

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STAVEBNÍ**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Analýza hydrodynamiky vtoku do
tlakového kanálu s využitím metody PIV**

2023

Bc. DAVID KOLÁŘ

Název práce: Analýza hydrodynamiky vtoku do tlakového kanálu s využitím metody PIV

Autor: Bc. David Kolář

Katedra: K141 Katedra hydrauliky a hydrologie

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D.

e-mail vedoucího: baresvoj@cvut.cz

Abstrakt Tato diplomová práce se zaměřuje na zkoumání úplavu a struktur za vtokem do hranatého propustku při tlakovém proudění. Analýza byla provedena na hydraulickém modelu v laboratorních podmínkách. Součástí práce bylo zprovoznění a aplikace metody 2D Partical Image Velocimetry (PIV). V běžné praxi jsou místní ztráty uvažovány jako lokální problém, což neodpovídá realitě a cílem práce je rozšířit teoretické i praktické znalosti ohledně ztráty na vtoku do propustku. Konkrétně se práce věnuje popisu místní ztráty vtokem při přechodu z proudění o volné hladině do proudění tlakového. Práce se dále věnuje vyhodnocení velikosti úplavu, který vzniká za hranou vtoku do tlakového kanálu.

Díky metodě PIV bylo možné vyhodnotit vektorová pole okamžitých rychlostí při různých okrajových podmínkách tlakového proudění v oblasti vtoku do propustku s Reynoldsovým číslem Re od 1×10^4 do 4×10^4 . Výsledky ukazují, že tabulkové hodnoty součinitele místní ztráty pro ostrohranný vtok jsou platné pro vyšší Reynoldsova čísla z uvedeného intervalu. Pro nižší hodnoty Re vychází součinitel místní ztráty výrazně vyšší oproti tabulkové hodnotě. Dále byla nalezena závislost délky úplavu na poměru zatopení. Výška úplavu vykazuje trend závislost na poměru zatopení.

Klíčová slova: náhlé zúžení, místní hydraulická ztráta, úplav, PIV, vektorové pole rychlostí, propustek

Title: Analysis of the inlet hydrodynamics to the culvert under pressurized flow conditions using the PIV method

Author: Bc. David Kolář

Department: K141 Department of Hydraulics and Hydrology

Supervisor: Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D.

Supervisor's e-mail address: baresvoj@cvut.cz

Abstract This master thesis focuses on the investigation of the recirculation area and flow structures downstream of the inlet of a square culvert under pressurized flow conditions. The analysis was carried out on a hydraulic model under laboratory conditions. The work included the implementation and application of the 2D Partical Image Velocimetry (PIV) method. In common practice, local losses are considered as a local problem, which does not correspond to reality and the aim of this work is to increase the theoretical and practical knowledge regarding the loss at the inlet of a culvert. Specifically, the thesis focuses on the description of local head loss at the inlet during the transition from a free-surface flow to a pressurized flow. The thesis also discusses the evaluation of the size of the recirculation area that forms behind the edge of the pressurized channel inlet.

The PIV method allowed the evaluation of instantaneous velocity vector fields at different boundary conditions of the pressurized flow in the inlet region of the culvert with Reynolds number Re from 1×10^4 to 4×10^4 . The results show that values reported in technical standards of the local head loss coefficient for the sharp-edged inlet are valid for the higher Reynolds numbers of the interval. For lower values of Re , the local head loss coefficient is significantly higher. Furthermore, the dependence of the length of the recirculation area on the relative level of inlet submergence was found. The recirculation area height shows a trend of dependence on the relative level of inlet submergence as well.

Keywords: Sudden constriction, local head loss, recirculation area, PIV, velocity vector field, culvert

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kolář	Jméno: David	Osobní číslo: 476974
Zadávací katedra: K141		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor/specializace: Vodní hospodářství a vodní stavby		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	Analýza hydrodynamiky vtoku do tlakového kanálu s využitím metody PIV	
Název diplomové práce anglicky:	Analysis of the inlet hydrodynamics to the culvert under pressurized flow conditions using the PIV method	
Pokyny pro vypracování:	<p>Teoretická rešeršní část práce se zaměří na dvě základní témata: i) Teorii vzniku energetických ztrát při nátoku do kanálu/propustku s tlakovým režimem proudění, včetně vývoje ztráty v podélném profilu, vztahu mezi průběhem a velikostí ztrát v souvislosti s tvarem rychlostního pole v nátoku, ii) teorie aplikované 2D PIV metody na uvedenou úlohu s důrazem na postupy kalibrace, na časové a prostorové rozlišení a průměrování atp.</p> <p>V praktické části student na navrženém hydraulickém modelu zprovozní a aplikuje metodu 2D PIV, za pomoci které experimentálně vyhodnotí řadu stavů proudění při různých okrajových podmínkách. V rámci práce rovněž popíše provozní postup a nastavení PIV pro daný experiment. Pro každý experiment rovněž změří a zaznamená průběh tlakové čáry podél celé podélné osy kanálu a další potřebné hydraulické charakteristiky.</p> <p>V rámci práce vyhodnotí vztah mezi velikostí úplavu za vtokem u stropu kanálu, tvarem rychlostního pole a průběhem ztrát s ohledem na rozdílné okrajové podmínky nátoku a základní hydraulické, případně turbulentní charakteristiky proudění. V práci rovněž publikuje vizualizace rychlostního pole pro všechny pozorované stavy.</p> <p>Seznam doporučené literatury: Tullis, B. P.; Anderson, D. S.; Robinson, S. C. (2008). Entrance Loss Coefficients and Inlet Control Head–Discharge Relationships for Buried-Invert Culverts. <i>Journal of Irrigation and Drainage Engineering</i>, 134(6), 831–839. Raffel, M., Willert, C. E., & Kompenhans, J. (1998). Particle image velocimetry: a practical guide (Vol. 2). Berlin: Springer. Schröder, A., & Willert, C. E. (Eds.). (2008). Particle image velocimetry: new developments and recent applications. Berlin Springer. NOVOTNÝ, Jan (2017). Vývoj měřicí metody PIV od počátku až po současnost = PIV method development from the beginning to the present. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické.</p>	
Jméno vedoucího diplomové práce:	Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce:	27.09.2022	Termín odevzdání DP v IS KOS: 09.01.2023
		Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku
	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<p><i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i></p>	
<p>30.9.2022</p>	<input type="text"/>
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.
Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 8. ledna 2023

.....

Bc. David Kolář

Rád bych poděkoval Ing. Vojtěchovi Barešovi PhD. za vedení a konzultování této diplomové práce. Velké poděkování také patří Ing. Tomáši Pickovi PhD. za pomoc, rady a hlavně za stavbu žlabu experimentální sestavy.

Abstrakt**Zadání práce****Seznam použitých značek a symbolů 3****Seznam obrázků 8****1 Úvod 9**

- 1.1 Motivace 9
- 1.2 Cíle 10

2 Hydraulika propustků 11

- 2.1 Režim proudění 11
 - 2.1.1 Tlakové proudění 12
- 2.2 Místní ztráta vtokem 14

3 Particle Image Velocimetry (PIV) 16

- 3.1 Obecný popis 16
- 3.2 Historie 16
- 3.3 Charakteristika PIV 17
- 3.4 Vybavení pro PIV 18
- 3.5 Matematický základ statistického vyhodnocení 18
- 3.6 Použití 19

4 Experimentální sestava 20

- 4.1 Použitá zařízení pro metodu PIV 21
- 4.2 Tlakové odběry 22
- 4.3 Software DynamicStudio 22
 - 4.3.1 Nastavení 22
 - 4.3.2 Analýza 22
- 4.4 Definice veličin 23
- 4.5 Experimentální stavy 24

5 Zpracování naměřených dat 25

- 5.1 Měření tlaků 25

5.2	Matice bodových rychlostí	26
5.3	Časově zestředněný snímek bodových rychlostí	26
5.4	Sekvence snímků vektorového pole okamžitých rychlostí	27
6	Metody vyhodnocení dat	28
6.1	Rekonstrukce čáry energie a tlaku po délce propustku	28
6.2	Stanovení součinitele místní ztráty	31
6.3	Velikost úplavu	32
7	Výsledky	35
7.1	2D vektorová pole rychlostí	35
7.2	Časově střední vertikální rychlost \bar{v}	37
7.3	Maximální časově střední horizontální rychlost \bar{u}	38
7.4	Průběh měřených tlaků po délce kanálu	39
7.5	Velikost úplavu	40
	7.5.1 Délka úplavu	40
	7.5.2 Výška úplavu H_u	41
7.6	Součinitel místní ztráty	42
7.7	Diskuse	44
8	Závěr	46
	Seznam použité literatury a zdrojů informací	48
	Seznam příloh	50

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

α	[-]	součinitel kinetické energie
B	[m]	šířka žlabu
$\check{C}E$	[m]	čára energie
$\check{C}T$	[m]	čára tlaku
D	[m]	průměr potrubí
D	[m]	výška kanálu
Δt	[s]	časový interval
E	[m]	celková mechanická energie vůči srovnávací rovině
g	[m/s^2]	tíhové zrychlení
H_{up}	[m]	výška horní hladiny
H_{down}	[m]	výška dolní hladiny
Hu	[m]	výška úplavu
i_0	[-]	sklon dna
λ	[-]	součinitel ztráty tření
L_{AD}	[m]	délka mezi profily
Lu	[m]	délka úplavu
O	[m]	omočený obvod
p	[bar] [m]	tlak
Q	[m^3/s]	průtok
R	[m]	hydraulický poloměr
ρ	[kg/m^3]	měrná hustota
s	[m]	převýšení hladiny
S	[m^2]	průtočná plocha
RVV	[-]	relativní vertikální rychlost (angl: Relative Vertical Velocity)
u	[m/s]	okamžitá horizontální rychlost
\bar{u}	[m/s]	časově střední horizontální rychlost
\bar{U}	[m/s]	průřezová rychlost

\bar{v}	[m/s]	časově střední vertikální rychlost
v	[m/s]	okamžitá vertikální rychlost
x	[m] [-]	X horizontální souřadnice
x_{Hu}	[m]	X souřadnice <i>Vena contracta</i>
ξ	[-]	součinitel ztráty
y	[m] [-]	Y vertikální souřadnice
y_{Hu}	[m]	Y souřadnice <i>Vena contracta</i>
y_h	[m]	hloubka horní vody
y_c	[m]	zúžená hloubka
y_σ	[m]	zatopená zúžená hloubka
y_d	[m]	hloubka dolní vody
Y	[-]	číslo řádku v matici
$\sum Z$	[m]	suma ztrát
Z_m	[m]	místní ztráty
Z_t	[m]	ztráty třením

2.1	Příčný řez kruhovým a obdélníkovým propustkem a značení jejich rozměrů. Schematicky osazeno v korytě toku. (převzato z [2])	11
2.2	Tlakové proudění v propustku (převzato z [8])	12
2.3	Varianty vtoku a tabulková hodnota součinitele ξ (převzato z [8])	12
2.4	Průběh ztrát při tlakovém proudění	13
2.5	Místní ztráta náhlým zúžením potrubí (převzato z [26])	14
2.6	Vzor proudění v zóně při hraničním úplavu (převzato z [10])	14
2.7	Průměrné rychlostní pole na levém obrázku a z těchto rychlostí rekonstruované relativní průměrné tlaky za překážkou ve dně přímým řešením Navier-Stokesových rovnic na pravém obrázku. $ \bar{u} /U_\infty$ rychlostní pole časově středních rychlostí, C_p rekonstruované pole průměrných bodových tlaků. (převzato z [17])	15
3.1	Schéma PIV metody (převzato z [12])	17
3.2	Dvojice snímku z kamery (převzato z [25])	17
3.3	Křížová korelace a poloha nejpravděpodobnějšího posunutí (převzato z [18])	18
4.1	Experimentální žlab nátoky do propustku upravený pro aplikaci PIV	20
4.2	Model experimentálního žlabu pro PIV	21
4.3	Schéma propojení komponentů sestavy PIV	21
4.4	Umístění tlakových odběrů v ose žlabu vyvedených ve stropě kanálu	21
4.5	Postup přípravy snímku pro PIV, a) surový vstupní snímek, b) <i>Image Mean</i> - snímek průměrného pozadí objevující se na každém vstupním snímku, c) <i>Image Arithmetic</i> - od snímku a) odečtené pozadí snímku b, d) <i>Adaptiv PIV</i> - vytvoří z dat vektory okamžitých rychlostí, e) <i>Vector Validation</i> - ověření velikosti vektorů - vektory mimo rozsah jsou vymazány, f) <i>Vector Interpolation</i> - interpolace chybějících vektorů, g) <i>Image Masking</i> - vytvoření masky pro odstranění vektorů mimo oblast zájmu, h) <i>Vector Statistics</i> - výsledné vektorové pole rychlostí.	23
4.6	Definice veličin v modelu	23
5.1	Průběh tlaků na tlakových odběrech Q1_ D4. Černá linie znázorňuje konstrukci vestavby ve žlabu. Barevné řady zobrazují naměřené tlaky v tlakových odběrech. Označení jednotlivých řad odpovídá hodnotě H_{up} . $H_{up} = 6$ (×), $H_{up} = 8$ (◇), $H_{up} = 10$ (□), $H_{up} = 12$ (Δ)	25
5.2	Vlevo matice svislých sloupců souřadnic x [-], vpravo horizontální bodové rychlosti \bar{u} [m/s]	26
5.3	Snímek časově středních hodnot bodových rychlostí experimentu Q1_ D4_ H10	26

5.4	Sekvence snímků okamžitých rychlostí stavu Q1_ D4_ H10	27
6.1	Čáry energie z měřených tlaků. Legenda šedá linie (Δ) Pm ěř jsou měřené tlaky v tlakových odběrech, modrá linie (\diamond) čára energie.	28
6.2	Rekonstrukce čáry energie. Rekonstrukce reálných tlaků z předpokladu lineárního průběhu ztrát třením po délce od konce úplavu ke konci kanálu. Místní ztráta po délce úplavu byla aproximována lineárním modelem, protože není znám skutečný průběh ztrát v tomto místě. Legenda šedá linie (Δ) Pm ěř jsou měřené tlaky v tlakových odběrech, modrá linie (\diamond) rekonstruovaná čára energie $\check{C}E'$, oranžová linie (\square) čára rekonstruovaných reálných tlaků $\check{C}T'$	29
6.3	Rychlostní profil horizontálních rychlostí \bar{u} v tlakových odběrech Q1_ D4_ H6. Přepočet rychlosti pro zobrazení v jednom grafu $0.25n + \bar{u}_i$, kde $n \in \langle 0; 6 \rangle$	30
6.4	Součinitel místní ztráty stavu Q1_ D4	31
6.5	Proudnic stavů Q1_ D4_ H6 a Q1_ D4_ H8.	32
6.6	Standardizované sumy čtverců stavů Q1_ D4. Legenda odpovídá poměru s/D	33
6.7	Porovnání stanovených délek úplavu Lu oběma metodami. Vodorovná osa jsou délky stanovené z proudnic, svislá osa hodnoty určeny početně podle RVV. Modrá čára diagonálně přes graf představuje 100% shodnost velikostí. Legenda odpovídá poměru s/D . 33	33
6.8	Vykreslení gradientu horizontálních rychlostí Q1_ D4 a Q3_ D8. Legenda odpovídá poměru s/D . Minimální hodnota gradientu odpovídá největší změně sousedící dvojce rychlostí. Osa y odpovídá číslu řádku matice bodových rychlostní Y	34
7.1	Vektorová pole rychlostí pro stav Q1_ D4_ H8 ($\bar{U} = 0.313$ m/s) při poměru $s/D = 1$. Levý obrázek je snímek časově středních rychlostí. Pravý obrázek je 1/300 pořizovaných snímků okamžitých rychlostí. Pro oba obrázky je barevná stupnice rychlostí v rozmezí od $0 \div 0.5$ m/s a černé šipky v popředí znázorňují směr a velikost vektoru rychlosti v jednotlivých bodech měrné sítě.	35
7.2	Vektorová pole rychlostí pro stav Q3_ D8_ H14 ($\bar{U} = 0.469$ m/s) při poměru $s/D = 0.75$. Levý obrázek je snímek časově středních rychlostí. Pravý obrázek je 1/300 pořizovaných snímků okamžitých rychlostí. Pro oba obrázky je legenda barev v rozmezí od $0 \div 0.75$ m/s a černé šipky v popředí znázorňují směr proudění v jednotlivých bodech měrné sítě. 35	35
7.3	Vektorová pole rychlostí pro stav Q1.5_ D8_ H10 ($\bar{U} = 0.234$ m/s) při poměru $s/D = 0.25$. Levý obrázek je snímek časově středních rychlostí. Pravý obrázek je 1/300 pořizovaných snímků okamžitých rychlostí. Pro oba obrázky je legenda barev v rozmezí od $0 \div 0.35$ m/s a černé šipky v popředí znázorňují směr proudění v jednotlivých bodech měrné sítě. 36	36
7.4	Průběh relativních vertikálních rychlostí RVV pro průřezovou rychlost $\bar{U} = 0.234$ m/s. V pravém obrázku pro nejmenší převýšení s/D zobrazené modrými kosočtverci (\diamond) není patrná po délce kanálu výrazná změna v rychlostech. To potvrzuje, že pro tento stav se nevytvořil úplav. Označení legendy grafu odpovídá poměru s/D jednotlivých průtokových stavů.	37
7.5	Relativní vertikální rychlosti RVV porovnané podle s/D . Legenda odpovídá Reynoldsovým číslům a vodorovná osa x/D má vlivem standardizace pro dvě velikosti kanálu D dvě délky.	37
7.6	Průběh maximální rychlosti v časově středním snímku vodorovných rychlostí \bar{u} pro stejnou průřezovou rychlost $\bar{U} = 0.234$ m/s. Legenda odpovídá poměru zatopení s/D . V pravém obrázku nejmenší řada modrých kosočtverců (\diamond) je přibližně konstantní po celé délce pozorování. To potvrzuje, že pro tento stav se nevytvořil za vtokem do kanálu úplav. 38	38
7.7	Porovnání průběhů maximálních rychlostí v časově středním snímku vodorovných rychlostí \bar{u} porovnaných podle stejných s/D . Legenda odpovídá Re a vodorovná osa x/D má dvě velikosti zapříčiněnou dvěma velikostmi kanálu D	38

7.8	Porovnání měřených a vypočtených tlaků v tlakových odběrech na stropě kanálu. Oranžové (\square) zobrazují vypočtené tlaky $\check{C}T'$, šedé (Δ) jsou naměřené tlaky $Pm\check{e}r$. Vynesením hodnot vzniká čára tlaku $Pm\check{e}r$, která v některých místech roste, a odvozená čára energie by také rostla. To není možné, energie v systému nemůže růst.	39
7.9	Vynesená bezrozměrná délka úplavu Lu/D v závislosti na Re a s/D . V levém obrázku jsou data proložena mocninou spojnicí trendů, těsnost tohoto proložení je nedostatečná. V pravém obrázku je pro toto proložení použit logaritmický model, který vytvořil závislost mezi Lu a s/D	40
7.10	Vynesena bezrozměrná výška úplavu Hu/D v závislosti na Re a poměru s/D . V obou obrázcích jsou data proložena spojnicí trendů při použití logaritmického modelu. Spolehlivost proložení dat v levém obrázku v závislosti na Re je nedostatečná. Pravý obrázek závislosti na s/D vykazuje optimálnější parametr spolehlivosti R^2	41
7.11	Součinitel místní ztráty ξ , pro $\bar{U} = 0.234$ m/s. Získané hodnoty součinitele vynesené po délce kanálu v místech tlakových odběrů.	42
7.12	Součinitel místní ztráty ξ , $\bar{U} = 0.313$ m/s. Získané hodnoty součinitele vynesené po délce kanálu v místech tlakových odběrů.	42
7.13	Vynesený součinitel místní ztráty ξ . V levém obrázku je závislosti na s/D a značky podle Re . Oranžové (\square) patří nejmenšímu průtoku na kanále výšky $D = 4$ cm, pro který vycházel součinitel v porovnání s ostatními výrazně vyšší. Pravý obrázek je závislost na Re a značky podle s/D . Data jsou proložena mocninou spojnicí trendů, která odpovídá naměřeným datům.	43
7.14	Rychlostní pole okamžitých bodových rychlostí na levém obrázku a z těchto rychlostí rekonstrované relativní okamžité průběhy tlaků za překážkou ve dně přímým řešením Navier-Stokesových rovnic na pravém obrázku. $ u /U_\infty$ rychlostní pole časově středních rychlostí, C_p rekonstrované pole průměrných bodových tlaků. (převzato z [17])	44
8.1	Proudnice stavu Q1_ D4 pro různé hloubky před propustkem.	51
8.2	Postup přípravy snímku pro PIV, a) surový vstupní snímek, b) <i>Image Mean</i> - snímek průměrného pozadí objevující se na každém vstupním snímku, c) <i>Image Arithmetic</i> - od snímku a) odečtené pozadí snímku b, d) <i>Adaptiv PIV</i> - vytvoří z dat vektory okamžitých rychlostí, e) <i>Vector Validation</i> - ověření velikosti vektorů - vektory mimo rozsah jsou vymazány, f) <i>Vector Interpolation</i> - interpolace chybějících vektorů, g) <i>Image Masking</i> - vytvoření masky pro odstranění vektorů mimo oblast zájmu, h) <i>Vector Statistics</i> - výsledné vektorové pole rychlostí.	52
8.3	Vektorová pole časově středních rychlostí stavů s průřezovou rychlostí $\bar{U} = 0.234$ m/s. Barevná škála odpovídá rychlostem z měření v rozmezí od 0 ÷ 0.35 m/s. V levém části obrázku jsou převýšení od shora 6, 8, 10 a 12 cm při výšce kanálu $D = 4$ cm. V pravé části jsou od shora 10, 12, 14 a 16 cm při výšce kanálu $D = 8$ cm.	53
8.4	Vektorová pole časově středních rychlostí stavů s průřezovou rychlostí $\bar{U} = 0.313$ m/s. Barevná škála odpovídá rychlostem z měření v rozmezí od 0 ÷ 0.45 m/s. V levém části obrázku jsou převýšení od shora 6, 8, 10 a 12 cm při výšce kanálu $D = 4$ cm. V pravé části jsou od shora 10, 12, 14 a 16 cm při výšce kanálu $D = 8$ cm.	54
8.5	Vektorová pole časově středních rychlostí stavů s průřezovou rychlostí $\bar{U} = 0.469$ m/s. Barevná škála odpovídá rychlostem z měření v rozmezí od 0 ÷ 0.75 m/s. V levém části obrázku jsou převýšení od shora 6, 8, 10 a 12 cm při výšce kanálu $D = 4$ cm. V pravé části jsou od shora 10, 12, 14 a 16 cm při výšce kanálu $D = 8$ cm.	55
8.6	Příklady různých vektorových polí časově středních rychlostí vložené do fotografie experimentu, bylo možné udělat jako jeden z výstupů analýzy v programu od Dantec Dynamics.	56
8.7	Příklady různých vektorových polí okamžitých rychlostí. Barevná škála od nejnižší rychlosti v modré až po největší rychlost v červené.	56
8.8	Hodnoty měřených tlaků vynesené do grafu. Vlevo pro výšku kanálu $D = 4$ cm, vpravo výška kanálu $D = 8$ cm.	57

8.9	Z toho důvodu, že některé průběhy tlaků vykazovaly divné chování, bylo provedeno opakované kontrolní měření na jednom kanále $D = 8$ cm při průtoku $Q = 1.5$ l/s. Závěrem opakování je, že původní měřené hodnoty byly naměřeny správně a nebylo potřeba výsledky analýz měnit.	57
8.10	Rekonstrukce čáry energie. Rekonstrukce reálných tlaků z předpokladu lineárního průběhu ztrát třením po délce od konce úplavu ke konci kanálu. Místní ztráta po délce úplavu byla aproximována lineárním modelem, protože není znám skutečný průběh ztrát v tomto místě. Legenda šedá linie (Δ) Pm ěř jsou měřené tlaky v tlakových odběrech, modrá linie (\diamond) rekonstruovaná čára energie $\check{C}E'$, oranžová linie (\square) čára rekonstruovaných reálných tlaků $\check{C}T'$	58
8.11	Časově střední rychlostní profily v místě tlakových odběrů. Vlevo pro kanál $D = 4$ cm, vpravo výška $D = 8$ cm. Přepočet rychlosti pro zobrazení v jednom grafu $0.25n + \bar{u}_i$, kde $n \in \langle 0; 6 \rangle$	59
8.12	Součinitel místní ztráty ξ	60
8.13	Vykreslení gradientu horizontálních rychlostí. Legenda odpovídá poměru s/D . Minimální hodnota gradientu odpovídá největší změně sousedící dvojce rychlostí \bar{u} . Osa y odpovídá číslu řádku matice bodových rychlostní Y	61
8.14	Relativní vertikální rychlost RVV	62
8.15	Maximální rychlost \bar{u}	62

1.1 Motivace

Propustek je hydraulický objekt a je součástí skoro každé liniové stavby vedené v náspu. Hlavním účelem těchto objektů je bezpečné převedení vodního toku pod komunikací nebo umožnění migrace živočichů. Propustek je mostním otvorem s kolmou světlostí otvoru od 0.4 do 2.0 m včetně, jak je definováno v normě ČSN 73 6200. Hydraulický rozdíl propustků od mostních otvorů je v poměru délky k příčným rozměrům. Dominantním rozměrem propustků je jejich délka. Díky dostatečné délce mezi vtokem a výtokem z propustku může dojít k rozvinutí proudění a například přechodu z proudění o volné hladině do proudění tlakového nebo vzniku vodního skoku. Vtokem do propustku většinou nastává zúžení koryta vodního toku do profilu propustku. Za výtokem dochází naopak k rozšíření na původní tvar koryta [14].

Problematika hydrauliky propustků už byla mnohokrát zkoumána a publikována u nás i v zahraničí. Projektanti mají naučené postupy, jak propustky navrhovat a posuzovat. Jejich rozměry jsou většinou navrženy správně, i když často předimenzované a to hlavně z důvodu ochrany před ucpáním [1]. Standardním přístupem pro popis hydrauliky propustků je 1D řešení pomocí Bernoulliho rovnice. Místní ztráty vtokem a výtokem uvažují jako lokální problém a ztrátu třením uvažují jako lineární po celé délce propustku. Nicméně vznik a propagace místní ztráty na vtoku do tlakového kanálu je vícerozměrný problém, kdy roli hraje řada charakteristik turbulentního proudění. Proto jedním z cílů, který si tato práce klade, je rozšíření teoretických i praktických znalostí hydrauliky těchto objektů. Experimentální sestava s PIV systémem umožnila vizualizaci, kvantifikaci a stanovení okamžitých rychlostí ve 2D rovině s vysokým prostorovým rozlišením.

Při tlakovém proudění jsou ztráty tvořeny ztrátou místní a ztrátou třením. Tření vzniká kontaktem vody se stěnou nebo vody s vodou při deformaci proudnic. Místní ztráta u vtoku do propustku s ostrohranným vtokem je analogií k místní ztrátě u ostrohranného vtoku do potrubí nebo místní ztrátě při náhlém zúžení při tlakovém proudění v potrubí. U těchto jevů dochází k velmi podobnému zakřivení proudnic a dějům za hranou překážky nebo zúžení. Náhlé zúžení vyvolá výrazný pokles tlaku vlivem větší průřezové rychlosti a změny zakřivení proudnic. Poté tlak mírně vzroste a následně již postupně rovnoměrně klesá vlivem ztrát třením. Pro náhlé zúžení při tlakovém proudění v potrubí je hodnota součinitele závislá na poměru průtočných ploch před a za zúžením. Pro vtok do propustku nebo do potrubí není tento součinitel vztažen ke světlému průměru/výšce nebo k převýšení hladiny nad záklenkem tlakového kanálu/potrubí. Běžně je uvažováno s jednoznačnou tabulkovou hodnotou, která nemá žádnou spojitost s hydraulickými charakteristikami proudění (Reynoldsovým číslem, průtokem, rychlostí), geometrií nebo převýšením před vtokem. Vývoj energetických ztrát není běžně uvažován jako prostorový problém po délce kanálu. Rekonstrukce průběhu tlaků a zobrazení rychlostí ukazuje, že není možné místní ztrátu považovat za lokální pokles energie, ale musí se uvažovat i o délkovém rozměru, protože dochází k propagaci ztráty

na poměrně dlouhé vzdálenosti. Pokud bude délka propustku malá, může docházet k šíření ztráty i do výtoku.

Práce přináší pohled na proudění v nátoku do propustku, kdy díky metodě PIV bylo možné změřit a analyzovat vektory rychlostí přímo v ose a v dostatečné podrobnosti. Výzkum byl zaměřen na oblast vtoku do propustku, za pomoci měření tlaků na stropě kanálu a měření podélných a vertikální složek rychlostí v místě zúžení. Je stanovován součinitel místní ztráty a velikost úplavu vznikající za hranou vtoku. Experimenty byly provedeny na geometrii ostré vtokové hrany do kanálu. Vyhodnocované průtokové stavy měly Reynoldsovo číslo v rozmezí $1 \div 4 \times 10^4$. Rozsah použitých převýšení horní hladiny s nad stropem kanálu před vtokem do kanálu byl definován poměrem s/D v intervalu od $0.25 \div 2$, kde D je výška propustku.

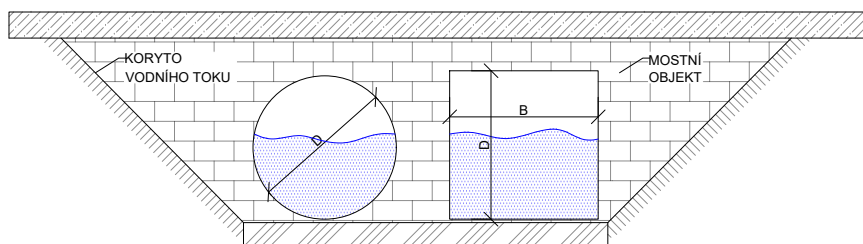
Práce je rozdělena na teoretickou část, popis experimentální sestavy, metody vyhodnocení dat a vyhodnocení naměřených dat. V grafické příloze jsou vektorová pole a grafické výstupy jednotlivých experimentů.

1.2 Cíle

Hlavním cílem této práce byla interpretace poznatků experimentálního výzkumu hydraulického problému náhlého zúžení proudu. Ten je způsoben vtokem do propustku. Další cíl není ryze výzkumný, ale jedná se o metodologický cíl, konkrétně o aplikaci metody PIV na popsanou hydraulickou úlohu. Konkrétní cíle práce lze definovat jako

- Popsat a definovat místní ztrátu vtokem při přechodu z proudění o volné hladině do tlakového kanálu pro různé hodnoty Re a převýšení hladiny nad záklenkem vtoku do kanálu.
- Popsat a definovat tvar rychlostního pole v místě zúžení včetně vyhodnocení hydraulických charakteristik a průběhu tlaku.
- Popsat úplav, který vzniká za vtokem, jelikož jeho velikost a tvar bude jednoznačně ovlivněn náhlou změnou proudnic.
- Aplikovat metodu PIV na popsanou úlohu včetně vytvoření návodu k postupu a nastavení PIV měření, ve kterém budou popsány kroky potřebné ke zprovoznění měření.

Propustky jsou malé objekty s konstantním podélným sklonem a jejich světlost je od 0,4 do 2,0 m. Slouží k převedení vody pod zemními tělesy komunikací a tělesy kolejových tratí. Převážně se používají dva základní příčné profily propustků, a to obdélníkový nebo kruhový, výjimečně parabolický nebo vejčitý. Z hlediska použití je možné propustky rozdělit na dvě skupiny, jedny převádějí vodu z malých povodí a jsou většinu roku bez stálého průtoku, druhé slouží jako propojení inundačních území rozdělené zemním tělesem liniových staveb. Nejčastěji využívaný příčný profil je kruhový, nicméně lepší hydraulické chování vykazuje obdélníkový průřez. Pro obdélníkovou geometrii vychází příznivější poměr hloubky k zatopené ploše (poměr plnění) než u kruhového průřezu [1, 19].



Obrázek 2.1: Příčný řez kruhovým a obdélníkovým propustkem a značení jejich rozměrů. Schematicky osazeno v korytě toku. (převzato z [2])

2.1 Režim proudění

Režim proudění vody v propustku je ovlivněn okrajovými podmínkami před vtokem a za výtokem. Zpravidla se jedná o nerovnoměrné proudění s volnou hladinou. Průběh hladin je často ovlivněn přechodem říčního proudění na bystřinné a naopak. Proudění v propustku může být i v tlakovém režimu proudění. Často se jedná o kombinaci různých forem proudění. Režim je ovlivněn sklonem dna propustku v porovnání ke sklonu kritickému, délkou propustku, příčným profilem, dispozicí vtoku a výtoku a okrajovými podmínkami na přítoku a odtoku z propustku [1, 8, 19].

Je možné definovat tři hlavní skupiny:

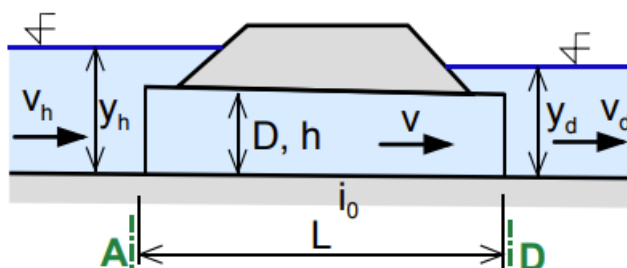
- proudění o volné hladině,
- proudění o volné hladině se zahlceným vtokem,
- tlakové proudění

2.1.1 Tlakové proudění

Tlakové proudění v propustku může být po celé délce nebo jen v jeho části. Varianta tlakového proudění je ovlivněna výškou dolní vody konkrétně, zda zatápí či nezatápí výtok z propustku. Pro řešení situace, kdy je tlakové proudění v celé délce propustku a výtok je zatopen od dolní vody, viz Obrázek 2.2, se sestavuje Bernoulliho rovnice pro profil vzduté hladiny nad propustkem A a pro profil D za výtokem z propustku [1, 8, 19].

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2g} + i_0 \cdot L_{AD} = y_d + \frac{\alpha \cdot v_d^2}{2g} + \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} + (\xi_z + \xi_r) \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

Kde i_0 je sklon dna, L_{AD} délka úseku AD , α Coriolisovo číslo, v_h průřezová rychlost nad propustkem, v_d průřezová rychlost pod propustkem, v průřezová rychlost v propustku, g tíhové zrychlení, λ součinitel ztráty tření, L délka tlakového proudění, D průměr /výška propustku, ξ_z součinitel ztráty vtokem závislý na konstrukčním provedení vtoku viz Obrázek 2.3, ξ_r součinitel ztráty výtokem závislý na poměru rychlosti v propustku a za výtokem.



Obrázek 2.2: Tlakové proudění v propustku (převzato z[8])

ξ	0.40 - 0.50	0.70 - 0.80	0.80 - 0.90	0.05 - 0.10	0.10 - 0.15	0.30 - 0.40

Obrázek 2.3: Varianty vtoku a tabulková hodnota součinitele ξ (převzato z [8])

Bilance mechanické energie v propustku - Bernoulliho rovnice

Rovnice byla poprvé publikována v roce 1738 švýcarským matematikem Danielem Bernoullim v knize Hydrodynamica [23]. Bernoulliho rovnice popisuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění kapaliny.

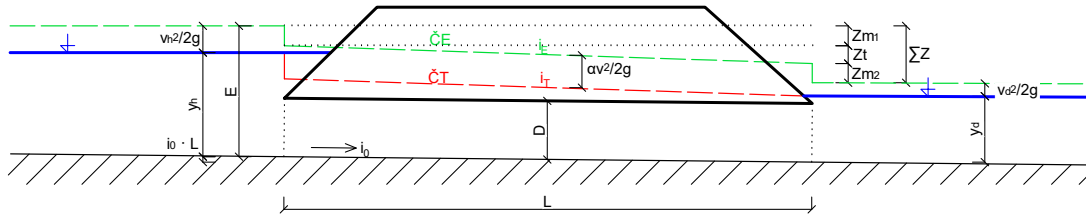
Rovnice 2.1 popisuje bilanci mechanické energie pro různé profily. Energetická výška je součtem polohové, tlakové a rychlostní výšky a při bilanci mezi dvěma profily, viz Rovnice 2.1 a Obrázek 2.4, musí dojít k započtení ztrát mezi těmito profily.

$$\sum Z = Z_m + Z_t \quad Z_m = (\xi_z + \xi_r) \cdot \frac{v^2}{2g} \quad Z_t = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.2)$$

Kde Z_m jsou ztráty místní, Z_t ztráty třením, λ součinitel ztráty třením ($\lambda = f(Re, \frac{\Delta}{D})$), D je poloměr kruhového průřezu, pro nekruhový profil je $D = 4 \cdot R = 4 \cdot S/O$.

Místní ztráta je prezentována jako lokální pokles čáry energie způsobená například vtokem do propustku, ztráty třením jsou po celé délce a způsobují stálý pokles čáry energie. Další místní ztrátou může být ztráta výtokem viz. Obrázek 2.4. Pro zjednodušení se uvažuje s místní ztrátou jako lokálním poklesem čáry energie a dále se po proudu pokles energie neuvažuje. Jde o schematizaci znázornění průběhu mechanické energie, a pokud je použito dalších a přesnějších metod vyhodnocení hydraulických charakteristik proudění (měření bodových rychlostí, měření tlaku atp.) je možné po proudu pozorovat šíření této ztráty.

Při tlakovém proudění v propustku čára tlaku (ČT) začíná a končí na volné hladině mimo propustek. Čára tlaku kopíruje čáru energie (ČE) odsazená o rychlostní výšky. Čára energie začíná na energetické hladině horní hladiny E . Hladina energie je součtem hloubky proudění a rychlostní výšky $y_h + v^2/2g$. Celkový pokles čáry energie je roven $\sum Z$.



Obrázek 2.4: Průběh ztrát při tlakovém proudění

Nerovnoměrnost rychlostního profilu vyjadřuje Coriolisovo číslo α . Tímto číslem je udán podíl skutečné kinetické energie průřezu k průřezové kinetické energii, vyjádřený pomocí střední rychlosti na průřezu [7]. Číslo vyjadřuje nerovnoměrnost ve směru proudění.

$$\alpha = \frac{1}{u^3 \cdot S} \cdot \int u_i^3 \cdot dS \quad (2.3)$$

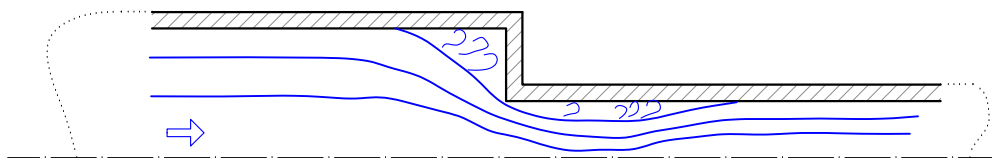
Coriolisovo číslo je integrál bodových rychlostí přes plochu průřezu normalizovaný celkovou plochou a průměrnou rychlostí, kde u je průměrná rychlost po integrované ploše, S je plocha přes kterou se integruje, u_i jsou bodové rychlosti v integrované ploše.

2.2 Místní ztráta vtokem

Místní ztráta je zavedení úbytku mechanické energie vyvolané lokální rozruchem proudu do Bernoulliho rovnice. Úbytek mechanické energie není způsoben samotným zúžením, ale zvýšením tření vlivem vzniku dodatečných vírů, které vznikají převážně v místech, kde rychlejší proud tekutiny vniká do proudu pomalejšího. Takové podmínky vznikají především za místem náhlého zúžení (kontrakcí) proudu a jsou ovlivněny i geometrií překážky. Vhodná geometrie sníží velikost ztráty a umožní více kapacitní vtok. Hodnotu součinitele místní ztráty ξ je možné určit z tabulek podle geometrie, viz Obrázek 2.3. Pro ostrohranný vtok A je možné použít součinitel místní ztráty z intervalu 0.40 - 0.50. Běžně používaná hodnota z intervalu je součinitel 0.5 kvůli analogii se zúžením na potrubí. Součinitele v těchto tabulkách jsou určitým zjednodušením, neboť hodnoty nezohledňují třeba Reynoldsovo číslo nebo velikost průřezové rychlosti.

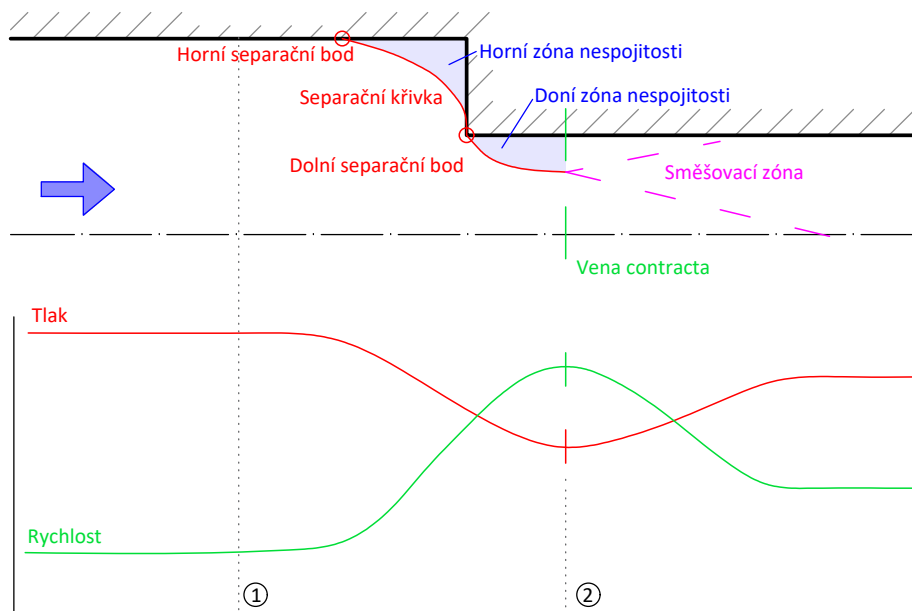
$$Z_m = \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.4)$$

Hydraulickou ztrátu vtokem do propustku je možno připodobnit k místní ztrátě náhlého zúžení potrubí. Obrázek 2.5 ukazuje osovou symetrie náhlého zúžení na potrubí, schéma je velmi podobné vtoku do propustku. Dochází ke stejné deformaci proudnic a separační křivka vytvoří zóny nespojitosti. Součinitel místní ztráty při zúžení potrubí je závislý na poměru ploch potrubí před a za zúžením a z toho se odvíjí i velikost součinitele místní ztráty.



Obrázek 2.5: Místní ztráta náhlým zúžením potrubí (převzato z [26])

Náhlá změna průřezu vytvoří separační křivky, které oddělují zóny nespojitosti od souvislého hlavního proudu, viz Obrázek 2.6.



Obrázek 2.6: Vzor proudění v zóně při hraničním úplavu (převzato z [10])

Separáční křivka. Jak se proud blíží k náhlé kontrakci, proudnice již není schopna sledovat hranu vstupu do kanálu a horní obalová proudnice změní trajektorii. Separáční křivka vzniká mezi hlavním proudem a prostorem zóny nespojitosti. Stanovení horního separáčního bodu, ve kterém dochází k oddělení proudnice od svěny potrubí je obtížné. Ale bod oddělení dolní separáční křivky vždy začíná na hraně a pomyslný konec lze označit jako *Vena contracta* [10].

Horní zóna nespojitosti je ohraničena volnou hladinou před propustkem, respektive stěnou potrubí a separáční křivkou. Rychlostní gradient přes plochu nespojitosti je příčinou vzniku turbulence [10].

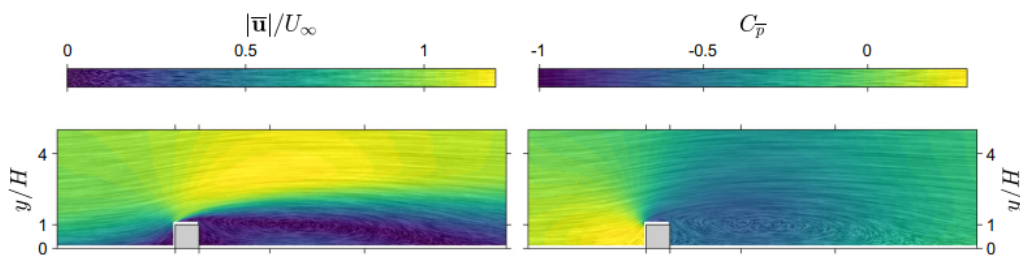
Dolní zóna nespojitosti. Na rozdíl od horní zóny nespojitosti má ta dolní mnohem složitější okrajové podmínky. Velké nestabilní víry se vyskytují mezi separáční křivkou a stěnami potrubí a ty způsobují kolísání separáční vrstvy. Disipace energie v této zóně je způsobena vlivem turbulence v těchto velkých vírech a přítomnosti vírové vrstvy podél separáční křivky [10].

Směšovací zóna Vírová struktura se rozšiřuje po proudu za hranici *Vena contracta* a proud se snaží vyplnit kanál, tím dochází k zpomalení rychlosti proudu a vzniku směšovací zóny. Přítomnost turbulentního proudění v úplavu způsobuje disipaci energie a ta je nejvýraznější při změně průřezové plochy. Vliv zúžení průtočné plochy se po proudu na proudění zmenšuje, dokud proudění nedosáhne opět střední průřezové rychlosti [10].

Vena contracta (VC) Je místem, kde výška zóny nespojitosti je v hlavním proudu maximální. Hmota se nikam neztrácí, proto platí rovnice kontinuity $v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$. Při konstantním průtoku je hodnota na obou stranách rovnice shodná, a dochází jen ke změně průtočné plochy. Jelikož je plocha hlavního proudu ve VC nejmenší, z toho plyne největší rychlost v tomto místě, viz graf na Obrázku 2.6. Předpoklad shody mezi VC a polohou minimálního tlaku, vychází z úvahy o jednorozměrném Bernoulliho modelu, viz rovnice ???. Rychlost ani tlak nejsou v libovolném místě podél osy stejné, což potvrzují autoři na experimentálních datech. Tato hypotéza platí pro $Re > 1 \times 10^6$ [20].

Proudění v kanále je za normálních podmínek proudění trojrozměrné. Pro zjednodušení se uvažuje pouze dvourozměrného proudění, při kterém dochází k proudění pouze dvěma směry a to v rovině pozorování ve směru x a y a v rovinách k této rovině rovnoběžných. Vliv složek rychlostí kolmých k této rovině pozorování je možné zanedbat. Vložení pozorovací roviny do osy kanálu je možné přítomnost sekundárního proudění je možné potlačit, ale nikoliv eliminovat [10].

Je tedy předpokladem, že za zúžením vzniká místo, ve kterém nastane pokles tlaku. Tento pokles by měl být pozorovatelný na tlakových odběrech nebo při měření PIV. Pomocí metody PIV je možné z měřených rychlostí vytvořit časově střední snímek lokálních tlakových změn [5, 17].



Obrázek 2.7: Průměrné rychlostní pole na levém obrázku a z těchto rychlostí rekonstruované relativní průměrné tlaky za překážkou ve dně přímým řešením Navier-Stokesových rovnic na pravém obrázku. $|\bar{u}|/U_\infty$ rychlostní pole časově středních rychlostí, $C_{\bar{p}}$ rekonstruované pole průměrných bodových tlaků. (převzato z [17])

KAPITOLA 3

PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV)

3.1 Obecný popis

Optická metoda Particle Image Velocimetry (PIV), je technika měření okamžitých rychlostí v rovině. Rychlosti se určují z měřené vzdálenosti, kterou urazí unášené částice toku, a z času, který částice potřebují k překonání této vzdálenosti potřebují. Částice jsou buď součástí proudícího média, nebo jsou do média přidávány. Metoda využívá laserového paprsku, který je pomocí optiky laseru transformován na laserový rovinný list. Ve vytvořené rovině tak dochází k osvětlení reflexních částic obsažených v kapalině. Dochází ke stroboskopickému jevu, který umožní „zmrazení“ pohybu částic, z toho důvodu je buzení světelné roviny pulzní. Expozice kamery je velmi krátká a scéna musí být dostatečně osvětlena. Doba mezi impulzy je časem, který slouží k výpočtu rychlosti. Kamera je umístěná kolmo ke světelné rovině vytvořené světelným listem a je časově synchronizována s pulzním laserem. Snímek zobrazí každou částici jako světlý bod na tmavém pozadí. Jsou pořizovány dva snímky velmi rychle za sebou z jednoho pozorovacího bodu.

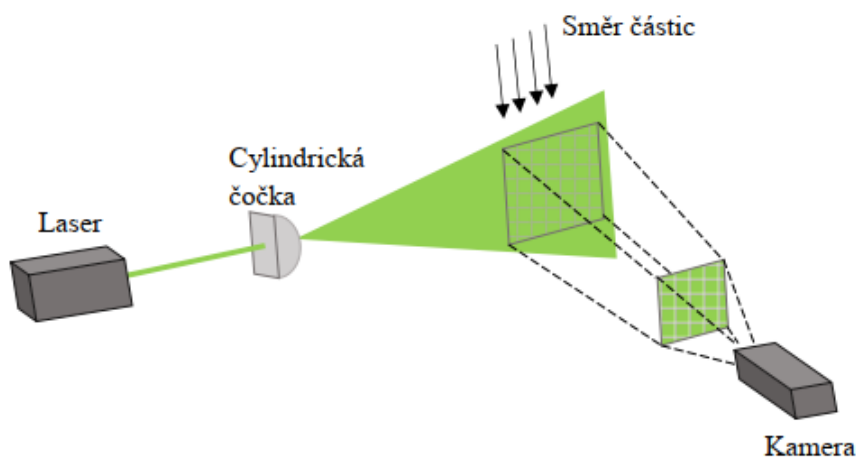
Snímaná oblast je při vyhodnocování rozdělena na menší plochy, ze kterých je korelačními metodami stanoven jeden vektor. Tento vektor reprezentuje časově i prostorově střední hodnotu posunu všech částic uvnitř vyhodnocované plochy. Dělením tohoto posunu známým časovým intervalem mezi dvěma záznamy obrazu jsou vektory posunu převedeny do mapy rychlostních vektorů [16, 21].

3.2 Historie

PIV je metoda používaná k zjištění celého rychlostního pole v jedné rovině a z toho plynoucích dalších veličin proudících kapalin. Jedná se o metodu vyvíjenou v 80. letech 20. století. První náznak PIV vyzkoušel již německý fyzik Ludwig Prandtl v roce 1904, kdy pro vizualizaci proudění využil suspenze slídy na hladině kanálu. Prandtl studoval strukturu turbulentního proudění. Dalším historickým použitím byla vizualizace nestacionárního proudového pole za válcem v roce 1917, který v článku publikovali Naylor a Frazier. Pro záznam polohy částic se používal fotoaparát a pro detekci směru a rychlosti proudění bylo využito pulzujícího optického listu. První funkční metoda pro detekci vzájemného posunu signálu publikovali v roce 1966 autoři Weaver a Goodman. Vědecký pokrok této metody byl ovlivněn rozvojem optiky, laserů, videotechniky a výpočetní techniky. O rok později byla publikována první autokorelační funkce pro detekci posunutí částic v mechanice tekutin. Od počátků se vývoj PIV měření posunul o velký krok vpřed. V začátcích využívali standardní 35mm film, který poskytoval fantastické rozlišení, bohužel porovnání dvojice snímků a jejich vyhodnocení trvalo stovky hodin. Dnešní trend, hlavně díky moderní výpočetní technice, je nižší rozlišení s vyhodnocením stovek dvojic snímků v reálném čase [11, 13].

3.3 Charakteristika PIV

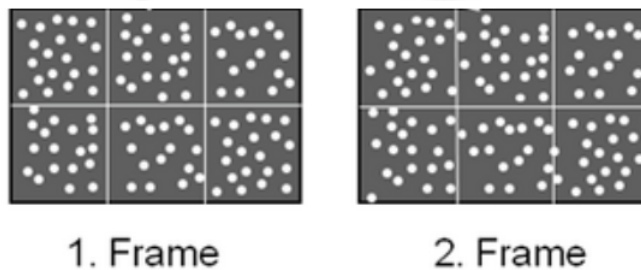
PIV poskytuje náhled na vektorová pole rychlostí v rovině měření (světelný list), které je možné vizualizovat z pohledu pozorovatele. Principem je zkoumání přemístění jednotlivých skupin částic. Základní sestava pro moderní měření metodou PIV je pulzní laser, optika laseru pro vytvoření laserového listu, kamera a trigger (synchronizační jednotka). To vše je ovládáno přes PC, kde dále za pomoci softwaru dochází k analýze získaných dat.



Obrázek 3.1: Schéma PIV metody (převzato z [12])

Pro kvalitní měření je potřeba mít vhodnou tekutinu, která obsahuje v sobě vhodné částice pro osvětlení laserem a zaznamenání kamerou. Pokud tyto částice nejsou v tekutině obsaženy, jsou do tekutiny přidány pro správný reflexní efekt. Pulzní laser je přes synchronizační jednotku společně s kamerou zapojen do počítače a synchronizace způsobí, že pulzy laseru odpovídají snímkovací frekvenci kamery. Toto propojení zajistí „zastavování“ pohybu a díky algoritmům, je možné popsat vzájemný posun částic mezi dvojicí snímků pořízených ve velmi krátkém časovém úseku. Vzájemný posun části mezi pořízenými snímky je možné takto kvantifikovat.

Tento posun je vidět na obrázku 3.2, kde jsou dva snímky za sebou s malým časovým rozdílem mezi nimi. Mezi kvadranty je možné pozorovat posun a následně tento posun interpretovat vektorem, který má velikost i směr.



Obrázek 3.2: Dvojice snímku z kamery (převzato z [25])

3.4 Vybavení pro PIV

Většina tekutin neobsahuje dostatek vhodných přirozených reflexivních částic a proto je zapotřebí do nich tyto částice uměle přidat. Výběr částic se řídí používaným médiem, jedny jsou vhodné pro použití v plynu druhé naopak pro použití v kapalině. Výběr druhu částice závisí na velikosti, reflexivitě, hustotě, tvaru a kvalitě povrchu pro stejnoměrnost odrazu světla. Částice jsou obvykle ve tvaru kuličky nebo zrnka a pro měření není potřeba jich přidávat mnoho. Pro dvoufázové proudění vody a vzduchu je vhodné použít fluorescenční částice.

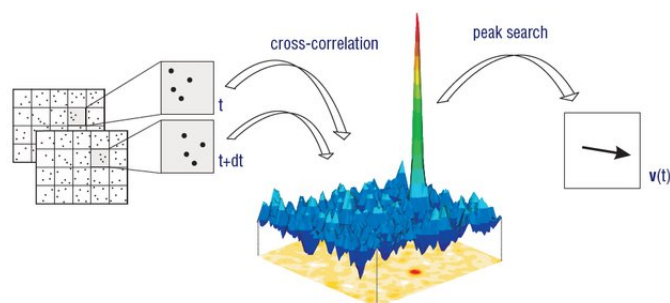
Laserový paprsek při prosvětlení vytváří rovinu a proto je zapotřebí dostatečný výkon pro prosvícení zkoumané kapaliny. Nejčastěji se používají pulzní lasery s dvěma jednotkami. Energie pulzů jsou v desítkách až stovkách mJ . Potřebná energie se odvíjí od světelných podmínek a osvětlované oblasti. Laser je vhodným zdrojem světla, protože poskytuje monochromatické světlo vysoké energetické hustoty. Sadou optických čoček je nastavena požadovaná tloušťka listu.

Optické a elektronické charakteristiky senzoru kamery mají přímý vliv na technické možnosti záznamu. Nejrozšířenější snímací technikou pro PIV jsou kamery s CCD nebo CMOS senzory. Výhodou CMOS senzorů je vysoká citlivost a relativně málo šumu [13].

3.5 Matematický základ statistického vyhodnocení

Základním předpokladem pro vyhodnocení dat získaných PIV měřeními byly autokorelační metody, které se rozšířily v křížovou korelační analýzu. Korelace posuzuje těsnost vzájemné závislosti dvou veličin, v PIV je to závislost vektorů rychlostí s výslednou iterační plochou. Aby bylo dosaženo nejlepší shody je možné měnit velikost a tvar nejlépe odpovídající plochy. Softwaru převezme pro zpracování dvojice snímků, které je rozdělena na stejně velké dílčí snímky neboli iterační plochy. Sousední plochy se ve snímku překrývají o hodnotu, která odpovídá posunu iteračních ploch. Plochy se ve vyhodnocení postupně zmenšují společně s krokem posunu. Síť je postupně zmenšována a přesnost vektorů by měla narůstat. Zpracování snímků probíhá iteračně v několika cyklech.

Na začátku jsou předvoleny velikosti iteračních oblastí a jejich počet. Z předchozí iterace je znám odhad rychlostního pole (přemístění částic), první iterace má rychlost u_0 a $v_0 = 0$. Při další iteraci jsou rychlosti pole ve snímcích přepočítány s odhadem částic v čase $t_1 + \frac{1}{2} \cdot \Delta t$ pro snímek 1 a $t_2 - \frac{1}{2} \cdot \Delta t$ pro snímek 2, s předpokladem posunutí částic odpovídající odhadnuté rychlosti. Pomocí vzájemné korelační funkce je nalezeno pro každou iterační plochu optimální přemístění tak, aby se snímky nejlépe shodovaly. Vypočtená přemístění, a tedy rychlosti jsou validovány, jsou hledány „vadné“ vektory. Pokud se jejich posun příliš liší od přemístění sousedních buněk, je tento vektor vyhodnocen jako neplatný a je nahrazen interpolací sousedních hodnot. Pro správné vyhodnocení musí mít snímek kalibrované rozměry [3, 13].



Obrázek 3.3: Křížová korelace a poloha nejpravděpodobnějšího posunutí (převzato z [18])

Výstupem zpracování obrázků je matice dat, ve které jsou hodnoty v pixelech a v reálných rozměrech. Tabulka obsahuje souřadnice, horizontální a vertikální složky rychlosti, střední kvadratickou odchylku, turbulentní kinetickou energii a další statistické parametry [3].

3.6 Použití

PIV není omezené jen na zkoumání dynamiky tekutin. Příkladem může být pohyb buněk v medicíně, aerodynamika v automobilovém průmyslu a další aplikace, kde je zapotřebí kvantifikovat rychlost nebo posun částic.

Metoda je zatím omezena na laboratorní použití. Samotné měření není zatím uzpůsobeno k tomu, aby mohlo být mobilní a využíváno k měření v terénu. Samotné nastavení a specifické podmínky je zatím možné vytvořit pouze v laboratorních podmínkách, protože proudící tekutina musí být dostatečně čistá, aby znečištění v ní obsažené nezpůsobovalo odlesky při osvětlení laserem. Přidané částice musí být rozmíchány v celém objemu, a proto je vhodné mít uzavřený okruh s čerpáním. Další omezením je dispozice, v nejjednodušším případě je umístění kamery tak, aby by umožněn pohled kamery kolmo k světelnému listu. Pokud tento pohled není možné zajistit, lze sestavu nastavit v jiném úhlu s jednou nebo dvěma kamerami. Následně pak v programu nutné zohlednit toto nastavení přes pohled na kalibrační element, kde na snímcích je úhel zkreslení nebo prolnutí z obou kamer.

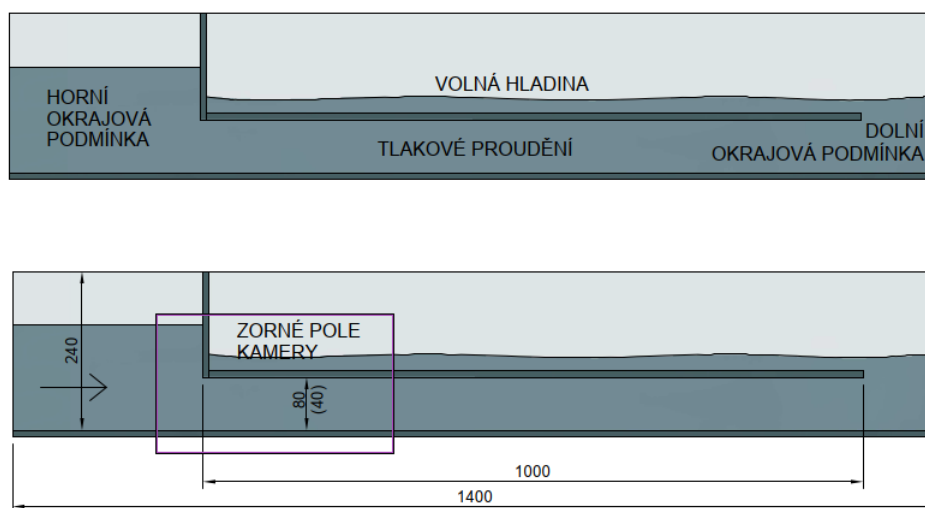
Jelikož laser slouží jen jako konzistentní zdroj světla, tak pro určité situace je možné PIV použít bez něj. Například pro získání vektorů hladinových rychlostí. Výrazným omezením je proměnlivé osvětlení a přesná ortogonalita kamery pro zamezení odchylek měření.

KAPITOLA 4

EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA

Pro účel této diplomové práce byl ve vodohospodářském experimentálním centru fakulty stavební ČVUT vytvořen experimentální žlab z plexiskla o šířce $B = 80$ mm. Nátok byl vyřešen přes perforované potrubí pro vhodnější rovnoměrné rozdělení proudu po výšce kanálu. Regulaci dolní hladiny zajišťovalo stavidlo společně s dnovým uzávěrem. Měření hladin bylo vyřešeno příložným měřítkem kalibrovaným na srovnávací rovinu dna žlabu. Tento žlab nese určitá specifika právě pro použití metody měření PIV. Pro snímání pohybu částic v proudící kapalině v oblasti nátoky do tlakového kanálu (Area of interest) je zapotřebí svítit laserem zespoda skrz průhledné dno modelu, viz Obrázek 4.3. Cirkulaci vody v modelu zajišťují dvě čerpadla s regulačními kohouty o maximálním společném průtoku 4.5 l/s. Průtok je měřen indukčním průtokoměrem značky Badger Meter Magnetoflow M1500 DN 50 s digitálním displejem, s chybou měření průtoku ± 0.5 % při rychlosti proudění v průtokoměru > 0.5 m/s, pokud je rychlost menší, může chyba nabývat hodnoty ± 2.5 mm/s.

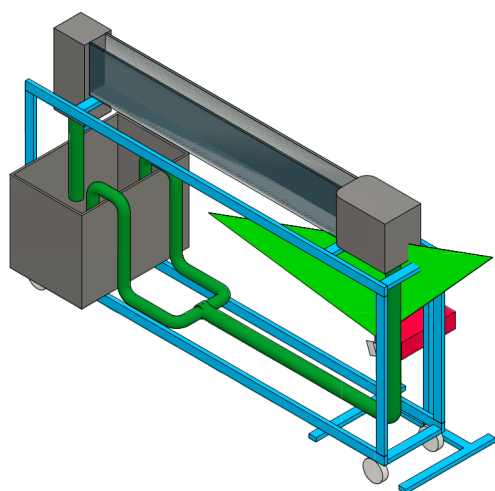
Vnitřní vestavba samotné měřicí trati je modulární a je možné ji úplně vyndat a vyměnit za jinou. V tomto případě byla použita vestavba plně zatopeného tlakového propustku s proměnlivou výškou propustku D , viz Obrázek 4.1. Maximální průtok pro výšku propustku $D = 8$ cm je $Q = 3$ l/s. Pro propustek o výšce $D = 4$ cm je maximální průtok $Q = 1.5$ l/s. Tyto hodnoty maximálních průtoků byly odvozeny od podmínky zatopení výtoku z vestavby dolní vodou, při větším průtoku již tato podmínka dodržena nebyla.



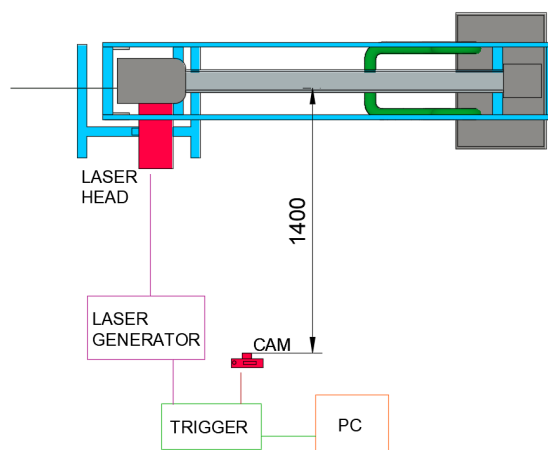
Obrázek 4.1: Experimentální žlab nátoky do propustku upravený pro aplikaci PIV

4.1 Použitá zařízení pro metodu PIV

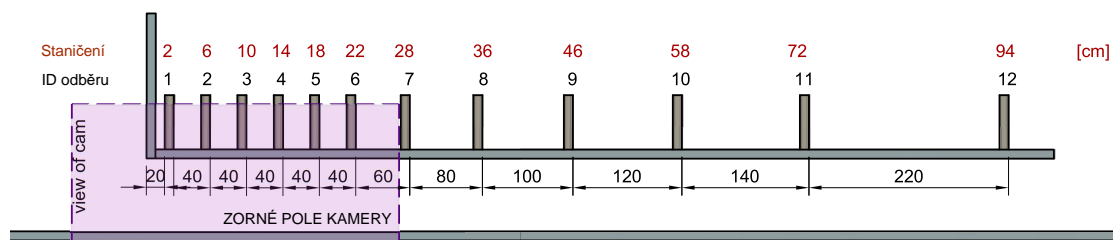
Z bezpečnostních důvodů byl v laboratoři tento model obestaven panely a zakryt černou tkaninou společně s černým igelitem. Bylo použito kompletní řešení od firmy Dantec Dynamics s laser od Quantel EverGreen, který měl výkon 200 mJ při frekvenci pulzů 15 Hz . Vlnová délka tohoto laseru je 532 nm , což odpovídá zelenému světlu. Tloušťka světelného listu v místě měření byla 1 mm . Kamera FlowSense EO od Dantec Dynamic má CCD čip s rozlišením 4 Megapixels s maximální snímkovací frekvencí 41 dvou-snímku za vteřinu. Velikost jednoho pixelu je $5.5\text{ }\mu\text{m}$. Na kameře byl nasazen fotografický objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm a světelností $f/1.4$. Kamera byla umístěna 1.4 m od žlabu kolmo na světelnou rovinu. Výsledná velikost iterační plochy, která je reprezentovaná jedním vektorem, má velikost $2.6 \times 2.6\text{ mm}$. Všechny komponenty PIV byly přes synchronizační jednotku, také od firmy Dantec Dynamic, zapojeny do počítače. V počítači byl nainstalován software od Dantec DynamicStudio, díky kterému bylo vše ovládáno a ve kterém probíhaly veškeré analýzy. Proudící voda byla doplněna o reflexní polyamidní částice s průměrem částic $50\text{ }\mu\text{m}$ a hustotou 1.2 g/cm^3 . Postup zprovoznění PIV, nastavení, orientace v programu a použité prvky analýzy jsou popsány v příloze B této práce.



Obrázek 4.2: Model experimentálního žlabu pro PIV



Obrázek 4.3: Schéma propojení komponentů sestavy PIV



Obrázek 4.4: Umístění tlakových odběrů v ose žlabu vyvedených ve stropě kanálu

Na Obrázku 4.4 je fialovým obdélníkem naznačen pohled a záběr kamery. Poloha a výška kamery byla po celou dobu experimentů zafixována a všechny získané snímky končili těsně před odběrem číslo 7.

4.2 Tlakové odběry

Obrázek 4.1 ukazuje hydraulickou dispozici experimentu. Horní okrajová podmínka je tvořena volnou hladinou a překážkou tvoří čelo vtoku. Za vtokem následuje čtvercový nebo obdélníkový kanál podle nastavení experimentu. V ose žlabu jsou ve stropě kanálu vyvedeny tlakové odběry, schéma a rozměry jsou vidět na Obrázku 4.4. V těchto odběrech pro každý stav, viz Tabulka 4.1, která ukazuje průtokové stavy, byly naměřeny tlaky a následně provedena analýza, viz kapitola 4.3.2. Za vestavbou následovala dolní okrajová podmínka, která byla definována jako hloubka větší než výška propustky, $H_{down} > D$. Díky tomu bylo zaručeno tlakové proudění v celé délce kanálu. Zatopení vtoku bylo řízeno stavidlem v dolní vodě, které ovlivňovalo míru zavodnění trubního systému.

4.3 Software DynamicStudio

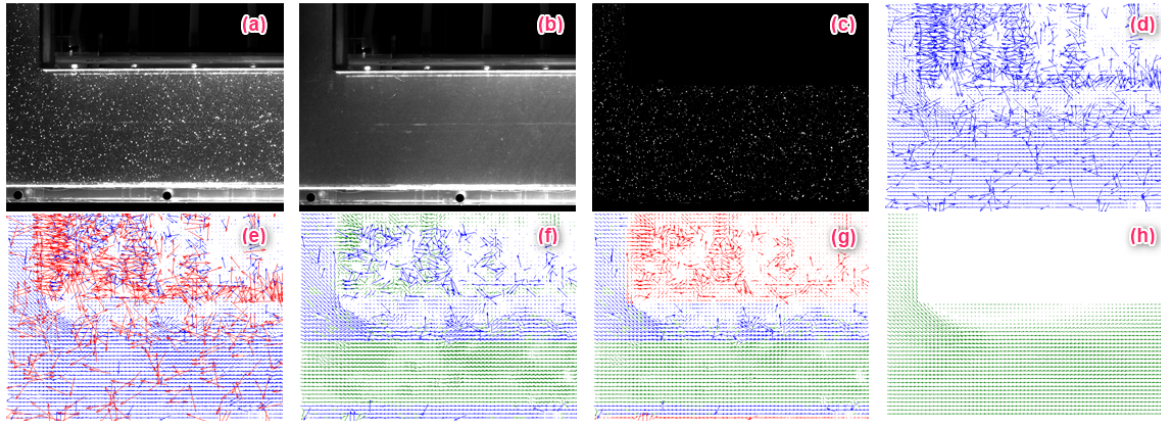
4.3.1 Nastavení

Podrobné hardwarové nastavení PIV je popsáno v příloze B této práce. Při zapojení komponentů do počítače přes synchronizační jednotku načte program všechny součásti sestavy. Zorné pole kamery je omezen, začíná před nátokem a končí před odběrem číslo 7. Velikost iterační oblasti byla 15×15 pixelů, což odpovídá velikosti 2.6×2.6 mm. Prvním krokem je nastavení Δt , kdy tato veličina je důležitá pro nastavení času mezi pulzy. Hodnota je v jednotkách mikrosekund a její velikost je odhadnuta nástrojem obsaženým v programu DynamicStudio. Po optimalizaci pohledu kamery a vypnutí bezpečného módu laseru se vytvoří kalibrační snímek. Vloží se do obrazu kalibrační deska se známými rozměry a vytvoří se snímek. Po zadání rozměru je vypočten měřítkový faktor, jelikož jde o 2D rovinné zobrazení, stačí pro kalibraci pouze jeden rozměr. Tento faktor je základním vstupním údajem pro vyhodnocování obrazu. Nastaví se počet dvou-snímků a vše je připraveno na měření.

4.3.2 Analýza

Vstupními daty pro analýzu u každého experimentu bylo 300 dvojic snímků s časem mezi dvojicí snímků $\Delta t = 1.9 \div 3.2$ ms, podle aktuálního nastavení experimentu a průtoku. Snímkovací frekvence byla 15 Hz. S celkovým časem měření 20 vteřin pro každý experiment.

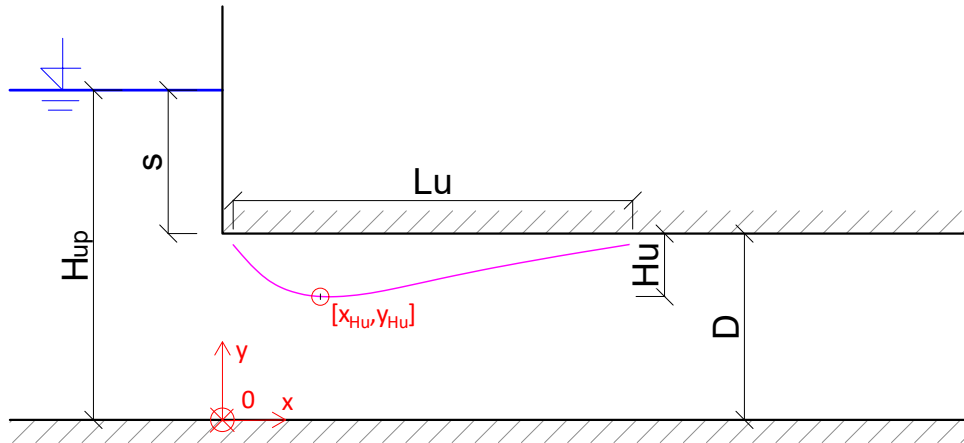
Analýzy, které byly vyhodnocovány na snímcích z PIV v programu DynamicStudio od Dantec Dynamics, jsou v programu předdefinovány. Na zachycenou sekvenci snímku, Obrázek 4.5a, byla použita funkce *Image Mean* Obrázek 4.5b, která vytvoří průměrný snímek pozadí z celé série. V praxi to znamená, že vznikne snímek nedokonalostí, které se objevují v celé sérii. Dalším krokem je odečtení časově středního snímku od pořízených dat záznamu pomocí funkce *Image Arithmetic* Obrázek 4.5c, kdy vznikne sada snímků pouze s částicemi. Analýza *Adaptiv PIV* vypočítá z těchto snímků posunu částic a zobrazí je pomocí šipek, vektorů rychlosti, Obrázek 4.5d. Vzniknou i neplatné vektory, se špatnou velikostí nebo směrem, kterou budou označeny červeně. Neplatné vektory se odfiltrují díky *Range Validation* Obrázek 4.5e, kde je možné v nastavení definovat maximální velikost vektorů rychlosti, která se mohou v experimentu vyskytnout. Chybějící vektory je možné následně doplnit funkcí *Vector Interpolation* interpolací z přilehlých vektorů Obrázek 4.5f. *Vector Masking* vymaže vektory mimo oblast zájmu, Obrázek 4.5g, a *Vector Statistics* vytvoří časově střední snímek ze všech snímků okamžitých rychlostí Obrázek 4.5h. Podrobné obrázky znázorňující jednotlivé analýzy viz příloha A této práce.



Obrázek 4.5: Postup přípravy snímku pro PIV, *a)* surový vstupní snímek, *b)* *Image Mean* - snímek průměrného pozadí objevující se na každém vstupním snímku, *c)* *Image Arithmetic* - od snímku *a)* odečtené pozadí snímku *b)*, *d)* *Adaptiv PIV* - vytvoří z dat vektory okamžitých rychlostí, *e)* *Vector Validation* - ověření velikosti vektorů - vektory mimo rozsah jsou vymazány, *f)* *Vector Interpolation* - interpolace chybějících vektorů, *g)* *Image Masking* - vytvoření masky pro odstranění vektorů mimo oblast zájmu, *h)* *Vector Statistics* - výsledné vektorové pole rychlostí.

4.4 Definice veličin

Obrázek 4.6 definuje vytvořenou konvenci označování veličin a rozměrů, které se používaly při experimentech. H_{up} je hloubka před vtokem, definována horní okrajovou podmínkou proudění o volné hladině. D je výška propustku, ta se měnila pro dva případy pro $D = 4$ cm a $D = 8$ cm. Převýšení hladiny nad propustkem je s a $D + s = H_{up}$. L_u je délka úplavu a H_u jeho výška. Výška úplavu, respektive poloha *Vena contracta* je na souřadnicích x_{Hu} a y_{Hu} .



Obrázek 4.6: Definice veličin v modelu

4.5 Experimentální stavy

Kodifikace experimentů byla stanovena na základě nastavení experimentální sestavy. Například první stav v Tabulce 4.1 Q0.75_D4_H6 nastal při průtoku $Q = 0.75$ l/s, světlé výšce propustku $D = 4$ cm a horní okrajové podmínce s volnou hladinou o hloubce $H_{up} = 6$ cm. Pro tento stav jsou hodnoty $s/D = 0.5$. Průřezová rychlost $\bar{U} = 0.234$ m/s vychází z rovnice Q/S , kde S je průtočná plocha rovna součinu výšky propustku D a šířce žlabu $B = 8$ cm. Reynoldsovo číslo Re je dáno rovnicí $Re = (\bar{U} \cdot D)/\nu = 1.24 \times 10^4$, kde \bar{U} je průřezová rychlost, D je v běžném případě průměr kruhového potrubí, nicméně pro hranaté kanály je D rovno čtyřnásobku hydraulického poloměru $D = 4R$ a ν kinematická viskozita vody dle hydraulických tabulek.

Tabulka 4.1: Experimentální stavy, kodifikace

	Q [l/s]	D [cm]	H [cm]	s [cm]	s/D	\bar{U} [m/s]	Re
Q0.75_D4_H6	0.75	4	6	2	0.5	0.234	1.24E+04
Q0.75_D4_H8	0.75	4	8	4	1	0.234	1.24E+04
Q0.75_D4_H10	0.75	4	10	6	1.5	0.234	1.24E+04
Q0.75_D4_H12	0.75	4	12	8	2	0.234	1.24E+04
Q1_D4_H6	1	4	6	2	0.5	0.313	1.65E+04
Q1_D4_H8	1	4	8	4	1	0.313	1.65E+04
Q1_D4_H10	1	4	10	6	1.5	0.313	1.65E+04
Q1_D4_H12	1	4	12	8	2	0.313	1.65E+04
Q1.5_D4_H6	1.5	4	6	2	0.5	0.469	2.47E+04
Q1.5_D4_H8	1.5	4	8	4	1	0.469	2.47E+04
Q1.5_D4_H10	1.5	4	10	6	1.5	0.469	2.47E+04
Q1.5_D4_H12	1.5	4	12	8	2	0.469	2.47E+04
Q1.5_D8_H10	1.5	8	10	2	0.25	0.234	1.86E+04
Q1.5_D8_H12	1.5	8	12	4	0.5	0.234	1.86E+04
Q1.5_D8_H14	1.5	8	14	6	0.75	0.234	1.86E+04
Q1.5_D8_H16	1.5	8	16	8	1	0.234	1.86E+04
Q2_D8_H10	2	8	10	2	0.25	0.313	2.47E+04
Q2_D8_H12	2	8	12	4	0.5	0.313	2.47E+04
Q2_D8_H14	2	8	14	6	0.75	0.313	2.47E+04
Q2_D8_H16	2	8	16	8	1	0.313	2.47E+04
Q3_D8_H10	3	8	10	2	0.25	0.469	3.71E+04
Q3_D8_H12	3	8	12	4	0.5	0.469	3.71E+04
Q3_D8_H14	3	8	14	6	0.75	0.469	3.71E+04
Q3_D8_H16	3	8	16	8	1	0.469	3.71E+04

KAPITOLA 5

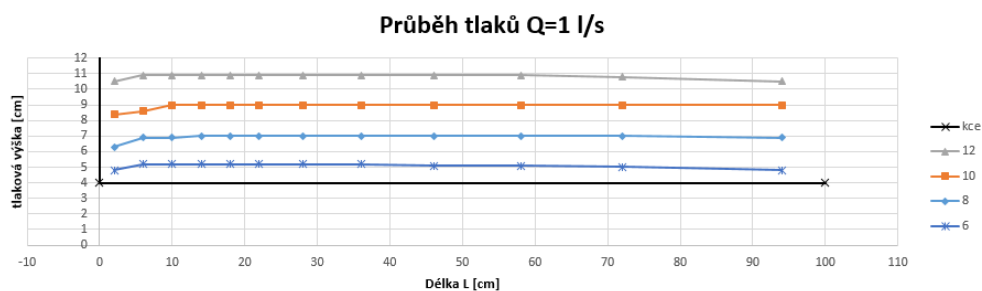
ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

5.1 Měření tlaků

Tlakové odběry umístěné ve stropě kanálu byly napojeny na 12 gumových hadiček. Z nich byl při každém měření odstraněn vzduch a výška hladiny v trubičce byla odečtena na měřítku. Funkčnost této měřicí metody je díky principu spojených nádob, kdy dochází k vyrovnání tlaků na obou koncích hadičky. Nulová hladina měření byla stanovena na dně kanálu, aby všechny odečtené hodnoty byly kladná čísla. Pro ukázkou byl zvolen průtokový stav Q1_D4, kompletní data jsou v příloze A. Pro jednotlivé odběry, viz Obrázek 4.4 jsou naměřené hodnoty tlaku uvedeny v Tabulce 5.1. V grafu jsou vyneseny naměřené hodnoty tlaků v odběrech, černá linie představuje konstrukci vestavby a barevné linie pak jednotlivá měření s různou H_{up} , viz Obrázek 5.1.

Tabulka 5.1: Naměřené tlaky Q1_D4 v cm

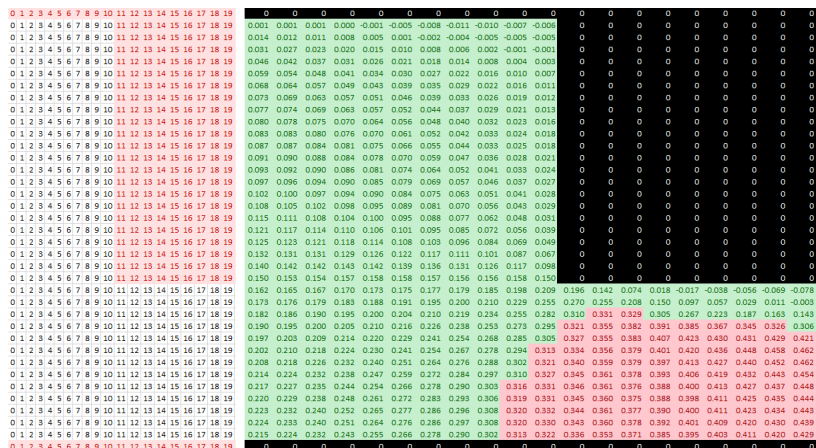
	$Q = 1 \text{ l/s}$		$D = 4 \text{ cm}$				$\bar{U} = 0.313 \text{ m/s}$							
staničení [cm] ID odběr	0	2	6	10	14	18	22	28	36	46	58	72	94	104
	Hup	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Hdown
Q1_D4_H12	12	10.5	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.8	10.5	10.7
Q1_D4_H10	10	8.4	8.6	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8.9
Q1_D4_H8	8	6.3	6.9	6.9	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6.9
Q1_D4_H6	6	4.8	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5	4.8	5



Obrázek 5.1: Průběh tlaků na tlakových odběrech Q1_D4. Černá linie znázorňuje konstrukci vestavby ve žlabu. Barevné řady zobrazují naměřené tlaky v tlakových odběrech. Označení jednotlivých řad odpovídá hodnotě H_{up} . $H_{up} = 6$ (\times), $H_{up} = 8$ (\diamond), $H_{up} = 10$ (\square), $H_{up} = 12$ (\triangle)

5.2 Matice bodových rychlostí

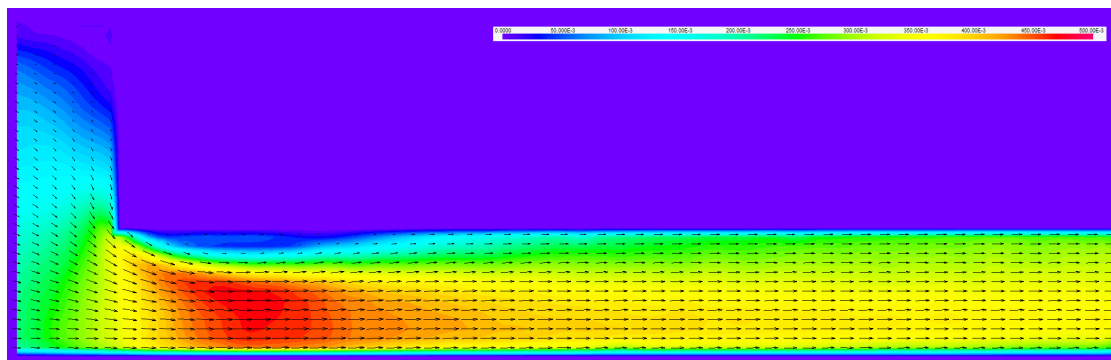
Přímým výstupem z programu Dantec DynamicStudio je numerický soubor *.csv, který byl následně převeden do maticového zobrazení hodnot. Obrázek 5.2 zobrazuje stav v místě vstupu do propustku, v levém obrázku jsou červeně vybarvená místa, kde proudění neprobíhá, naopak v pravém obrázku jsou barevně části, kde probíhá proudění. Zelená barva zobrazuje bodové rychlosti menší než průřezová rychlost $\bar{U} = Q/S$ [m/s], červená barva zobrazuje rychlosti větší. Černá barva je konstrukce propustku.



Obrázek 5.2: Vlevo matice svislých sloupců souřadnic $x [-]$, vpravo horizontální bodové rychlosti \bar{u} [m/s]

5.3 Časově zestředněný snímek bodových rychlostí

Výstupem analýzy Vector Statistics, viz kapitola 4.3.2, je časově střední snímek vektorů rychlostí, viz Obrázek 5.3. Tento snímek je vypočten jako aritmetický průměr ze všech 300 pořizovaných snímků během měření jednoho stavu. Barevná škála popisuje velikost vektoru a černá šipka jeho velikost i směr. Škála rychlostí je od modré barvy po červenou, tomu odpovídá rozsah rychlostí $0 \div 0.5$ m/s na tomto snímku.

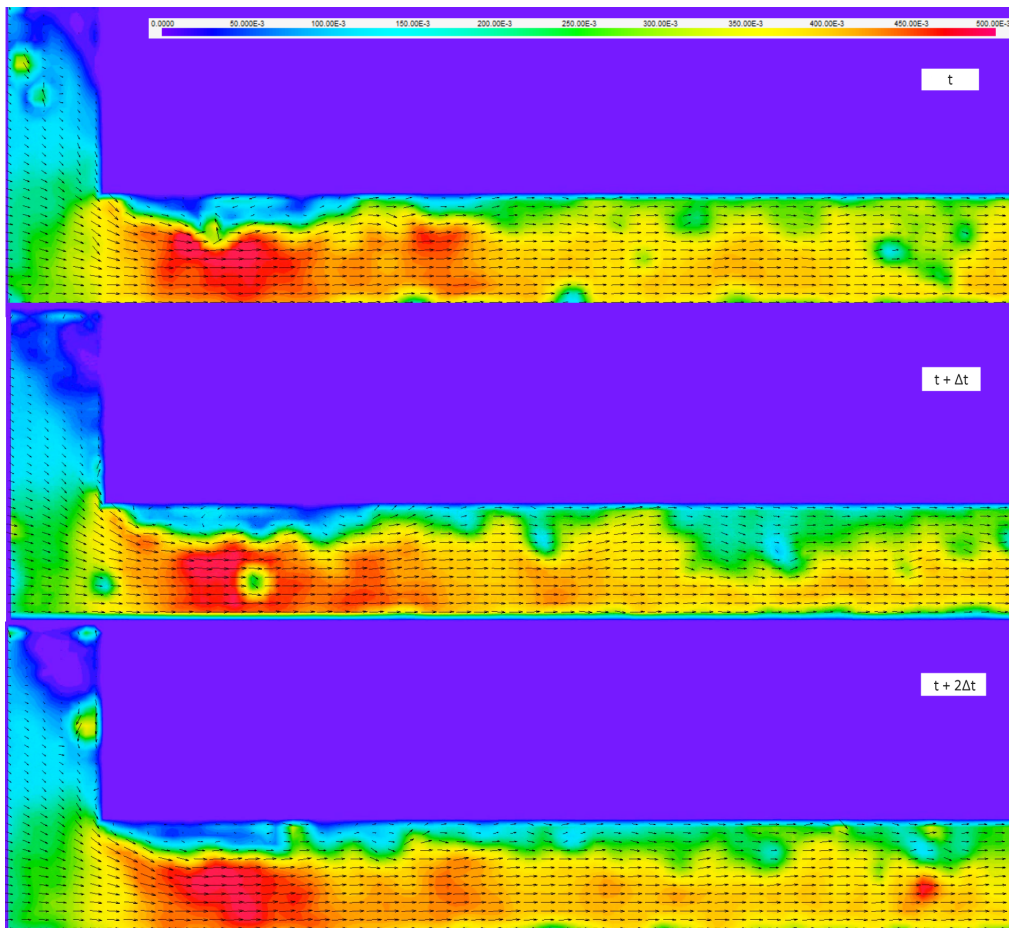


Obrázek 5.3: Snímek časově středních hodnot bodových rychlostí experimentu Q1_ D4_ H10

5.4 Sekvence snímků vektorového pole okamžitých rychlostí

PIV vyhodnocuje vektorové pole okamžitých rychlostí. Složením těchto snímků do sekvence dostáváme představu o povaze proudění v reálném čase. Tyto sekvence je možné mezi sebou jednoduše porovnávat a pozorovat jaký vliv má změna, kterou jsme ovlivnili proudění.

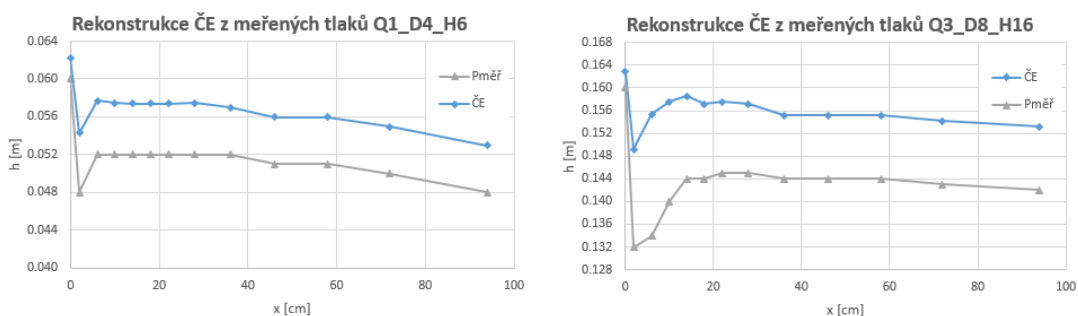
Program Dantec Dynamics vytvořil video záznam složením jednotlivých snímků vektorových polí okamžitých rychlostí získaných při měření. Obrázek 5.4 je ukázka tří vektorových polí okamžitých rychlostí. Barevná škála je shodná s Obrázkem 5.3, rychlosti jsou tedy od $0 \div 0.5$ m/s.



Obrázek 5.4: Sekvence snímků okamžitých rychlostí stavu Q1_D4_H10

6.1 Rekonstrukce čáry energie a tlaku po délce propustku

První zvolená metoda pro rekonstrukci $\check{C}E$ po délce propustku byla založena na měření tlaku v tlakových odběrech na stropě kanálu. Z měření rychlostního pole pomocí PIV lze dopočítat lokální Coriolisovo číslo α podle rovnice 2.3, které se použije jako součást rychlostní výšky. Ta byla přičtena k měřeným tlakům $Pm\check{e}\check{r}$ a tím byl získán zrekonstruovaný průběh čáry energie. Levý Obrázek 6.1 zobrazuje zrekonstruovanou čáru energie právě z měřených tlaků. Problém je na začátku, mezi druhým a třetím odběrem, kde dochází zvýšení energie. To odporuje základním principům, kdy čára energie nemůže růst, protože nic do systému nepřidává energii. Měřený tlak na stropě, při tomto typu proudění, neodpovídá rozdělení tlaků ustáleného proudění. Řešením pro tento postup by bylo měření reálných tlaků a následné rozdělení tlaků v horizontálním a vektikálním směru. Postup je možný díky vzorci podobnému Coriolisovému číslu α [6]. Rekonstrukce reálných tlaků po výšce kanálu je také možná s využitím samotného PIV a z nasnímaných okamžitých rychlostí vytvořit gradient a následně i lokální tlak. Pro tuto metodu je bohužel nutné velmi podrobné rozlišení zkoumané oblasti, a proto v tomto experimentu není možné tento postup aplikovat [5].

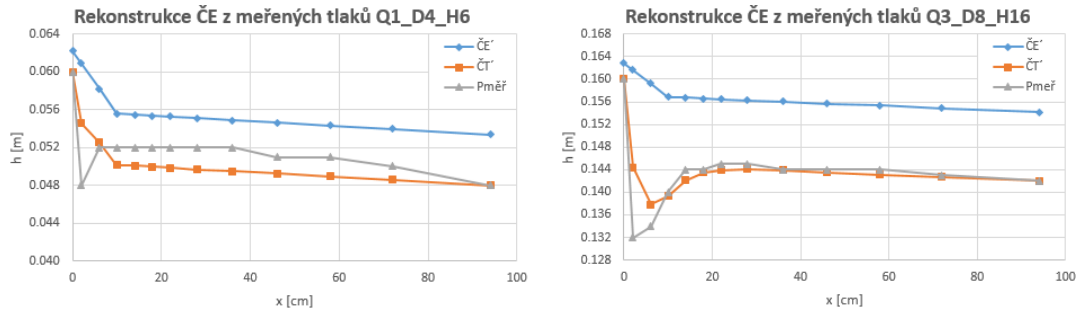


Obrázek 6.1: Čáry energie z měřených tlaků. Legenda šedá linie (Δ) $Pm\check{e}\check{r}$ jsou měřené tlaky v tlakových odběrech, modrá linie (\diamond) čára energie.

Protože měřené tlaky neodpovídají reálným hodnotám tlaku v celém příčném profilu, muselo se využít jiného vyhodnocení, to zobrazuje Obrázek 6.2. K rekonstrukci $\check{C}E'$ a $\check{C}T'$ bylo přistupováno opačně s několika předpoklady. Prvním předpokladem bylo, že ztráty třením způsobují lineární pokles čáry energie, druhým byl průběh čáry energie v místě úplavu, kde má převažující vliv místní ztráta. V tomto místě byla použita lineární aproximace, protože reálný průběh je neznámý a jakkoliv složitější aproximace v tomto místě by vykazovala oproti reálu určitou chybovost. Byla stanovena zóna, kde energie klesá díky tření - od konce úplavu až do konce kanálu, zde je pokles čáry energie lineární. Mezi nátokem a koncem úplavu je lineární aproximace. Velikost celkové ztráty třením po celé délce kanálu je přiřazena

poslednímu odběru. Zpět proti proudu jsou hodnoty ztráty třením postupně započítány až po konec úplavu, viz stanovení úplavu v kapitole 6.3. Rozdíl mezi hodnotou energie na vtoku a hodnotou na konci úplavu je možné přisoudit místní ztrátě, a byl lineárně aproximován. Vznikla čára energie $\check{C}E'$, od které byla odečtena rychlostní výška upravena o Coriolisovo číslo, získané z předchozí metody rekonstrukce. Tím vznikla dopočítaná tlaková čára $\check{C}T' = \check{C}E' - \alpha \cdot (\bar{U}^2/2g)$ - oranžová linie, která je porovnána v Obrázku 6.2 s měřenými tlaky - šedá linie.

Při větším úplavu se rekonstruované tlaky velmi podobají tlakům měřeným. Rekonstruovaná tlaková čára $\check{C}T'$ má rozumný průběh a je možné pozorovat předpokládaný pokles tlaku za vtokem do kanálu. U malého úplavu jsou patrné rozdíly mezi průběhy tlakových čar, měřené hodnoty bude ovlivněny i samotnou přesností měření a absolutní měřenou ztrátou.



Obrázek 6.2: Rekonstrukce čáry energie. Rekonstrukce reálných tlaků z předpokladu lineárního průběhu ztrát třením po délce od konce úplavu ke konci kanálu. Místní ztráta po délce úplavu byla aproximována lineárním modelem, protože není znám skutečný průběh ztrát v tomto místě. Legenda šedá linie (Δ) $P_{měř}$ jsou měřené tlaky v tlakových odběrech, modrá linie (\odot) rekonstruovaná čára energie $\check{C}E'$, oranžová linie (\square) čára rekonstruovaných reálných tlaků $\check{C}T'$.

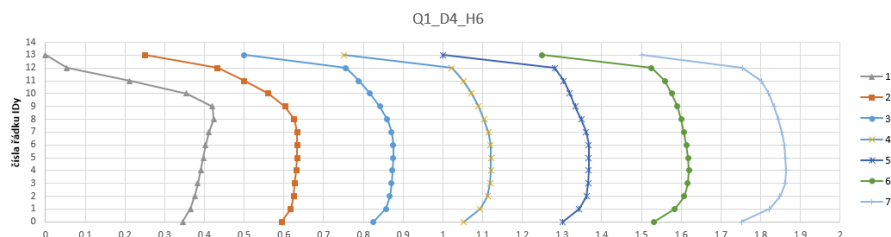
Do zorného pole kamery bylo možné dostat pouze sedm odběrů, i když měřených hodnot tlaků bylo dvanáct. V záhlaví Tabulky 6.1 jsou uvedena čísla tlakových odběrů, druhý řádek zobrazuje průřezovou rychlost \bar{U} v kanále při tomto měření. Hodnoty ve sloupcích odpovídají bodovým rychlostem \bar{u} [m/s] v místech tlakových odběrů převzatých z maticového zobrazení rychlostí, viz též Obrázek 5.2.

Tabulka 6.1: Stanovené čáry tlaku pro Q1_D4_H6

H6 ID odběr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
\bar{U} [m/s]	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313		
x/D	0.45	0.85	1.225	1.6	1.975	2.375	2.9							
u_i	0 0.0540 0.2118 0.3550 0.4197 0.4233 0.4113 0.4030 0.3968 0.3911 0.3831 0.3754 0.3645 0.3449	0.000 0.1831 0.2500 0.3107 0.3532 0.3760 0.3833 0.3838 0.3833 0.3809 0.3774 0.3744 0.3668 0.3442	0.000 0.2561 0.2889 0.3167 0.3411 0.3596 0.3704 0.3750 0.3752 0.3731 0.3704 0.3663 0.3564 0.3251	0.000 0.2730 0.3020 0.3223 0.3400 0.3542 0.3645 0.3700 0.3716 0.3705 0.3686 0.3623 0.3437 0.3032	0.000 0.2809 0.3047 0.3193 0.3338 0.3489 0.3609 0.3670 0.3674 0.3668 0.3664 0.3613 0.3427 0.3024	0.000 0.2752 0.3092 0.3265 0.3396 0.3494 0.3562 0.3628 0.3678 0.3696 0.3663 0.3572 0.3340 0.2819	0.000 0.2540 0.3012 0.3204 0.3338 0.3447 0.3524 0.3584 0.3625 0.3648 0.3608 0.3483 0.3218 0.2512	0.00014	0.00012	0.00011	0.00011	0.00011	0.00011	0.00010
α	1.266	1.142	1.091	1.083	1.079	1.083	1.096	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08		
$\alpha \bar{U}^2/2g$	0.0063	0.0057	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0055	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054		
Zt	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0004	0.0006	0.0024		
$\check{C}E'$	0.0609	0.0582	0.0556	0.0555	0.0554	0.0553	0.0551	0.0549	0.0546	0.0543	0.0539	0.0534		
$\check{C}T'$	0.0546	0.0525	0.0501	0.0501	0.0500	0.0499	0.0496	0.0495	0.0493	0.0489	0.0486	0.045		
$P_{měř}$	0.048	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.051	0.051	0.05	0.048		

Řádek $\int u_i^3 \cdot dS$ v Tabulce 6.1 je integrálem ze vzorce 2.3, kde u_i jsou bodové rychlosti a dS příslušná dílčí plocha. Řádek α je výpočet podle vzorce 2.3 a v odběrných místech, ve kterých nebyly měřeny rychlosti pomocí PIV, je hodnota průměrem z posledních získaných hodnot. Zt vychází ze vzorce 2.2, kde L je vzdálenost mezi jednotlivými odběry, hodnota λ odpovídá hydraulicky hladkému potrubí, průměr potrubí D je ve vzorci nahrazen $4R$, což je vzorec pro nekruhový příčný profil. Rekonstruovaná čára energie $\check{C}E'$ je stanovena od konce z poslední hodnoty vzorcem $\check{C}E'_i = \check{C}E'_{i+1} + Zt_i$. Průběh reálných tlaků je stanoven vzorcem $\check{C}T'_i = \check{C}E'_i - \alpha_i \cdot \bar{U}/2g$, kde i jsou čísla tlakových odběrů.

Vynesené rychlostní profily \bar{u} v tlakových odběrech v Obrázku 6.3 odpovídají hodnotám v Tabulce 6.1. Zobrazené rychlostní profily jsou v rozmezí od 0 do 0.4 m/s. Pro názorné grafické zobrazení do jednoho grafu, byl použit přepočít rychlosti $0.25n + \bar{u}_i$, kde $n \in \langle 0; 6 \rangle$ je ID odběru – 1. Zbylé rychlostní profily ostatních průtoků jsou v grafické příloze A.



Obrázek 6.3: Rychlostní profil horizontálních rychlostí \bar{u} v tlakových odběrech Q1_D4_H6. Přepočít rychlosti pro zobrazení v jednom grafu $0.25n + \bar{u}_i$, kde $n \in \langle 0; 6 \rangle$.

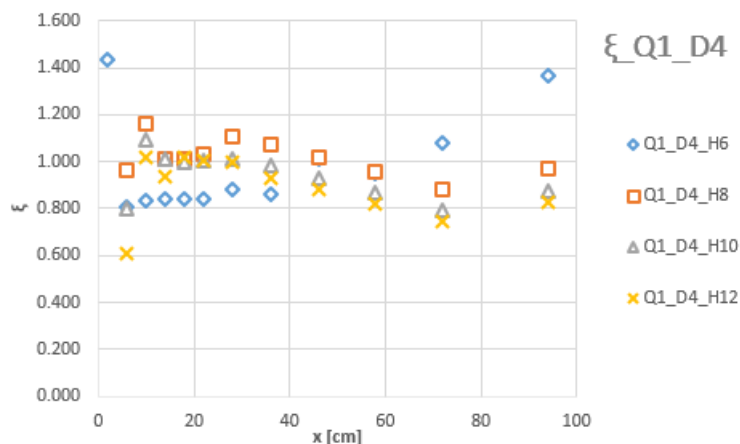
6.2 Stanovení součinitele místní ztráty

Výpočet součinitele místní ztráty vychází z měřených tlaků. Začátek tabulky je shodný s tabulkou 6.1 a tabulka 6.2 na ni navazuje. První řádek je α ze vzorce 2.3. Řádek $\alpha \bar{U}^2 / 2g$ odpovídá rychlostní výšce upravené o Coriolisovo číslo α . Řádek Pm ěř jsou měřené tlaky, $\check{C}E$ odpovídá přičtení rychlostní výšky s koeficientem α k měřeným tlakům. Ztráty třením Zt pro jednotlivé tlakové odběry po proudu narůstají. Místní ztráta je rozdíl $Zm = \check{C}E - Zt$, z této hodnoty je následně vyjádřen součinitel místní ztráty ξ , viz vzorec 2.2.

Tabulka 6.2: Vyhodnocení součinitele místní ztráty Q1_ D4 _H6

H6 ID odběr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
α	1.266	1.142	1.091	1.083	1.079	1.083	1.096	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
$\alpha \bar{U}^2 / 2g$ [m]	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Pm ěř [m]	0.048	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.051	0.051	0.050	0.048
$\check{C}E$ [m]	0.0543	0.0577	0.0574	0.0574	0.0574	0.0574	0.0575	0.0570	0.0560	0.0560	0.0550	0.0530
Zt [m]	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0009	0.0012	0.0015	0.0019	0.0024
Zm [m]	0.0542	0.0575	0.0572	0.0570	0.0569	0.0568	0.0567	0.0560	0.0548	0.0545	0.0531	0.0505
ξ	1.436	0.804	0.833	0.842	0.843	0.838	0.883	0.863	1.012	0.949	1.077	1.363

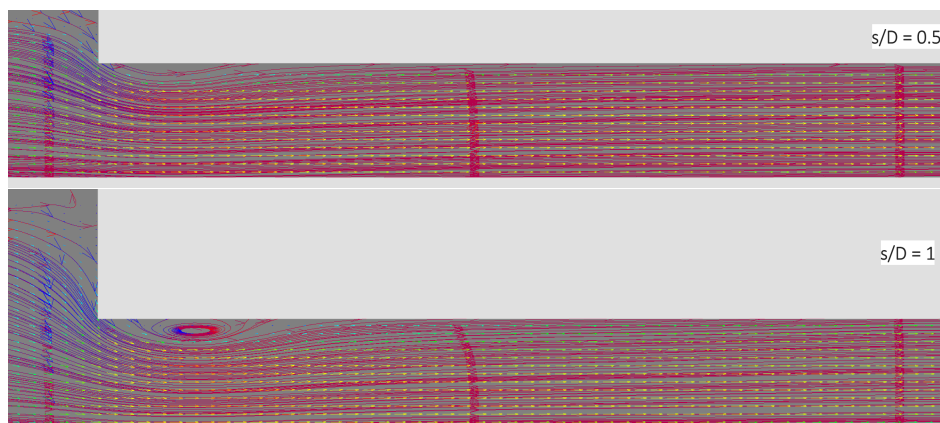
Obrázek 6.4 ukazuje vynesené součinitele místní ztráty ξ do grafu. Je možné pozorovat počáteční rozkolísanost, ale na konci dochází k ustálení a průběh vypadá stabilně. Proto výsledný součinitel je stanoven jako průměr posledních pěti hodnot. Měření bylo prováděno při dvou světlych výškách kanálu a aby bylo možné hodnoty součinitele porovnat mezi jednotlivými stavy, tak došlo ke standardizaci na bezrozměrné veličiny.



Obrázek 6.4: Součinitel místní ztráty stavu Q1_ D4

6.3 Velikost úplavu

Velikost úplavu bylo možné vyhodnotit z proudnic. Mapa proudnic je jedním z výstupů DynamicStudia jako časově střední průběh proudového pole. Získání délky úplavu Lu a výšky Hu předcházelo iterování mezi jednotlivými proudnicemi a toto stanovení bylo založeno na osobním úsudku. Stanovení nebylo konzistentní a také bylo docela pomalé. Příklad proudového pole je na Obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Proudnicе stavů Q1_D4_H6 a Q1_D4_H8.

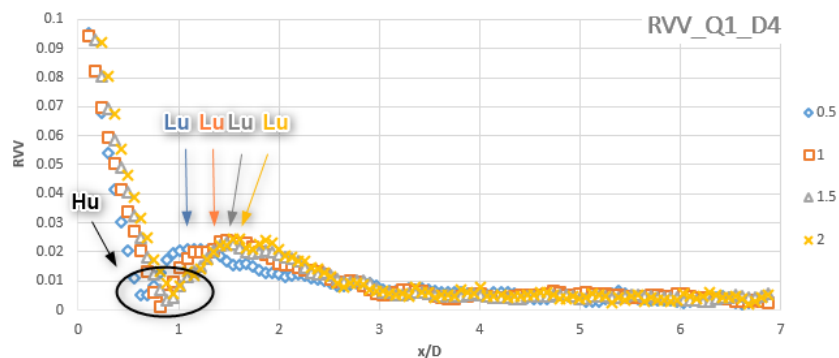
Obrázek 6.5 porovnává velikost úplavu za vtokem ve dvou stavech, které se liší podle míry zatopení před propustkem H_{up} . Průtok Q , výška kanálu D a tím i průtočná plocha S jsou pro oba zobrazené experimenty stejné. Další proudová pole jsou v příloze A.

Pro rychlejší vyhodnocení proto byla nalezena jiná metrika. Tou metodou bylo vyhodnocení vertikálních rychlostí ve svislici RVV. Velikost úplavu byla stanovena z matic rychlostí, maticové zobrazení je vidět na pravému Obrázku 5.2. Délka úplavu Lu byla stanovena jako bod, kde je dosaženo lokálního maxima ve svislých rychlostech \bar{v} [m/s] vyhodnocovaných po sloupcích vypočtením relativních vertikálních rychlostí RVV, vzorec 6.1. Začátek úplavu je na hraně vtoku do kanálu a konce odpovídá právě nejvyšší hodnotě relativní vertikální rychlosti. Toto definuje délku úplavu Lu . Tato metoda byla použita z toho důvodu, aby bylo možné objektivně vyhodnotit konec úplavu a díky tomu je délka úplavu stanovena shodně pro všechny experimenty a je možné tímto postupem, při opakovaném měření, získat stejné hodnoty.

$$RVV_j = \frac{\sqrt{\bar{v}_{j,1}^2 + \bar{v}_{j,2}^2 + \dots + \bar{v}_{j,n}^2}/n}{\bar{U}} \quad (6.1)$$

Rovnice 6.1, kde j je označení dané svislice, n je počet bodů v dané svislici, \bar{v} je časově střední bodová vertikální rychlost a \bar{U} je průřezová rychlost.

Obrázek 6.6 ukazuje metriku RVV v závislosti na standardizované souřadnici x/D . Minimum hodnoty menší než 1.0 x/D lokalizuje polohu maximální výšky úplavu Hu . V tomto místě jsou velikosti svislé rychlosti \bar{v} nejmenší a zde se nachází střed vírového proudění. Jde o lokální minimum, které odpovídá *Vena contracta*. To znamená, že vertikální rychlosti jsou blízké nule, jak v hlavním proudu, tak v úplavu. Proudění probíhá převážně rovnoběžně se dnem kanálu. Naopak maximum v intervalu 1.0 ÷ 2.0 x/D ukazuje konec úplavu. V těchto místech jsou naopak svislé rychlosti \bar{v} největší a směřují vzhůru ke stropu kanálu.

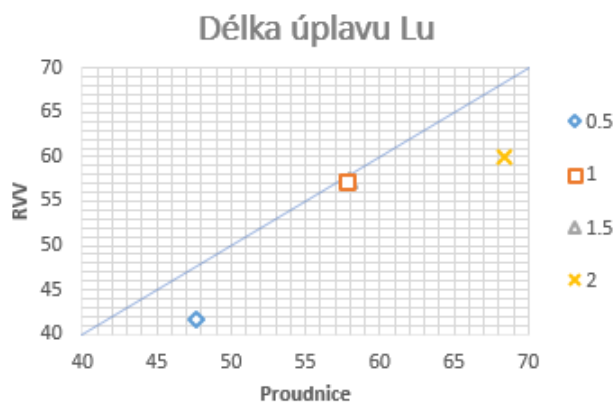


Obrázek 6.6: Standardizované sumy čtverců stavů Q1_D4. Legenda odpovídá poměru s/D

Porovnání délky úplavu získané přes RVV a délky stanovené z obrázků proudnic, viz Tabulka 6.3. Porovnání délek úplavu potvrzuje, že délky získané z obou metod si odpovídají.

Tabulka 6.3: Porovnání stanovení délky úplavu Lu metodou relativní vertikální rychlosti RVV a odečtením z proudnic

s/D	RVV [mm]	Proudnice [mm]	chyba [%]
0.5	41.7	47.6	12
1	57.3	57.9	1
1.5	57.3	58.04	2
2	59.9	68.4	14

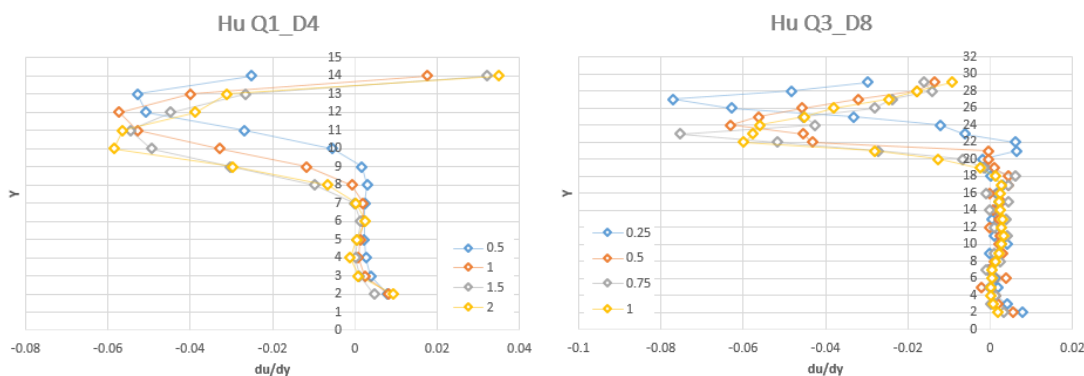


Obrázek 6.7: Porovnání stanovených délek úplavu Lu oběma metodami. Vodorovná osa jsou délky stanovené z proudnic, svislá osa hodnoty určeny početně podle RVV. Modrá čára diagonálně přes graf představuje 100% shodnost velikostí. Legenda odpovídá poměru s/D .

Poloha maximální výšky úplavu Hu je v minimu relativní vertikální rychlosti RVV, viz Obrázek 6.6. Tím byla nalezena poloha x/D respektive souřadnice x_{Hu} . Velikost Hu byla stanovena z horizontální rychlosti \bar{u} z maticového zobrazení rychlostí ve sloupci se souřadnicí x_{Hu} . V sloupci x byl vyhodnocen z bodových horizontálních rychlostí \bar{u} gradient du/dy , mezi dvojicí sousedících hodnot. Byla nalezena maximální hodnota gradientu, která odpovídá nejvýraznější změně sousedních rychlostí, viz Tabulka 6.4. Rychlost proudění v úplavu má jinou rychlost oproti rychlosti v hlavním proudu. Z polohy tohoto bodu bylo odečteno číslo řádku matice Y a určena souřadnice y_{Hu} v milimetrech. Odečtením této souřadnice výšky úplavu Hu od výšky kanálu D byla stanovena výška úplavu Hu . Jde o matematické stanovení výšky úplavu z naměřených časově středních bodových rychlostí a po standardizaci výškou kanálu Hu/D je možné mezi sebou výšku úplavu v jednotlivých experimentech navzájem porovnávat.

Tabulka 6.4: Stanovení souřadnice y výšky úplavu Hu

Q1_D4	$s/D = 0.5$			$s/D = 1$			$s/D = 1.5$			$s/D = 2$		
Y	y [mm]	\bar{u}	du/dy	y [mm]	\bar{u}	du/dy	y [mm]	\bar{u}	du/dy	y [mm]	\bar{u}	du/dy
14	38.660	0.000	-0.025	38.139	0.000	0.018	39.050	0.000	0.032	38.269	0.000	0.035
13	36.055	0.065	-0.053	35.534	-0.046	-0.040	36.446	-0.084	-0.026	35.664	-0.091	-0.031
12	33.450	0.203	-0.051	32.929	0.058	-0.057	33.841	-0.015	-0.045	33.059	-0.011	-0.039
11	30.845	0.335	-0.027	30.324	0.207	-0.053	31.236	0.101	-0.054	30.455	0.090	-0.056
10	28.240	0.405	-0.005	27.720	0.345	-0.033	28.631	0.243	-0.049	27.850	0.237	-0.059
9	25.636	0.419	0.002	25.115	0.430	-0.012	26.026	0.372	-0.030	25.245	0.390	-0.030
8	23.031	0.415	0.003	22.510	0.460	-0.001	23.422	0.451	-0.010	22.640	0.467	-0.007
7	20.426	0.407	0.002	19.905	0.462	0.002	20.817	0.476	0.000	20.035	0.484	0.000
6	17.821	0.401	0.002	17.300	0.457	0.002	18.212	0.476	0.001	17.431	0.483	0.003
5	15.216	0.395	0.002	14.696	0.452	0.001	15.607	0.473	0.001	14.826	0.477	0.000
4	12.612	0.389	0.003	12.091	0.448	0.001	13.002	0.471	0.000	12.221	0.476	-0.001
3	10.007	0.382	0.004	9.486	0.446	0.002	10.398	0.471	0.001	9.616	0.479	0.001
2	7.402	0.372	0.008	6.881	0.440	0.008	7.793	0.468	0.005	7.011	0.477	0.009
1	4.797	0.351		4.276	0.418		5.188	0.456		4.407	0.452	
0	2.192	0.000		1.672	0.000		2.583	0.000		1.802	0.000	

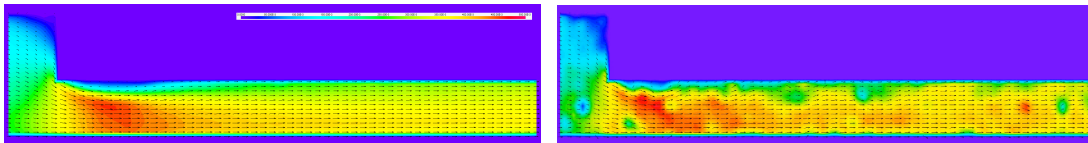


Obrázek 6.8: Vykreslení gradientu horizontálních rychlostí Q1_ D4 a Q3_ D8. Legenda odpovídá poměru s/D . Minimální hodnota gradientu odpovídá největší změně sousedící dvojice rychlostí. Osa y odpovídá číslu řádku matice bodových rychlostí Y .

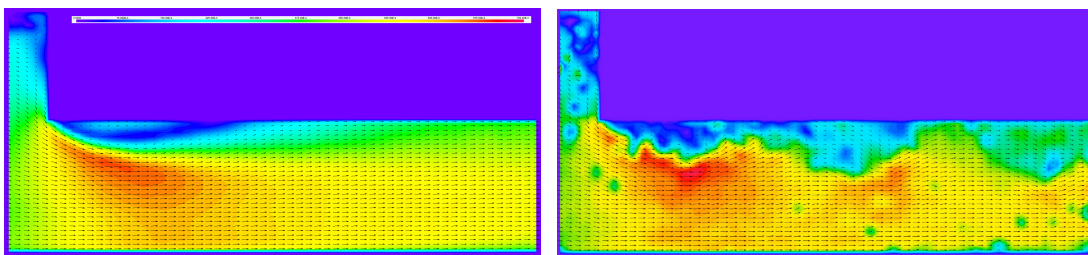
V této kapitole jsou popsány výsledky vyhodnocení analýz z naměřených dat. Byla definována závislost velikosti součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle, byl nalezen parametr ovlivňující délku úplavu Lu .

7.1 2D vektorová pole rychlostí

Hlavním výstupem PIV analýzy jsou vektorová pole okamžitých a časově středních rychlostí. Pole okamžitých rychlostí je možné zobrazit jako jednotlivé snímky, nebo v podobě sekvence. Snímek časově středních rychlostí je jedním snímkem složeným ze všech 300 pořizovaných.



Obrázek 7.1: Vektorová pole rychlostí pro stav Q1_D4_H8 ($\bar{U} = 0.313$ m/s) při poměru $s/D = 1$. Levý obrázek je snímek časově středních rychlostí. Pravý obrázek je 1/300 pořizovaných snímků okamžitých rychlostí. Pro oba obrázky je barevná stupnice rychlostí v rozmezí od 0 ÷ 0.5 m/s a černé šipky v popředí znázorňují směr a velikost vektoru rychlosti v jednotlivých bodech měrné sítě.

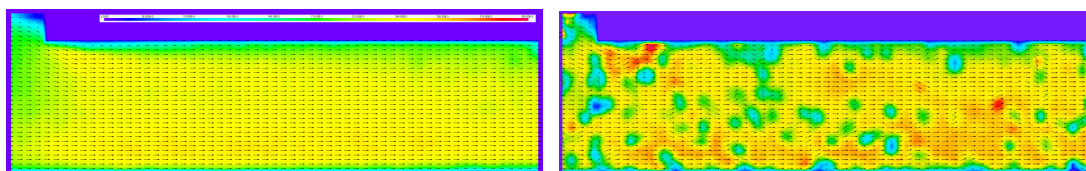


Obrázek 7.2: Vektorová pole rychlostí pro stav Q3_D8_H14 ($\bar{U} = 0.469$ m/s) při poměru $s/D = 0.75$. Levý obrázek je snímek časově středních rychlostí. Pravý obrázek je 1/300 pořizovaných snímků okamžitých rychlostí. Pro oba obrázky je legenda barev v rozmezí od 0 ÷ 0.75 m/s a černé šipky v popředí znázorňují směr proudění v jednotlivých bodech měrné sítě.

V Obrázcích 7.1, 7.2 a 7.3 jsou v levém obrázku časově střední snímky bodových rychlostí složených ze všech 300 snímků. V pravých obrázcích je jeden z tří set pořízených snímků okamžitých bodových rychlostí. V barevné škále odpovídá modrá barva nejnižší rychlosti, naopak červená barva značí rychlost maximální. Proudění probíhá zleva doprava. Tvar rychlostního pole v časově středních snímcích se jeví jako stabilní. Pohled na pravé snímky okamžitých snímků napovídá, že tomu tak není a proudění v této oblasti je také dynamické v čase a prostoru.

Za vtokem do kanálu při časově středních snímcích je vykreslen, podle barevné škály, vzniklý úplav. V tomto řezu jsou nahoře záporné až nulové rychlosti, proto tmavě modrá barva. Pod úplavem jsou nejvyšší rychlosti vlivem zmenšení průtočné plochy a směrem ke dnu rychlosti klesají přes žlutou a zelenou barvu až k modré, nulové. U okamžitých rychlostí místo úplavu za vtokem není jednoznačné. Vlivem zúžení proudění vznikají vírové struktury, které se propaguje po celé délce kanálu. Vírové struktury jsou nejvíce patrné v oblasti směšovací zóny. Naopak v oblasti mezi vtokovou hranou a VC je proudění v čase poměrně stabilní.

Nelineární rozdělení tlaků po výšce kanálu souvisí s tvarem rychlostního pole a zakřivením proudnic. Proto tlakové měření u stropu kanálu nemůže prezentovat tlak v celém příčném profilu kanálu. Pulzace v tlakových odběrech při měření tlaků byly způsobeny turbulencí a fluktuací v místě odběru.



Obrázek 7.3: Vektorová pole rychlostí pro stav Q1.5_ D8 _ H10 ($\bar{U} = 0.234$ m/s) při poměru $s/D = 0.25$. Levý obrázek je snímek časově středních rychlostí. Pravý obrázek je 1/300 pořízených snímků okamžitých rychlostí. Pro oba obrázky je legenda barev v rozmezí od 0 ÷ 0.35 m/s a černé šipky v popředí znázorňují směr proudění v jednotlivých bodech měrné sítě.

Obrázky 7.3 patří stavu, při kterém se netvořil úplav za vtokem do kanálu. Levý obrázek jsou časově střední rychlosti a je možné vidět, že neexistuje zúžený profil s hlavním proudem a s nárůstem lokálních rychlostí, jako v předchozích obrázcích, ve kterých se lokálně zvýšila rychlost vlivem zmenšení průtočné plochy. Pravý obrázek ukazuje rychlostní pole okamžitých rychlostí, ve kterém je možné pozorovat klasické turbulentní proudění po celé výšce a délce kanálu.

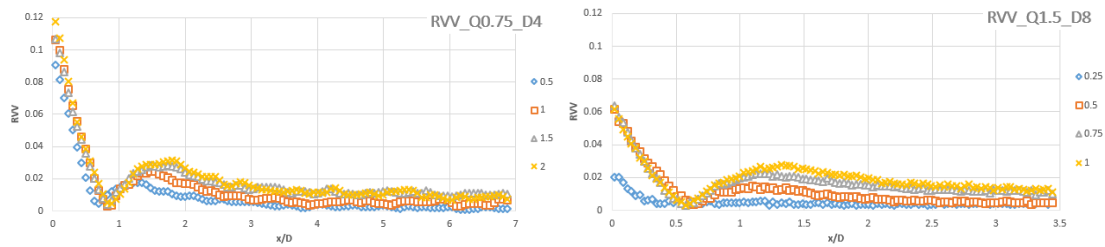
V Obrázcích 7.1 a 7.2 je naopak vidět zúžení proudnic, úplav a místo *Vena contracta*. Poté následuje směšovací zóna a probíhá míchání po celé výšce profilu za koncem úplavu.

Stav Q1.5_ D8 _ H10 byl jediným stavem, při kterém se za vtokem netvořil úplav. Následující výsledky potvrzují, že absence úplavu má vliv na velikost ztrát a tvar rychlostního pole.

7.2 Časově střední vertikální rychlost \bar{v}

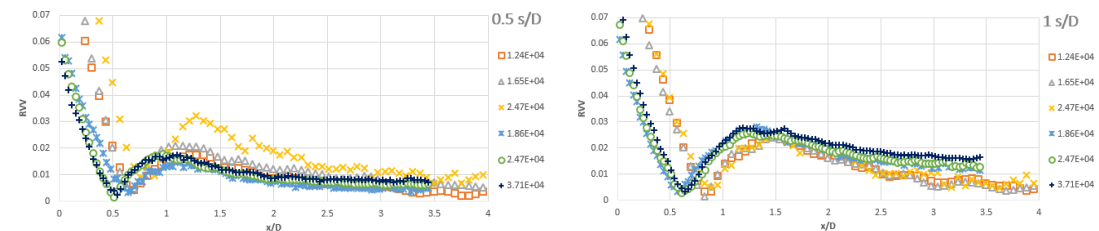
Časově střední bodové vertikální rychlosti \bar{v} byly vyhodnoceny metodou relativních vertikálních rychlostí RVV, viz vzorec 6.1. Relativní vertikální rychlost byla stanovena pro každý sloupec matice časově středních rychlostí \bar{v} a zprůměrována přes počet řádků. Hodnota RVV byla podělena průřezovou rychlostí \bar{U} , aby hodnota byla standardizována a mohla být mezi jednotlivými experimenty porovnávána.

Relativní vertikální rychlost RVV je suma kvadrátů bodových vertikálních časově středních hodnot rychlosti \bar{v} přes všechny řádky v daném svislici. Tato hodnota je dále odmocněna a zprůměrována počtem řádků Y a normalizována průřezovou rychlostí \bar{U} .



Obrázek 7.4: Průběh relativních vertikálních rychlostí RVV pro průřezovou rychlost $\bar{U} = 0.234$ m/s. V pravém obrázku pro nejmenší převýšení s/D zobrazené modrými kosočtverci (\diamond) není patrná po délce kanálu výrazná změna v rychlostech. To potvrzuje, že pro tento stav se nevytvořil úplav. Označení legendy grafu odpovídá poměru s/D jednotlivých průtokových stavů.

Relativní vertikální rychlost RVV v pravém Obrázku 7.4 potvrzuje, že při nejmenším průtoku s poměrem převýšení $s/D = 0.25$ nevzniká v kanále úplav. Při vyšším Re a stejném poměru s/D již naopak úplav vzniká, viz příloha A Obrázek 8.14. Modrá řada kosočtverců (\diamond) je po celé délce kanálu skoro konstantní a velmi malá, tzn., že absolutně převládá horizontální složka rychlosti. V ostatních stavech je RVV pro všechny řady proměnné. Mají minimum, ve kterém jsou i svislé rychlosti minimální, to stanovuje místo s největší výškou úplavu Hu . Mají i maximum, které naopak definuje konec úplavu a jeho délku Lu .



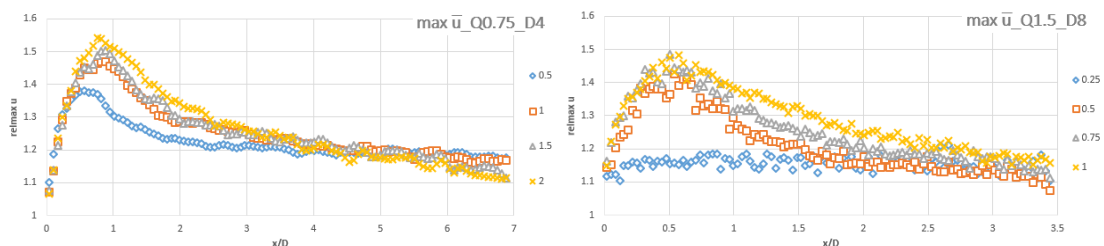
Obrázek 7.5: Relativní vertikální rychlosti RVV porovnané podle s/D . Legenda odpovídá Reynoldsovým číslům a vodorovná osa x/D má vlivem standardizace pro dvě velikosti kanálu D dvě délky.

Obrázek 7.5 graficky porovnává relativní vertikální rychlosti RVV mezi všemi experimenty, ve kterých je stejné s/D . Na vodorovné ose je rozdíl kvůli bezrozměrné souřadnici x/D , protože při větším kanále je souřadnice x standardizována větším D . Na pravém Obrázku 7.5 je výraznější rozdíl mezi minimem funkcí RVV. Při větším kanále nastane minimum i maximum funkce dříve. Z maxim funkcí RVV je možné definovat konec úplavu, začátek je na hraně při vtoku do kanálu.

7.3 Maximální časově střední horizontální rychlost \bar{u}

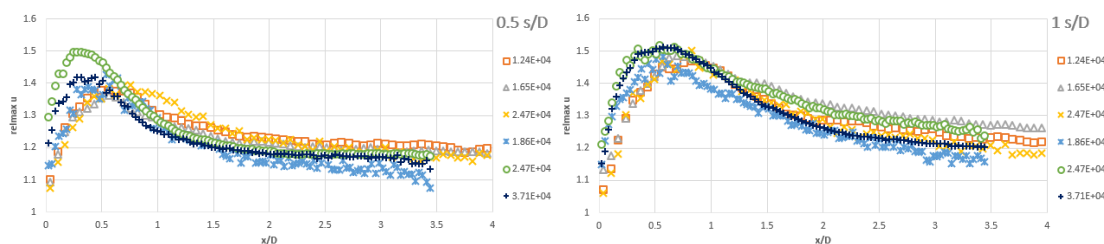
Z maticových zobrazení horizontálních rychlostí byly po sloupcích vyhodnoceny maximální časově střední rychlosti \bar{u} v každé svislici po délce kanálu. Tyto hodnoty byly normalizovány průřezovou rychlostí \bar{U} , aby bylo možné relativní bezrozměrné rychlosti mezi sebou porovnat.

$$relmax\ u = \frac{\max(\bar{u})_i}{\bar{U}} \quad (7.1)$$



Obrázek 7.6: Průběh maximální rychlosti v časově středním snímku vodorovných rychlostí \bar{u} pro stejnou průřezovou rychlost $\bar{U} = 0.234$ m/s. Legenda odpovídá poměru zatopení s/D . V pravém obrázku nejmenší řada modrých kosočtvců (\diamond) je přibližně konstantní po celé délce pozorování. To potvrzuje, že pro tento stav se nevytvořil za vtokem do kanálu úplav.

Zvýšení maximální rychlosti je zapříčiněno zmenšením průtočné plochy a vzniká úplav. Pro nejmenší stav $s/D = 0.25$ v pravém Obrázku 7.6, modré kosočtverce (\diamond), je rychlost přibližně konstantní, protože žádný úplav nevzniká. Při větších průtocích, větším Re a stejném poměru s/D je průběh rychlostí srovnatelný s ostatními a úplav vzniká, viz příloha A Obrázek 8.15.



Obrázek 7.7: Porovnání průběhů maximálních rychlostí v časově středním snímku vodorovných rychlostí \bar{u} porovnaných podle stejných s/D . Legenda odpovídá Re a vodorovná osa x/D má dvě velikosti zapříčiněnou dvěma velikostmi kanálu D .

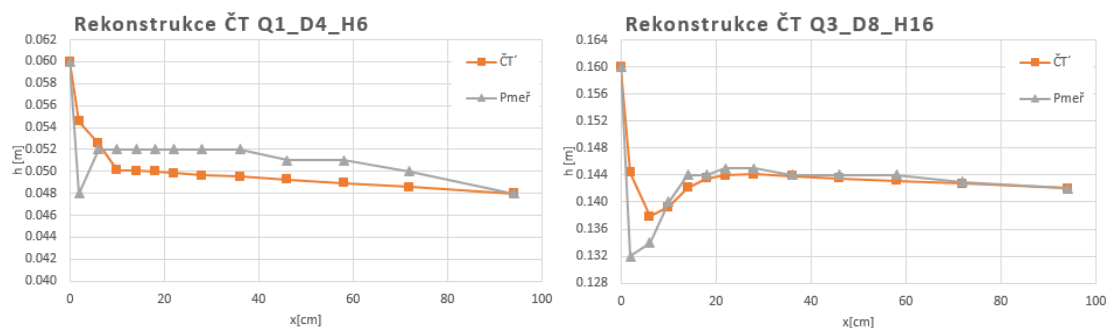
Obrázek 7.7 porovnává mezi sebou průtoky, srovnané podle poměru převýšení s/D . Barevná škála je zobrazena podle Re . Na vodorovné ose je bezrozměrná souřadnice x standardizovaná přes výšku kanálu D , svislá osa je bezrozměrná relativní rychlost \bar{u}/\bar{U} . Párování řad mezi sebou říká, že změna Re při zachování průřezové rychlosti \bar{U} výrazně nemění maximální rychlosti po délce kanálu.

Existuje analogie mezi maximální časově střední horizontální rychlostí a minimem v průběhu RVV. Protože v minimu RVV jsou minimální bodové vertikální rychlosti \bar{v} , tak v tom samém místě jsou naopak maximální bodové horizontální rychlosti \bar{u} . Proudění je podle všech ukazatelů v maximální možné míře rovnoběžné se dnem kanálu a proudění je jednodimenzionální.

7.4 Průběh měřených tlaků po délce kanálu

Během zpracování dat z tlakových odběrů se ukázalo, že odečtené tlaky vykazují nezvyklé chování. Metoda, která toto zjištění potvrzuje je rekonstrukce čáry energie z měřených tlaků. Ukázalo se totiž, jestliže je z naměřených tlaků sestavená tlaková čára a k této čáře přičtena rychlostní výška opravena o Coriolisovo číslo, tak vzniklá čára energie v některých úsecích stoupá. To při analýze ukázaly samotné tlaky získané z tlakových odběrů. Tlak při tomto experimentu a typech proudění nemá hydrostatické rozdělení po výšce kanálu. Distribuce tlaku je ovlivněna svislými rychlostmi \bar{v} , které za vtokem do kanálu působí na dno a naopak na konci úplavu na strop konstrukce kanálu. Problém je tedy v interpretaci, hodnoty získané z odběrů na stropě kanálu není možné distribuovat s hydrostatickým rozdělením po výšce kanálu.

Obrázek 7.8 zobrazuje porovnání měřených tlaků $P_{m\check{e}ř}$ a tlaků rekonstruovaných $\check{C}T'$. V tomto experimentu jsem $\check{C}T'$ rekonstruovali na základě aproximace průběhu $\check{C}E'$ a vypočtením Coriolisova čísla α . Rekonstruovaná $\check{C}T'$ je na Obrázku 7.8 zobrazena oranžovou barvou (\square). U velkého úplavu, Obrázek 7.8 vpravo, $\check{C}T'$ ukazuje lokální pokles díky vysokým hodnotám α , což odpovídá teoretickým předpokladům. Šedé linie (Δ) jsou naměřené tlaky $P_{m\check{e}ř}$.

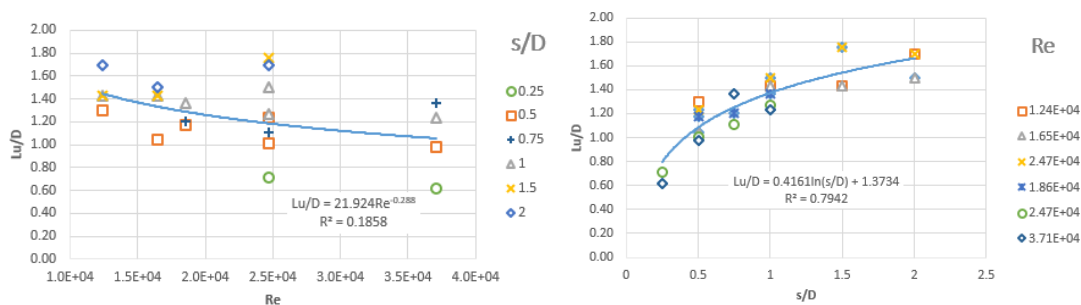


Obrázek 7.8: Porovnání měřených a vypočtených tlaků v tlakových odběrech na stropě kanálu. Oranžové (\square) zobrazují vypočtené tlaky $\check{C}T'$, šedé (Δ) jsou naměřené tlaky $P_{m\check{e}ř}$. Vynesením hodnot vzniká čára tlaku $P_{m\check{e}ř}$, která v některých místech roste, a odvozená čára energie by také rostla. To není možné, energie v systému nemůže růst.

7.5 Velikost úplavu

7.5.1 Délka úplavu

Aby bylo možné délky úplavu mezi experimenty porovnávat, byla velikost Lu převedena na bezrozměrné číslo Lu/D . Byla hledána závislost bezrozměrné délky Lu/D na Reynoldsově čísle Re a na převýšení na nátoku s/D .



Obrázek 7.9: Vynesená bezrozměrná délka úplavu Lu/D v závislosti na Re a s/D . V levém obrázku jsou data proložena mocninou spojnicí trendů, těsnost tohoto proložení je nedostatečná. V pravém obrázku je pro toto proložení použit logaritmický model, který vytvořil závislost mezi Lu a s/D

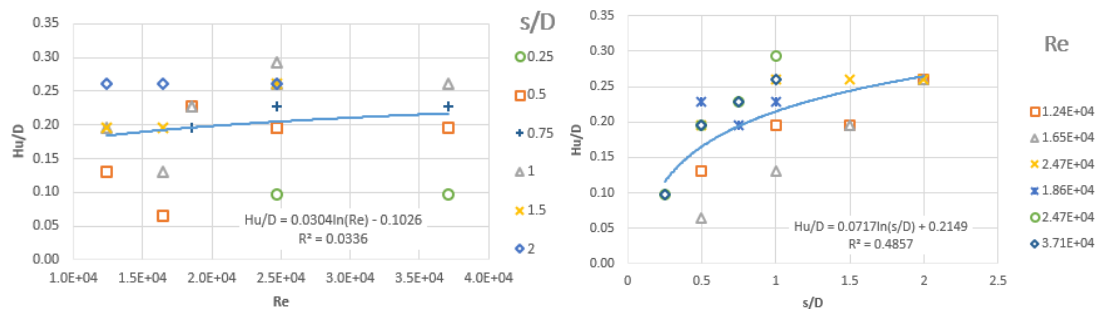
V Obrázku 7.9 byla snaha proložit vynesenými body spojnicí trendů. V levém Obrázku 7.9 je model mocninový s velmi nízkým parametrem spolehlivosti $R^2 = 0.19$. Neboli je velmi malá šance tímto modelem vhodně popsat závislost mezi bezrozměrnou délkou úplavu Lu/D a Reynoldsovým číslem Re . Klesající trend Lu/D v závislosti na Re nicméně existuje, ale rozptyl bodů je poměrně vysoký.

Pravý Obrázek 7.9 a jeho logaritmický model vykazuje dobrou spolehlivost R^2 . Z toho plyne, že existuje vztah mezi bezrozměrnou délkou Lu/D a poměrem s/D . Pokud bude známa výška kanálu D a vzdutí horní hladiny před vtokem H_{up} , je možno snadno získat převýšení $s = H_{up} - D$. Po dosazení do vzorce 7.2 lze získat bezrozměrnou délku úplavu Lu/D a protože je výška kanálu D již známa, je následně získána skutečná délka úplavu Lu .

$$Lu/D = 0.42 \cdot \ln(s/D) + 1.37 \quad (7.2)$$

7.5.2 Výška úplavu Hu

Stanovení výšky úplavu bylo ovlivněno výškovým rozlišením PIV výstupu. Každý vektor rychlosti byl totiž vytvořen z oblasti 2.6 x 2.6 mm.



Obrázek 7.10: Vynesena bezrozměrná výška úplavu Hu/D v závislosti na Re a poměru s/D . V obou obrázcích jsou data proložena spojnici trendů při použití logaritmického modelu. Spolehlivost proložení dat v levém obrázku v závislosti na Re je nedostatečná. Pravý obrázek závislosti na s/D vykazuje optimálnější parametr spolehlivosti R^2 .

V Obrázku 7.10 byla snaha proložit vnesenými body spojnici trendů. V levém Obrázku 7.9 je model logaritmický s velmi nízkým parametrem spolehlivosti $R^2 = 0.03$. Neboli, není šance tímto modelem vhodně popsat závislost mezi bezrozměrnou výškou úplavu Hu/D a Reynoldsovým číslem Re .

Stanovení výšky úplavu Hu gradientem horizontálních rychlostí du/dy na pravém Obrázku 7.10 ukazuje trend závislosti na poměru s/D . Parametr spolehlivosti tohoto logaritmického modelu je $R^2 = 0.48$, jehož hodnota není zcela optimální, viz rovnice 7.3. Nicméně určitá závislost existuje, což dokládá proložený logaritmický model hodnotami bezrozměrné výšky úplavu Hu/D a poměrem s/D .

$$Hu/D = 0.072 \cdot \ln(s/D) + 0.21 \quad (7.3)$$

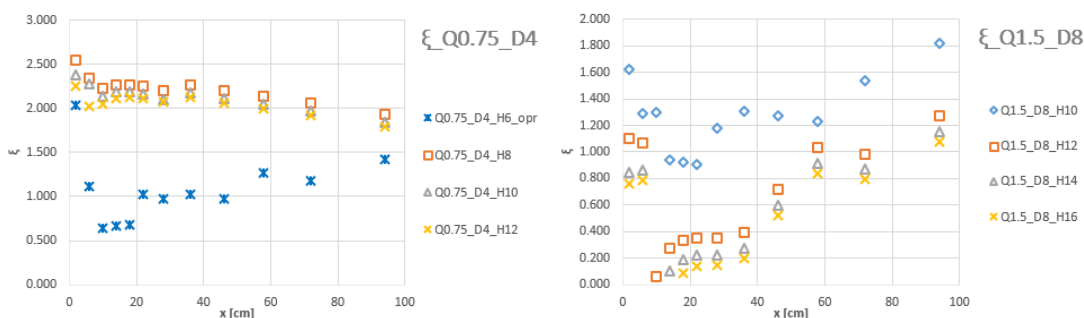
Ani jeden z modelů prezentovaných v Obrázku 7.10 neposkytuje ideální model, který by popisoval závislost výšky úplavu Hu . Z vyhodnocených dat avšak vyplývá, že existuje částečný trend závislosti výšky úplavu na geometrii a výšce hladiny před nátokem H_{up} .

Problémem tohoto stanovení bylo prostorové rozlišení samotné PIV metody. CCD kamera má danou velikost čipu a s tím i spojené rozlišení. I když je optika na kameře vyměnitelná, je nutné si před měřením rozmyslet velikost zkoumané oblasti s ohledem na velikost výstupních souborů a výpočetní výkon a čas analýzy. Vzhledem k dostupným možnostem byla zvolena velikost iterační plochy 2.6 x 2.6 mm pro průměrování zachycených reflexních částic. To mělo zásadní vliv na počet řádků vektorů rychlosti po výšce kanálu, protože při těchto experimentech byla upřednostněna velikost zorného pole před dostatečnou podrobností. Bylo totiž uvažováno, že vznikající úplav za vtokem do kanálu potřebuje relativně dlouhou dráhu na to, aby se rozptýlil a proudění se opět stalo po výšce kanálu rovnoměrné. Výzkumné otázky byly spíše orientovány na délku úplavu, než na jeho výšku. Z toho důvodu není rozlišení PIV dat po výšce dostatečně podrobné, a tedy došlo k významnému průměrování časově střední rychlosti.

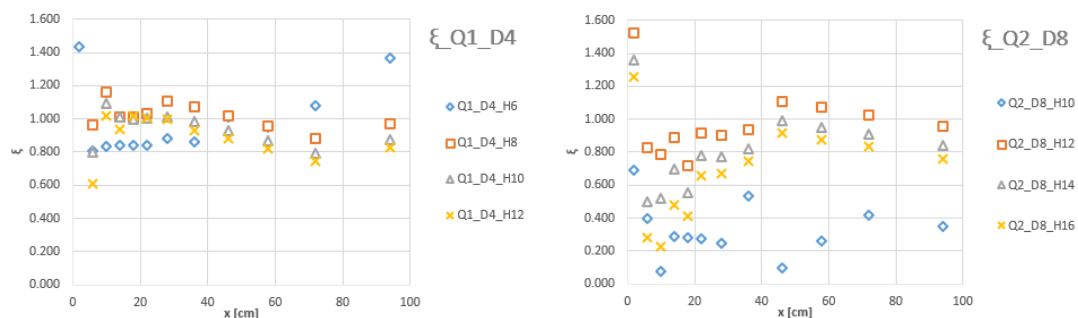
7.6 Součinitel místní ztráty

Jedním z hlavních cílů práce bylo lépe popsat děje na vtoku do propustku. Jediná hodnota, kterou je možné ovlivnit výsledek výpočtu v Bernoulliho rovnici, jsou ztráty. Konkrétně jde o součinitel místní ztráty, který je definován pouze jednou hodnotou v závislosti na geometrii vtoku. Hodnota je stejná pro všechny možné podmínky vtoku, míry jeho zatopení, rychlosti proudění, Reynoldsova čísla a další okrajové podmínky a hydraulické charakteristiky. Proto byla hledána v této práci závislost součinitele místní ztráty ξ na Reynoldsově čísle Re a poměru zatopení vtoku s/D .

Obrázky 7.11 a 7.12 ukazují vypočtené součinitele místní ztráty ξ v intervalu tlakových odběrů.



Obrázek 7.11: Součinitel místní ztráty ξ , pro $\bar{U} = 0.234$ m/s. Získané hodnoty součinitele vynesené po délce kanálu v místech tlakových odběrů.

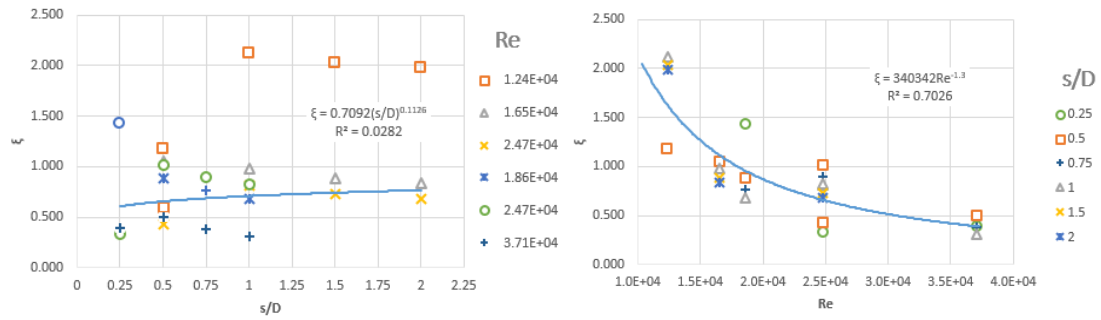


Obrázek 7.12: Součinitel místní ztráty ξ , $\bar{U} = 0.313$ m/s. Získané hodnoty součinitele vynesené po délce kanálu v místech tlakových odběrů.

Obrázky 7.11 jsou pro stejnou průřezovou rychlost $\bar{U} = 0.234$ m/s, rozdíl levého obrázku od pravého je v průtoku a průřezové ploše, které jsou poloviční při zachování stejné rychlosti. Stejně je tomu i u Obrázku 7.12. Průběh součinitele místní ztráty při vyšších převýšení má stejné chování ve všech případech. Zajímavostí je, že ve všech případech má experiment s nejvyšším poměrem s/D zobrazený jako (×) nejmenší součinitel ξ z trojice nejvyšších převýšení s (×, Δ, □).

Stavy s nejnižším relativním převýšením u nejmenších průtoků u Obrázků 7.11 vykazovaly zvláštní chování. Zdá se, že při malé turbulenci proudění (nízkém Re) vykazuje větší odporové součinitele a vlivem vazkosti tlumí turbulenci. Příkladem je první z Obrázků 8.3b, při zatopení 10 cm, kdy se vůbec nevytvořil úplav za vtokem do kanálu. Větší turbulence zmenší vliv vazkosti kapaliny, a tím i sníží celkovou ztrátu při stejném průtoku a průřezové rychlosti, toto chování bylo ověřeno na více měření. Tento jev největších ztrát při nejmenším převýšení je možné pozorovat jen u průtokového stavu $Q1.5_D8_H10$ na pravém Obrázku 7.11.

Další neobvyklé chování vykazuje stav $Q0.75_D4_H6$, viz levý Obrázek 7.11. Zde je naopak součinitel místní ztráty pro nejmenší průtok výrazně menší, než součinitele u ostatních průtoků.



Obrázek 7.13: Vynesený součinitel místní ztráty ξ . V levém obrázku je závislosti na s/D a značky podle Re . Oranžové (\square) patří nejmenšímu průtoku na kanále výšky $D = 4$ cm, pro který vycházel součinitel v porovnání s ostatními výrazně vyšší. Pravý obrázek je závislost na Re a značky podle s/D . Data jsou proložena mocninou spojnicí trendů, která odpovídá naměřeným datům.

Hodnoty v Obrázku 7.13 jsou vyhodnoceny z dat z Obrázků 7.11 a 7.12, ze kterých byly zprůměrovány poslední hodnoty kvůli eliminaci nepřesností v měření a významnému rozptylu součinitele v místech prvních tlakových odběrů. Levý Obrázek 7.13 není možné proložit optimální spojnicí trendů, neboli neexistuje vhodný model, který by popsal chování a závislost součinitele místní ztráty na relativním poměru s/D ; $\xi \neq f(s/D)$. Naopak pravý Obrázek 7.13 vykazuje chování, které je možné popsat mocninným modelem. To znamená, že je možné hodnotu součinitele místní ztráty ξ získat z Reynoldsova čísla tlakového proudění po dosazení do Rovnice 7.4 za hodnotu Re .

$$\xi = 340342 \cdot Re^{-1.3} \quad (7.4)$$

Parametr R^2 spojnice trendů určuje spolehlivost použitého modelu po proložení vynesenými daty. Tento model vykazuje spolehlivost $R^2 = 0.7026$, neboli 70.3% těsnost proložení dat. Model ukazuje, že pro vyšší Re se hodnota součinitele místní ztráty blíží tabulkovým hodnotám $\xi = 0.5$. Pro Re nižší než 3×10^4 hodnota součinitele roste a může se blížit až hodnotě $\xi = 2.0$.

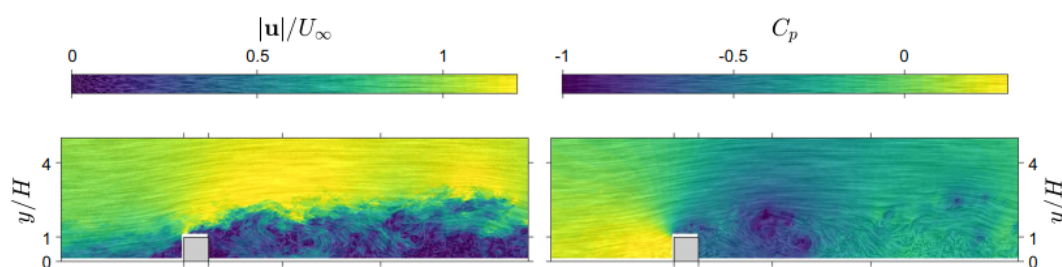
Vzorec 7.4 je možné použít pro všechny stavy, při kterých bude dodrženo tlakové proudění v propustku, ostrá hrana vtoku, svislé čelo vtoku, proudění o volné hladině před vtokem a Reynoldsovo číslo Re v rozmezí $1 \div 4 \times 10^4$.

7.7 Diskuse

V průběhu zpracování dat se ukázalo, že existuje několik nejasností, které zde budou dále diskutovány.

Měření tlaků na experimentální sestavě bylo základní analýzou. Samotné měření nečinilo problém, ale jak se později ukázalo při vyhodnocení, tak naměřené hodnoty nebylo možné přímo použít. U získaných hodnot měření tlaků se po vykreslení do grafu a následné rekonstrukci čáry energie ukázalo, že není možné pro tuto rekonstrukci tlaky využít, protože by čára energie v některých intervalech rostla. Klasické měření tlaků na stropě není zřejmě vhodné pro takový typ experimentu bez pozdějších úprav hodnot. Toto měření bez dalších úprav je možné použít pouze v experimentech, ve kterých je dostatečná vzdálenost mezi místní ztrátou a měřením tlaků. Uklidňovací délka hraje důležitou roli, protože umožňuje proudění návrat, po změně proudnicového pole, zpět do rovnoměrného proudění. Při tomto experimentu také docházelo k pulzaci v tlakových odběrech vlivem turbulence v proudění. Největší kmitání hladiny bylo v odběrech blíže k náhlému zúžení kanálu, v těchto odběrech se hladina pohybovala v intervalech až ± 2 mm. Měření tlaků v blízkosti místní ztráty a při proudění v neprizmatických korytech je možné běžnými metodami, ale je potřeba získané hodnoty přepočítat. Tímto přepočtem se zabýval ve své knize V. Chow, který řešil problematiku hydrostatického rozdělení tlaku v kanálech se zahnutým dnem. V jeho vzorcích je počítáno se zrychlením, které proudě dodá změna sklonu dna [6]. Deformace tlaků nebyla způsobena zakřivením dna, ale zakřivením proudnic způsobené obtékáním nátokové hrany. Tlaky přestávají být deformovány ve vzdálenosti $60 \div 140$ mm, to odpovídá relativní vzdálenosti x/D pro menší světlost výšku $1.5 \div 3.5$ a pro větší propustek $140 \div 180$ mm, neboli $1.75 \div 2.25 x/D$.

Další možnost, jak tlak rekonstruovat souvisí s PIV. Při dostatečně jemném rozlišení snímaných dat metodou PIV v zájmové oblasti, je možné získat lokální rozdělení tlaků z okamžitých rychlostí a přímým řešením Navier-Stokesových rovnic, viz Obrázek 7.14 [17]. To by bylo možné využít v případech, kdy se zkoumá vývoj mechanické energie po délce proudění. Využití detailního rozdělení tlaků může napomoci při minimalizaci energetických ztrát či naopak, v některých aplikacích jejich maximalizaci. Dosáhnout dostatečného rozlišení s řešením od Dantec Dynamics by bylo možné, ale v ten moment by nebylo možné získat informace pro vyhodnocení délky úplavu. S touto technikou nebylo možné získat široký záběr kamery, ve kterém by byla maximální možná délka kanálu a zároveň, aby získaná data dosahovala takové podrobnosti, na základě které by bylo možné data přímo využít i pro rekonstrukci lokálních tlaků v místech odběrů. Možnosti digitálního čipu kamery umožňovaly se soustředit pouze na jeden z protichůdných požadavků podrobnosti zobrazení, a proto byla dána přednost délce úplavu před podrobným rozlišením. Délka úplavu a obecně velikost úplavu byla jedním z cílů této práce, ale z důvodů nedostatečného výškového rozlišení vektorového pole, nebylo možné z těchto dat rekonstruovat lokální tlakové změny.



Obrázek 7.14: Rychlostní pole okamžitých bodových rychlostí na levém obrázku a z těchto rychlostí rekonstrované relativní okamžité průběhy tlaků za překážkou ve dně přímým řešením Navier-Stokesových rovnic na pravém obrázku. $|u|/U_\infty$ rychlostní pole časově středních rychlostí, C_p rekonstrované pole průměrných bodových tlaků. (převzato z [17])

Experimentální sestava byla zprvu budována pouze jako demonstrativní model k využití technologie PIV, na kterém proběhlo zprovoznění a seznámení se s touto metodou. Z toho důvodu byl na začátku důležitý délkový rozměr, aby žlab nebyl příliš dlouhý a bylo možné s ním ve vodohospodářské laboratoři bez obtíží manipulovat. V průběhu měření docházelo k postupnému vylepšování žlabu experimentální sestavy. Hlavní příčinou změn byla eliminace nejasností, které do měření hydraulických veličin vnášelo konstrukční řešení. Na začátku byl problém se strháváním vzduchu na odtoku ze žlabu do nádrže, a proto byl odtok vybaven mechanismem, který z celého trubního systému udělal tlakový systém. Při použití PIV laser osvětluje veškeré částice v proudu, kdy bublinky vzduchu je možné také považovat za částice. Jelikož bublinu vzduchu mají tvar kuličky, tak při osvětlení laserem dochází k náhodnému lomu dopadajícího světla. Tyto náhodné odrazy mají vysokou intenzitu a mohou způsobit nevratné bodové poškození snímacího čipu kamery.

Další modifikací bylo osazení mezikruží na konstrukci vtokového objektu, kde byl také problém se strháváním vzduchu. Před úpravou voda z vtokového objektu strhávala velké vzduchové bubliny, které byly unášeny po celé délce měrného kanálu. Tato úprava by nebyla potřeba, pokud by byla na nátok instalována velká nádrž s dostatečným objemem vody, která by umožnila rozptýlení vzduchových bublin z vody. Další část modelu, která by vedle ke stabilnějším výsledkům, je uklidňovací délka mezi nádrží a nátokem do zúženého kanálu. Je možné, že absence dostatečné uklidňovací délky způsobila jisté problémy. Vlivem omezeného délkového rozměru modelu bylo zapotřebí do krátkého úseku před vtokem vměstnat rovnoměrný nátok a uklidňovací délku. Výsledky vektorových polí okamžitých rychlostí před vtokem vypadají stabilně. Je tedy možné, že k problémům nejspíše nedocházelo. Pokud by se v tomto experimentu pokračovalo, nebo v jiném podobném, tak by bylo vhodné uklidňovací délku před vtokem do měrné sestavy prodloužit. Prodloužení eliminuje nejistoty spojené s tím, zda je proud již dostatečně uklidněn či nikoliv.

Tato diplomová práce se zabývá hydrodynamikou vtoku do tlakového kanálu s ostrohranným vtokem využitím zobrazovací metody PIV. Přejchod proudění o volné hladině do tlakového kanálu souvisí s řadou vodohospodářských staveb. Tato práce dává do souvislostí tento hydraulický jev s nátokem do propustku s obdélníkovým příčným profilem. Práce měla za cíl popsat a definovat místní ztrátu vtokem při přechodu z volné hladiny do tlakového kanálu, popsat a definovat tvar rychlostního pole v místě zúžení, popsat úplav vznikající za vtokem a aplikovat metodu PIV na popsané úloze včetně návodu k postupu nastavení.

Hlavní závěry práce lze shrnout následovně:

- Pro místní ztráty při přechodu z proudění o volné hladině do tlakového kanálu, pro hodnoty $Re = 1 \times 10^4 \div 4 \times 10^4$, byla nalezena závislost na Reynoldsově čísle proudění. Součinitel místní ztráty ξ a Re mají mezi sebou spojitost, kterou je možné popsat mocninným modelem. Díky této závislosti je možné konstantní hodnotu součinitele $\xi = 0.5$ z hydraulických tabulek nahradit právě mocninnou závislostí. Lze tedy v součiniteli vtoku do ostrohranného kanálu zohlednit i vlastnosti samotného proudění. Těsnost proložení těchto dat má dobrou spolehlivost, takže výsledný součinitel místní ztráty ξ je věrohodný a lze se na něj spolehnout v uvedeném intervalu Reynoldsových čísel.

Hodnota součinitele místní ztráty $\xi = 0.5$ je dosažena pro nejvyšší Re . Pro nižší Re jsou hodnoty ξ výrazně vyšší. Součinitel místní ztráty ostrohranného vtoku do kanálu ξ není závislý na relativním poměru s/D . Součinitel není ovlivněn vzduťím hladiny, které vznikne vlivem zmenšení průřezové plochy kanálu.

- Popis tvaru vektorového pole rychlostí byl možný díky metodě PIV. Výstupem z PIV měření byla vektorová pole okamžitých a časově středních hodnot rychlostí. Z dat byly pozorovány změny ve vertikálních časově středních rychlostech \bar{v} a horizontálních časově středních rychlostech \bar{u} . Naopak v sekvenci okamžitých rychlostí jsou pozorovatelné turbulentní víry, které se propagují po celé délce kanálu. Rozdíl mezi poli okamžitých a časově středních rychlostí je především v oblasti směšovací zóny za bodem *Vena contracta*. V průtkovém stavu Q1.5_D8_H10 se za hranou úplav vůbec nevytvořil, nevznikl hlavní proud kolem úplavu a v celém profilu a délce kanálu bylo klasické turbulentní proudění.
- Dalším cílem bylo popsat úplav, který vzniká za vtokem, protože jeho velikost je ovlivněna náhlou změnou proudnic. Výšku úplavu nebylo možné optimálně popsat, jelikož rozlišení výstupních dat z měření PIV po výšce kanálu nebylo dostatečně podrobné. Byl nalezen trend závislosti výšky úplavu Hu na relativní výšce převýšení s/D gradientem horizontálních rychlostí. Touto metodou je možné výšku úplavu Hu částečně popsat. Naopak rozlišení dat po délce kanálu bylo vhodné pro stanovení délky úplavu. Délka úplavu Lu byla ověřena i graficky z vektorových polí časově středních rychlostí a také ze snímků proudnic. Početně i graficky získaná délka úplavu byla

vynesena jako relativní parametr do grafu v závislosti na relativní výšce převýšení s/D . Zobrazená data byla proložena logaritmickým modelem, který vykazoval velmi dobrou spolehlivost. Je tedy možné na základě naměřeného převýšení před ostrohranným vtokem do kanálu získat informaci, do jaké délky bude vzniklý úplav zasahovat.

- K měření bylo využito komplexního řešení PIV měření od společnosti Dantec Dynamics. Výkon laseru byl 200 *mJ* při 15 Hz s vlnovou délkou 532 nm, což odpovídá zelenému světlu. Data byla pořizována s prostorovým rozlišením 2.6 x 2.6 mm. Vyhodnoceny byly sekvence vektorových polí okamžitých rychlostí a pole časově středních bodových rychlostí. Tato data byly následně podkladem pro vyhodnocení součinitele místní ztráty a velikosti úplavu vznikajícího za ostrohranným vtokem do tlakového kanálu. Měření na experimentální sestavě s použitím metody PIV lze považovat za úspěšné. Měření potvrdilo, že místní ztráta není lokální problém, ale prostorový, který se propaguje po délce kanálu.
- Návod popisující postupy a nastavení, která jsou potřebné pro zprovoznění PIV měření v rámci této experimentální sestavy, jsou popsány v příloze B.

Tato práce se zaměřila na popis dějů, které nastávají za vtokem do zúženého profilu. V inženýrské praxi je tento jev zjednodušován na lokální problém, který se děje v místě zúžení. Jak se ukázalo, úplav za obtékanou ostrou hranou svojí existencí výrazně ovlivňuje proudění za nátokem a jde tedy o prostorový problém, než jen pouze o lokální změnu. Pro správný popis součinitele místní ztráty a geometrii úplavu je nutné zohlednit další geometrické a hydraulické charakteristiky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ INFORMACÍ

Literatura

- [1] Balvín. P., a další *Technické podmínky 204 - Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*. Ministerstvo dopravy, Praha, aktualizace 2009
- [2] Balvín. P., Havlík A., a další *Hydraulické posouzení propustku*. Metodika pro MDČR, Praha, 2016
- [3] Beneš, J., *Měření parametrů proudu v turbulentní cele*. Bakalářská práce, Fakulta strojní ČVUT, Praha, 2016
- [4] Burešová, K., *Určení hladinových rychlostí pomocí metody partical tracking velocity*. Diplomová práce, Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2021
- [5] Chen. J., Raiola. M., Discetti. S., *Pressure from data-driven estimation of velocity fields using snapshot PIV and fast probes*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2022.110647>.
- [6] Chow, V. T., *Open-Channel Hydraulics*. 1959, McGraw-Hill. ISBN 07-010776-9
- [7] Halabrin, R., *optimalizace zjednodušeného okružního potrubí pro 5-ti dýzovou vertikální Peltonovu turbínu*. Diplomová práce, Fakulta strojního inženýrství VUT, Brno, 2011
- [8] Havlík. A., Píček. T., *HY2V Mosty a propustky*. přednáška, Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2019
- [9] Jurečková. P., *Modelový výzkum proudění na výtoku z propustku*. Diplomová práce, Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2017
- [10] Liu, Ch, L., *Experimental study of energy distribution in a two-dimensional sudden contraction*. Diplomová práce, Oregon State University, 1962
- [11] Novotný, J., *Vývoj měřicí metody PIV od počátku až po současnost*. Praha: České vysoké učení technické, 2017, ISBN 978-80-01-06118-3.
- [12] Peterka. T., *Měření proudových polí v objemu*. Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT, Praha, 2017
- [13] Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., Kompenhaus J. *Particle Image Velocimetry*. 2. vydání, New York, Springer, 2007, ISBN 978-3-540-72307-3.
- [14] Sedláček, D., *Modelový výzkum proudění na vtoku do propustku*. Diplomová práce, Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2017

- [15] Shinneeb, A-M., Bugg, J. D., *Variable threshold outlier identification in PIV data*. Institut of Physics publishing, Measurement Science and Technology, 2004, doi:10.1088/0957-0233/15/9/008
- [16] Thielicke, W., Sonntag, R., *Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab*. Journal of Open Research Software, 2021.
- [17] Van der Kindere, J.W., Laskari, A., Ganapathisubramani, B., *Pressure from 2D snapshot PIV*. Exp Fluids, 2019, doi.org/10.1007/s00348-019-2678-5
- [18] Wieneke, B., *PIV Uncertainty Quantification and Beyond*. 2017, DOI:10.13140/RG.2.2.26244.42886
- [19] Wildt, J., *Modelový výzkum proudění na vtoku do propustku*. Bakalářská práce, Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2017
- [20] Wilson, M. P., Jr., Teyssandier, R. G. *The Paradox of the Vena Contracta*. Journal of Fluids Engineering, 1975., ASME International. <https://doi.org/10.1115/1.3447316>
- [21] Zubík, P., *Integrovaná laserová anemometrie*. Disertační práce, Fakulta strojního inženýrství VUT, Brno, 2001

Internetové zdroje

- [22] Hager, W., *Blasius: A life in research and education*. [online][cit. 16.10.2022] Dostupné z: http://users.df.uba.ar/cobelli/Estructura_1/Blasius-Biography.pdf
- [23] The Editors of Encyklopedia, *Daniel BERNoulli*. Britannica. [online] [cit. 03.08.2022] Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Daniel-Bernoulli>
- [24] Oberhuber T., *výpočetní dynamika tekutin (Computational Fluid Dynamics)*. FJFI ČVUT v Praze. [online] [cit. 11.07.2022] Dostupné z: <https://people.fjfi.cvut.cz/pelancedi/SSM/TomasOberhuber.pdf>
- [25] OPTOLUTION Messtechnik GmbH. [online][cit 16.10.2022] Dostupné z: <https://www.optolution.com/en/measuring-principles/piv-principle/>
- [26] Separation Losses in pipe Flow, Fluid Mechanics, [online][cit. 16.10.2022], Dostupné z: <https://slidetodoc.com/ptt-252-fluid-mechanics-week-11-separation-losses/>

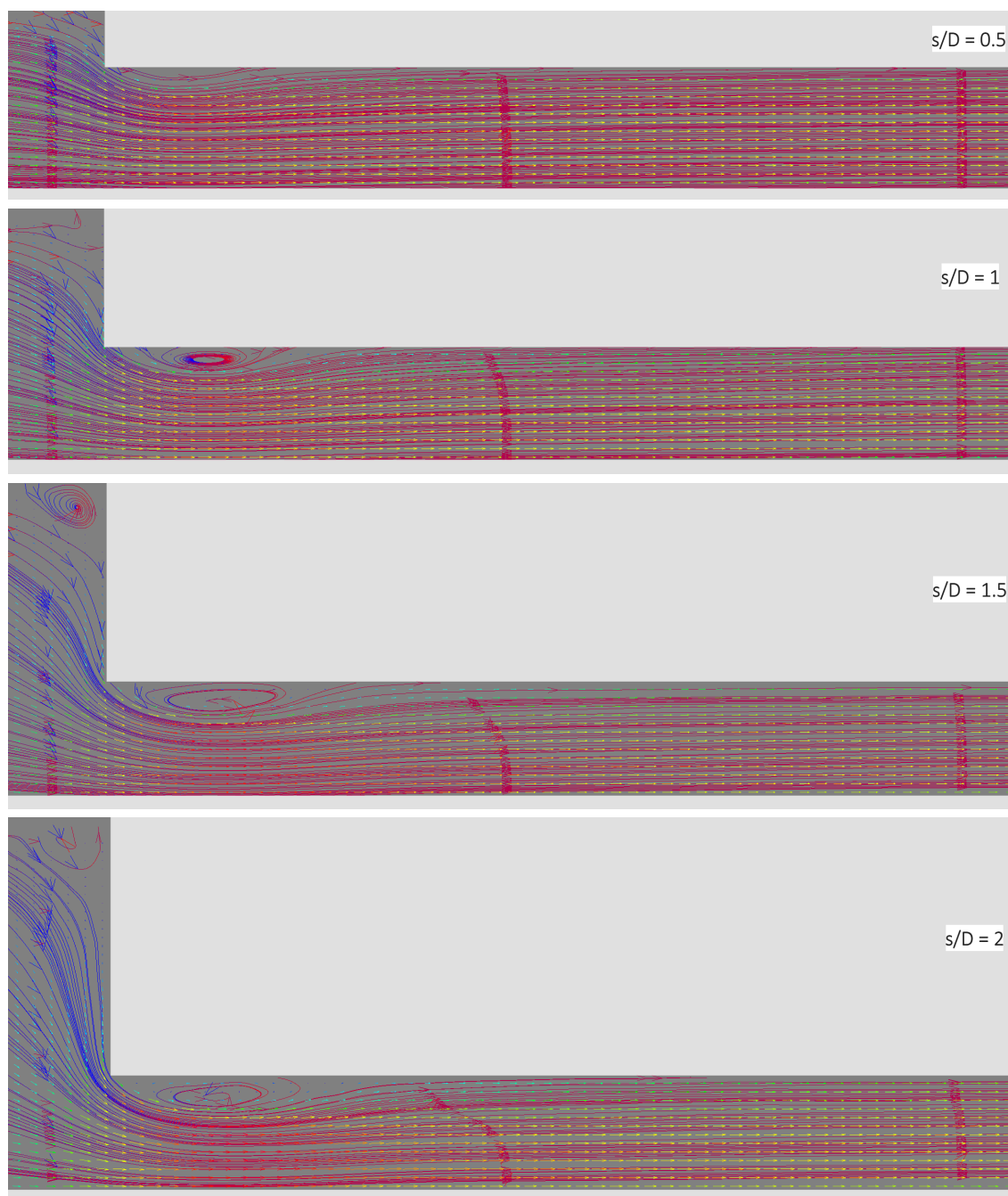
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Grafická příloha

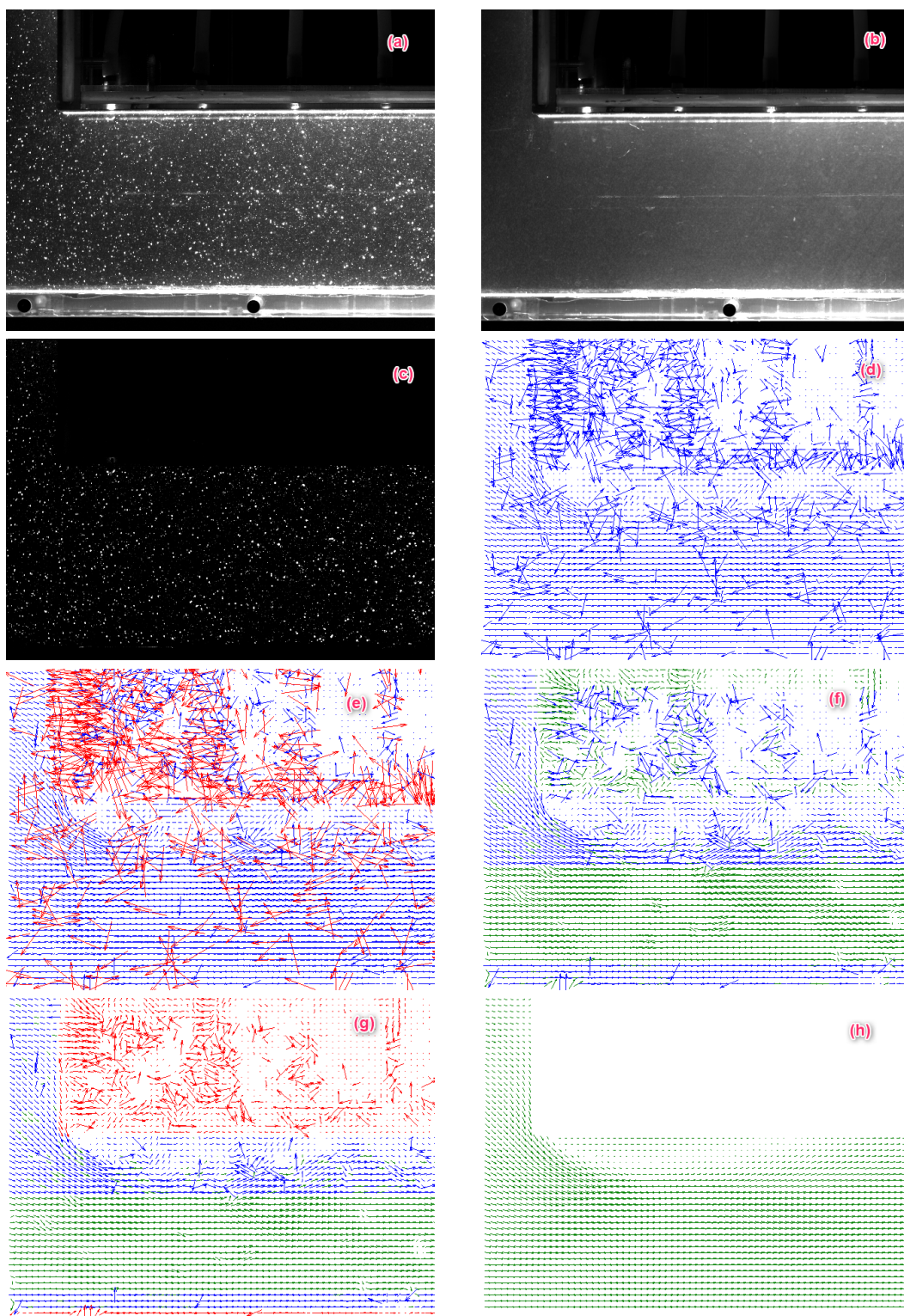
Příloha B: Dantec PIV

Příloha A

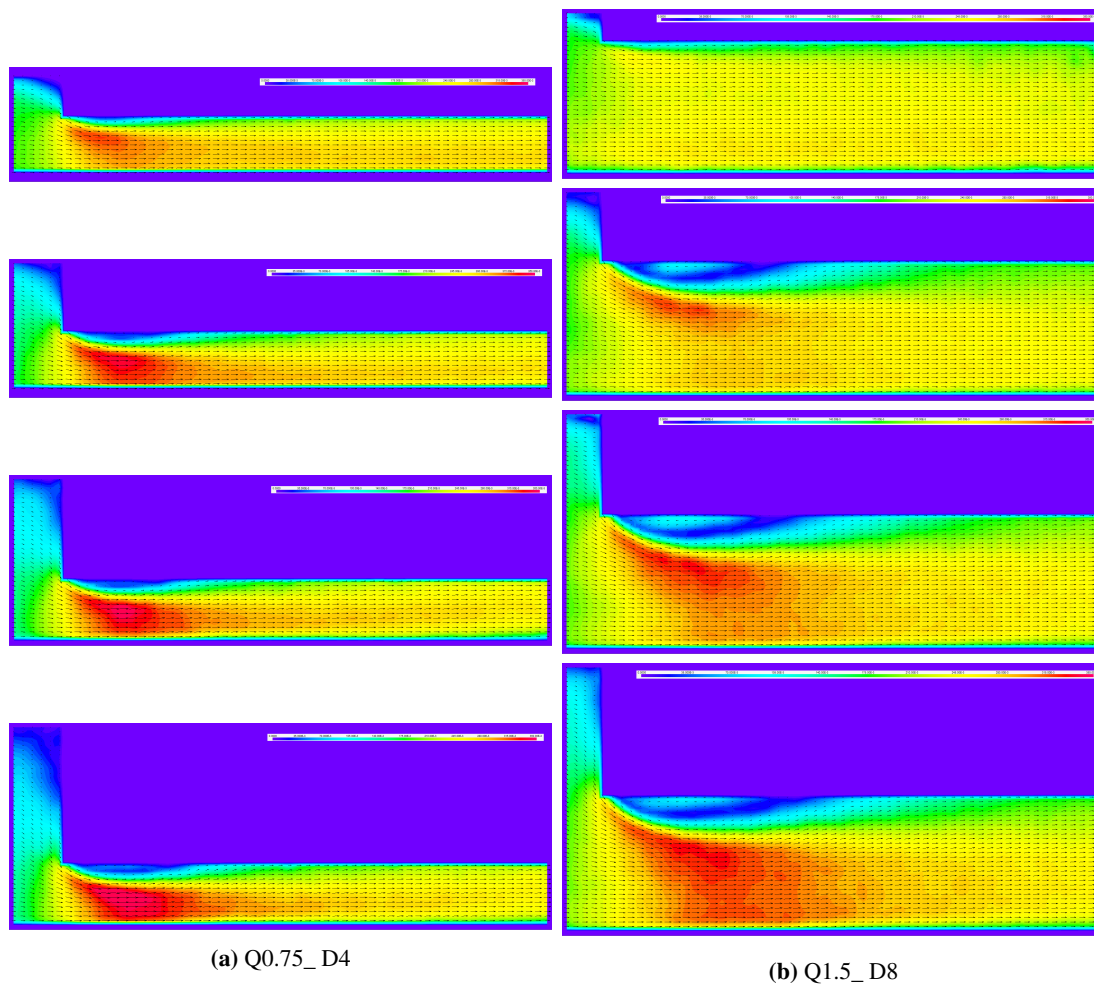
Grafická příloha



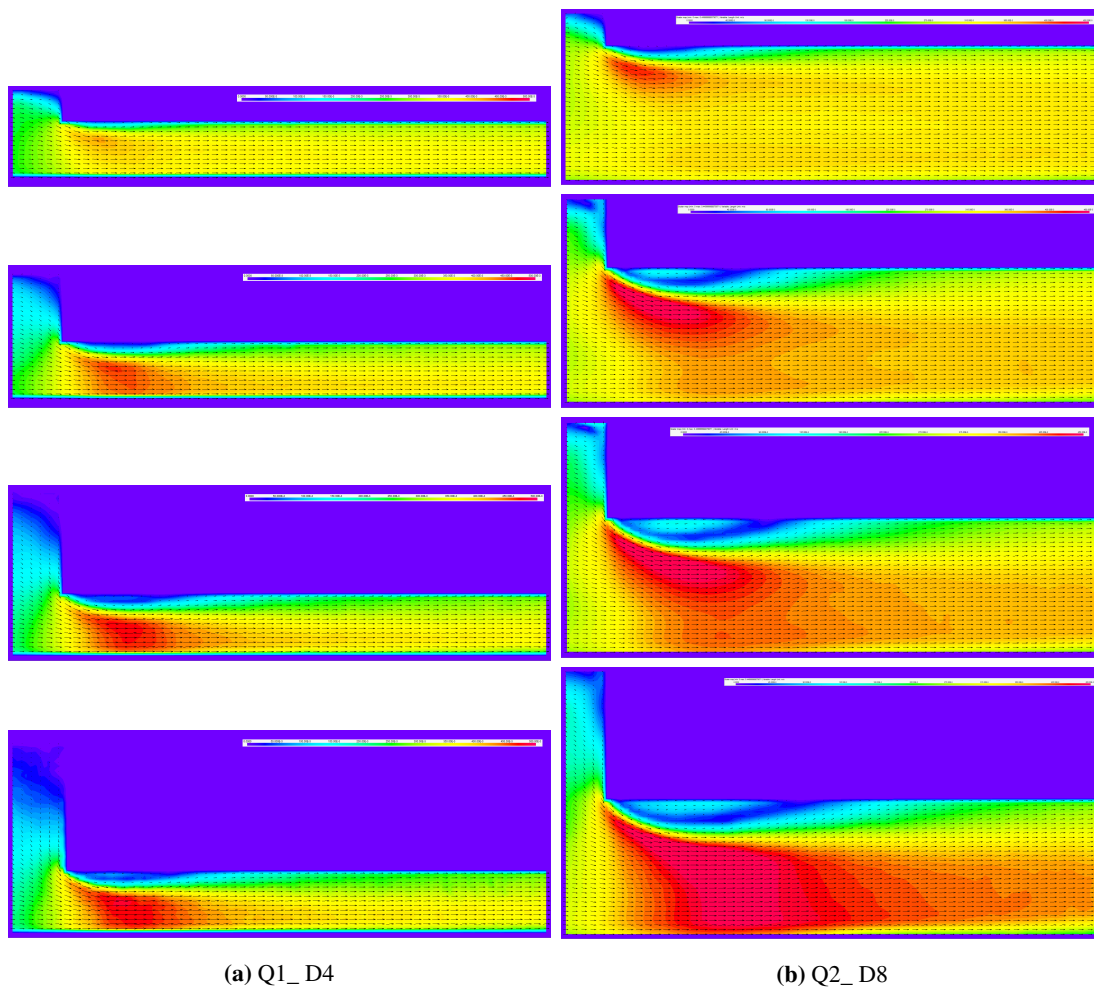
Obrázek 8.1: Proudnice stavu Q1_ D4 pro různé hloubky před propustkem.



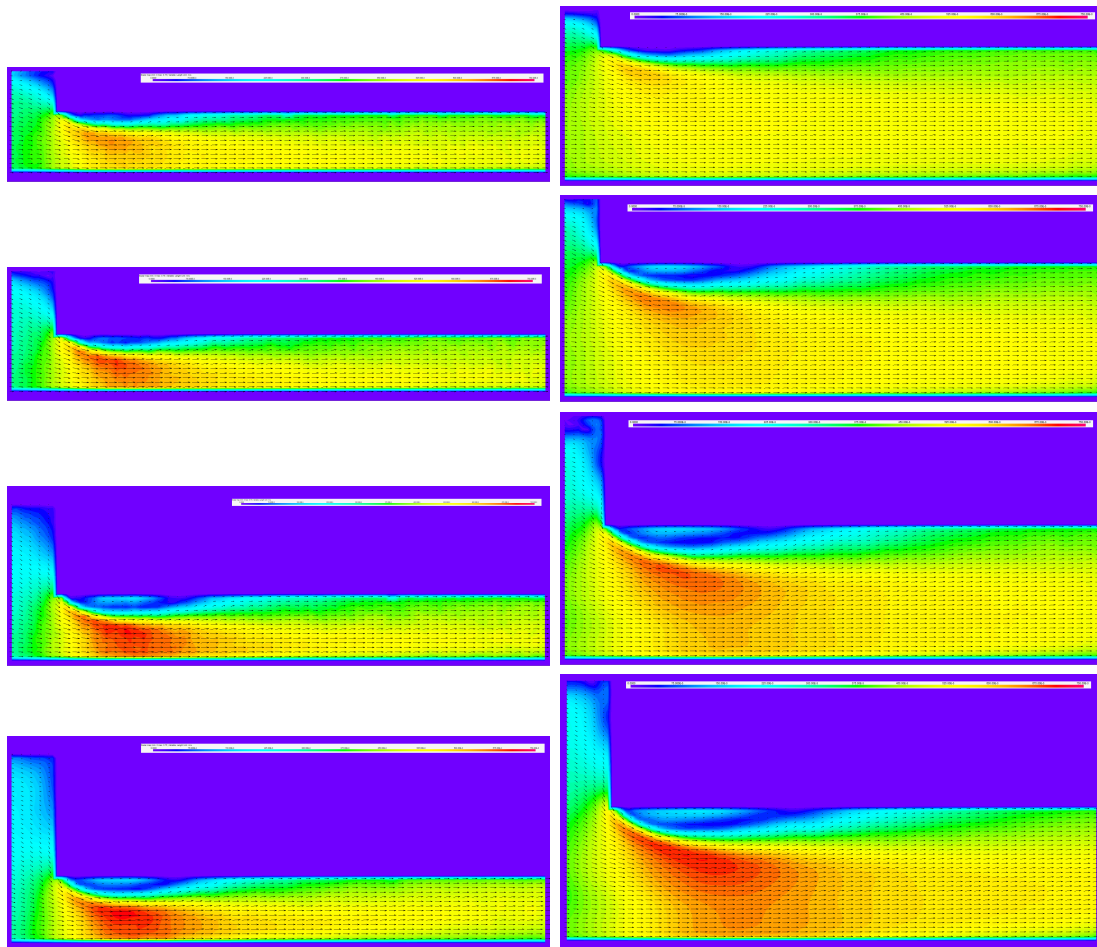
Obrázek 8.2: Postup přípravy snímku pro PIV, *a)* surový vstupní snímek, *b)* *Image Mean* - snímek průměrného pozadí objevující se na každém vstupním snímku, *c)* *Image Arithmetic* - od snímku *a)* odečtené pozadí snímku *b)*, *d)* *Adaptiv PIV* - vytvoří z dat vektory okamžitých rychlostí, *e)* *Vector Validation* - ověření velikosti vektorů - vektory mimo rozsah jsou vymazány, *f)* *Vector Interpolation* - interpolace chybějících vektorů, *g)* *Image Masking* - vytvoření masky pro odstranění vektorů mimo oblast zájmu, *h)* *Vector Statistics* - výsledné vektorové pole rychlostí.



Obrázek 8.3: Vektorová pole časově středních rychlostí stavů s průřezovou rychlostí $\bar{U} = 0.234$ m/s. Barevná škála odpovídá rychlostem z měření v rozmezí od 0 ÷ 0.35 m/s. V levém části obrázku jsou převýšení od shora 6, 8, 10 a 12 cm při výšce kanálu $D = 4$ cm. V pravé části jsou od shora 10, 12, 14 a 16 cm při výšce kanálu $D = 8$ cm.



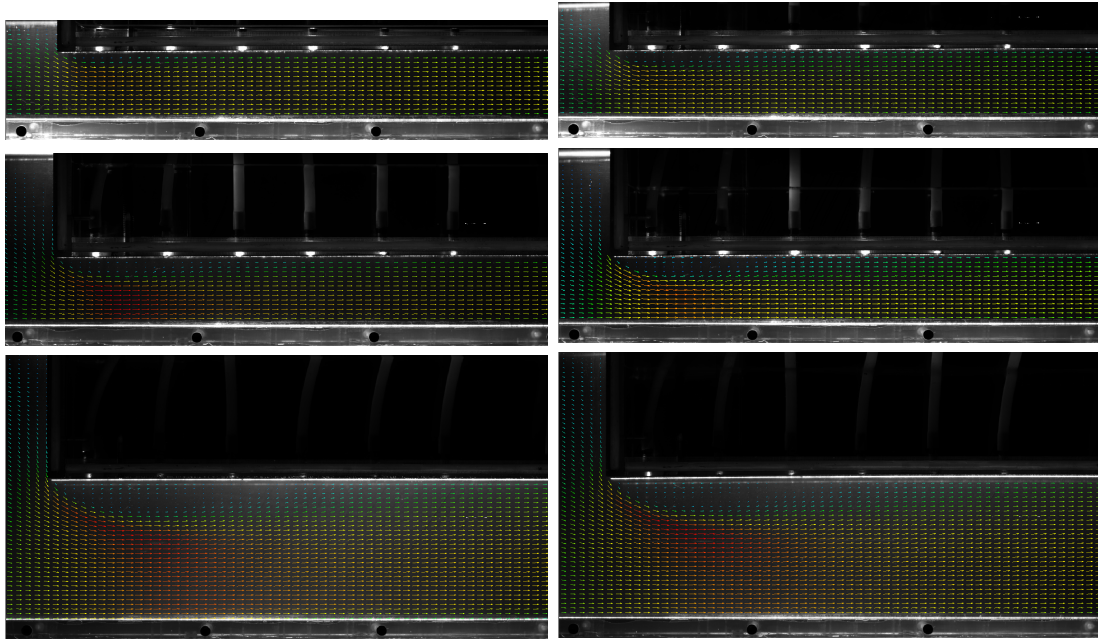
Obrázek 8.4: Vektorová pole časově středních rychlostí stavů s průřezovou rychlostí $\bar{U} = 0.313$ m/s. Barevná škála odpovídá rychlostem z měření v rozmezí od 0 ÷ 0.45 m/s. V levém části obrázku jsou převýšení od shora 6, 8, 10 a 12 cm při výšce kanálu $D = 4$ cm. V pravé části jsou od shora 10, 12, 14 a 16 cm při výšce kanálu $D = 8$ cm.



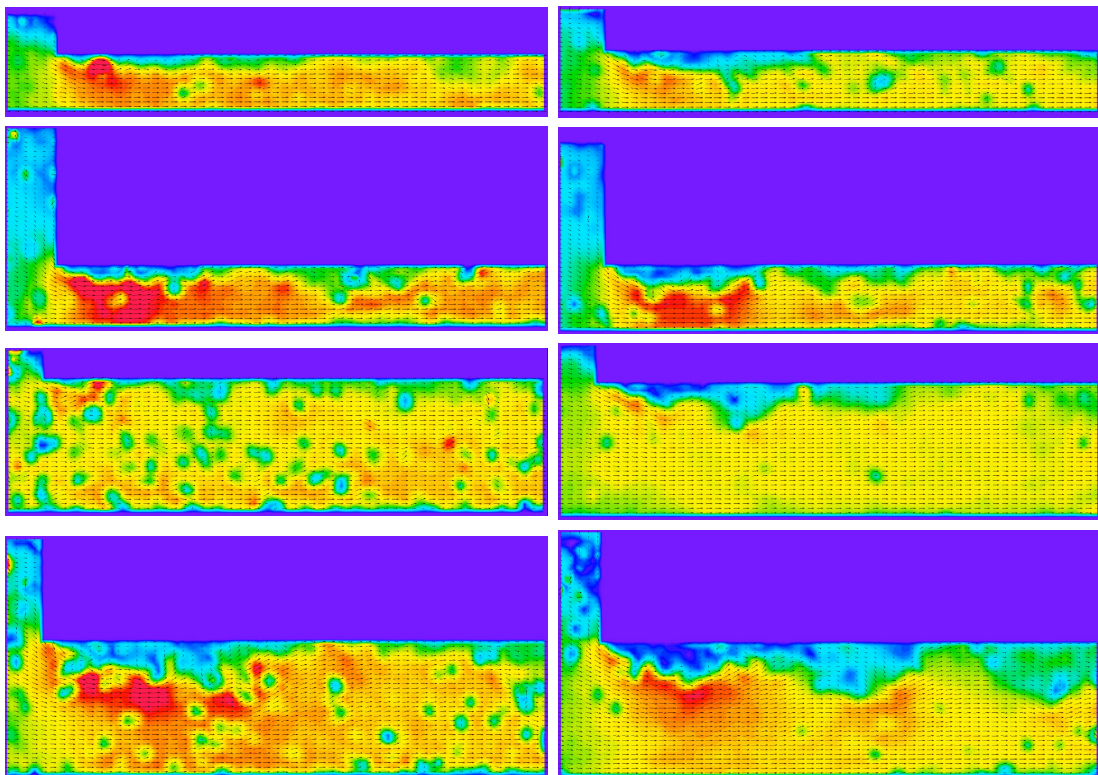
(a) Q1.5_D4

(b) Q3_D8

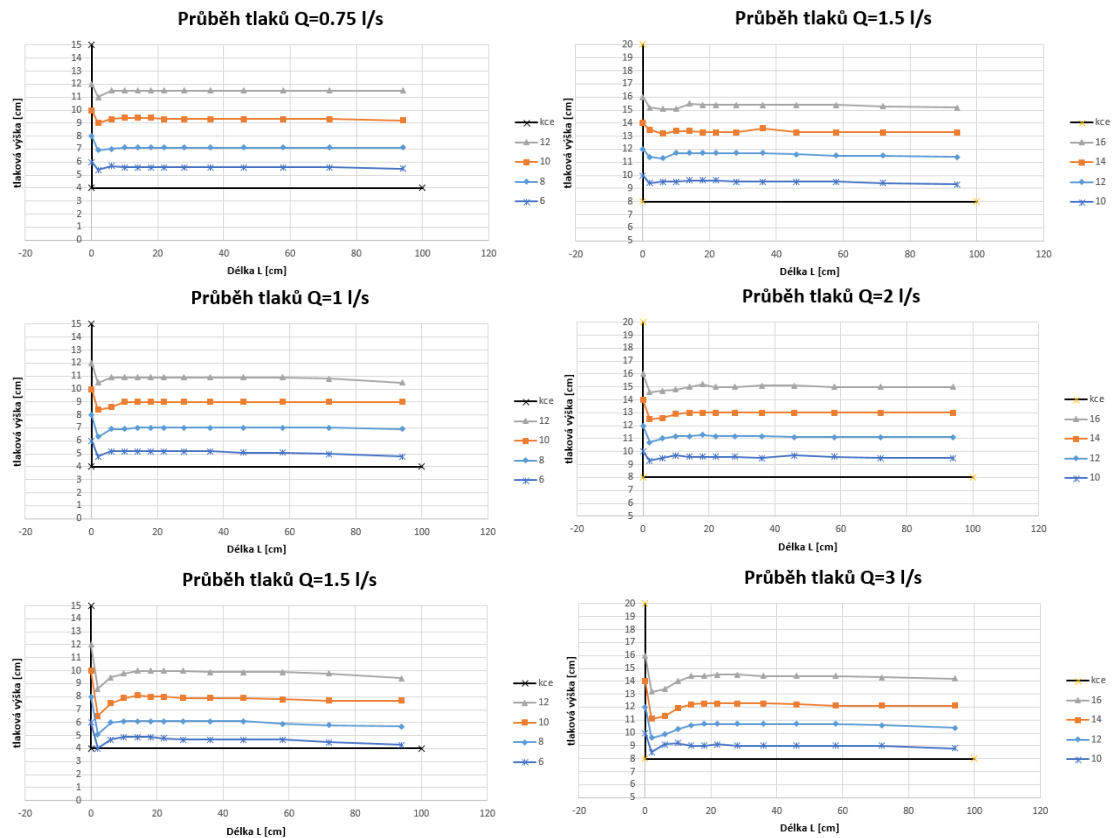
Obrázek 8.5: Vektorová pole časově středních rychlostí stavů s průřezovou rychlostí $\bar{U} = 0.469$ m/s. Barevná škála odpovídá rychlostem z měření v rozmezí od $0 \div 0.75$ m/s. V levém části obrázku jsou převýšení od shora 6, 8, 10 a 12 cm při výšce kanálu $D = 4$ cm. V pravé části jsou od shora 10, 12, 14 a 16 cm při výšce kanálu $D = 8$ cm.



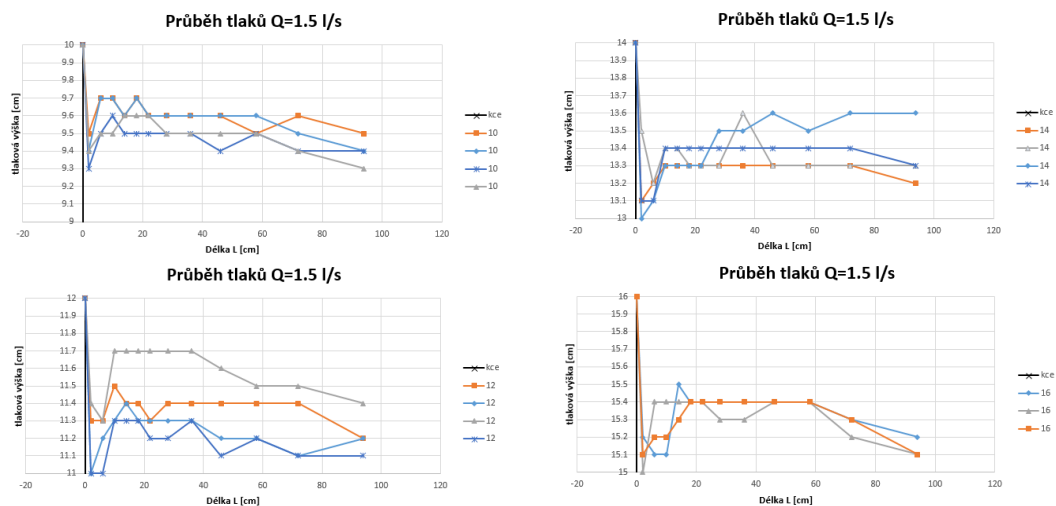
Obrázek 8.6: Příklady různých vektorových polí časově středních rychlostí vložené do fotografie experimentu, bylo možné udělat jako jeden z výstupů analýzy v programu od Dantec Dynamics.



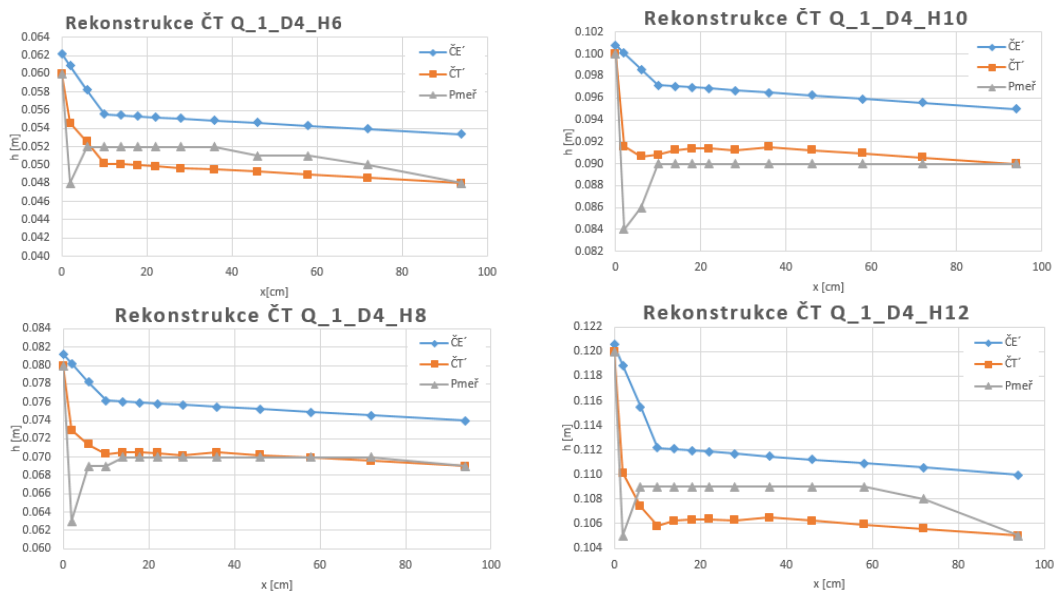
Obrázek 8.7: Příklady různých vektorových polí okamžitých rychlostí. Barevná škála od nejnižší rychlosti v modré až po největší rychlost v červené.



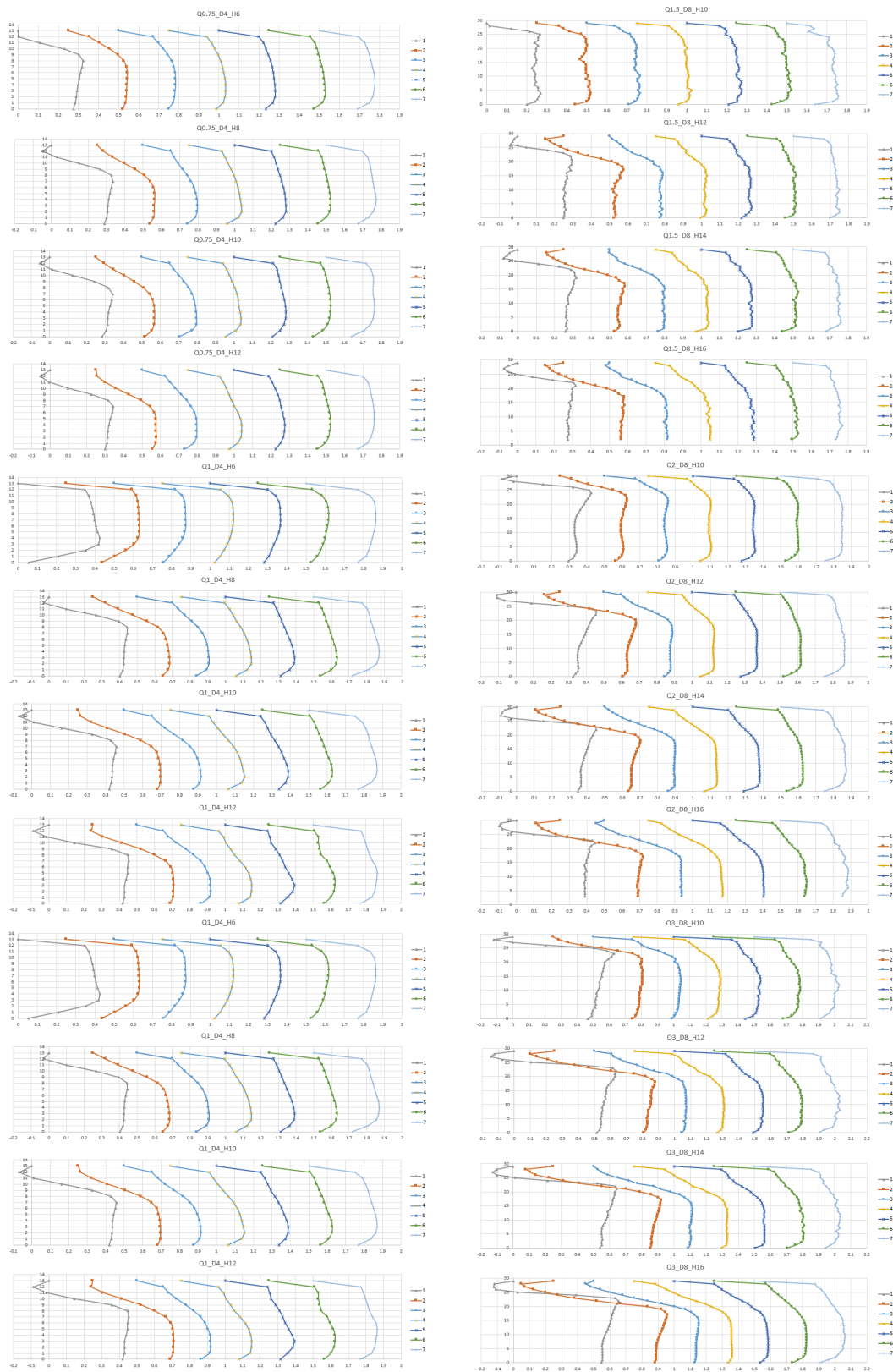
Obrázek 8.8: Hodnoty měřených tlaků vynesené do grafu. Vlevo pro výšku kanálu $D = 4$ cm, vpravo výška kanálu $D = 8$ cm.



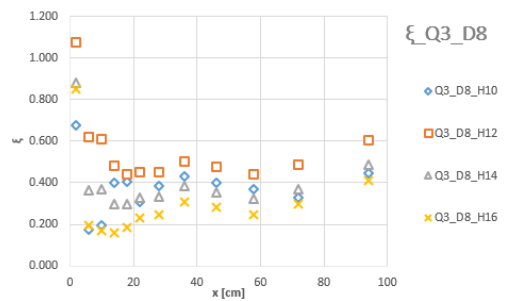
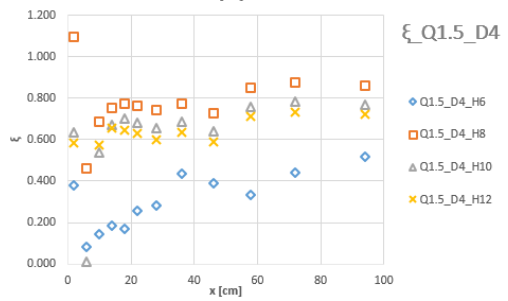
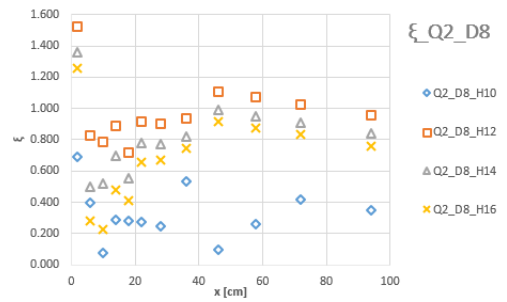
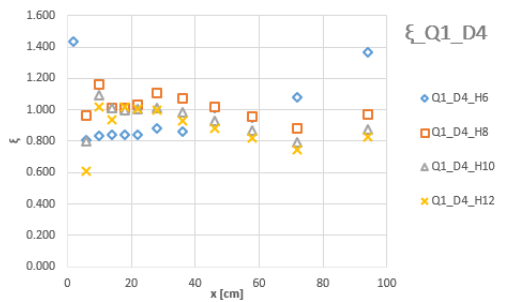
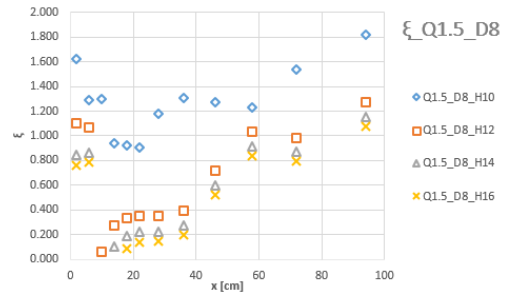
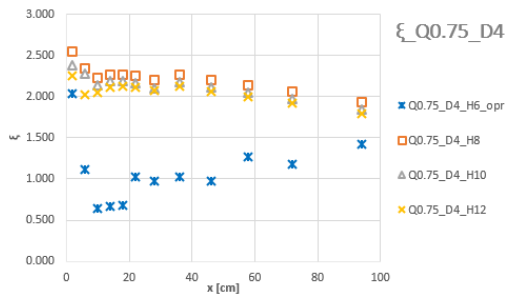
Obrázek 8.9: Z toho důvodu, že některé průběhy tlaků vykazovaly divné chování, bylo provedeno opakované kontrolní měření na jednom kanále $D = 8$ cm při průtoku $Q = 1.5$ l/s. Závěrem opakování je, že původní měřené hodnoty byly naměřeny správně a nebylo potřeba výsledky analýz měnit.



Obrázek 8.10: Rekonstrukce čáry energie. Rekonstrukce reálných tlaků z předpokladu lineárního průběhu ztrát třením po délce od konce úplavu ke konci kanálu. Místní ztráta po délce úplavu byla aproximována lineárním modelem, protože není znám skutečný průběh ztrát v tomto místě. Legenda šedá linie (Δ) $Pm\check{e}ř$ jsou měřené tlaky v tlakových odběrech, modrá linie (\diamond) rekonstruovaná čára energie $\check{C}E'$, oranžová linie (\square) čára rekonstruovaných reálných tlaků $\check{C}T'$.



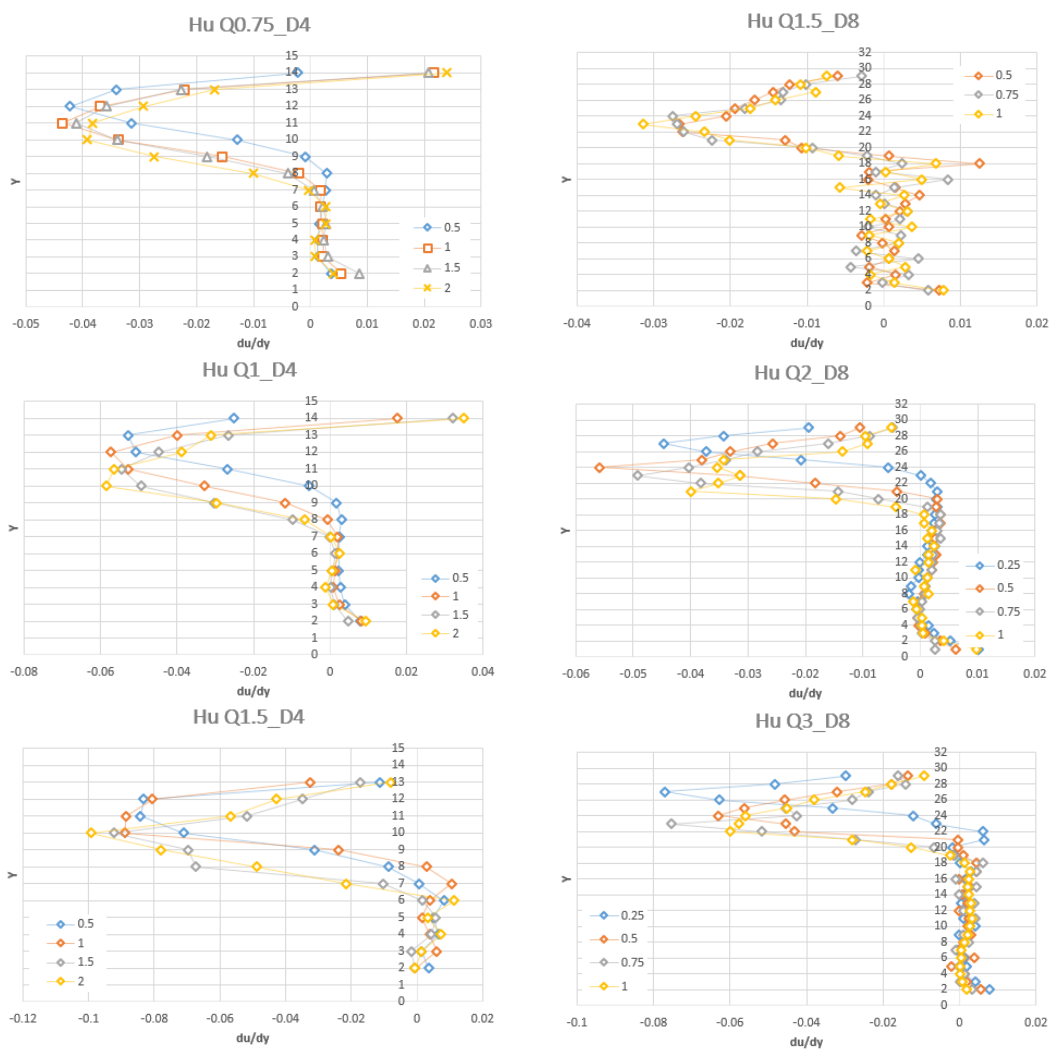
Obrázek 8.11: Časově střední rychlostní profily v místě tlakových odběrů. Vlevo pro kanál $D = 4$ cm, vpravo výška $D = 8$ cm. Přepočet rychlosti pro zobrazení v jednom grafu $0.25n + \bar{u}_i$, kde $n \in \langle 0; 6 \rangle$.



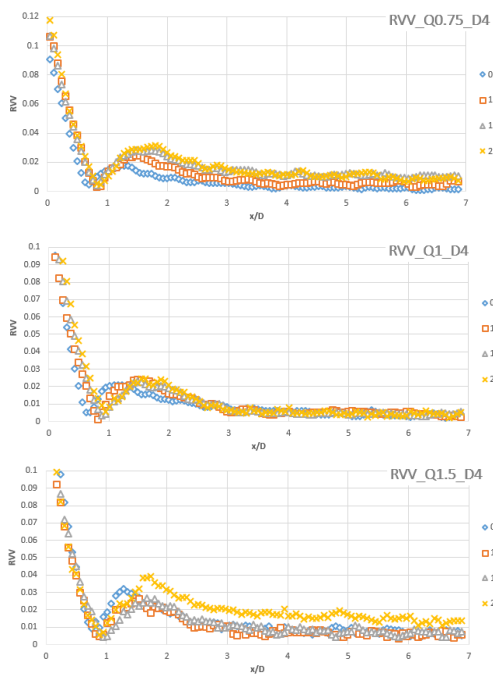
(a) D4_ součinitel ξ

(b) D8_ součinitel ξ

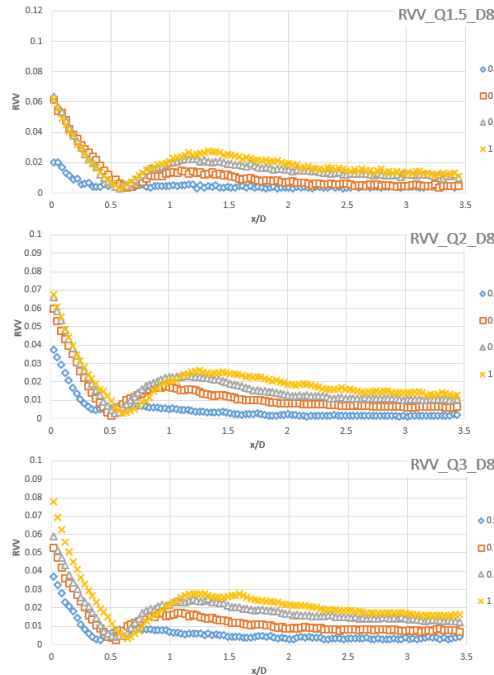
Obrázek 8.12: Součinitel místní ztráty ξ



Obrázek 8.13: Vykreslení gradientu horizontálních rychlostí. Legenda odpovídá poměru s/D . Minimální hodnota gradientu odpovídá největší změně sousedící dvojice rychlostí \bar{u} . Osa y odpovídá číslu řádku matice bodových rychlostní Y .

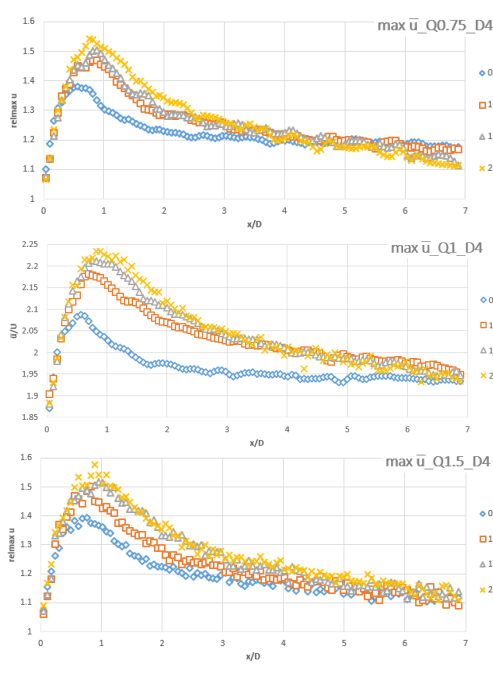


(a) D4_RVV

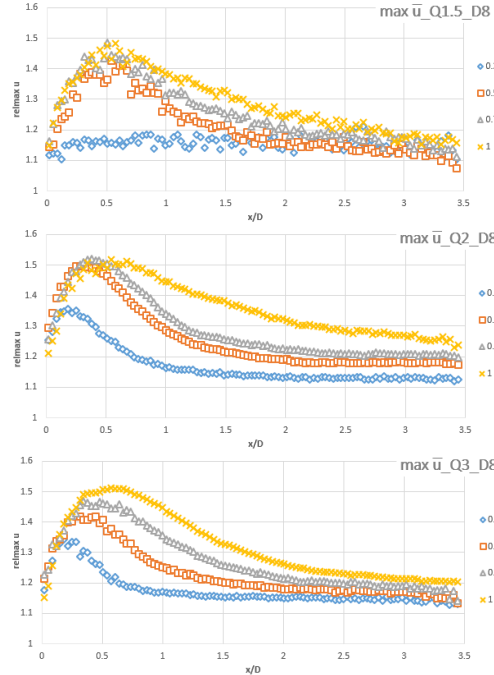


(b) D8_RVV

Obrázek 8.14: Relativní vertikální rychlost RVV



(a) D4_max \bar{u}



(b) D8_max \bar{u}

Obrázek 8.15: Maximální rychlost \bar{u}

ČVUT Fakulta stavební

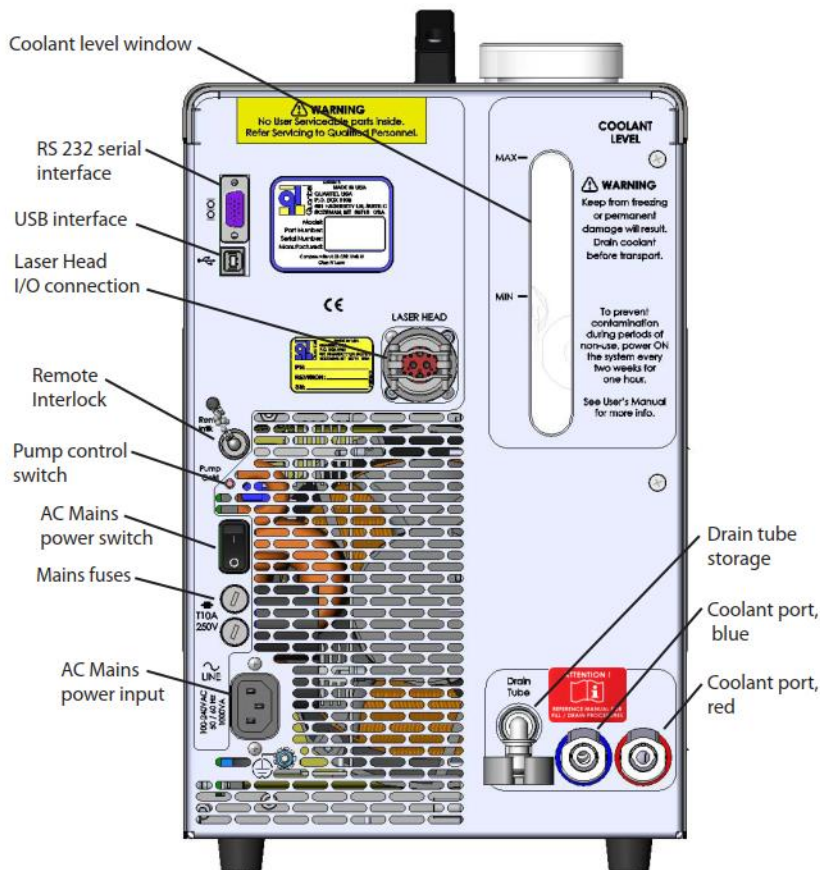
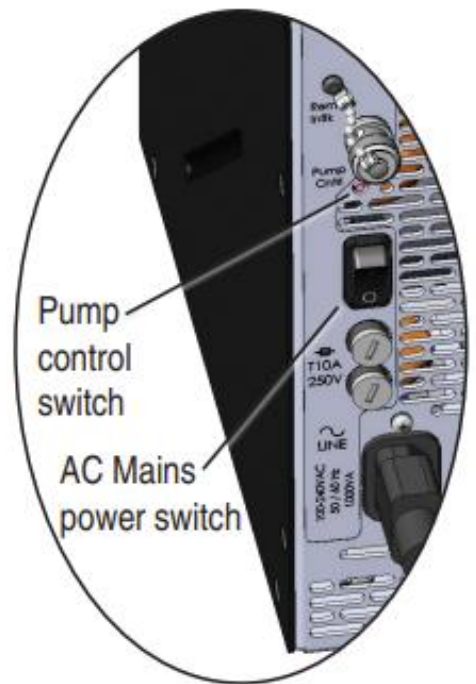
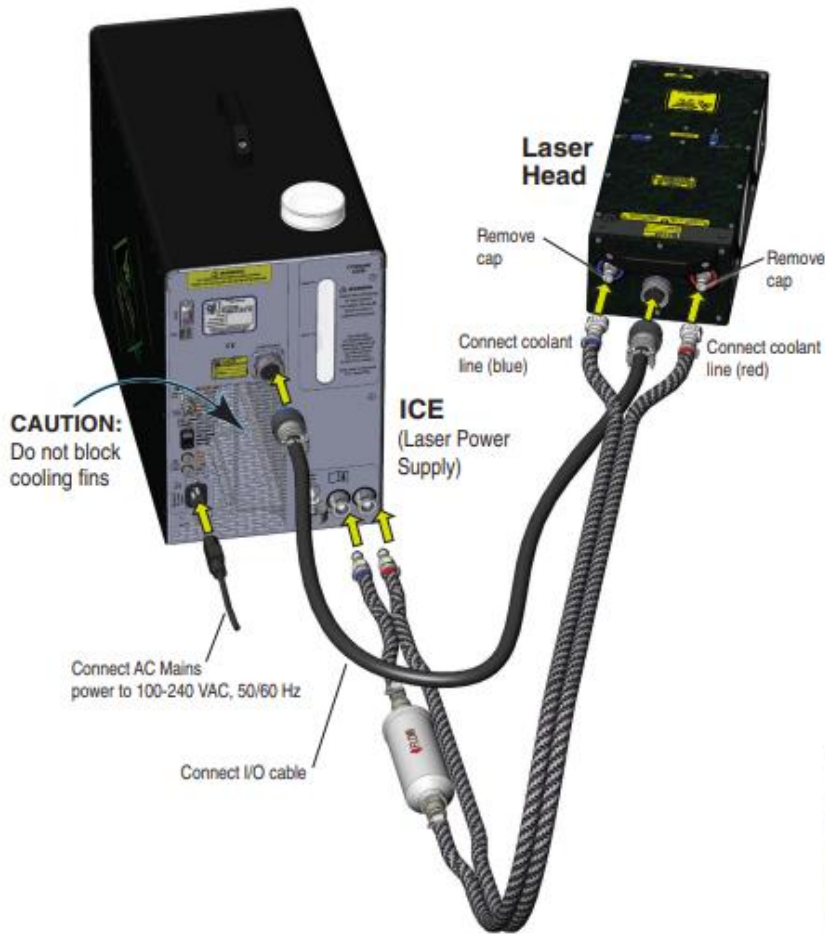
Dantec PIV

Návod na používání PIV na 2D rovině při tlakovém proudění

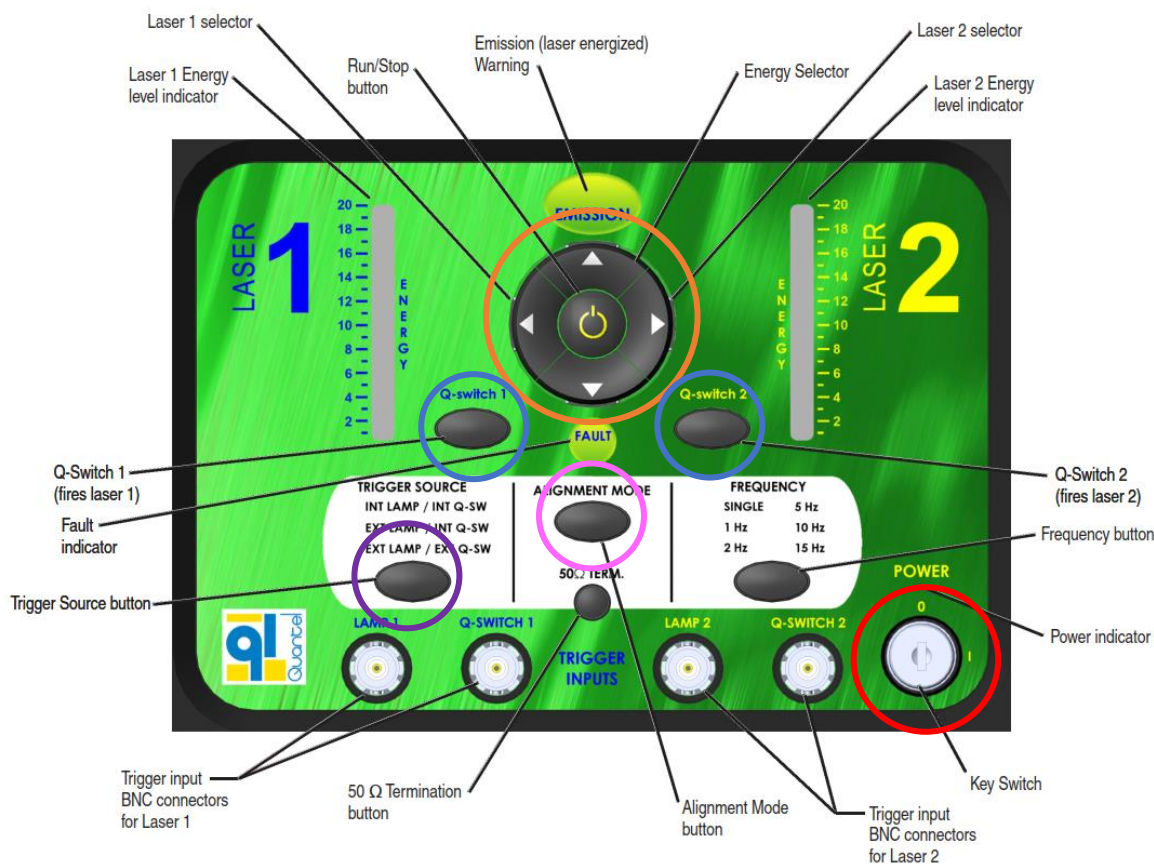


Kolář, David
[12/2022]

Zapojení



Zapnout vzadu a nastartovat klíčkem a zapnout tlačítkem 



Interní mód

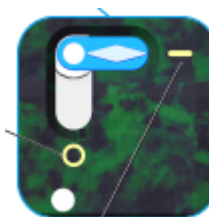
- testovací režim pro nastavení sestavy
- proklikat tlačítkem (INT LAMP/INT Q-SW)
- stisknout alignment mode („bezpečný mód pro interakci s optikou“)

Ovládání laseru

- ^ v změna energie
- < > překlikávání mezi lasery
- Zapínání laseru Q-switch 1 a 2

Seřízení optiky

- Otevřít krytky na laserové hlavě [0-I] (! Laser běží na „bezpečnou“ energii)
- Kolmost na stěnu (seřízení stojanu hlavy pomocí vodováhy, předozadní směr)
- Rovnoběžnost listu (otočení optiky po uvolnění dvou šroubku, natočení celého stojanu)
- Zaostření listu
 - o Přiložím papír k modelu
 - o Optikou ze zelenými kroužky nastavím správný tvar (tloušťka)
 - o ! laser běží v „bezpečném módu“, ale i tak pozor. **Nekoukat do optiky.**



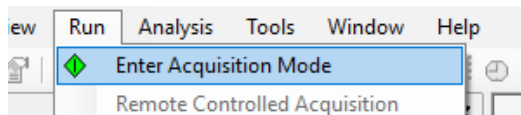
Zapnout synchronizační modul

DantecStudio

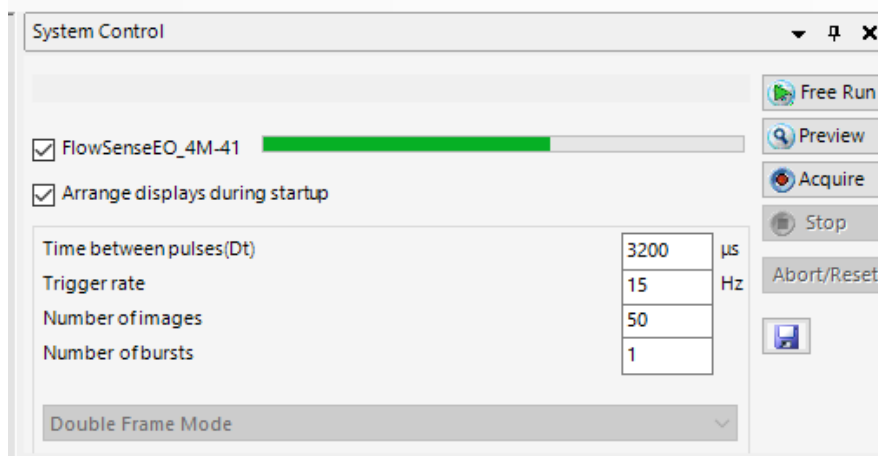
- New database (založení nové sestavy)
- New project (nové měření na sestavě)

Synchronizace kabelů

- View -> synchronisation cabel
 - o Podle obrázku zapojit kabely
- Run -> Enter Acquisition mode (načtení aktivních zařízení)

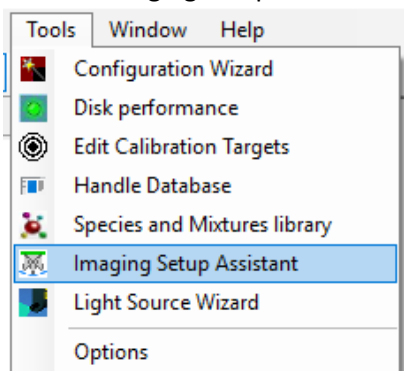


- Free Run

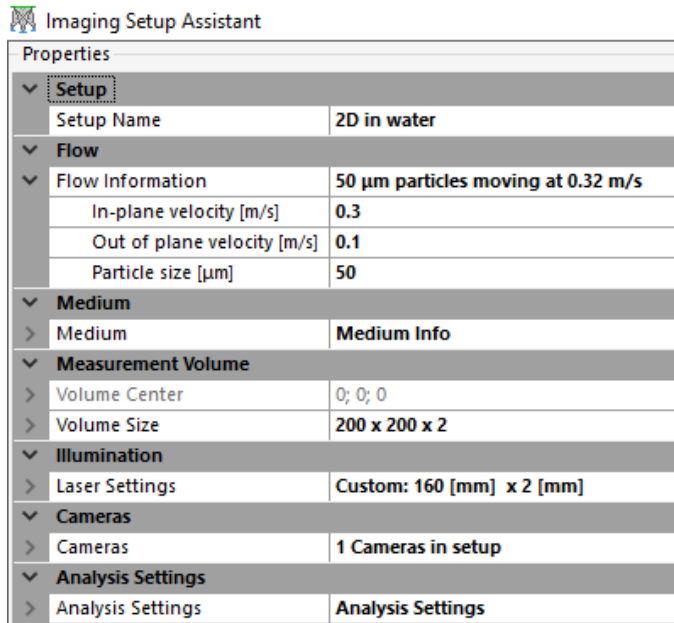


Odhad Δt

- Tools -> imaging setup Assistent



- o Vyplnit tabulky (program sám odhadne vhodné Δt)

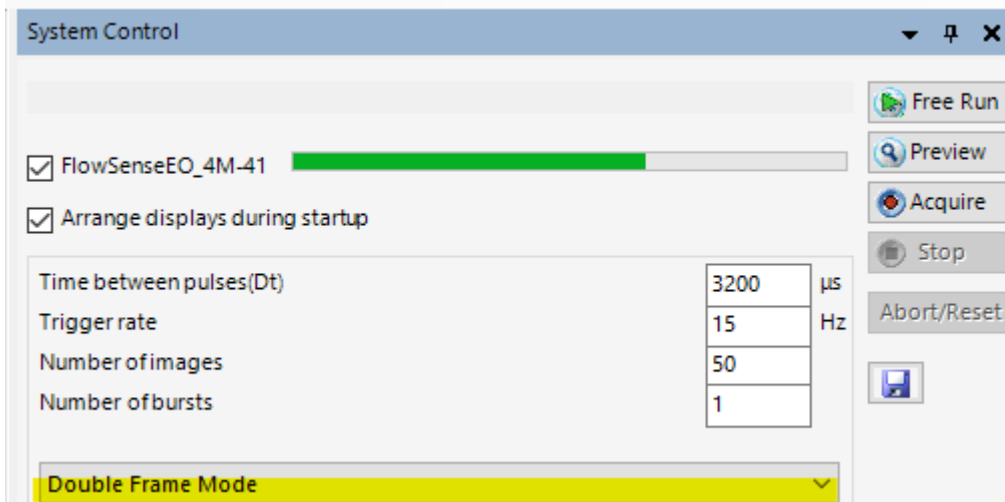


-
- Záložka setup information

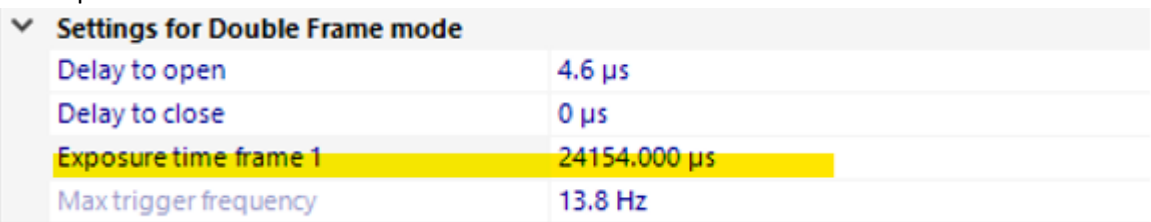
Δt bude jiné pro v_{max} a v_{min}

Nastavení kamery

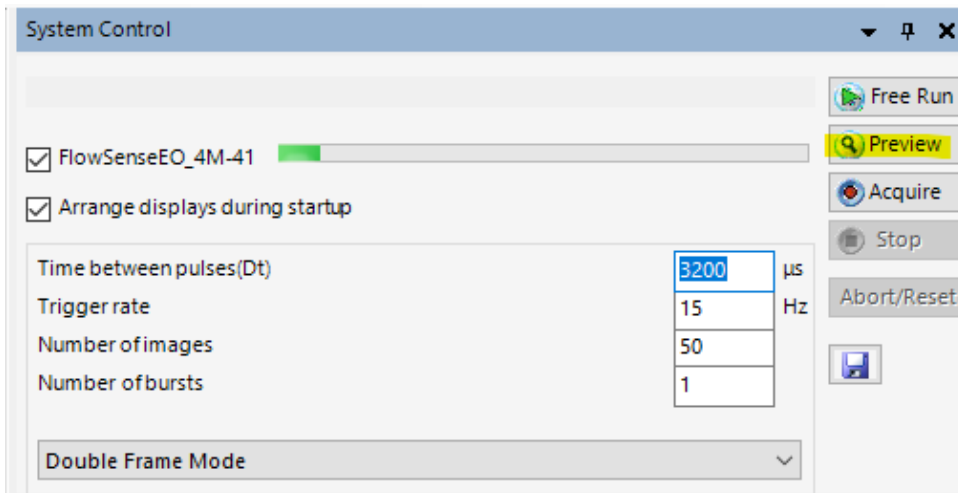
- Zapnutí double frame mode (přepínání mezi snímky – klávesa T)



-
- Nastavit intenzitu na minimum (kolečko s šipkami, laser 1 -2 energie, laser 2 -1 energie)
- Clonu na kameře téměř otevřít, přibližně 2.8
- Max exposure time



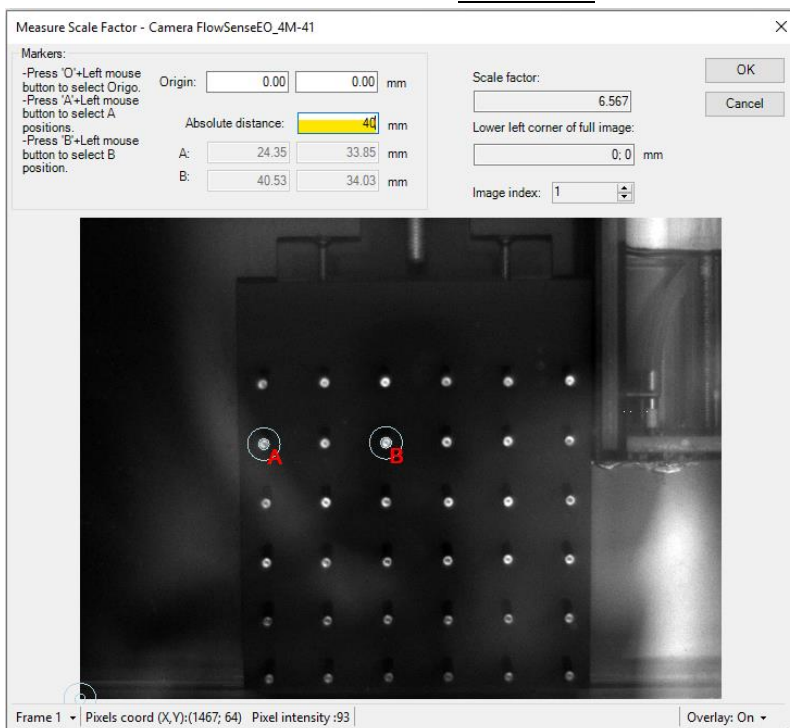
- proklikat tlačítkem (EXT LAMP/EXT Q-SW) (=>! zapne se plný režim)
- Zapnout laser (modrá tlačítka Q-switch)
- Spustit Preview



-
- Pozice kamery k požadovanému obrazu (nahoru/dolu, dopředu/dozadu)
- Ostržit optikou kamery podle PC na laserový list (= malé ostré částice)
- -> nastavit clonu 2.8-4

Kalibrační snímek

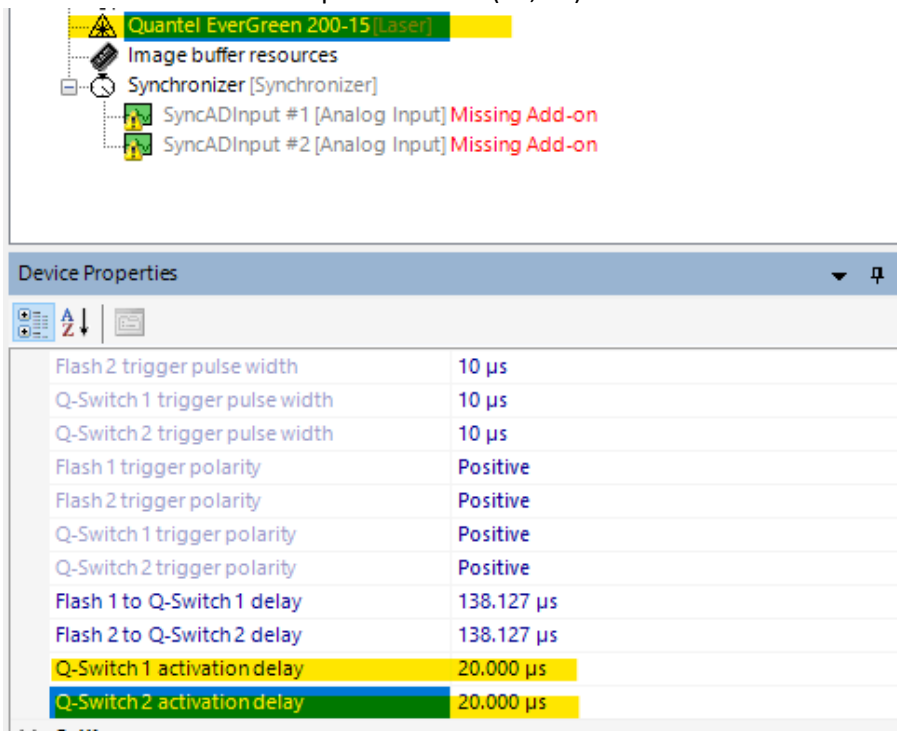
- Single frame mode
- Vypnout laser (modrá tlačítka Q-switch)
- Vložit kalibrační mřížku do modelu
- spustit Preview
- pravé tlačítko -> color map and histogram (nastavit kontrast)
- Záložka acquirerd data -> save for calibration
- Database browser -> images -> measure scale factor
- Držím klávesu A -> posunu bod A
- Držím klávesu B -> posunu bod B
- Stanovím reálnou vzdálenost -> OK -> scale factor



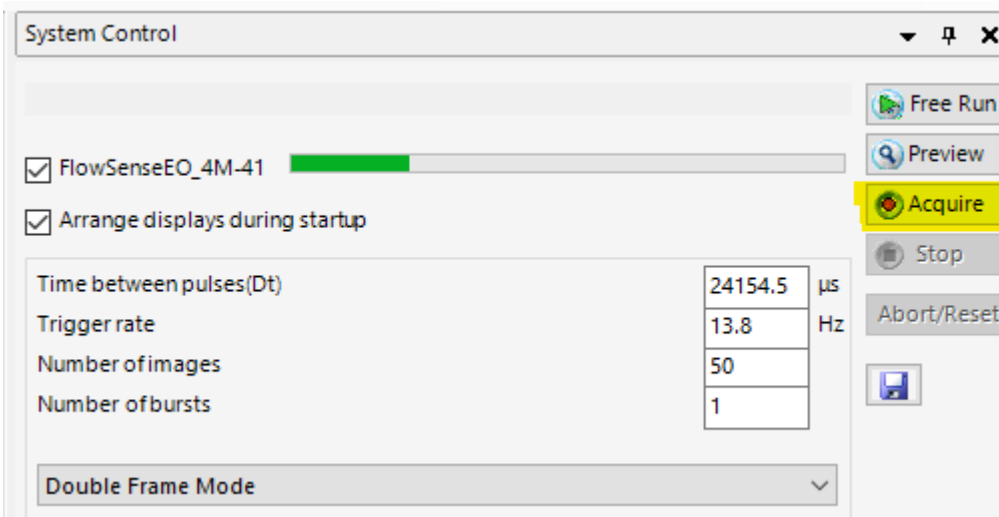
-
- Vyndat mřížku

Měření

- Zapnout laser (modrá tlačítka Q-switch)
- Je nastavené Δt , počet snímků, double frame mode
- Nastavení zahřívání laseru pro stabilizaci (20, 20)



- Zapnout laser (modrá tlačítka Q-switch)
- Měření



Analýza

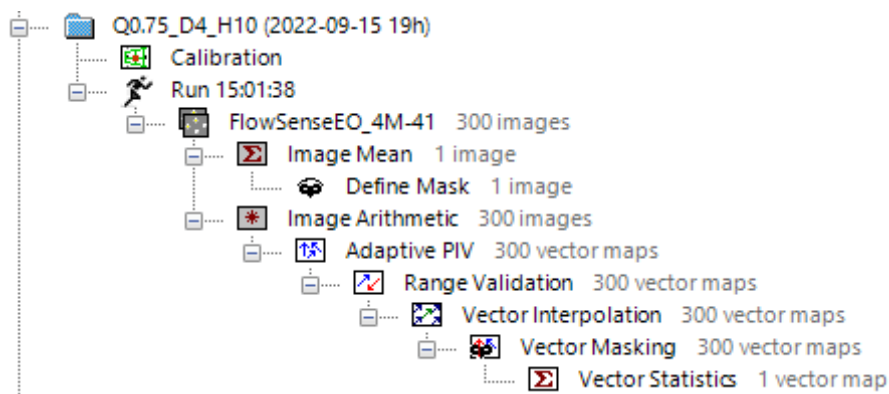
- Záložka acquierd data -> save in Database
- Právě tlačítko myši
- Analysis -> Make mean
- Toggle Image Mean
- Analysis -> image aritmecit -> Patern - Operandp

Operand: Another Image

Not in use Minimum Maximum
 Parent + Operand Parent - Operand Operand - Parent
 Parent * Operand Parent / Operand Operand / Parent

Operand = Another image map from database:

- - o PIV signal -> adaptive PIV
 - Grid size (32x32, 64x64)
 - Min area (32x32, 64x64)
 - Max area (128x128, 256x256)
- Překrytí části měření (překrytí neměřené části, která ve výsledcích ruší)
 - o Analysis -> masking -> polygon
 - o Analysis -> vector masking (přidání překrití k vektorům)
- Statistics
 - o Analysis -> statistics -> vector statistics



Export

- Obrázky
- Textový soubor *.csv
- video