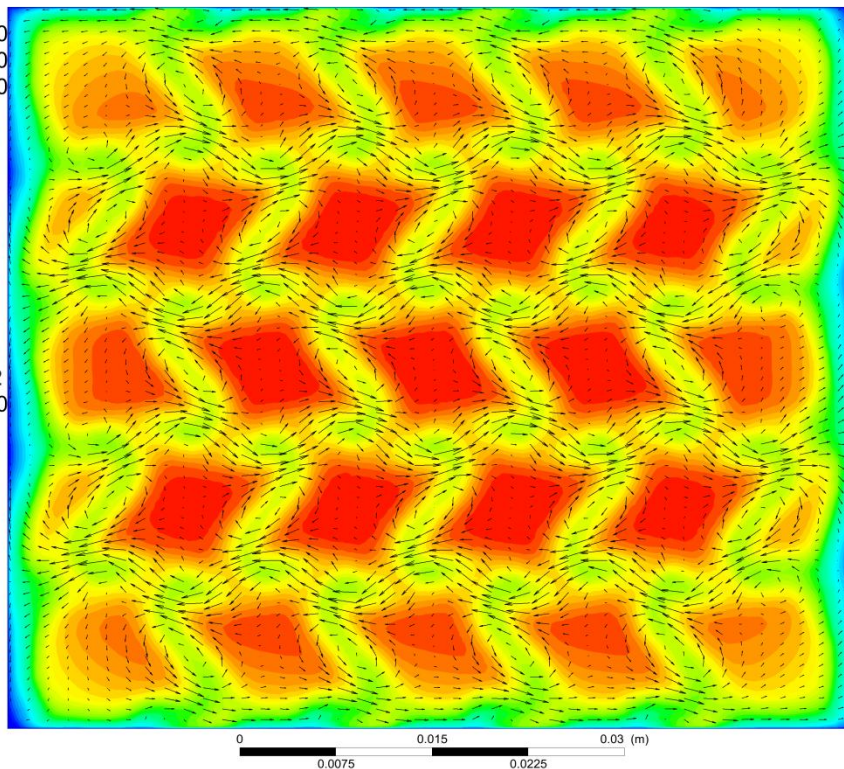
Obrázek 65: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z= 5 mm, y=18 mm

7.2.2 Vzdálenost $z=10$ mm za mřížkou mod. 2

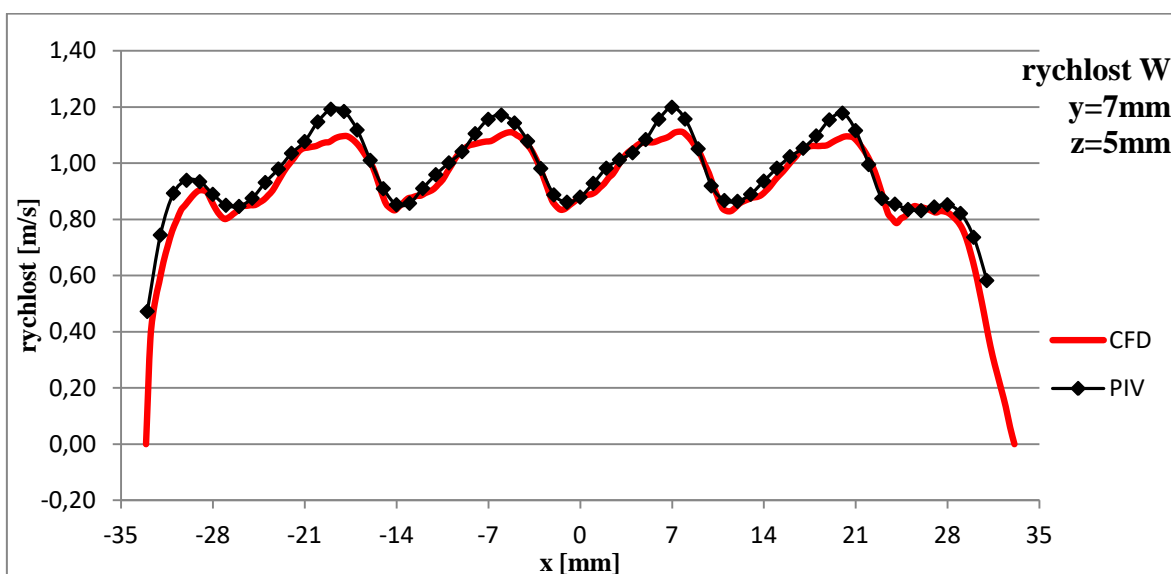
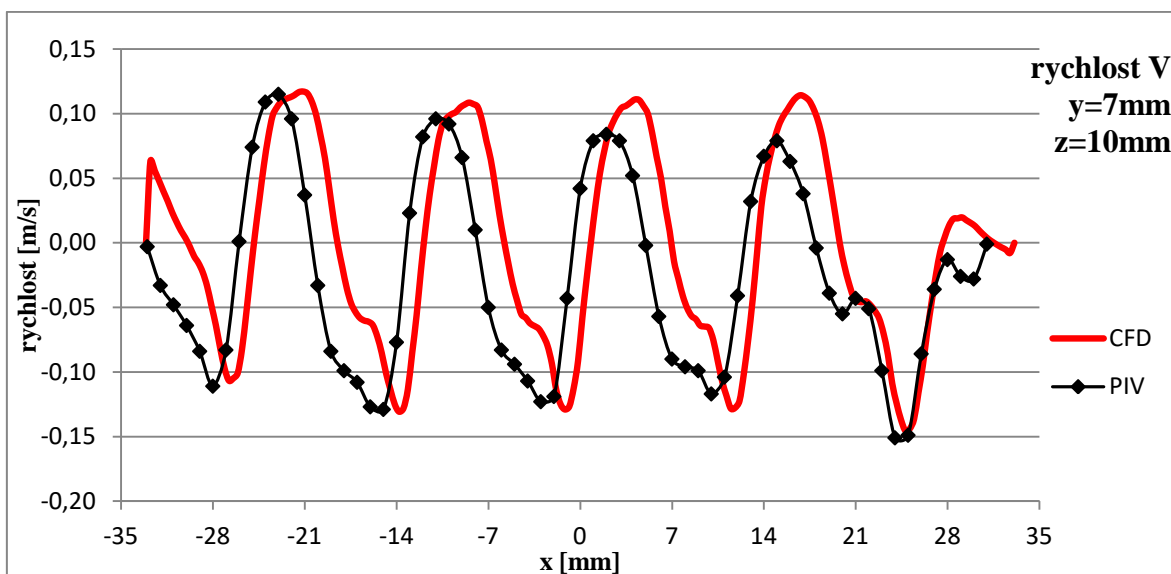
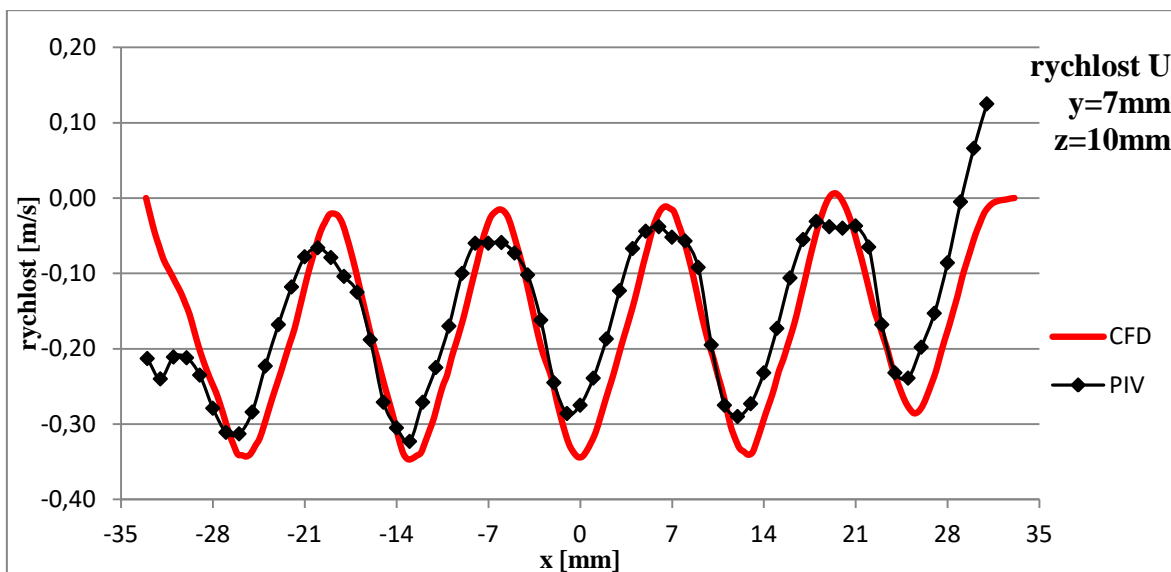


Velocity w
rychlost w
[m s⁻¹]

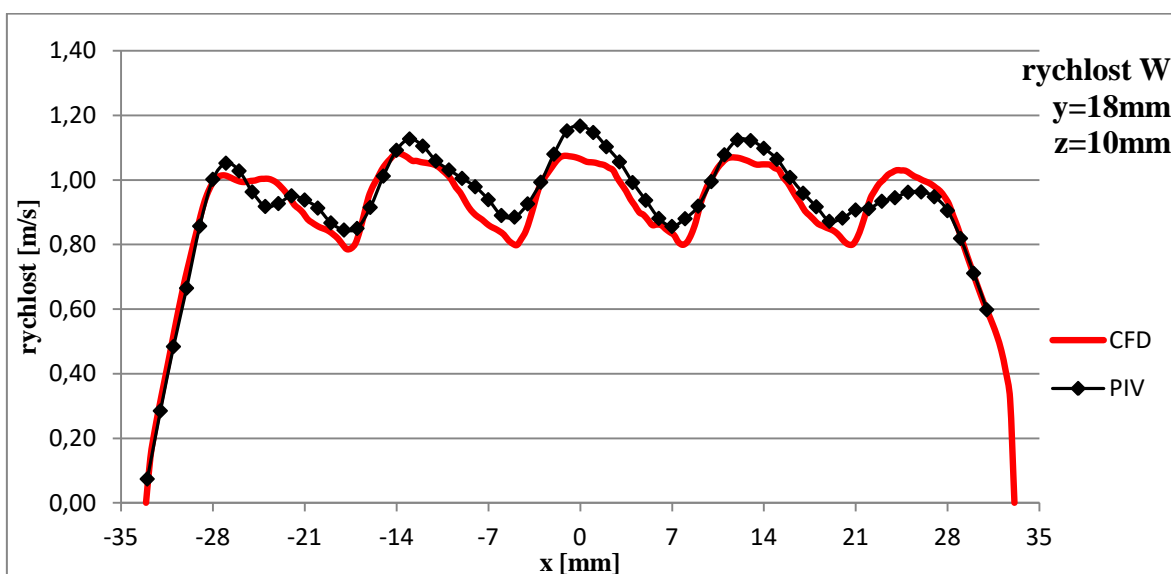
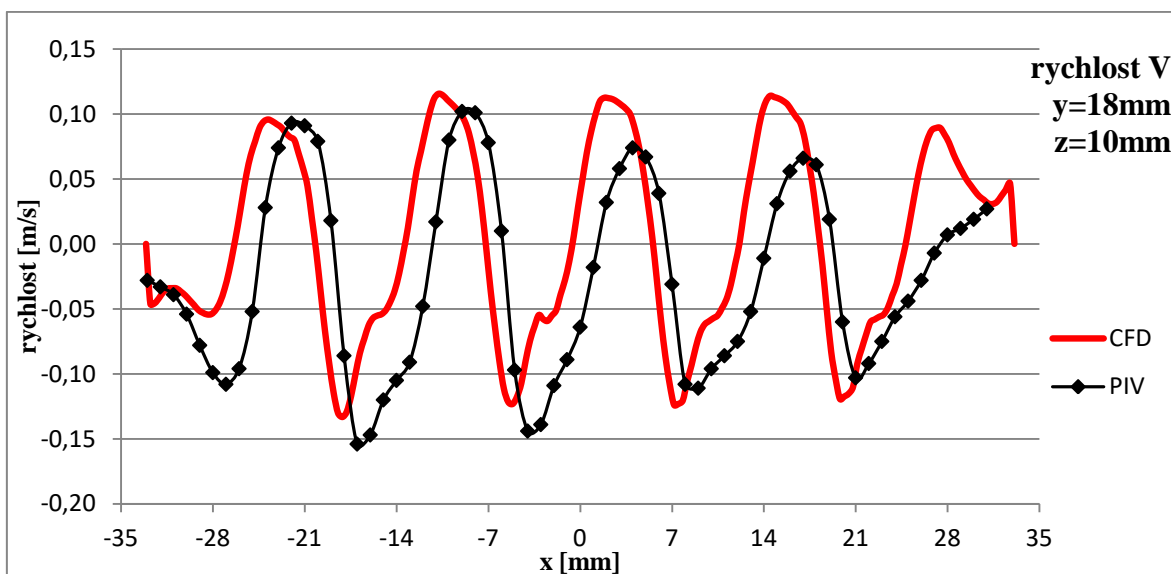
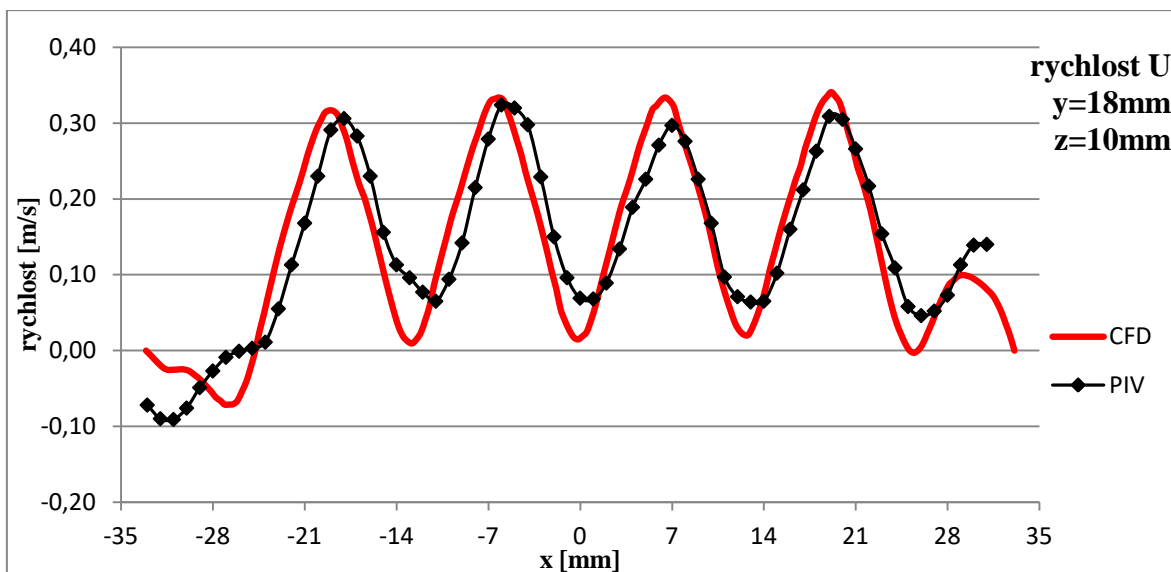
1.250e+000
1.161e+000
1.071e+000
9.821e-001
8.929e-001
8.036e-001
7.143e-001
6.250e-001
5.357e-001
4.464e-001
3.571e-001
2.679e-001
1.786e-001
8.929e-002
0.000e+000



Obrázek 66: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 10 mm

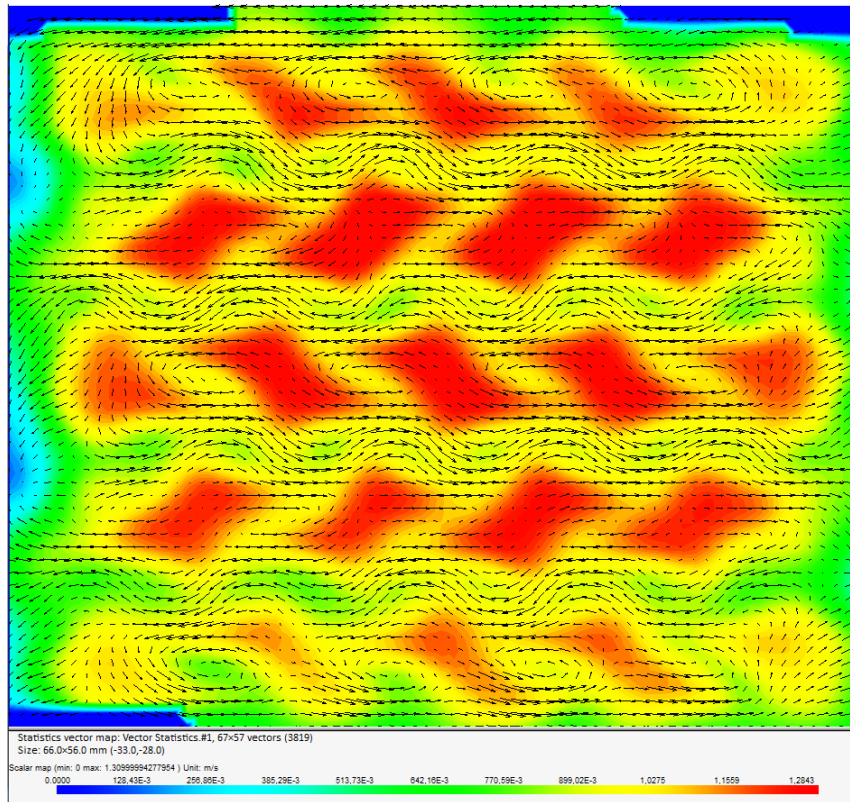


Obrázek 67: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=10 mm, y=7 mm

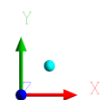
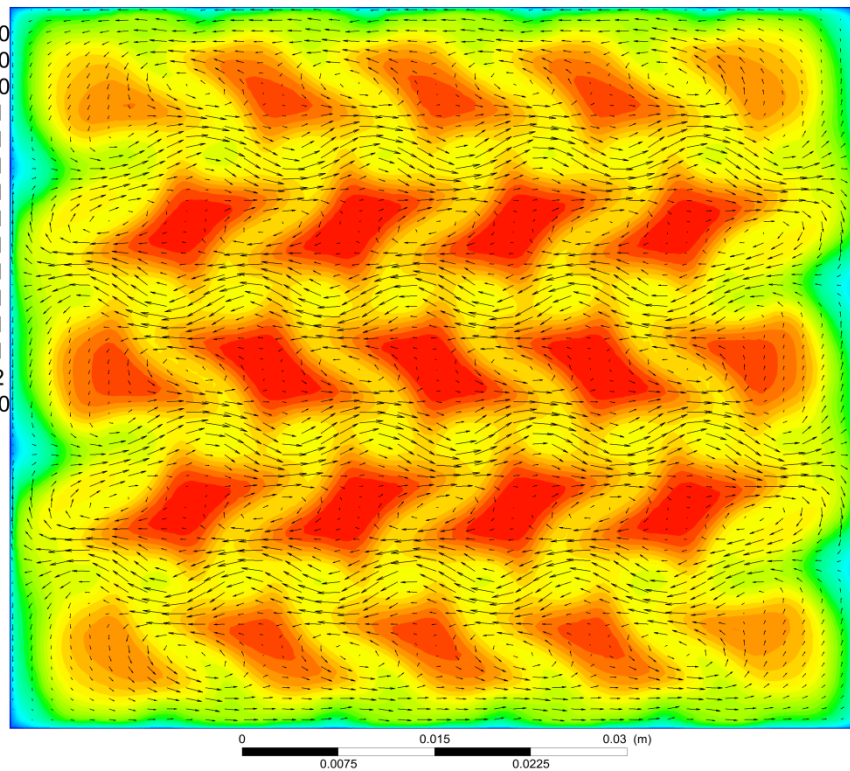


Obrázek 68: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=10 mm, y=18 mm

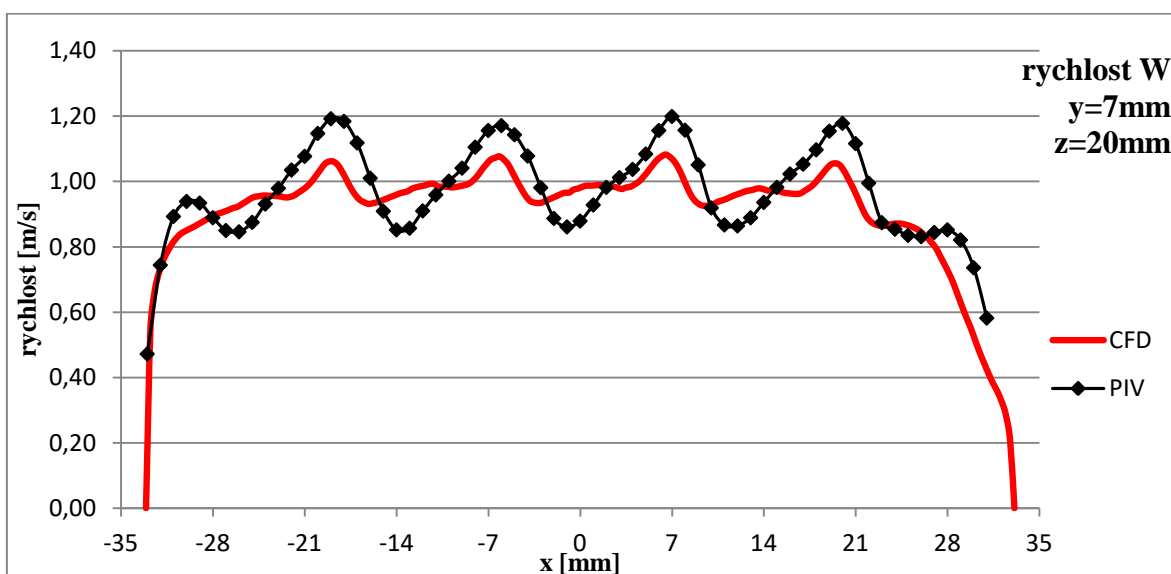
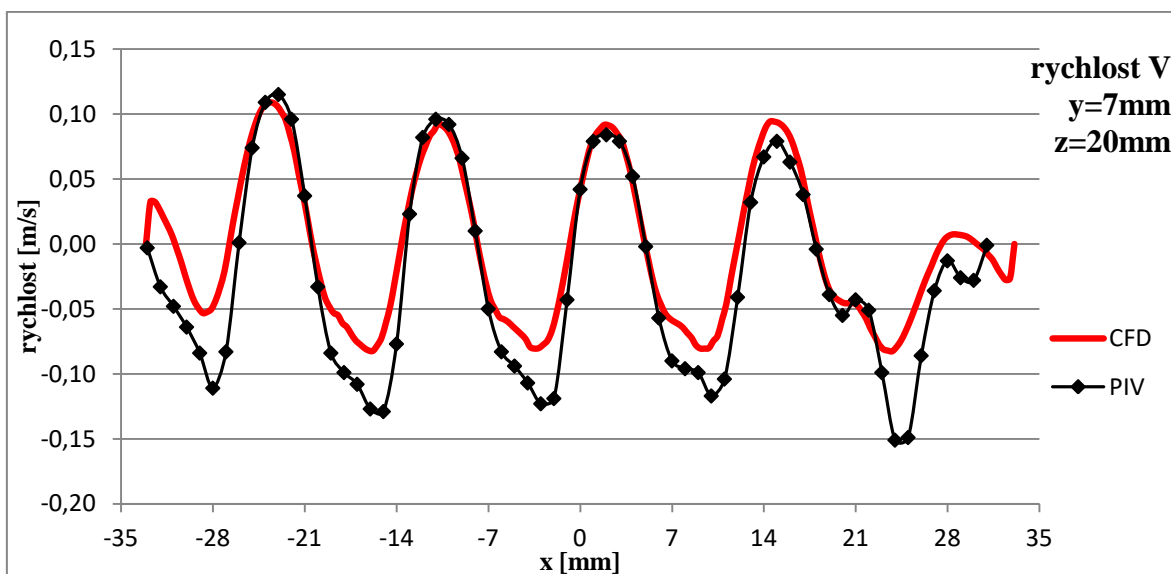
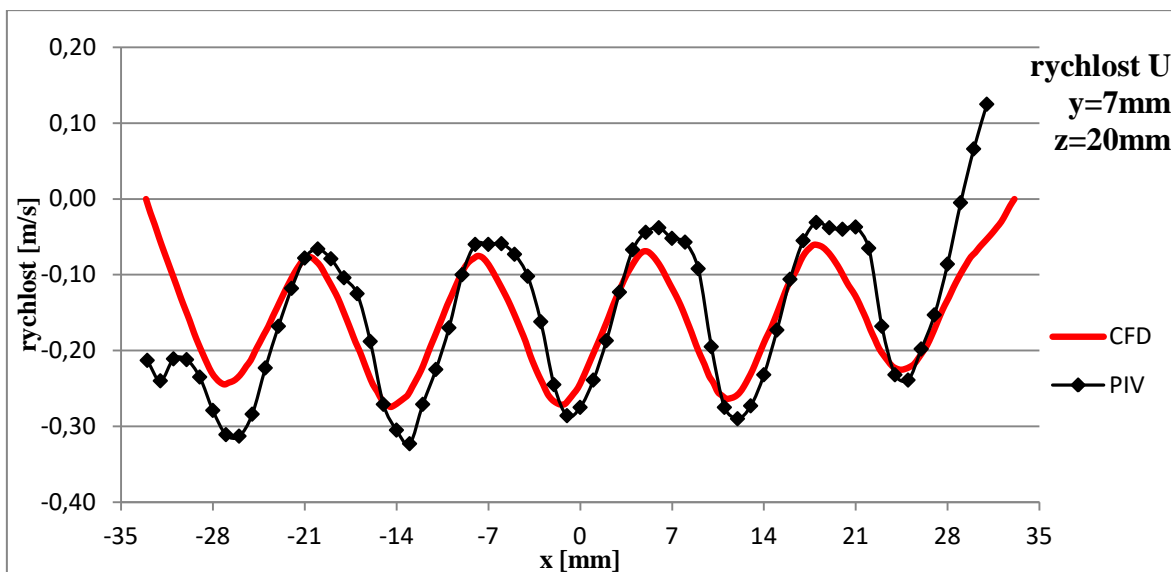
7.2.3 Vzdálenost $z=20$ mm za mřížkou mod. 2



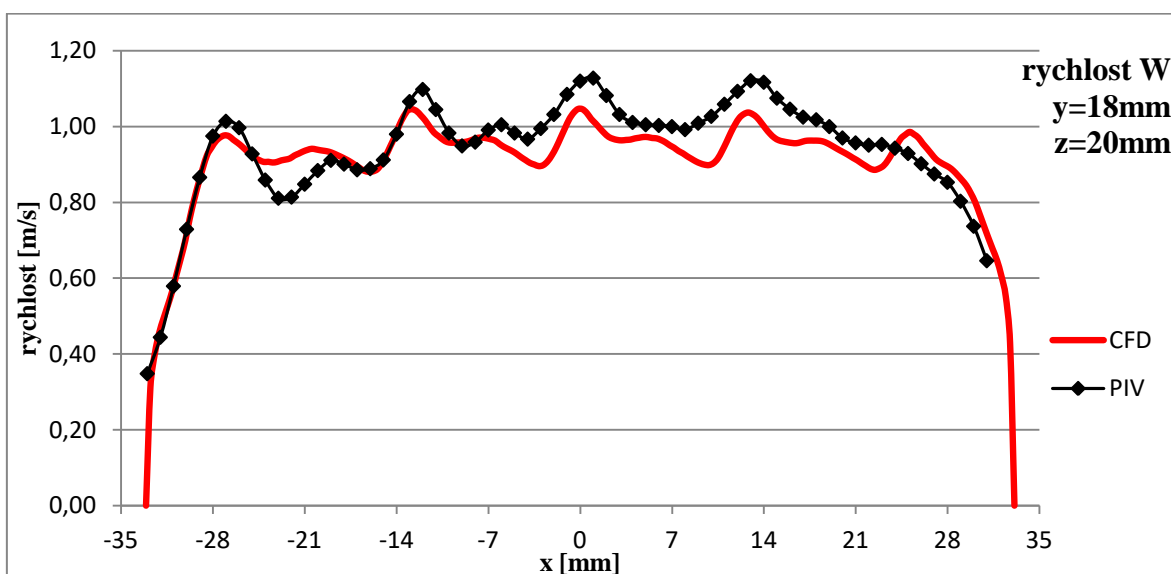
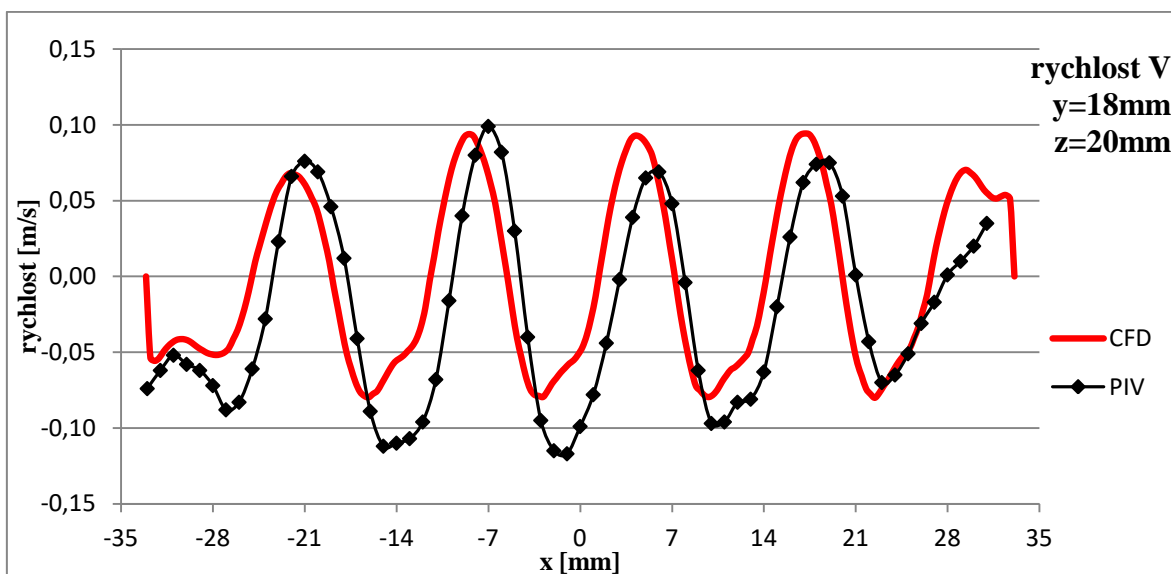
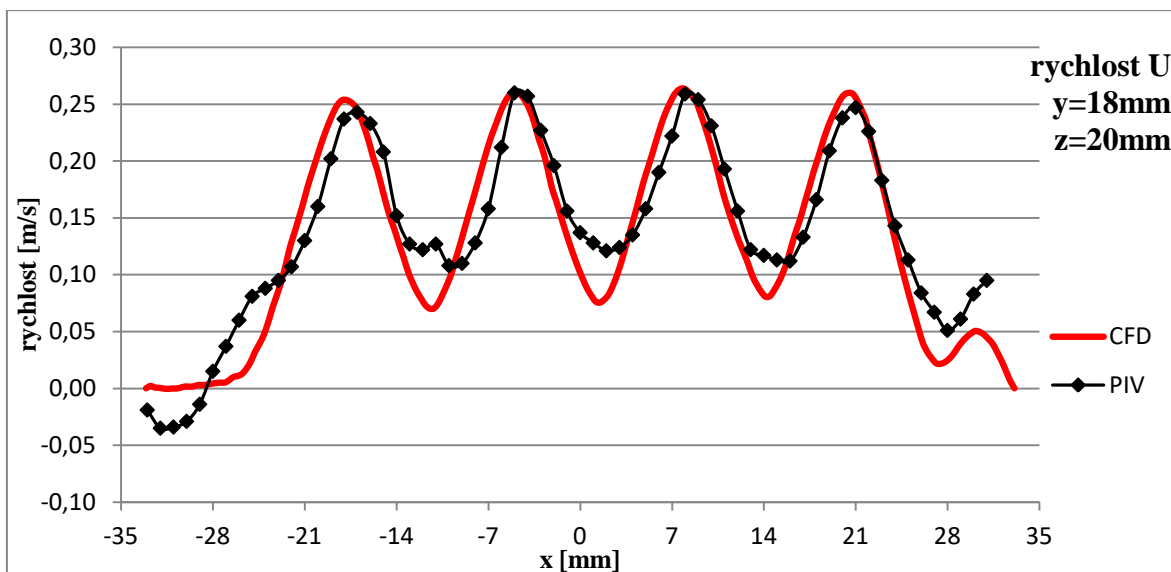
Velocity w
rychlost w
1.225e+000
1.137e+000
1.050e+000
9.621e-001
8.747e-001
7.872e-001
6.997e-001
6.123e-001
5.248e-001
4.373e-001
3.499e-001
2.624e-001
1.749e-001
8.747e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 69: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 20 mm

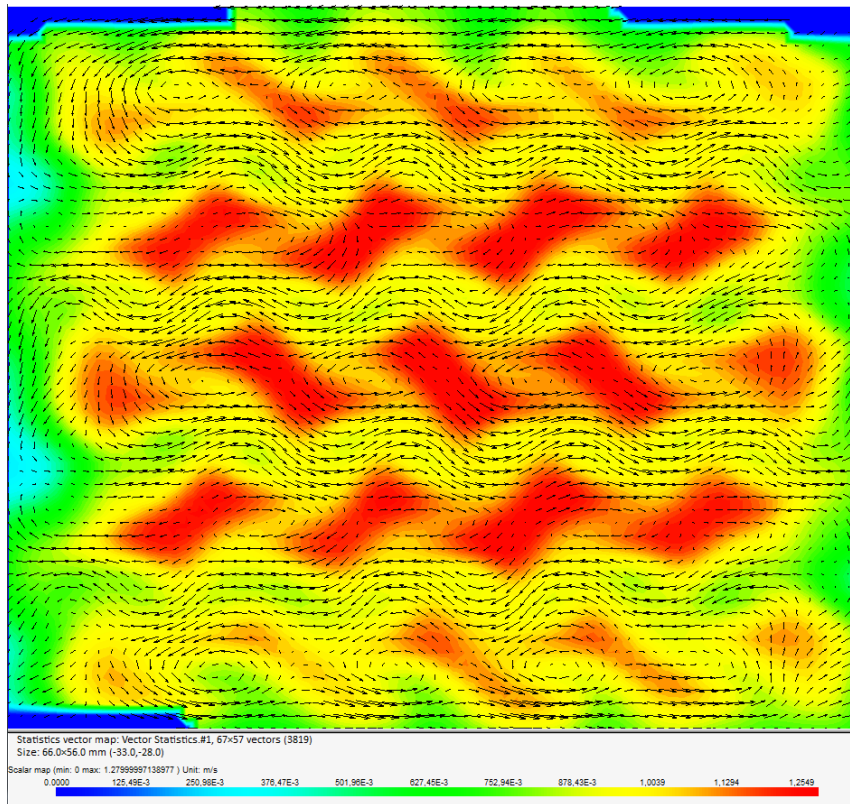


Obrázek 70: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=20 mm, y=7 mm

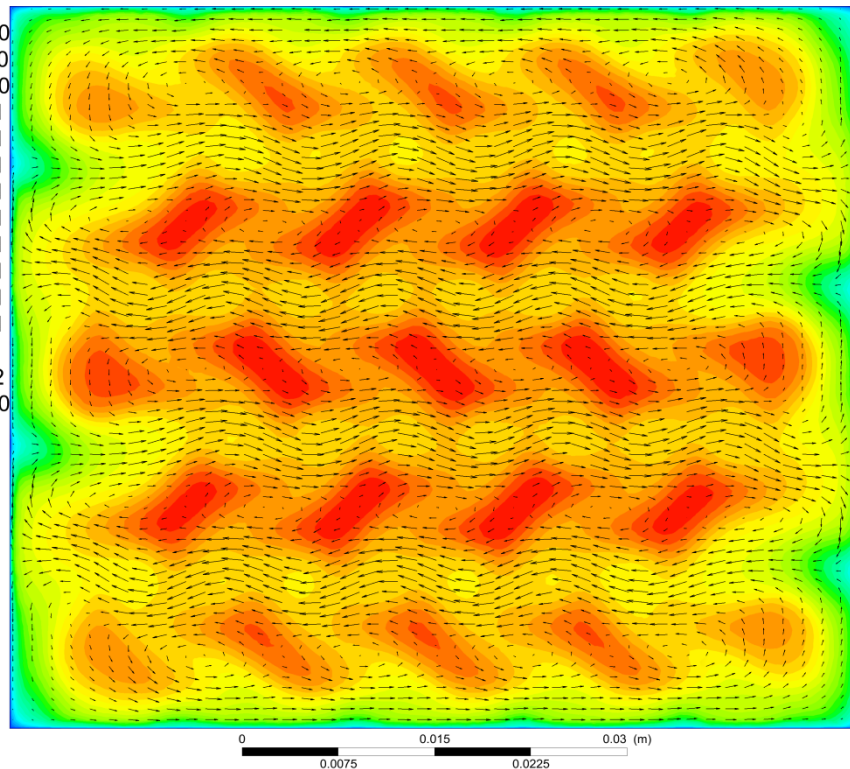
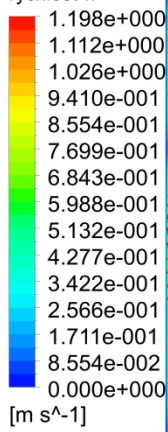


Obrázek 71: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=20 mm, y=18 mm

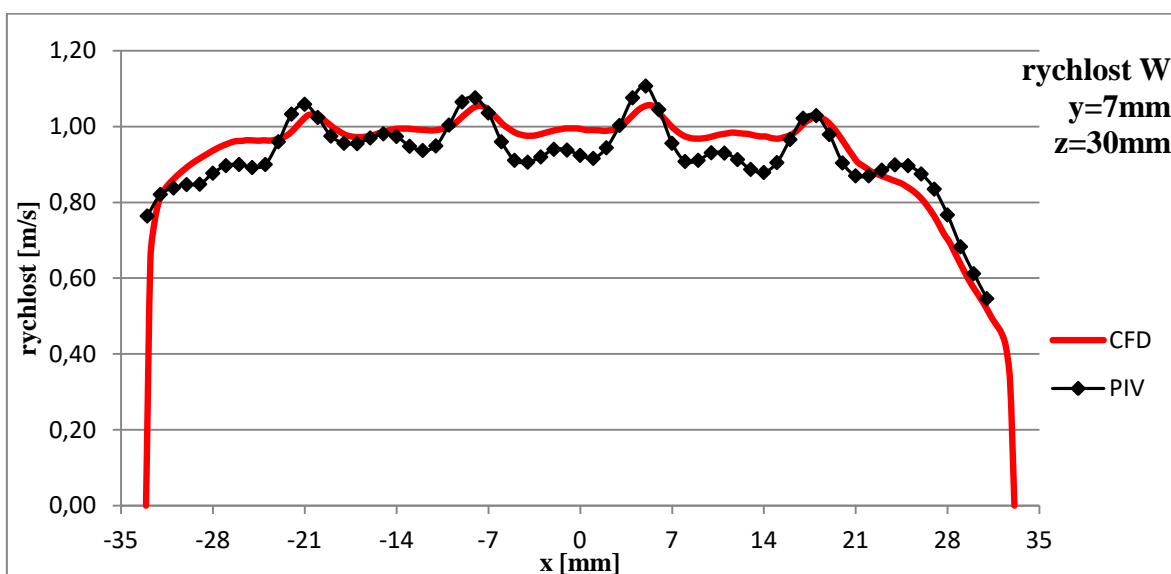
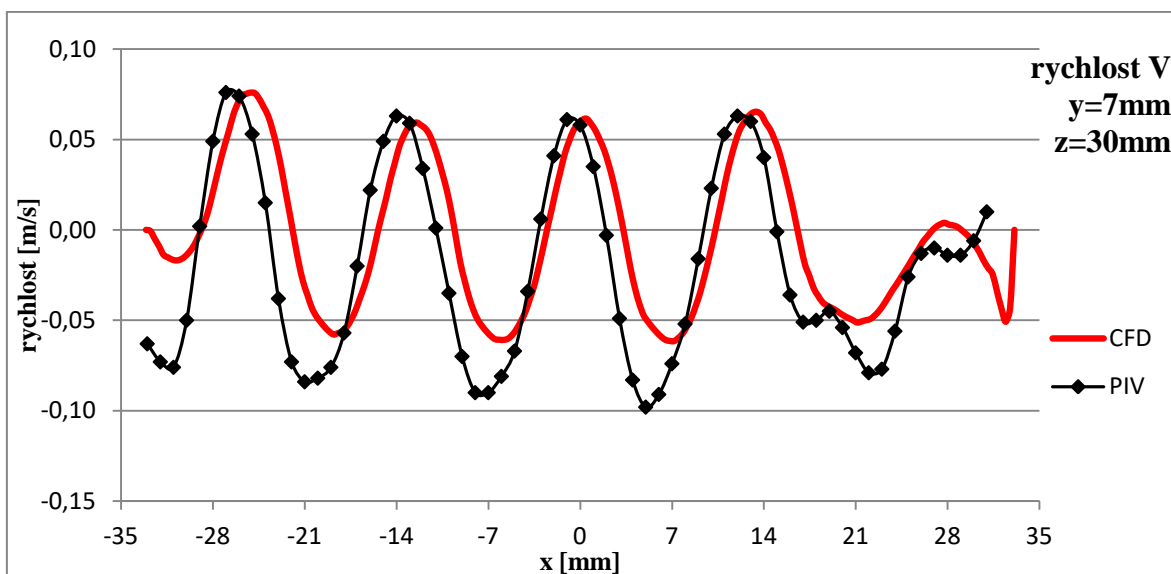
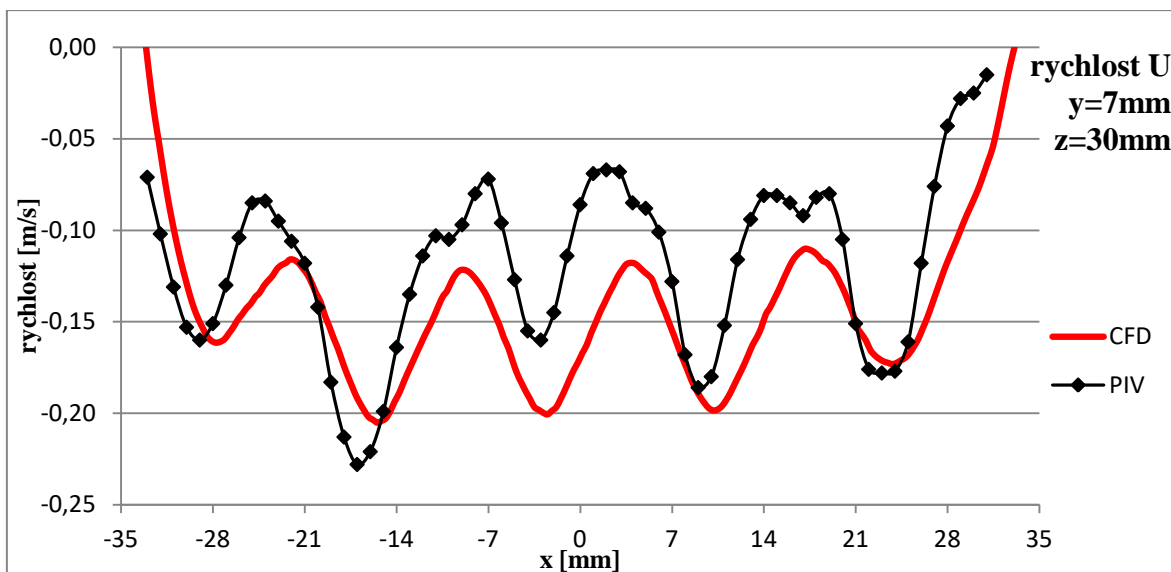
7.2.4 Vzdálenost $z=30$ mm za mřížkou mod. 2



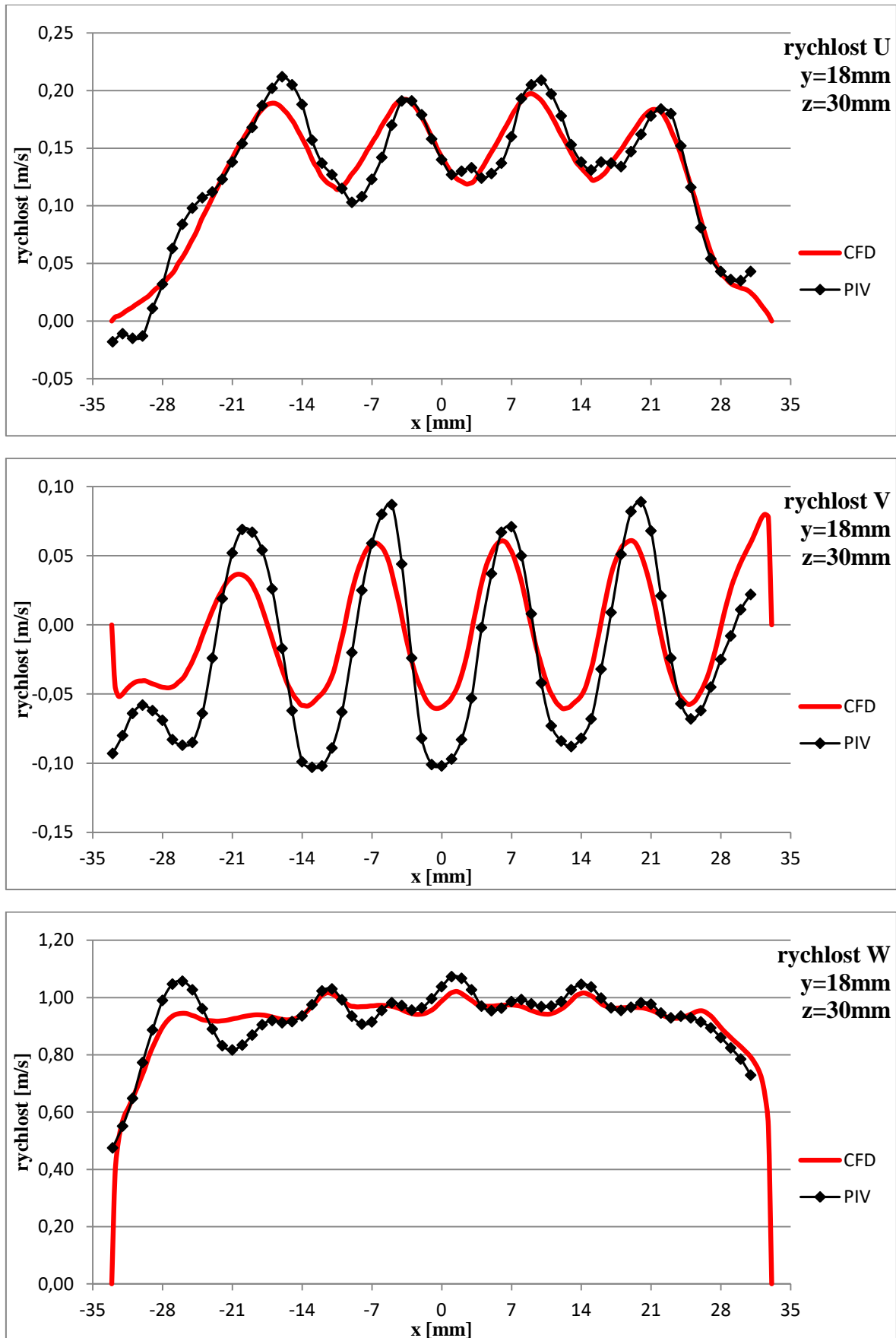
Velocity w
rychlost w



Obrázek 72: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 30 mm

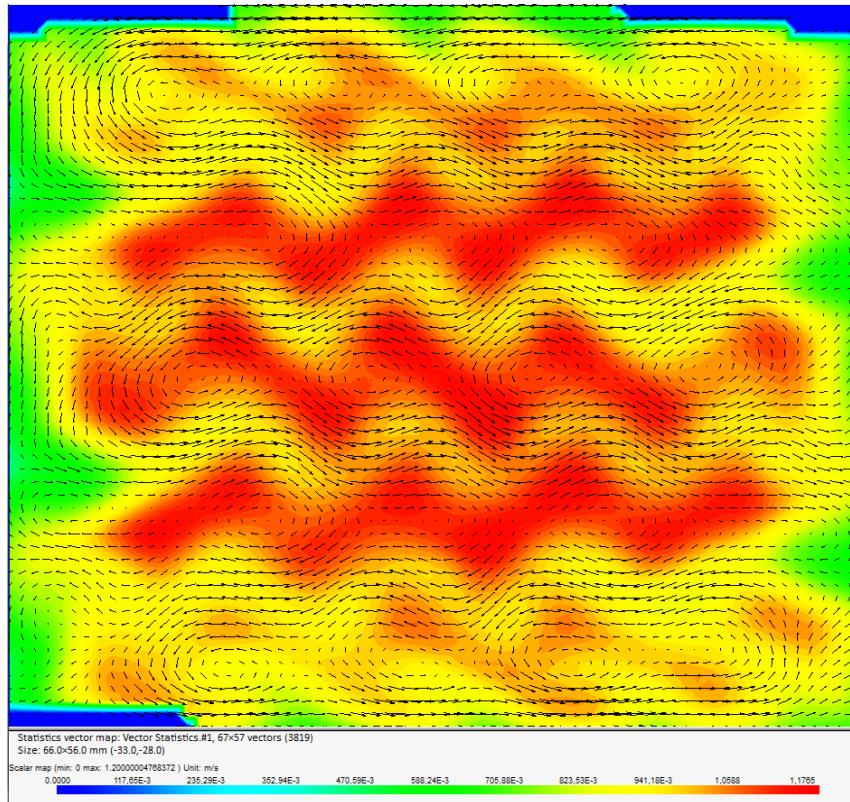


Obrázek 73: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=30 mm, y=7 mm

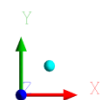
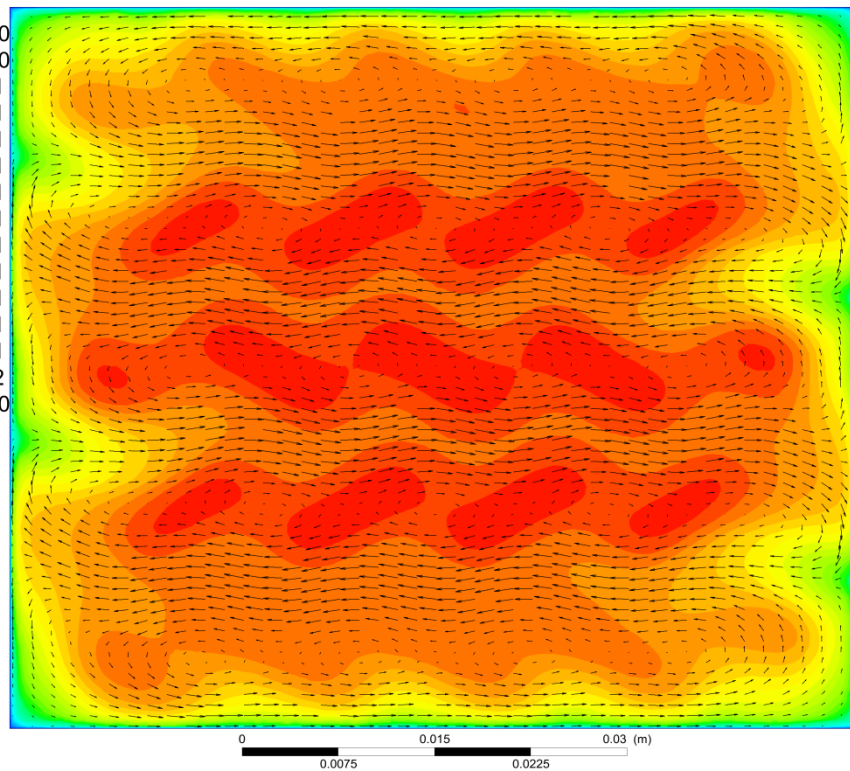


Obrázek 74: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=30 mm, y=18 mm

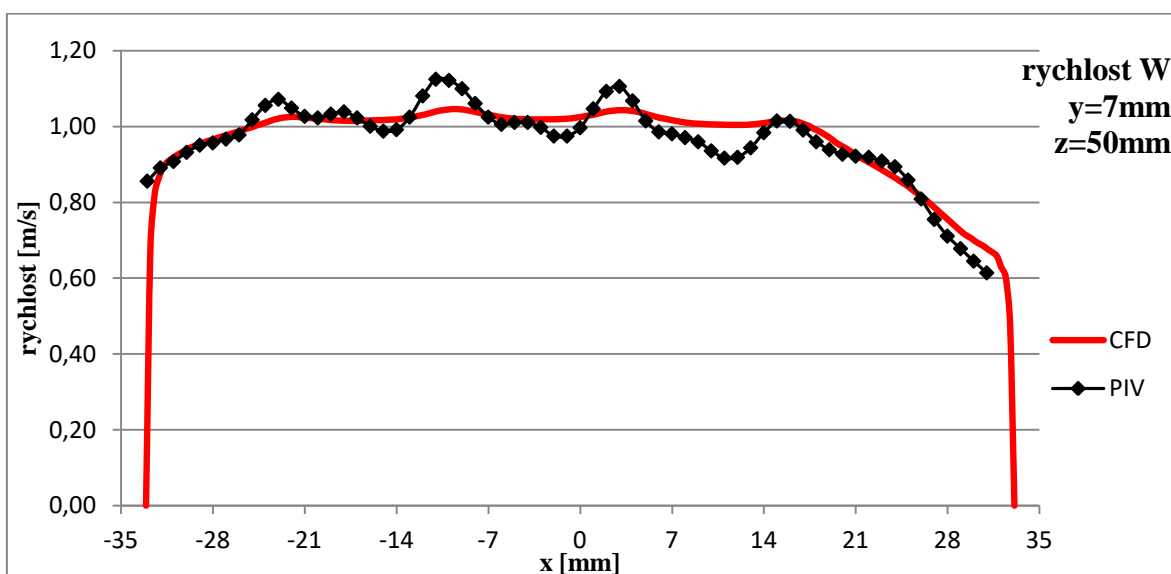
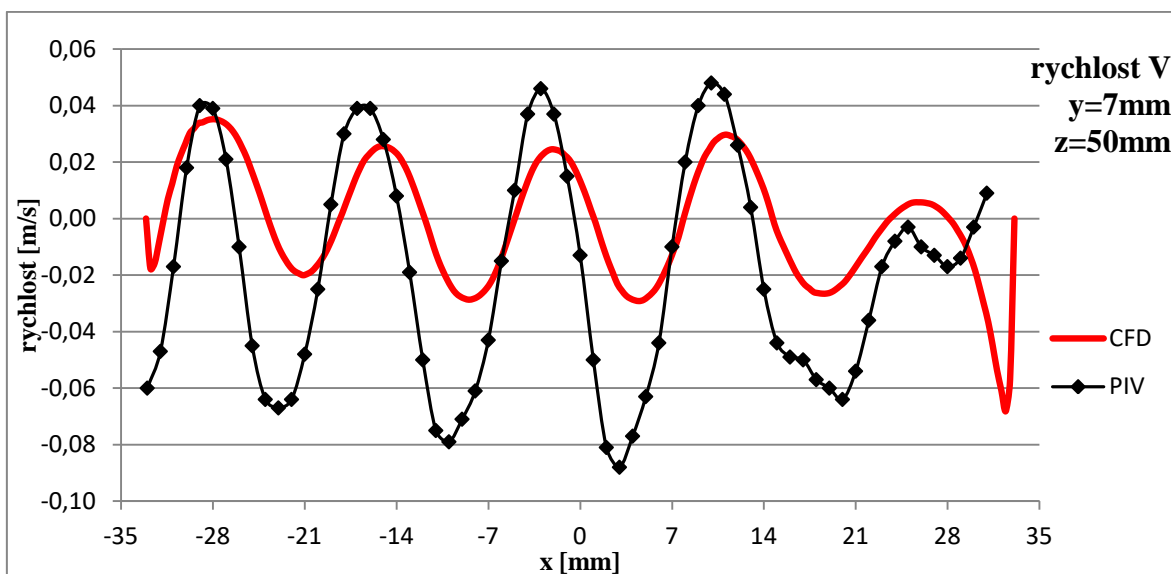
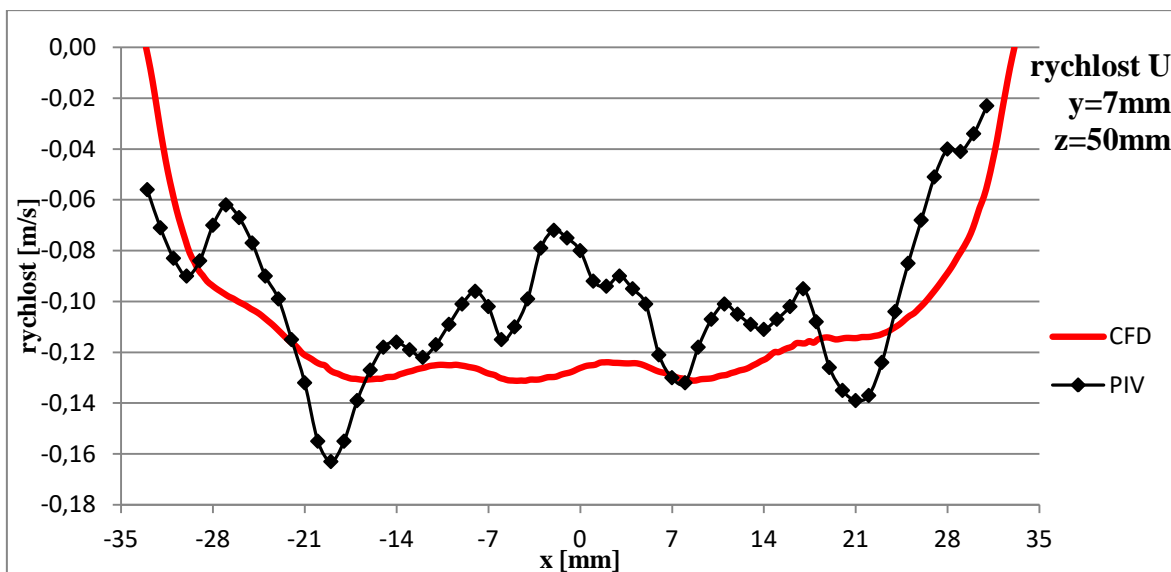
7.2.5 Vzdálenost $z=50$ mm za mřížkou mod. 2



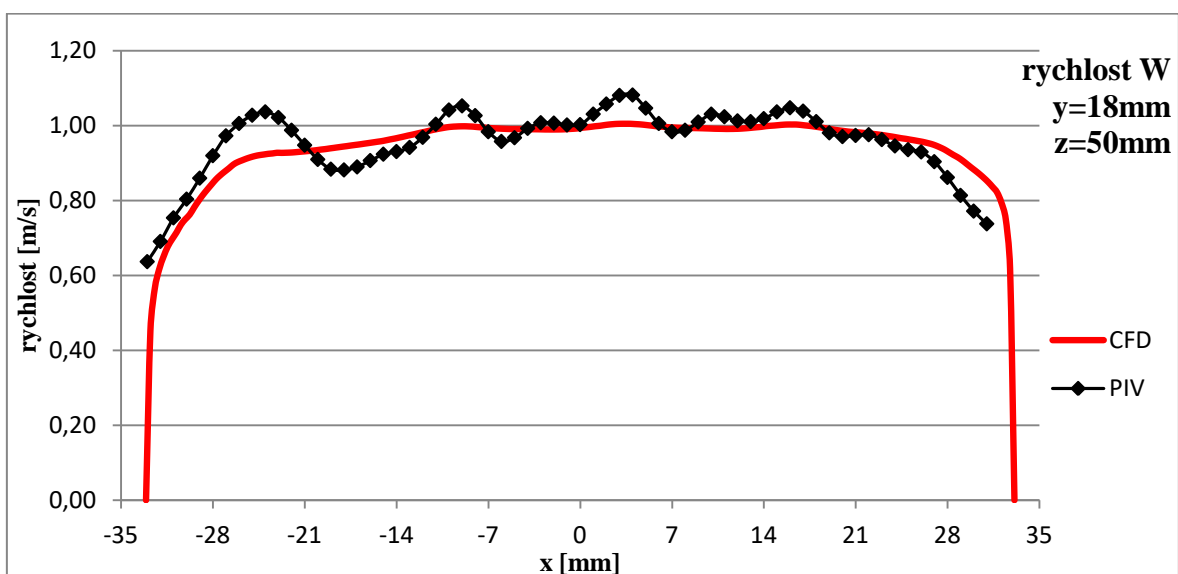
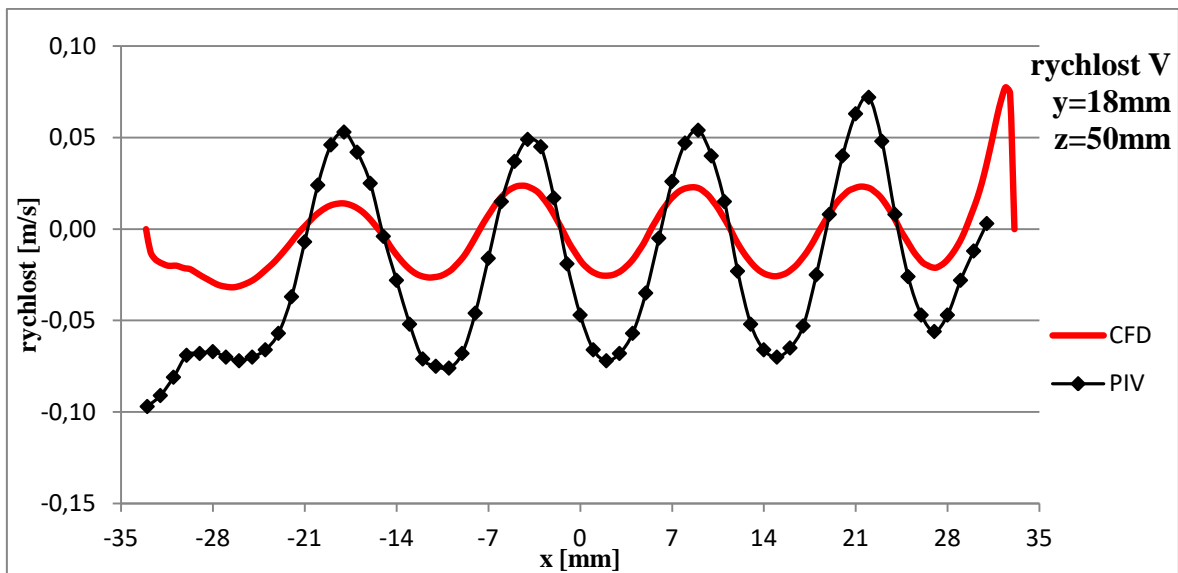
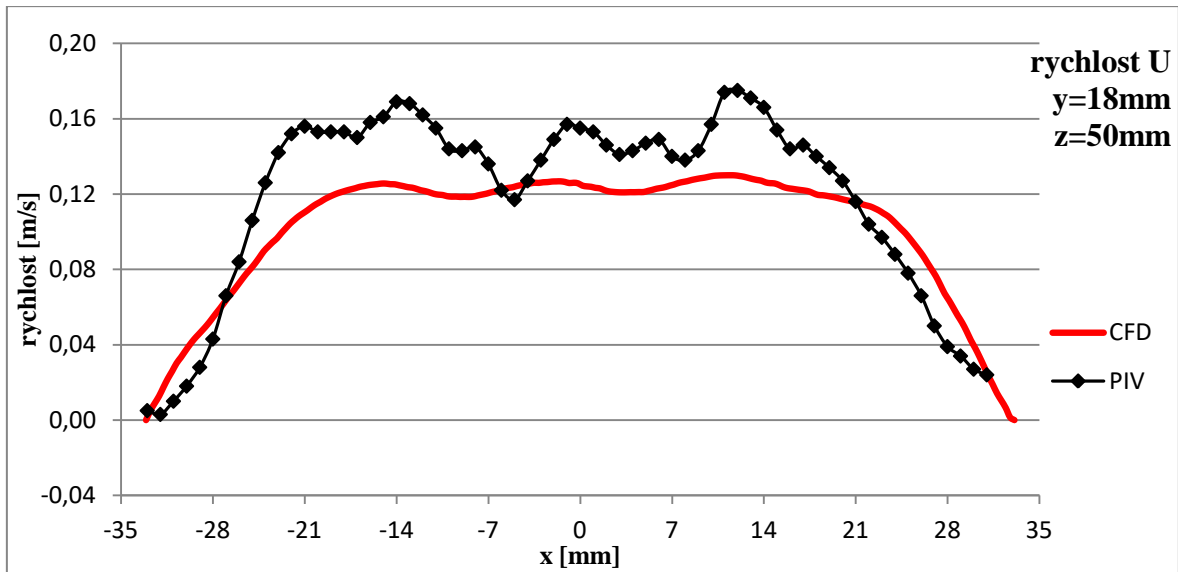
Velocity w
rychlost w
1.100e+000
1.021e+000
9.426e-001
8.640e-001
7.855e-001
7.069e-001
6.284e-001
5.498e-001
4.713e-001
3.927e-001
3.142e-001
2.356e-001
1.571e-001
7.855e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 75: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 50 mm

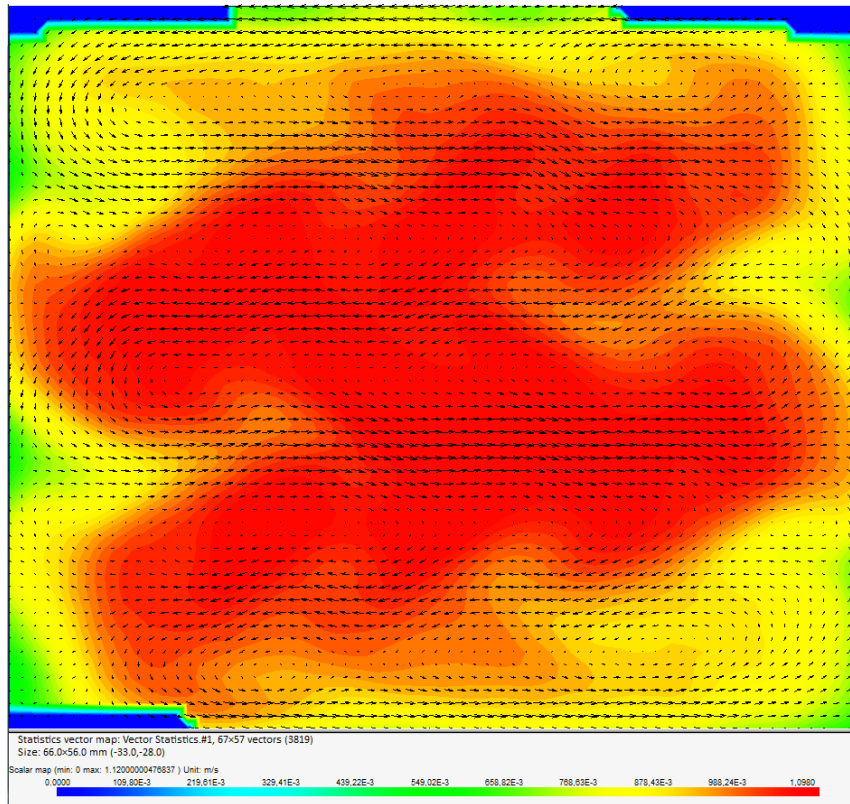


Obrázek 76: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=50 mm, y=7 mm

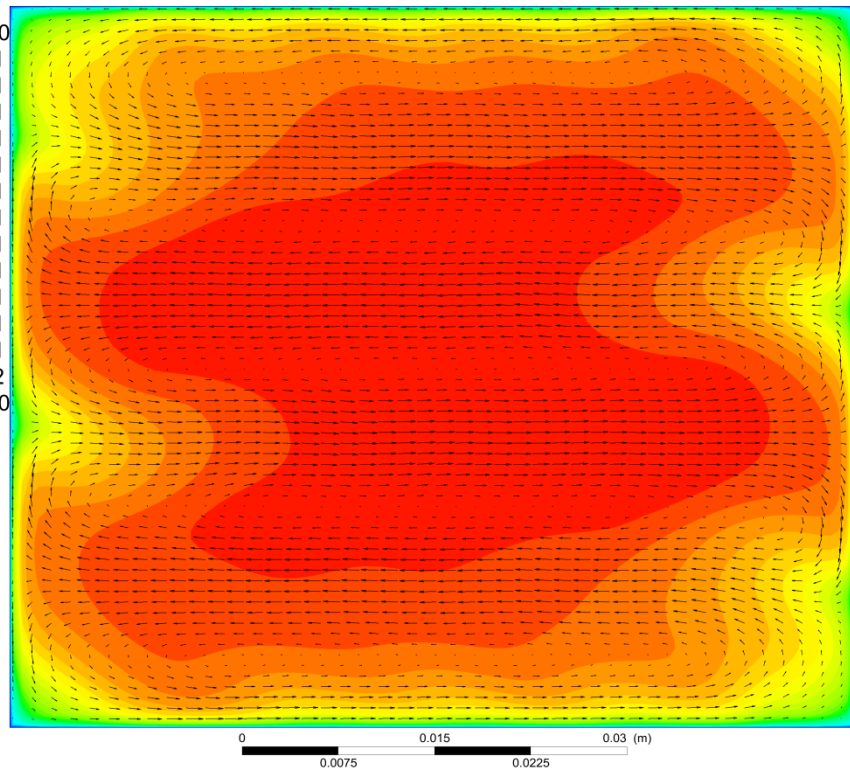


Obrázek 77: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, $z=50\text{ mm}$, $y=18\text{ mm}$

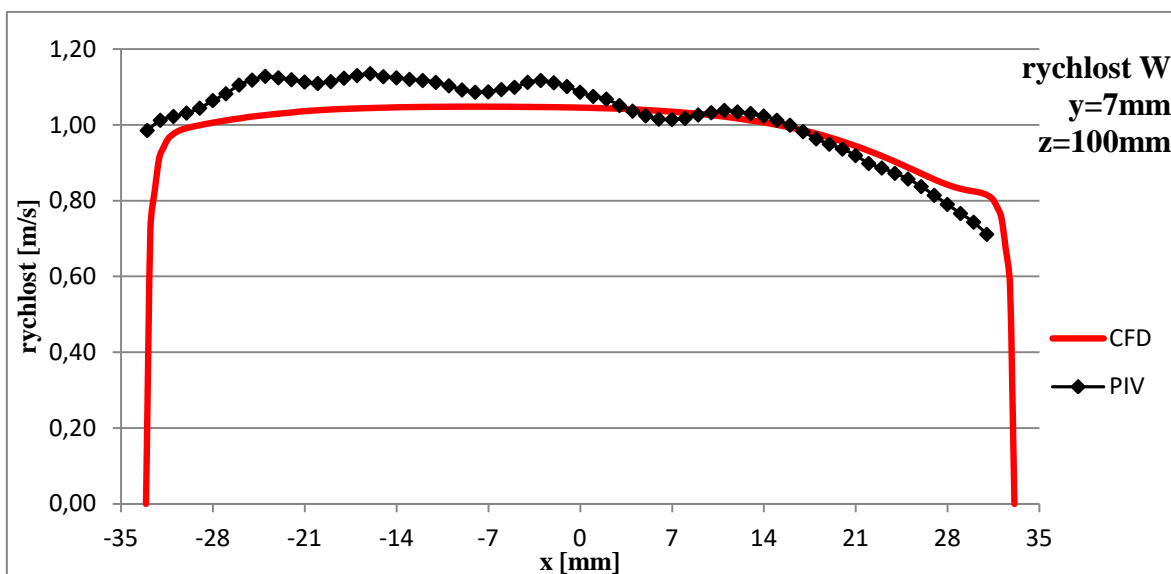
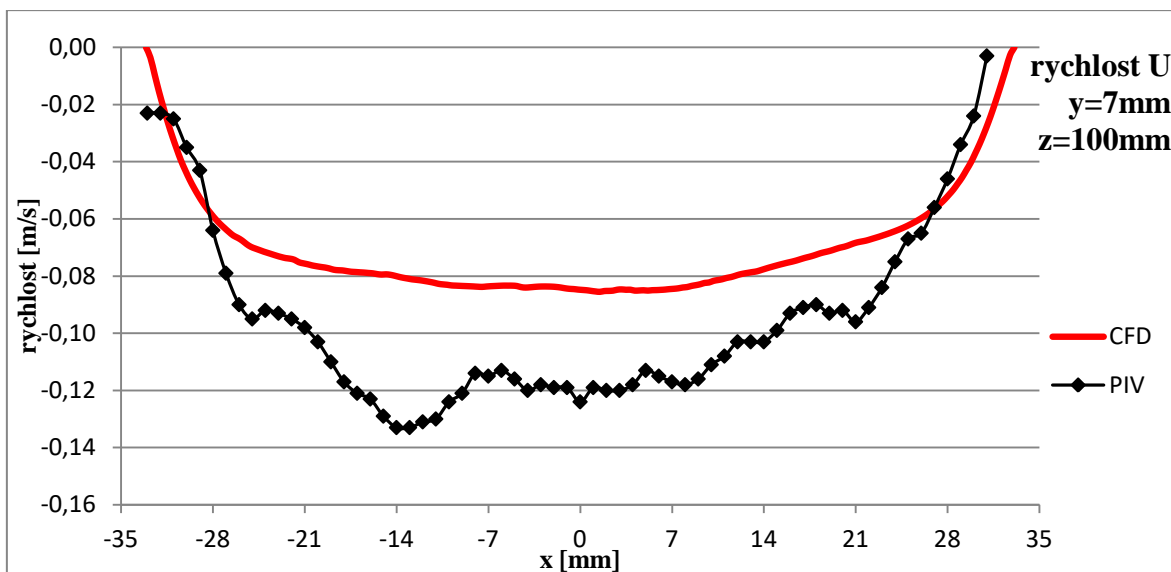
7.2.6 Vzdálenost $z=100$ mm za mřížkou mod. 2



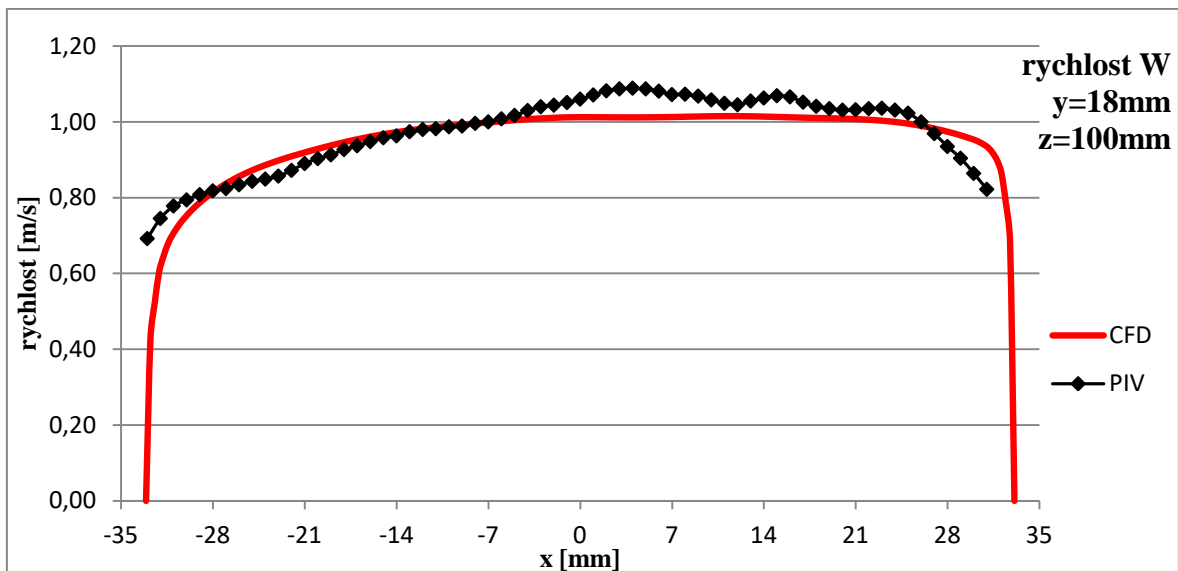
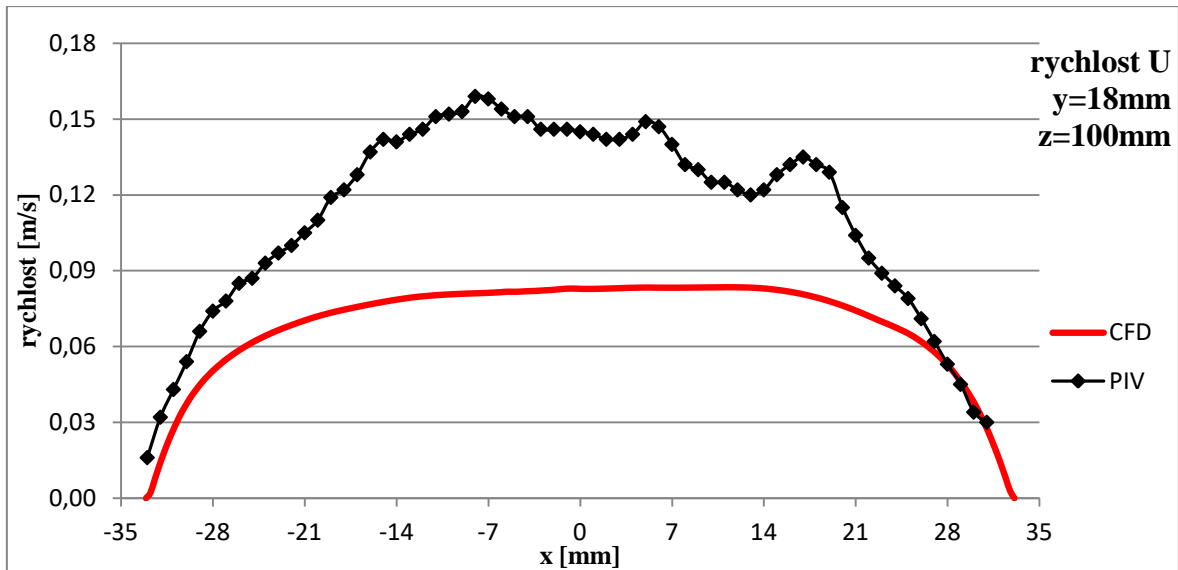
Velocity w
rychlost w
1.058e+000
9.827e-001
9.071e-001
8.315e-001
7.559e-001
6.803e-001
6.048e-001
5.292e-001
4.536e-001
3.780e-001
3.024e-001
2.268e-001
1.512e-001
7.559e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 78: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 100 mm

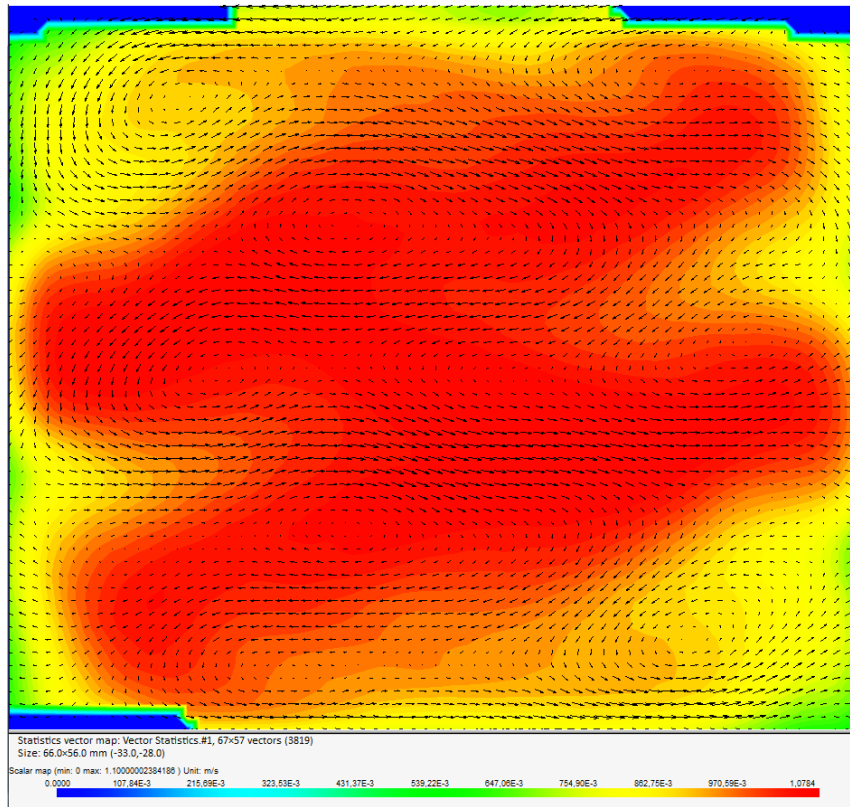


Obrázek 79: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=100 mm, y=7 mm

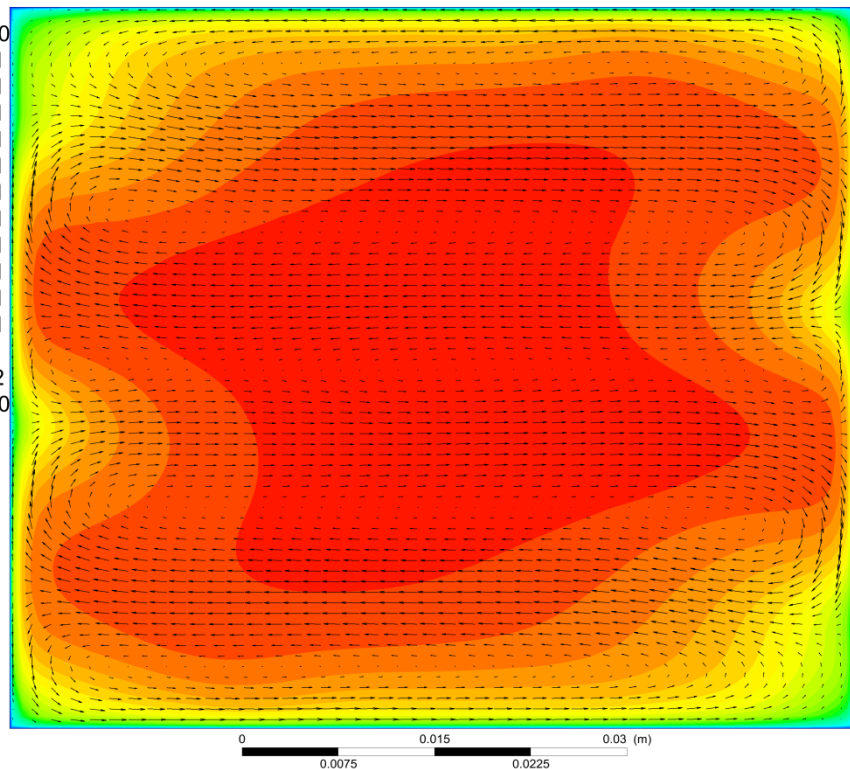


Obrázek 80: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=100 mm, y=18 mm

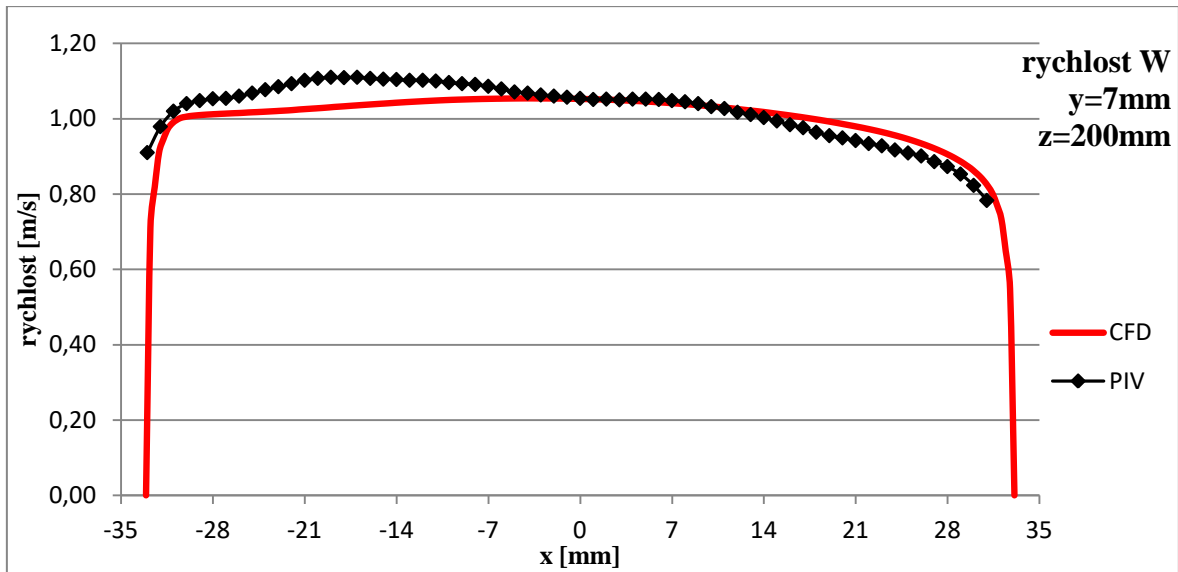
7.2.7 Vzdálenost $z=200$ mm za mřížkou mod. 2



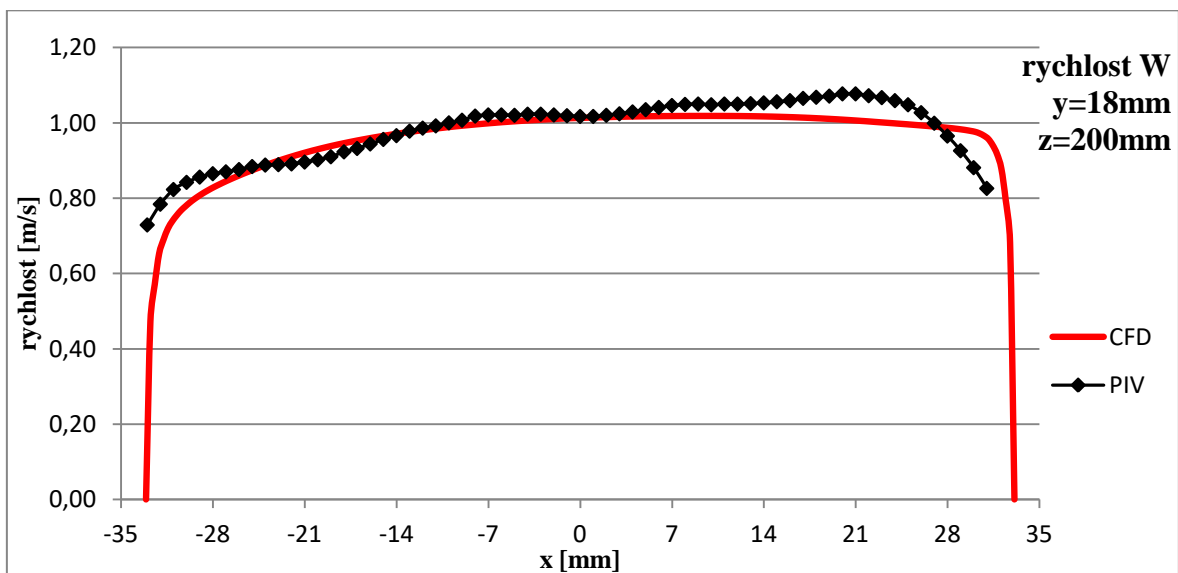
Velocity w
rychlost w
1.058e+000
9.823e-001
9.067e-001
8.312e-001
7.556e-001
6.800e-001
6.045e-001
5.289e-001
4.534e-001
3.778e-001
3.022e-001
2.267e-001
1.511e-001
7.556e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 81: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 200 mm

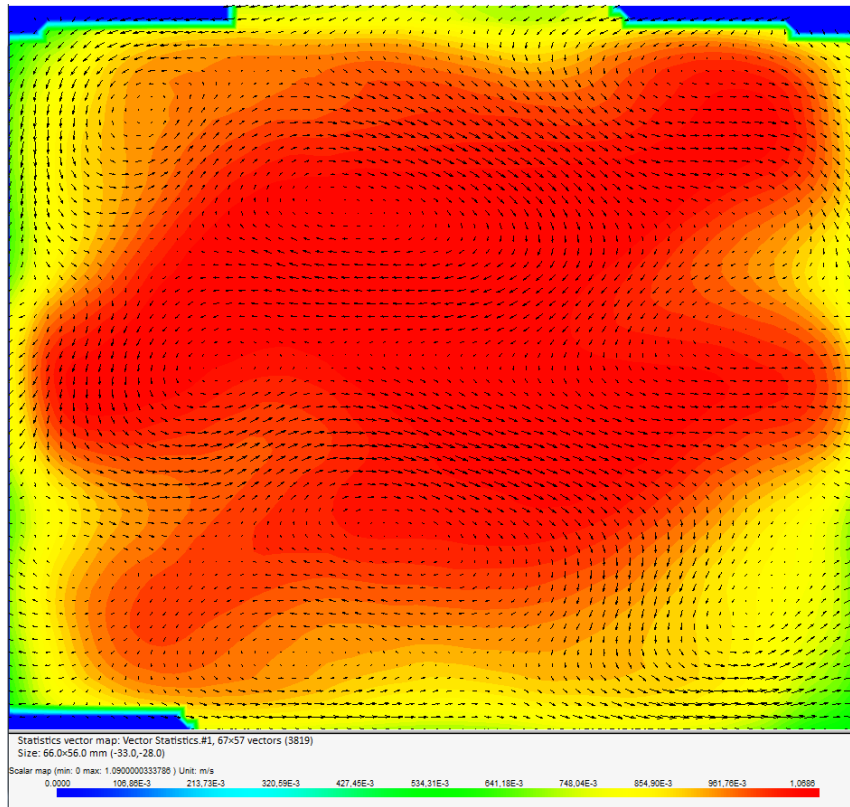


Obrázek 82: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=200 mm, y=7 mm

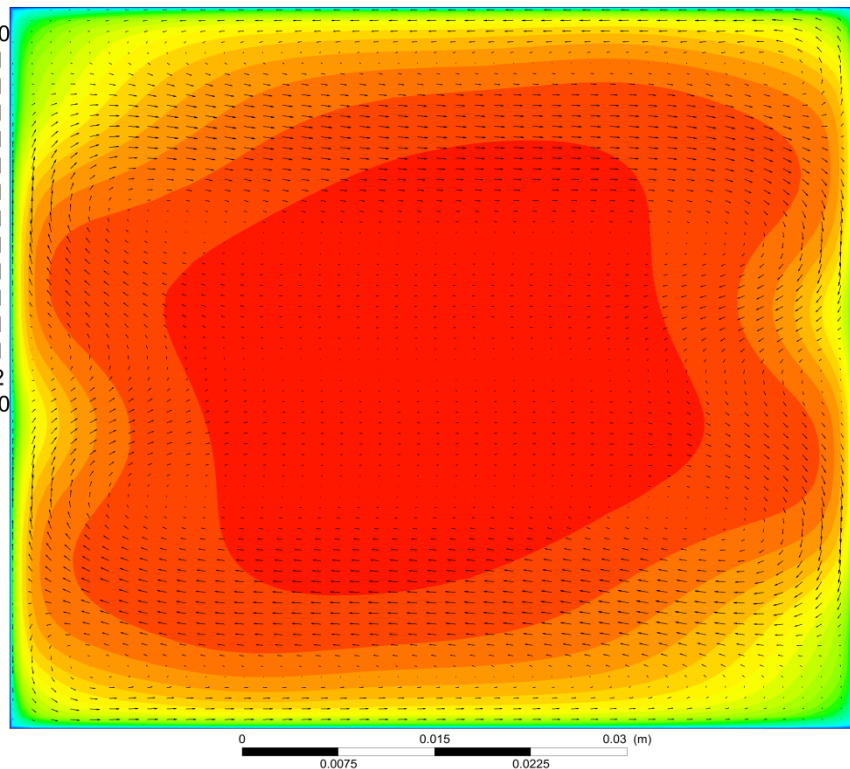


Obrázek 83: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=200 mm, y=18 mm

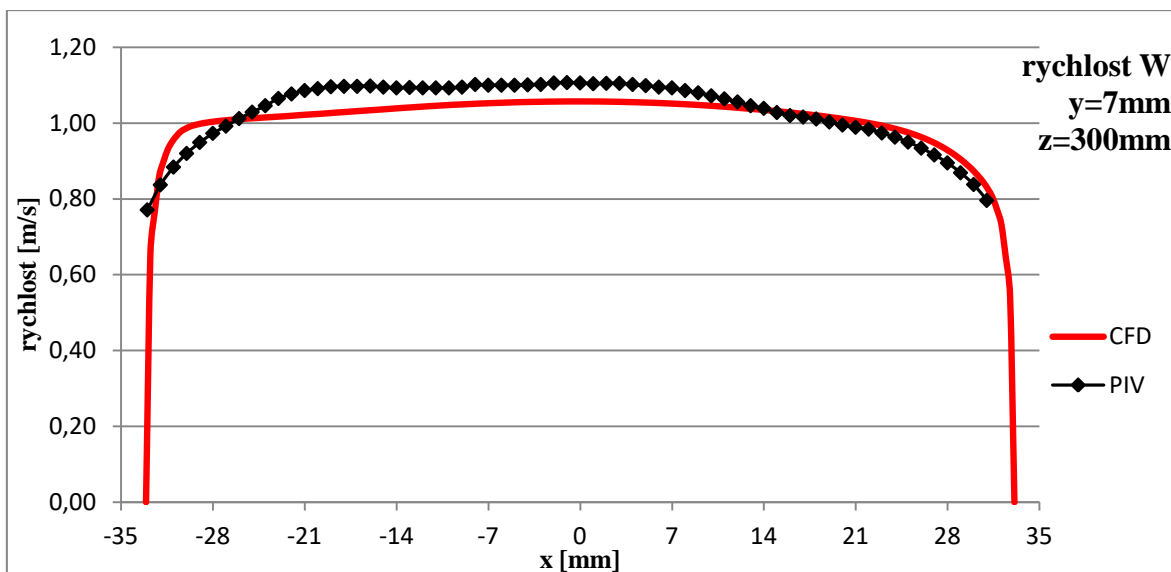
7.2.8 Vzdálenost $z=300$ mm za mřížkou mod. 2



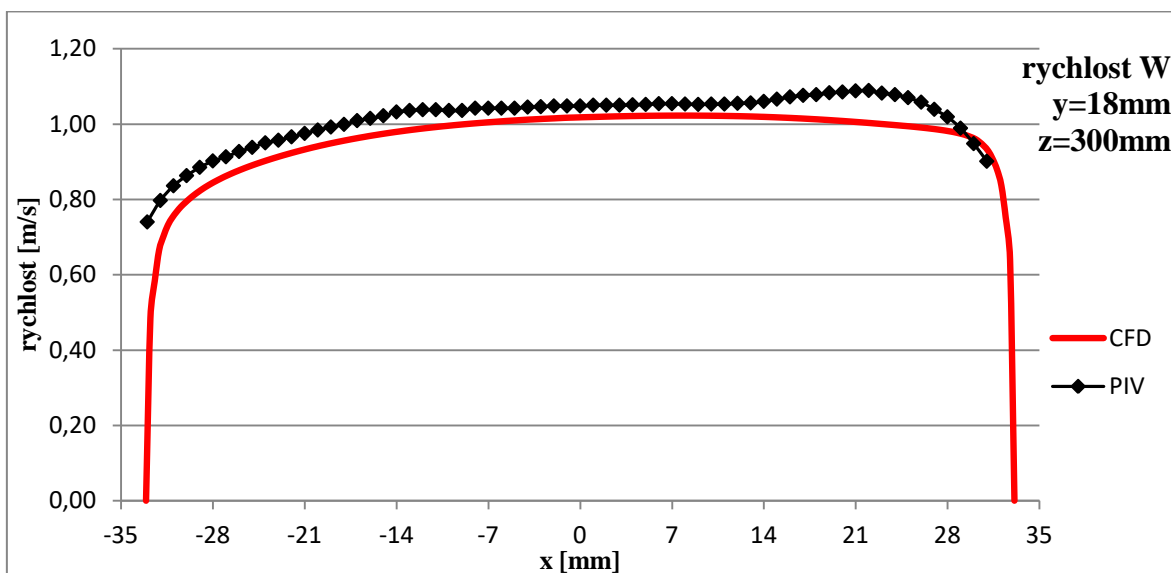
Velocity w
rychlost w
1.062e+000
9.861e-001
9.103e-001
8.344e-001
7.586e-001
6.827e-001
6.069e-001
5.310e-001
4.551e-001
3.793e-001
3.034e-001
2.276e-001
1.517e-001
7.586e-002
0.000e+000
[m s⁻¹]



Obrázek 84: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 300 mm



Obrázek 85: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, $z=300\text{ mm}$, $y=7\text{ mm}$



Obrázek 86: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, $z=300\text{ mm}$, $y=18\text{ mm}$

8 Závěr

Cílem práce bylo vyšetřit proudové pole v různých vzdálenostech za dvěma typy mísících mřížek pomocí experimentální metody stereo PIV a porovnat s výsledky CFD výpočtu. Nejprve byl proveden návrh obou typů mísících mřížek. Návrh byl upraven dle limitačních podmínek experimentální metody. Následně byl proveden návrh celého experimentálního zařízení, které bylo navrženo na základě parametrů zadaných úlohou. Při návrhu bylo důležité najít patřičné řešení pro přesný posuv mřížky v měřicím kanále, pro měření a regulaci průtoku kanálem. V další části byla provedena realizace návrhu, která spočívala ve výrobě všech nových komponent a následném sestavení. Současně probíhala výroba obou modelů mísících mřížek spolu s měřicím prostorem. Na sestaveném a odladěném experimentálním zařízení byla před měřením provedena kalibrace měřicí aparatury.

Celkem bylo realizováno (provedeno) 130 měření zahrnující oba typy mísících mřížek. Pro každý typ mřížky byly při měření nastaveny čtyři odlišné vstupní rychlosti. Pro každý typ mřížky a danou vstupní rychlost bylo naměřeno několik rovin kolmých na směr hlavního proudu v daných vzdálenostech za mřížkou. Měřicí aparatura byla staticky umístěna. Vzdálenost od měřicí roviny byla vždy dána posuvem nerezového kanálu s mřížkou. Všechna provedená měření byla vyhodnocena stejným způsobem popsaným v kapitole (5.5). Po provedení experimentálního měření byla naměřená data poskytnuta pro validaci CFD výpočtu. Kde v první části se jednalo o data sloužící k nastavení vstupních okrajových podmínek výpočtového modelu, která byla zaznamenávána před každým měřením. Při validaci bylo zjištěno, že odchylky výsledků byly způsobeny skutečnými rozměry vyrobené mřížky lišící se od návrhu.

Všechna vyhodnocená měření byla zpracována do výsledných vektorových map. Každému naměřenému řezu proudového pole tak odpovídá mapa vektorů rychlostí ve směru x , y . Složka rychlosti ve směru hlavního proudu byla ve vektorové mapě zobrazena barevnou strukturou. Výsledky byly v kapitole 7 porovnány s výsledky CFD výpočtu. Pro podrobné porovnání byly vytvořeny grafy ve stanovených místech výsledného pole. Z porovnání výsledků byly patrné mírné odchylky, které mohou být ovlivněny mnoha faktory. Hlavním rozdílem mezi oběma způsoby vyšetřování proudového pole za mřížkou byla samotná mřížka. Přesnost použitých mřížek pro experimentální měření byla dána přesností celé výroby, na rozdíl od ideálního modelu mřížek pro CFD výpočet. Obdobným (srovnatelným) faktorem mající vliv na lišící se výsledky, byly výsledné rozměry měřicího kanálu dané výrobou. Pro validaci CFD modelu byly použity zaznamenané hodnoty během měření. Jedním z důležitých parametrů byla hodnota objemového průtoku změřena „kýblovou metodou“. Tato metoda spolu se samotnou experimentální metodou stereo PIV vstupuje mezi faktory mající vliv na výsledky experimentálního měření.

Z porovnání výsledků navzdory mírným odchylkám vyplývá, že návrh, výroba, sestavení a odladění celého experimentálního zařízení bylo provedeno velmi dobře. Získané výsledky tak lze označit za důvěryhodné a výsledný validovaný CFD model lze aplikovat na řešenou problematiku.

I přes obtíže spojené s tvorbou a realizací experimentu je experiment v některých oblastech nenahraditelný. Ze závěrů této práce je zamýšleno postavené experimentální zařízení využít pro řešení dalších úloh měření.

Seznam použitých zdrojů

1. KLÍMA, T. *CFD modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně jaderného reaktoru*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení, 2017.
2. Encyklopedie fyziky. *Historie a fakta o jaderných elektrárnách* [online]. 2017 [cit. 2017-Květen-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/833-historie-a-fakta-o-jadernych-elektrarnach>
3. ČEZ. *Výroba elektřiny* [online]. 2017 [cit. 2017-Květen-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu/historie-a-soucasnost.html>
4. Miniencyklopedie: Jaderná energetika. *Jaderný reaktor* [online]. 2004 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/nuklear.htm>
5. HEZOUČKÝ, F. a S. ŠTECH. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními ...*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 978-80-261-0548-0, 2015.
6. PANTHER. WikipediaCommons. In: *Wwer-1000-scheme.png* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wwer-1000-scheme.png>
7. ZDEBOR, J. In: *Jaderné systémy I: Základní pojmy* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/files/JS1%20-%201.%20prednaska%20-%20uvod.pdf>
8. SAFAVI, A. a R. M. ABDI. ResearchGate. In: *Study of perforated plate effect in horizontal WWER1000 steam generator* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/256817252_Study_of_perforated_plate_effect_in_horizontal_WWER1000_steam_generator
9. ATOMENERGOMASH. *atomic-energy. news* [online]. 2016. Dostupné také z: <http://www.atomic-energy.ru/news/2016/06/07/66495>
10. JEŽEK, M. *Palivový cyklus jaderné elektrárny Temelín*. [dokument]. Brno: VUT v Brně, 2012.
11. KUBÍČEK, J. a V. ŽELEZNÝ. CVUT. In: *Acta Polytechnica, CFD ANALYSIS OF THE SPACER GRIDS AND MIXING VANES EFFECT ON THE FLOW IN A CHOSEN ...* [online]. 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap>
12. MOLCHANOV, V. L. A. V. UGRYUMOV a O. B. SAMOILOV. *TVSA-T fuel assembly for "Temelin" NPP*. [presentace]. Praha: OKBM, 2010; <https://www.slideshare.net/myatom/tvsat-fuel-assembly-for-temelin-npp-main-results->

of-design-and-safety-analyses-trends-of-development.

13. KLAVÍK, P. *Zmapování proudového pole kapaliny proudící v trubici pomocí laserové anemometrie (metodou PIV)*. Plzeň: 2015. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení.
14. *Manual DynamicStudio*. [User Guide]. Denmark: Dantec, 2016. Třídící znak no.: 9040U1862.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma primárního okruhu s reaktorem VVER 1000 [6]	13
Obrázek 2: Horizontální parogenerátor [8]	16
Obrázek 3: Hlavní cirkulační čerpadlo [9]	17
Obrázek 4: Palivový soubor VVANTAGE 6, [10].....	19
Obrázek 5: Kombinovaná distanční mřížka, [11].....	20
Obrázek 6: Palivový soubor TVSA-T mod.1 [11], [12].....	21
Obrázek 7: Palivový soubor TVSA-T mod.2 [12]	22
Obrázek 8: Umístění lopatek - vlevo mod.1, vpravo mod.2	22
Obrázek 9 Schéma uspořádání kamer metody stereo PIV. [13].....	23
Obrázek 10: Návrh experimentálního zařízení.....	25
Obrázek 11: Návrh experimentálního zařízení.....	26
Obrázek 12: Sestava kanálů a usměrňujícího prvku.....	27
Obrázek 13: Korekční nádoba	28
Obrázek 14: Usměrňující prvek.....	29
Obrázek 15: Návrh konstrukce rámu a zadní nádrže.....	30
Obrázek 16: Schéma toku kapaliny v zadní nádobě.....	32
Obrázek 17: Vliv optických vlastností na měření	33
Obrázek 18: Upravený tvar mřížek	34
Obrázek 19: Sestavené mřížky	34
Obrázek 20: Vlevo první návrh nerezového kanálu, vpravo finální návrh kanálu.....	36
Obrázek 21: Vyrobený nerezový kanál s mřížkou mod.1	36
Obrázek 22: Konstrukce pro posuv nerezového kanálu	37
Obrázek 23: Konstrukce pro posuv regulačního šoupěte	38
Obrázek 24: Měřicí přístroj se sondou	39
Obrázek 25: Pohled na experimentální zařízení	39
Obrázek 26: Vzájemné umístění kamer a laseru	40
Obrázek 27: Pohled na vložený kalibrační terčik v kanále	41
Obrázek 28: Pohled shora na měřený prostor.....	43
Obrázek 29: Pohled ze strany na měřený prostor.....	44
Obrázek 30: Naměřený snímek z levé kamery.....	45
Obrázek 31: Výsledný řez mod.1 pro rychlost 1,2 m/s, z=10 mm.....	47
Obrázek 32: Vektorové pole - mod.1, v=0,8m/s, z=10mm.....	48
Obrázek 33: Výsledný řez mod.2 pro rychlost 1,2 m/s, z=10 mm.....	49
Obrázek 34: Vektorové pole - mod.2, v=0,8m/s, z=10mm.....	50
Obrázek 35: Vyšetřované roviny vzhledem k poloze mřížky mod. 1	52
Obrázek 36: Poloha úseček pro porovnání složek rychlostí.....	52
Obrázek 37: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1m/s, vzdálenost 5mm	54
Obrázek 38: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z=5 mm, y=0 mm.....	55
Obrázek 39: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 5 mm, y=11 mm...	56
Obrázek 40: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 10 mm	57
Obrázek 41: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 10 mm, y=0 mm...	58
Obrázek 42: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 10 mm, y=11mm..	59
Obrázek 43: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 20 mm	60
Obrázek 44: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 20 mm, y=0 mm...	61
Obrázek 45: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 20 mm, y=11mm..	62
Obrázek 46: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 30 mm	63

Obrázek 47: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 30 mm, y=0mm....	64
Obrázek 48: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 30 mm, y=11mm..	65
Obrázek 49: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 50 mm	66
Obrázek 50: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 50 mm, y=0mm....	67
Obrázek 51: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 50 mm, y=11mm..	68
Obrázek 52: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 100 mm ...	69
Obrázek 53: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 100 mm, y=0mm..	70
Obrázek 54: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 100 mm, y=1mm..	71
Obrázek 55: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 200 mm ...	72
Obrázek 56: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 200 mm, y=0mm..	73
Obrázek 57: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 200 mm, y=11mm	73
Obrázek 58: Porovnání výsledků – mřížka mod. 1, rychlost 1 m/s, vzdálenost 300 mm ...	74
Obrázek 59: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 300 mm, y=0mm..	75
Obrázek 60: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 1, 1 m/s, z= 300 mm, y=11mm	75
Obrázek 61: Vyšetřované roviny vzhledem k poloze mřížky mod. 2	76
Obrázek 62: Poloha úseček pro porovnání složek rychlostí.....	76
Obrázek 63: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1m/s, vzdálenost 5 mm	78
Obrázek 64: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z= 5 mm, y=7 mm....	79
Obrázek 65: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z= 5 mm, y=18 mm...	80
Obrázek 66: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 10 mm	81
Obrázek 67: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=10 mm, y=7 mm....	82
Obrázek 68: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=10 mm, y=18 mm..	83
Obrázek 69: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 20 mm	84
Obrázek 70: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=20 mm, y=7 mm....	85
Obrázek 71: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=20 mm, y=18 mm..	86
Obrázek 72: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 30 mm	87
Obrázek 73: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=30 mm, y=7 mm....	88
Obrázek 74: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=30 mm, y=18 mm..	89
Obrázek 75: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 50 mm	90
Obrázek 76: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=50 mm, y=7 mm....	91
Obrázek 77: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=50 mm, y=18 mm..	92
Obrázek 78: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 100 mm ...	93
Obrázek 79: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=100 mm, y=7 mm..	94
Obrázek 80: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=100 mm, y=18mm.	95
Obrázek 81: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 200 mm ...	96
Obrázek 82: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=200 mm, y=7 mm..	97
Obrázek 83: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=200 mm, y=18mm.	97
Obrázek 84: Porovnání výsledků – mřížka mod. 2, rychlost 1 m/s, vzdálenost 300 mm ...	98
Obrázek 85: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=300 mm, y=7 mm..	99
Obrázek 86: Porovnání výsledků složek rychlostí – mod. 2, 1 m/s, z=300 mm, y=18mm.	99

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vybrané parametry VVER 440 a VVER 1000 [4].....	12
Tabulka 2: Výsledné hodnoty naměřené "kýblovou metodou"	42
Tabulka 3: Vybraná část z tabulky obsahující parametry zaznamenané při měření	43