

ČVUT v Praze, Fakulta Strojní
Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky



Bakalářská práce

Měření proudění optickými metodami v modelu aneurysmatu

Matěj Charouz

Vedoucí bakalářské práce : doc. Josef Adamec CSc.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno: **Matěj Charouz**

Program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Obor: **bez oboru**

Název česky: **Měření proudění optickými metodami v modelu aneurysmatu**

Název anglicky: **Measurement of flow by optical methods in model of aneurysm**

Zásady pro vypracování:

- Upravte experimentální trať pro měření optickými metodami na daném modelu.
- Provedte měření rychlostního pole v rovině symetrie aneurysmatu pro různé průtoky.
- Provedte měření pole koncentrace značkovací látky v rovině symetrie aneurysmatu pro různé průtoky.
- Výsledky měření zpracujte a kriticky zhodnoťte.

Rozsah průvodní zprávy: přibližně 30 stran

Rozsah grafických prací:

Seznam doporučené literatury:

Dle průběžných konzultací s vedoucím práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Kolínský

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou práci včas, je povinen tuto skutečnost předem písemně zdůvodnit, pokud bude omluva (předaná prostřednictvím studijního oddělení děkanovi) děkanem uznána, určí děkan studentovi náhradní termín konání státní závěrečné zkoušky (zůstávají dva termíny SZZ). Pokud tuto skutečnost student řádně neomluví, nebo omluva nebude děkanem uznána, určí děkan studentovi termín pro opakování státní závěrečné zkoušky. SZZ je možné opakovat pouze jednou (SZŘ čl. 22, odst. 3, 4)

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

.....
Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
Vedoucí Ú 12112

.....
Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 30. 4. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především Ing. Janu Kolínskému a doc. Josefu Adamcovi za odborné vedení, cenné rady a pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat také dalším zaměstnancům Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky, kteří byli ochotni podělit se o své pracovní a pedagogické zkušenosti.

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřená na oblast hemodynamiky, zejména se soustředí na problematiku proudění v nesymetrickém aneurysmatu. Aneurysma je nežádoucí výběžek (výrůstek) na tepně nebo žíle pacienta, který může v krajních případech způsobit smrt.

Tato práce je založena na experimentu, jehož úkolem je popsat chování tekutiny při různých rychlostech proudící tekutiny. Cíl práce je změřit a vyhodnotit jednotlivá proudová pole pro pevně stanovené rychlosti (průtoky).

Klíčová Slova

Aneurysma, hemodynamika, hydromechanika, měření proudového pole

Abstrakt

This bachelor thesis is focused on field of hemodynamics, mainly on issues of flowing in asymmetric aneurysm. Aneurysm is undesirable prominence (protuberance) on artery or vein of patient, which, in utmost case, can cause even death.

This thesis is based on experiment, whose task is to describe behavior of fluid flowing by various velocities. Aim of the thesis is to measure and evaluate each flow field for strictly given velocities(flow rates).

Keywords

Aneurysm, hemodynamics, hydromechanics, measurement of flow field

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
\bar{v}	Střední rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
\dot{Q}	Průtok	$[ml \cdot s^{-1}]$
U	Napětí na čerpadlu	[V]
f	Frekvence	[Hz]
w_x	Rychlost částic ve směru x	$[m \cdot s^{-1}]$
w_y	Rychlost částic ve směru y	$[m \cdot s^{-1}]$

Obsah

V Praze dne 30. 4. 2015	4
1. Úvod	10
1.1 Motivace	10
1.2 Cíl práce	10
1.3 Úvod do problematiky měření.....	11
1.4 Cévní soustava	11
1.5 Aneurysma	12
1.6 Rozdělení aneurysmat	13
2. Použité optické metody	14
2.1 Metoda PIV (Particle Image Velocimetry)	14
2.2 Metoda PLIF (Planar laser-induced Fluorescence)	15
3. Výroba experimentální trati.....	15
3.1 Výroba modelu aneurysmatu	15
3.2 Výroba přípravku pro usazení aneurysmatu	16
3.3 Sestavení trati	17
4. Popis PIV experimentu.....	18
4.1 Výběr řezu	19
4.2 Volba jednotlivých Reynoldsových čísel pro daný experiment.....	20
4.3 Výpočet základních parametrů pro metodu PIV.....	20
4.3.1 Výpočet středních rychlostí v cévě	20
4.3.2 Výpočet průtoku.....	21
4.3.3 Výpočet potřebného napětí na čerpadle	22
4.3.4 Shrnutí jednotlivých výpočtů	23
4.4 Naměřená data.....	23
5. Rychlostní pole změřené pomocí metody PIV	24
5.1 Zhodnocení výsledků PIV experimentu pro různé průtoky	24
5.1.1 Grafy pro Reynoldsova čísla 500 a 1000	24
5.2.2 Graf pro Reynoldsovo číslo 1500.....	26
5.2.3 Graf pro Reynoldsovo číslo 2000.....	27
5.3 Zhodnocení výsledků PIV experimentu pro různé časové okamžiky	28
5.3.1 Zhodnocení grafu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 0,05 sec	28
5.3.2 Zhodnocení grafu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 0,21 sec a 0,29 sec	29
5.3.3 Zhodnocení grafu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 0,45 sec	31
6. Popis PLIF experimentu	32
6.1 Zhotovení injekčního vstříku před model aneurysmatu.....	32
6.2 Kalibrace	32

7. Pole koncentrací změřené metodou PLIF.....	34
7.1 Zhodnocení výsledků PLIF experimentu pro Reynoldsovo číslo 500 v různých časových okamžicích.....	34
7.1.1 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 500 v čase 1 sec.	34
7.1.2 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 500 v čase 3 a 6 sec.	35
7.1.3 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 500 v čase 14 sec.	36
7.2 Zhodnocení výsledků PLIF experimentu pro Reynoldsovo číslo 1500 v různých časových okamžicích...	37
7.2.1 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 1000 v čase 0,5 a 1 sec.	37
7.2.2 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 1500 v čase 4 až 6 sec.....	38
7.3 Zhodnocení výsledků PLIF experimentu pro Reynoldsovo číslo 2000.....	40
7.3.1 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 0,5 a 1 sec.	40
7.3.2 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 2 a 5 sec.	42
7.3.2 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 2 a 5 sec.	43
8. Závěr	44
8.1 Činnosti předcházející vlastnímu měření	44
8.2 Vlastní experiment a diskuze výsledků	44
8.3 Návrhy na možné podrobnější zpracování problematiky	45
9. Seznam použité literatury	46
10. Přílohy.....	47

1. Úvod

1.1 Motivace

Tato Bakalářská práce je zaměřena na oblast hemodynamiky, což je věda zabývající se stacionárním i nestacionárním prouděním krve v krevním oběhu. Hlavní zkoumaný problém je takzvané Vakovité aneurysma (obr. 2a). Je to v podstatě nežádoucí výběžek (výrůstek) na tepně nebo žíle pacienta, který se může všelijak zanášet a zaplavovat, až se může zanést krevní sraženinou, která ohrožuje pacienta embolizací. Embolizací rozumíme pohyb vmetku (např. sraženiny) z místa, kde vznikl, do místa, které ucpe.

Tato bakalářská práce je zaměřená na vyšetření proudění v již zmíněném aneurysmatu.

1.2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je vyšetřit a popsat chování proudění pro jednotlivé rychlosti (průtoky) protékající kapaliny aneurysmatem pomocí optických metod, vyhodnotit a analyzovat proudová pole a navzájem porovnat výsledky již zmíněných metod. Další cíl byl, jak se bude chovat proudící kapalina v aneurysmatu v různých časových intervalech.

1.3 Úvod do problematiky měření

Měření tekutin může být provedeno několika způsoby. Zde se budeme zabývat měřením pomocí optických metod. Laserové optické metody umožňují měření kapalných i plynných látek. Cílem našeho měření je získání rychlosti částic. V průmyslu provádíme tyto měření z důvodů vyšetřování technických problémů a zjišťování technických specifikací, dále k ověřování a zlepšování vlastností objektů našeho zkoumání.

1.4 Cévní soustava

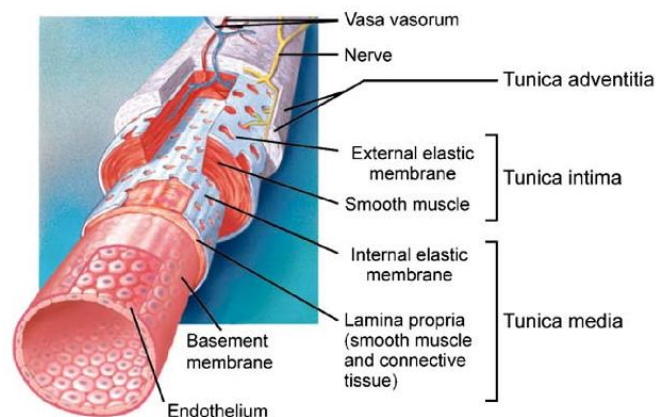
Funkcí cévní soustavy je zajišťovat oběh krve neboli pohyb tělních tekutin. Síla, která způsobuje oběh krve májí na svědomí rytmické stahy srdce. Krev se pohybuje v uzavřené soustavě, což znamená, že tepny a žíly jsou spojeny prostřednictvím menších cév v jeden uzavřený celek.

Tepny (arterie) vedou krev ze srdce, vystupují z komory. Jejich stěny jsou podobné žílám. Na vnější straně jsou tvořeny vazivovou tkání obsahující kolagenní vlákna. Další vrstva obsahuje velký počet elastických vláken a hladkou svalovinu (obr. 1).

Žíly (vény) na rozdíl od tepen přivádějí krev zpět do srdce a vstupují do síní. Stěny žil mají slabou svalovinu a v dolních končetinách mají kapsovité chlopně, které brání zpětnému toku krve.

Vlásečnice (kapiláry) jsou tenké cévy. Jsou to v podstatě spoje mezi tepnami a žilami umožňující výměnu látek mezi krví a tkáňovým mokem. Stěny vlásečnic jsou tvořeny jen jednou vrstvou plochých plochých výstelkových buněk, což je nejněvnitřnější vrstva všech cév.

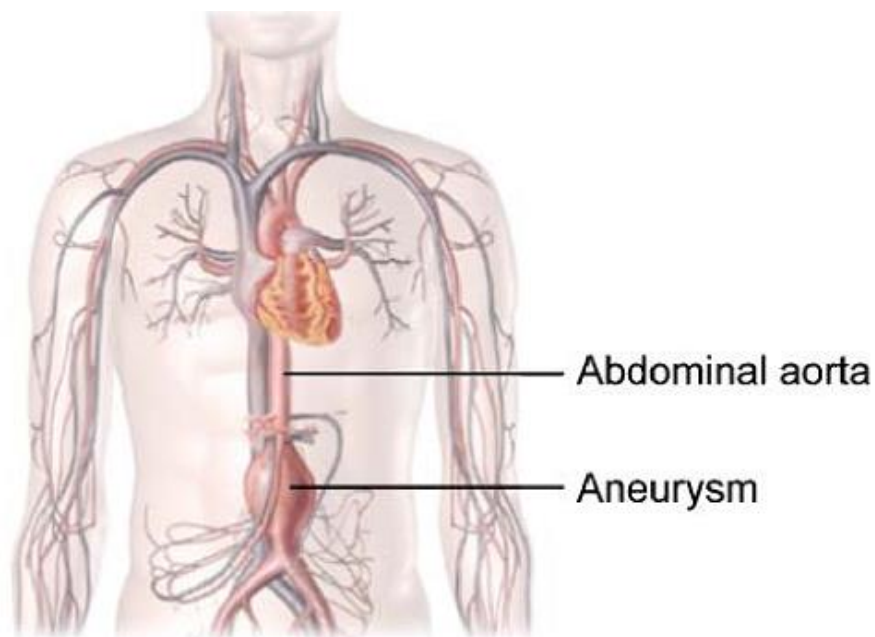
[1]



Obrázek 1 – Jednotlivé vrstvy cév [2]

1.5 Aneurysma

Aneurysma je v podstatě výduť (rozšíření) tepny. Je způsobeno několika příčinami. Patří mezi ně například vrozené změny na cévní stěně (zejména její zeslabení) nebo chorobnými procesy. Aneurysma se nejčastěji vyskytuje na největší tepně v těle (aortě), která přímo odstupuje ze srdce nebo na mozkových tepnách (obr. 2). Oba případy jsou velmi nebezpečné, protože je zde velký tlak proudící krve. Pokud dojde k prasknutí, které není včas poznáno a léčeno, může vést k rychlé smrti v důsledku vykrvácení [3].

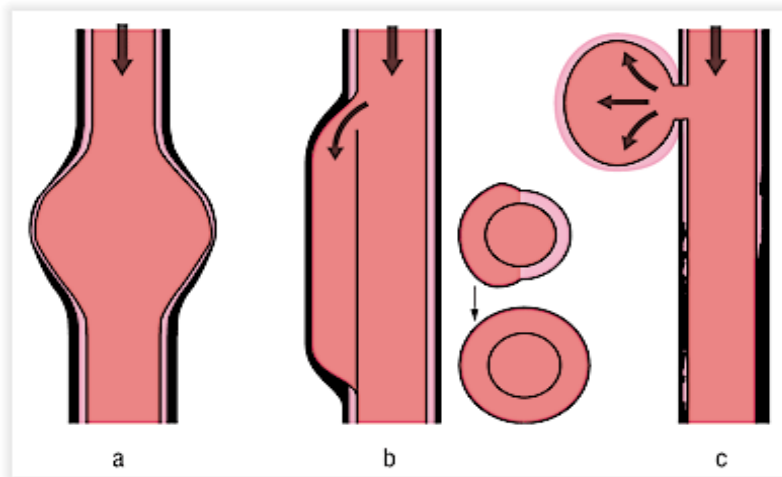


Obrázek 2 – Nejčastější výskyt aneurysmatu [2]

1.6 Rozdělení aneurysmat

Aneurysmata se rozdělují do třech hlavních skupin (viz. Obr.3) :

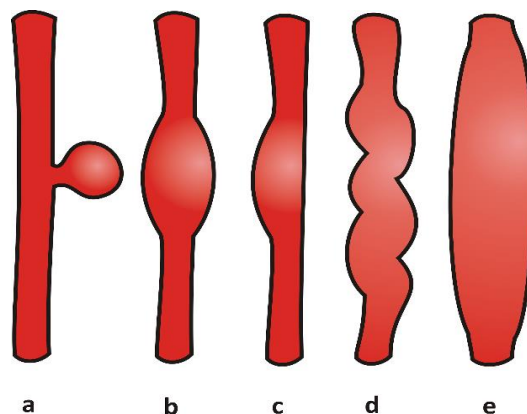
- a. **Pravé aneurysma** (*verum*)
- b. **Nepravé aneurysma** (*falsum*)
- c. **Disekující aneurysma** (*dissecans*)



Obrázek 3 – Typy aneurysmat [3]

Pravé aneurysma Vzniká prostým vyklenutím stěny. Podle tvaru se dále rozděluje na (viz obr.4):

- a. **Vakovité**
- b. **Člunkovité**
- c. **Vřetenité**
- d. **Difusní**
- e. **Hadovité**



Obrázek 4 – Typy aneurysmat [3]

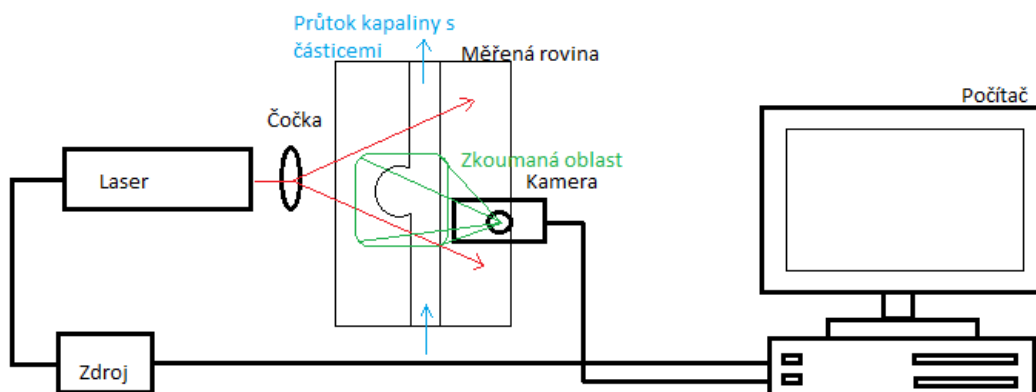
2. Použité optické metody

2.1 Metoda PIV (Particle Image Velocimetry)

Tato metoda patří mezi moderní vizualizační a měřicí metody pro výzkum proudění kapalin a plynů v laboratorních i provozních podmínkách. Jedná se vlastně o vizualizaci částic o stejné hustotě zavedené do proudící měřené kapaliny a následné počítačové zpracování obrazu s cílem získat vektorovou mapu rychlosti proudového pole. Zařízení pro metodu PIV je relativně nákladné a na trh se dostává v různých variantách. Typickým příkladem může být zařízení znázorněné na obrázku 1. Úzký světelný paprsek z pulzního laseru je válcovou čočkou upraven do tvaru světelného nože (listu), pomocí kterého se osvětluje vybraná rovina měřícího prostoru. Osvětlená rovina měřícího prostoru je ohraničena zorným polem záznamového zařízení umístěného kolmo na rovinu světelného nože. Zařízení obvykle vyžaduje práci v zatemněném prostoru. Jedno měření se provádí buď dvěma, nebo více krátkými po sobě jdoucími pulzy se známou frekvencí, čímž lze získat záběry obrazů částic v různých časových intervalech. Je-li známé měřítko zobrazení, mohou se pak v počítači exaktně určit polohy částic v každém záběru a vyhodnotit posunutí částic Δx a Δy a ve dvou na sebe kolmých směrech. Za známého časového intervalu mezi snímky $\Delta \tau$ a z posunutí částic Δx a Δy vyhodnocujeme rychlosti w_x a w_y v daném místě a to dle vztahů [5] :

$$w_x = \frac{\Delta x}{\Delta \tau} \quad (2.1.1)$$

$$w_y = \frac{\Delta y}{\Delta \tau} \quad (2.1.2)$$



Obrázek 5 - Schéma metody PIV

2.2 Metoda PLIF (Planar laser-induced Fluorescence)

Tato metoda je obdobná forma metody PIV. Jedná se o optickou diagnostickou metodu, kterou je možné použít pro měření koncentrace a teploty vzorku, ale také pro určení rychlosti proudění a rozložení tlaku ve zkoumaném objektu. Měření probíhá obdobně jako u metody PIV s tím rozdílem, že se do tekutiny nepřimíchávají částice o stejné hustotě, ale naopak se do kapaliny vstříkuje speciální fluorescenční roztok (např. Rodamin), který s „laserovým nožem“ spolu fluorescencuje. Na kameru se aplikuje barevný filtr, který znázorní již zmíněnou fluoerescenci [5].

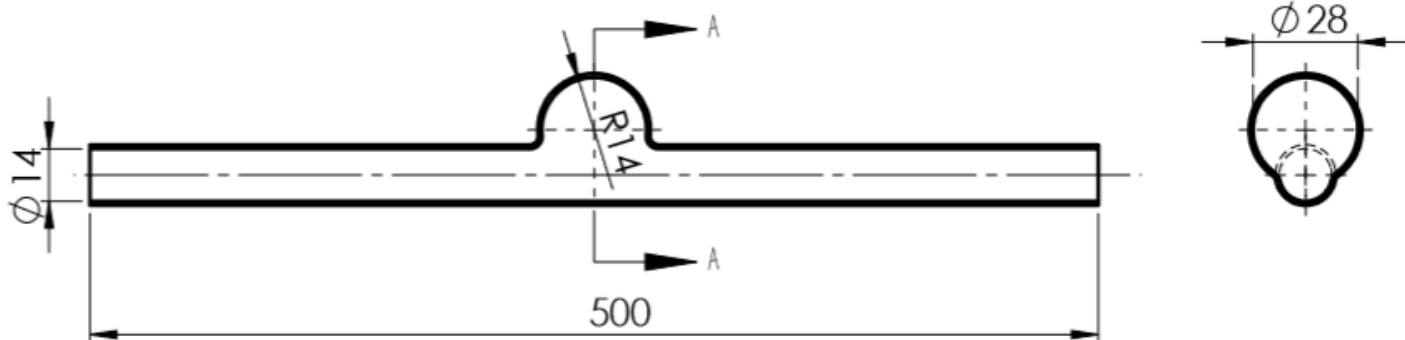
3. Výroba experimentální trati

3.1 Výroba modelu aneurysmatu

Nejdřív bylo nutné vyrobit model, který budeme zkoumat. Jedná se o model nesymetrického aneurysmatu se specifickými rozměry. Nejdříve se tento model musel realizovat jako CAD (obr. 6) model a z něho výsledný výkres (obr.7).



Obrázek 6 – 3D model aneurysmatu

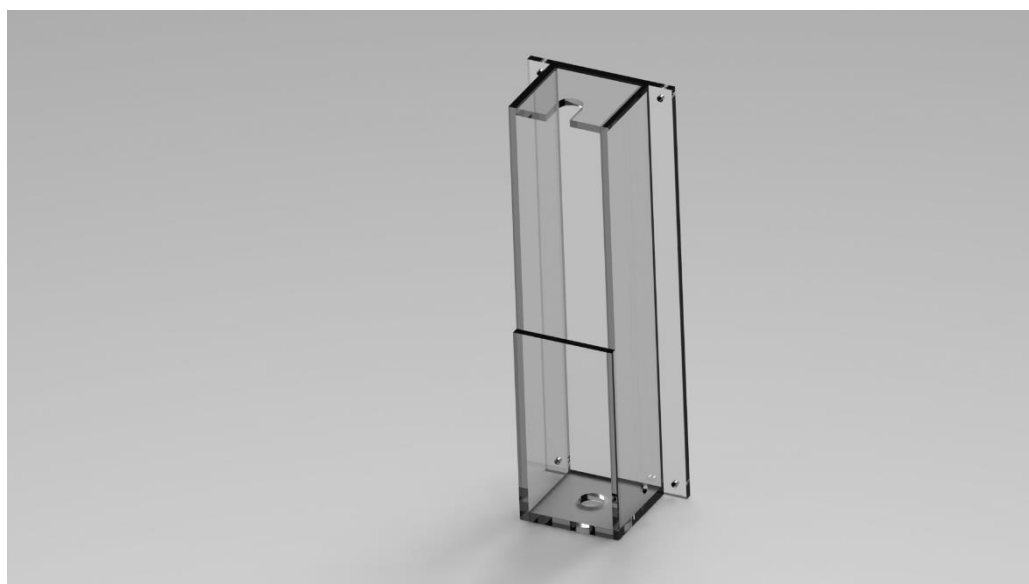


Obrázek 7 – Výkres modelu aneurysmatu

Dále bylo nutné tento model vyrobít co s největší přesností. Takže výkres s 3D modelem byl předán do rukou skláře který tento model podle výkresu zhotovil.

3.2 Výroba přípravku pro usazení aneurysmatu

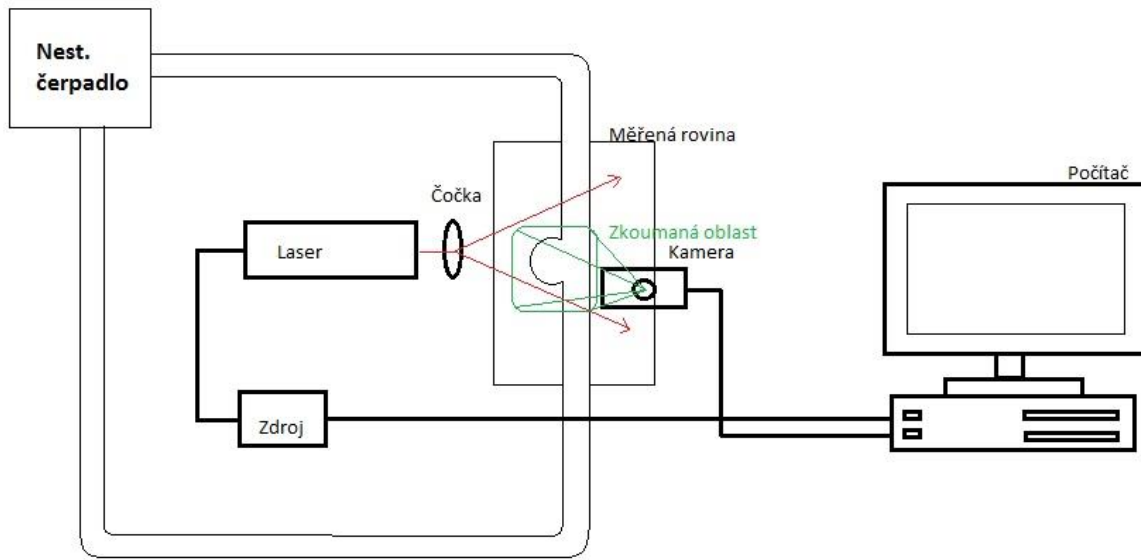
Postup byl obdobný jako při zhotovení modelu aneurysmatu. Nejdřív se vyrobil CAD model (obr. 8) a výkresy, podle kterých se tento přípravek následně vyřezal na laseru. Z jednotlivých dílů vyřezaných na laseru se pak pomocí speciálního lepidla slepil tento přípravek.



Obrázek 8 – 3D model přípravku

3.3 Sestavení trati

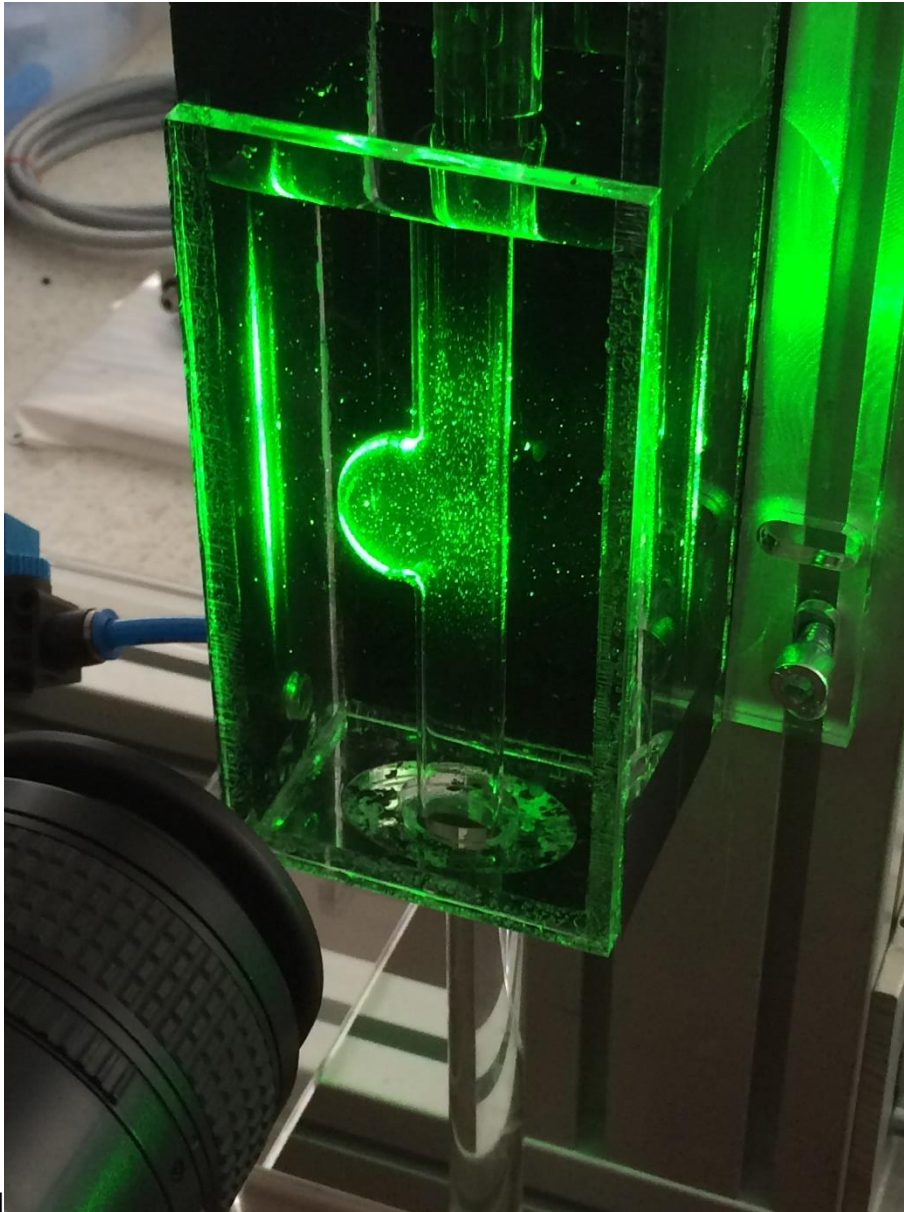
Pro provedení PIV a PLIF metody se musela sestavit experimentální trať. Jak už z popsaných metod (viz kap. 2) vyplývá, je zapotřebí nestacionární čerpadlo, model aneurysmatu, vysokorychlostní kamera, laser a částice o stejné hustotě jako je protékající tekutina aneurysmatem.



Obrázek 9 – Schéma experimentální trati

4. Popis PIV experimentu

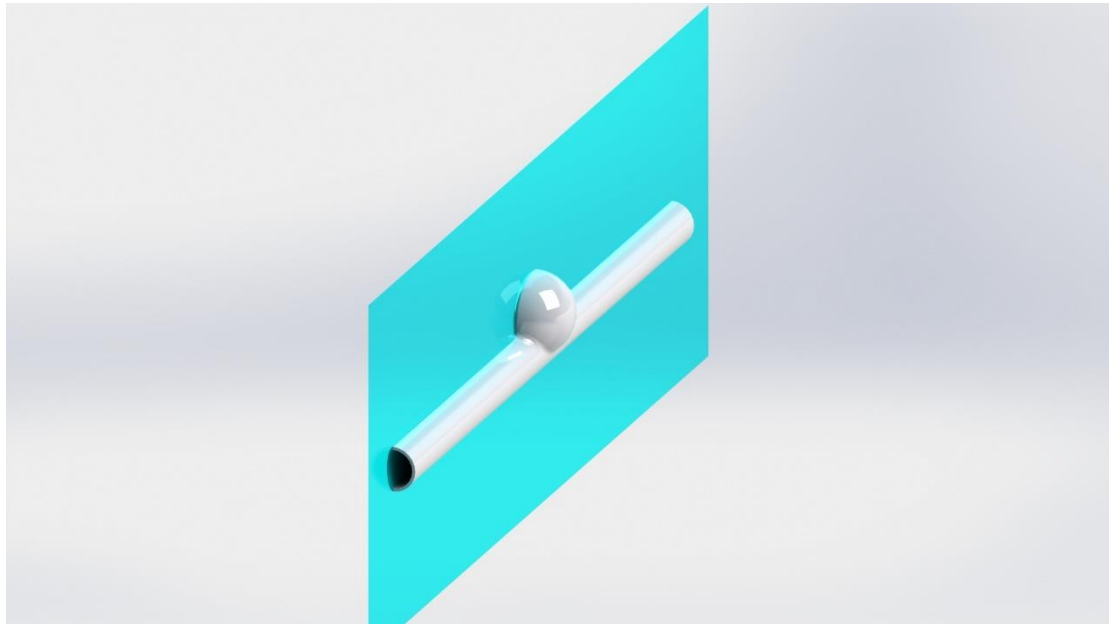
Pomocí této metody budeme měřit 4 jednotlivé stacionární průtoky. Do proudící tekutiny aneurysmatem se přimíchají částice o stejné hustotě, laserem prosvítíme vybranou rovinu, kterou chceme zkoumat, a vysokorychlostní kamerou se naměří o určité frekvenci dané průtoky.



Obrázek 10 – PIV metoda

4.1 Výběr řezu

Výběr řezu je velmi důležitý, protože jejím výběrem určíme, co budeme pomocí této metody vůbec měřit. Měli jsme na výběr hned 2 možnosti řezu. Rovinu řezu jsme mohli provést buďto samotnou výdutí nebo podélně celým aneurysmatem. Jelikož jsme chtěli změřit rychlosti v podélném řezu a jestli se částice budou zdržovat ve výduti, zvolili jsme druhou možnou variantu (obr. 11)



Obrázek 11 – rovina řezu

4.2 Volba jednotlivých Reynoldsových čísel pro daný experiment

Pro experiment se změřili 4 stacionární průtoky pro různá Reynoldsova čísla (tab. 1).

Tabulka 1 – Volba Reynoldsových čísel

Re[1]	500	1000	1500	2000

4.3 Výpočet základních parametrů pro metodu PIV

4.3.1 Výpočet středních rychlostí v cévě

Na základě stanovených Reynoldsových čísel se spočítaly jednotlivé střední rychlosti.

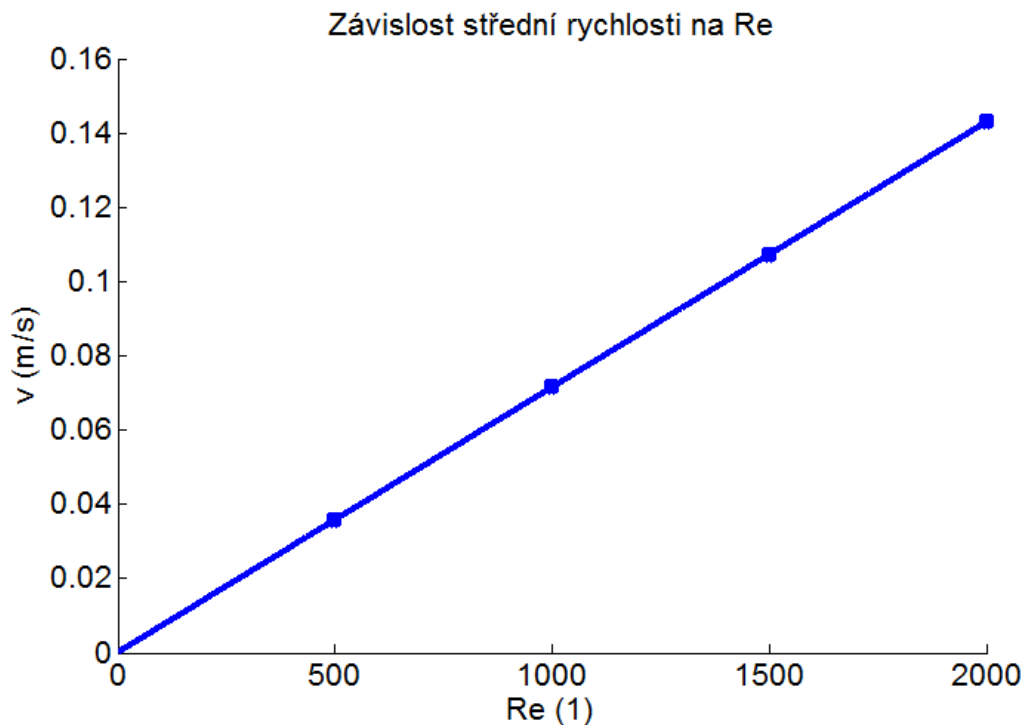
$$\bar{v}_{500} = \frac{R_e \cdot v}{d} = \frac{500 \cdot (1 \cdot 10^{-6})}{(14 \cdot 10^{-3})} = 0,0357 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.1.1)$$

$$\bar{v}_{1000} = \frac{R_e \cdot v}{d \cdot v} = \frac{1000 \cdot (1 \cdot 10^{-6})}{(14 \cdot 10^{-3})} = 0,0714 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.1.2)$$

$$\bar{v}_{1500} = \frac{R_e \cdot v}{d} = \frac{1500 \cdot (1 \cdot 10^{-6})}{(14 \cdot 10^{-3})} = 0,107 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.1.3)$$

$$\bar{v}_{2000} = \frac{R_e \cdot v}{d} = \frac{2000 \cdot (1 \cdot 10^{-6})}{(14 \cdot 10^{-3})} = 0,142 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.1.4)$$

Z vypočítaných hodnot se získala závislost střední rychlosti na Reynoldsově čísle.



Graf 1 – Závislost Střední rychlosti na Reynoldsově čísle

4.3.2 Výpočet průtoku

Na základě vypočítaných středních rychlostí se vypočítal průtok.

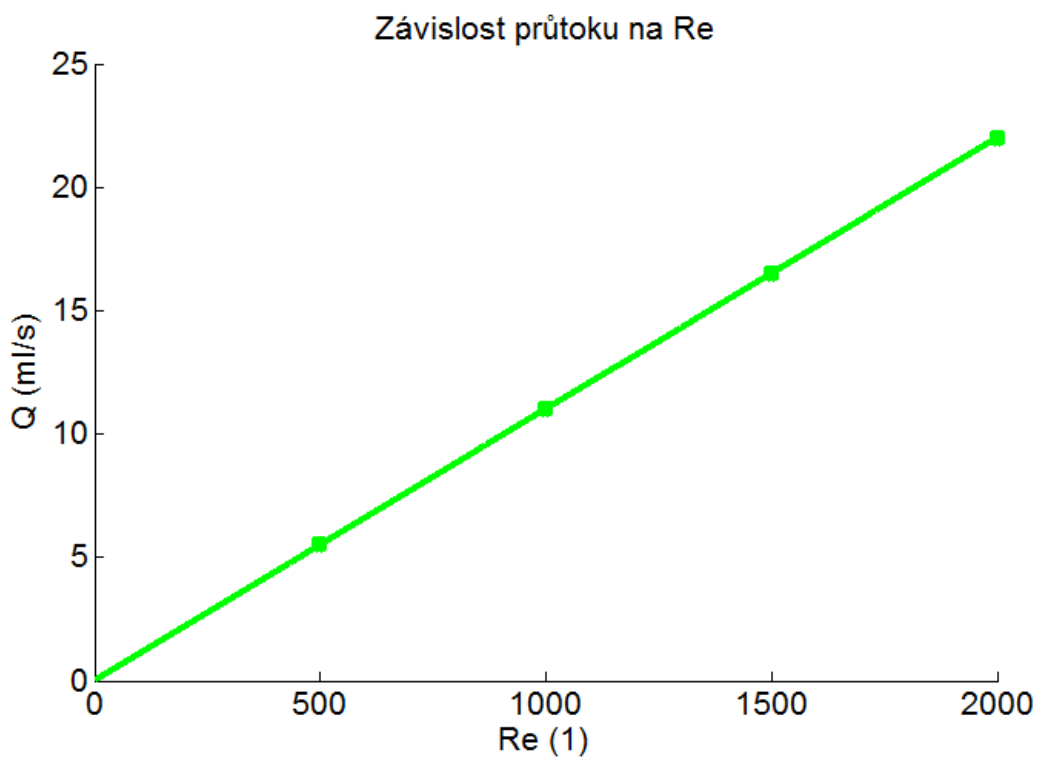
$$Q_{500} = \bar{v}_{500} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,0357 \cdot \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 5,495 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.2.1)$$

$$Q_{1000} = \bar{v}_{1000} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,0714 \cdot \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 10,99 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.2.2)$$

$$Q_{1500} = \bar{v}_{1500} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,107 \cdot \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 16,47 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.2.3)$$

$$Q_{2000} = \bar{v}_{2000} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,142 \cdot \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 21,85 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.3.2.4)$$

Z vypočítaných hodnot se získala závislost průtoku na Reynoldsově čísle.



Graf 2 – Závislost průtoků na Reynoldsově čísle

4.3.3 Výpočet potřebného napětí na čerpadle

Pro správné nastavení čerpadla bylo zapotřebí vypočítat jednotlivá napětí, která se na čerpadle musí nastavit vzhledem ke stanoveným Reynoldsovým číslům. Vycházeli jsme z předpokladu, že maximální Napětí čerpadla jsou 2 volty při Reynoldsově čísle 4000.

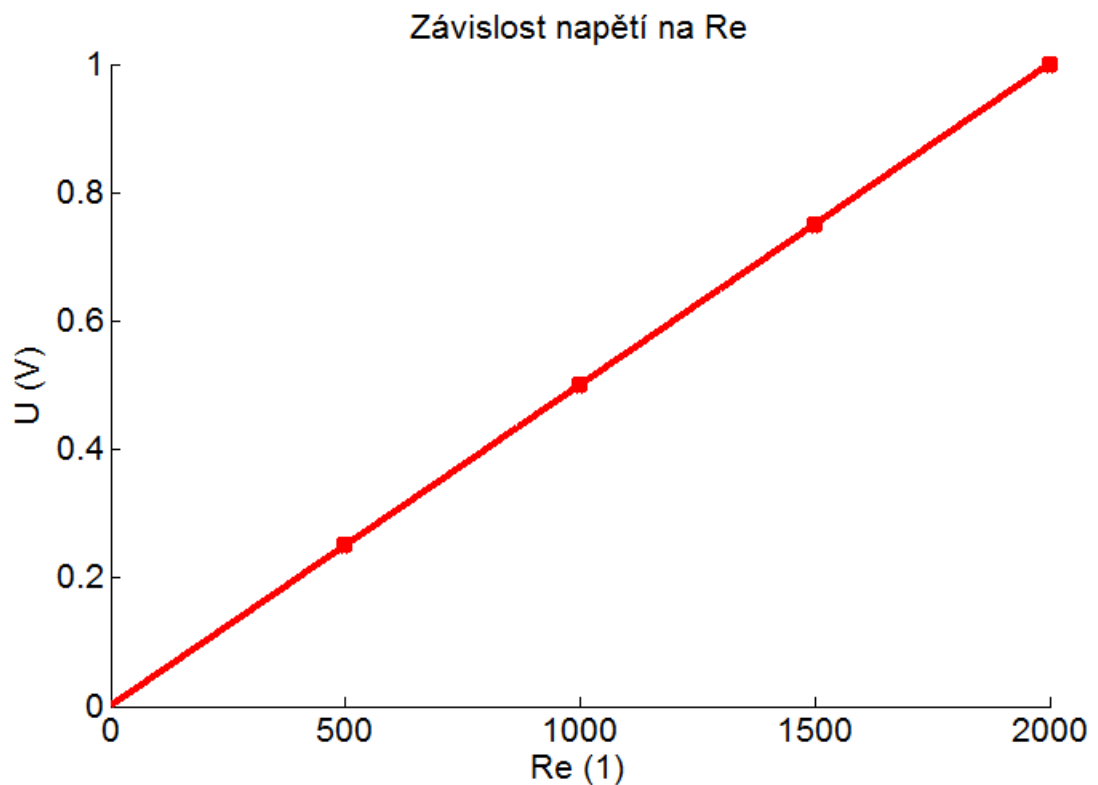
$$U_{500} = \frac{R_e}{2000} = \frac{500}{2000} = 0,25 V \quad (4.3.3.1)$$

$$U_{1000} = \frac{R_e}{2000} = \frac{1000}{2000} = 0,5 V \quad (4.3.3.2)$$

$$U_{1500} = \frac{R_e}{2000} = \frac{1500}{2000} = 0,75 V \quad (4.3.3.3)$$

$$U_{2000} = \frac{R_e}{2000} = \frac{2000}{2000} = 1 V \quad (4.3.2.4)$$

Z vypočtených hodnot se zhotovila závislost Reynoldsova čísla na napětí čerpadla.



Graf 3 – Závislost napětí na Reynoldsově čísle

4.3.4 Shrnutí jednotlivých výpočtů

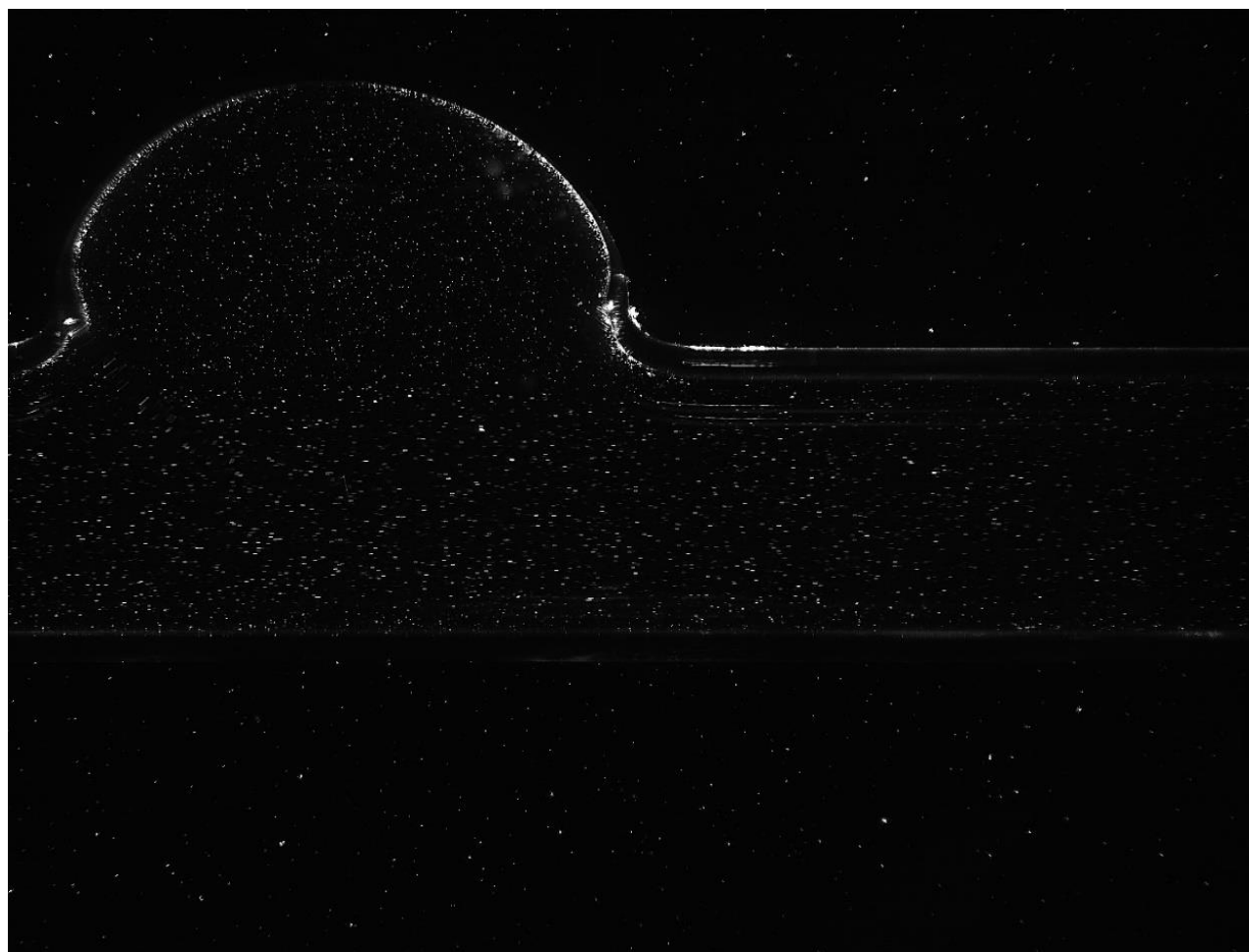
Shrnutí jednotlivých výsledků uvádím v tabulce 2.

Tabulka 2 – Souhrn jednotlivých průtoků

<i>Re</i> [1]	<i>Rychlost</i> [$m \cdot s^{-1}$]	<i>Průtok</i> [$ml \cdot s^{-1}$]	<i>Napětí</i> čerpadla[V]	<i>Frekvence</i> [Hz]
500	0,0357	5,495	0,25	100
1000	0,0714	10,99	0,5	200
1500	0,107	16,47	0,75	300
2000	0,142	21,85	1	400

4.4 Naměřená data

Pomocí PIV metody (viz kap. 2) jsme získali data potřebná k dalšímu vyhodnocení. Tyto data nám znázorňují o kolik se posune vybraná částice při určité frekvenci o určitou vzdálenost mezi snímky (obr.12).



Obrázek 12 – Naměřené polohy částic pomocí PIV metody

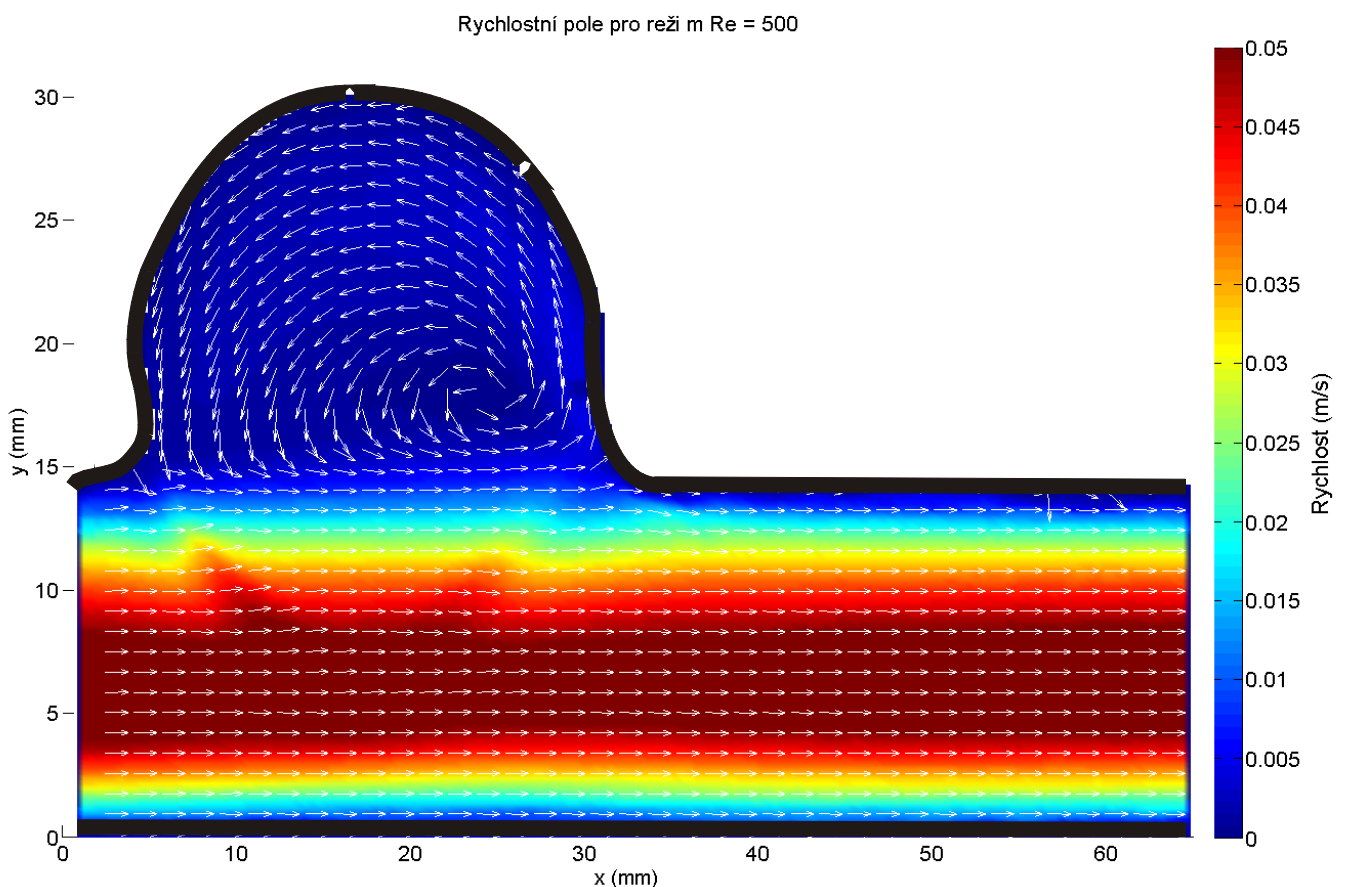
5. Rychlostní pole změřené pomocí metody PIV

Po zpracování dat v Dantec studiu a Matlabu jsme získali jednotlivá rychlostní pole pro různá Reynoldsova čísla v modelu aneurysmatu (viz Graf 4-7)

5.1 Zhodnocení výsledků PIV experimentu pro různé průtoky

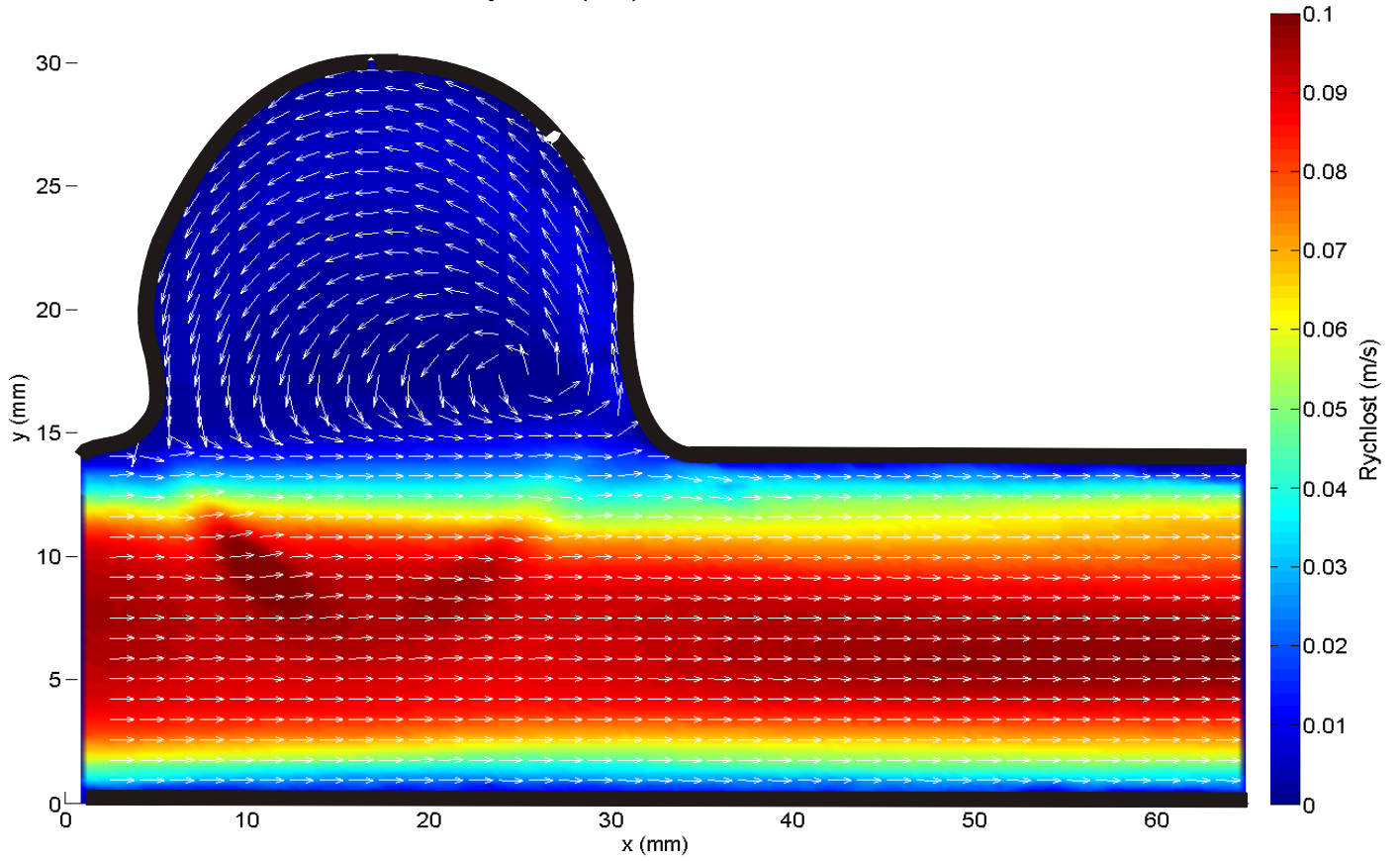
5.1.1 Grafy pro Reynoldsova čísla 500 a 1000

Na grafu 4 a 5 je patrné, že pro tyto 2 stacionární děje ($Re = 500-1000$) se proudící kapalina v trubici chová takřka stejně. Hlavní tok kapaliny je laminární po celém aneurysmatu. Na hranici aneurysmatu můžeme pozorovat, že malá část kapaliny naráží na stěnu aneurysmatu a následně mění směr, díky čemuž se tvoří malý vír. Dále můžeme pozorovat, že rychlost hlavního toku je řádově pětkrát až desetkrát větší než je rychlost proudící kapaliny aneurysmatu



Graf 4 – Rychlostní pole pro Reynoldsovo číslo 500

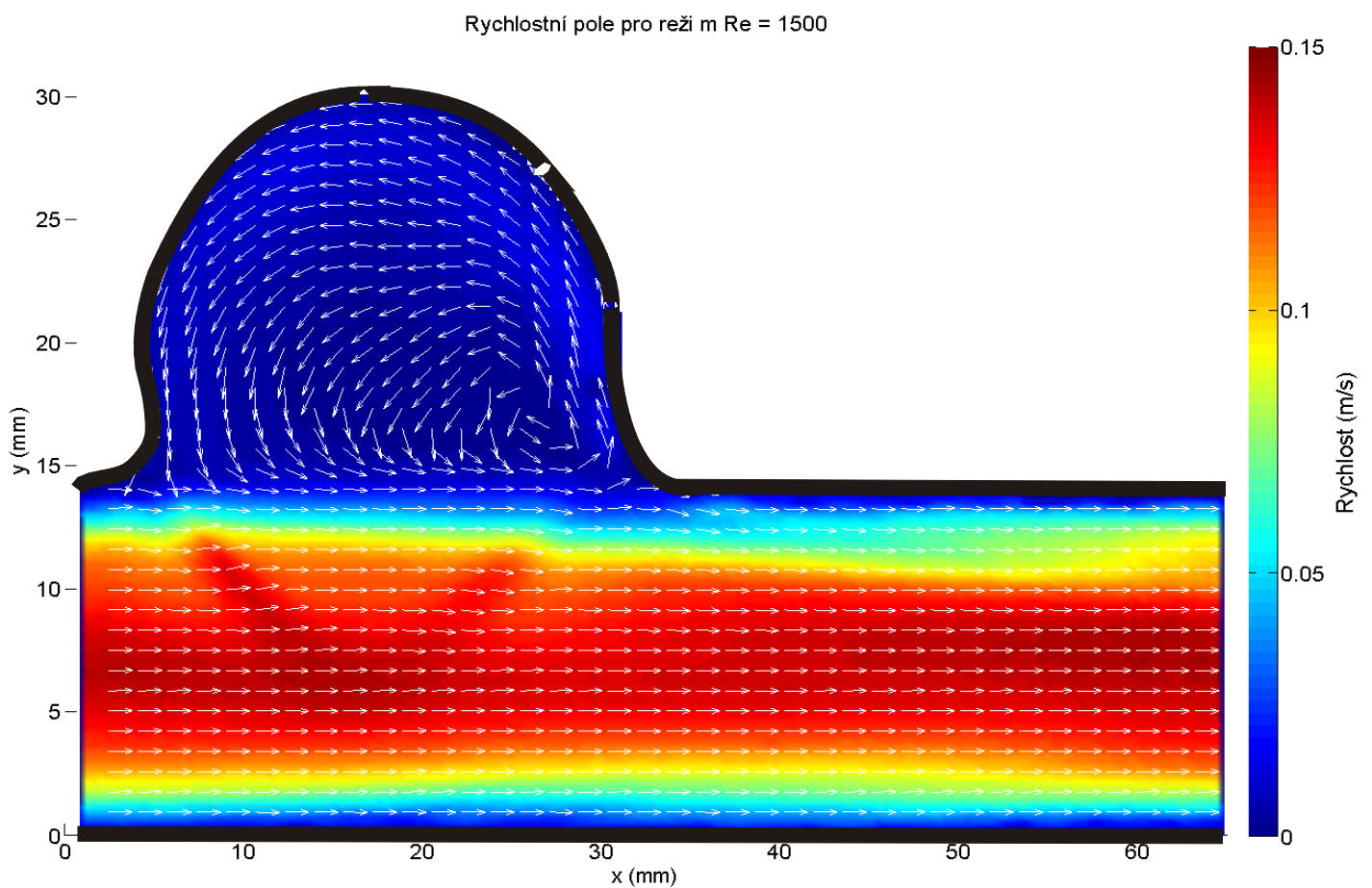
Rychlostní pole pro reži m Re = 1000



Graf 5 – Rychlostní pole pro Reynoldsovo číslo 1000

5.2.2 Graf pro Reynoldsovo číslo 1500

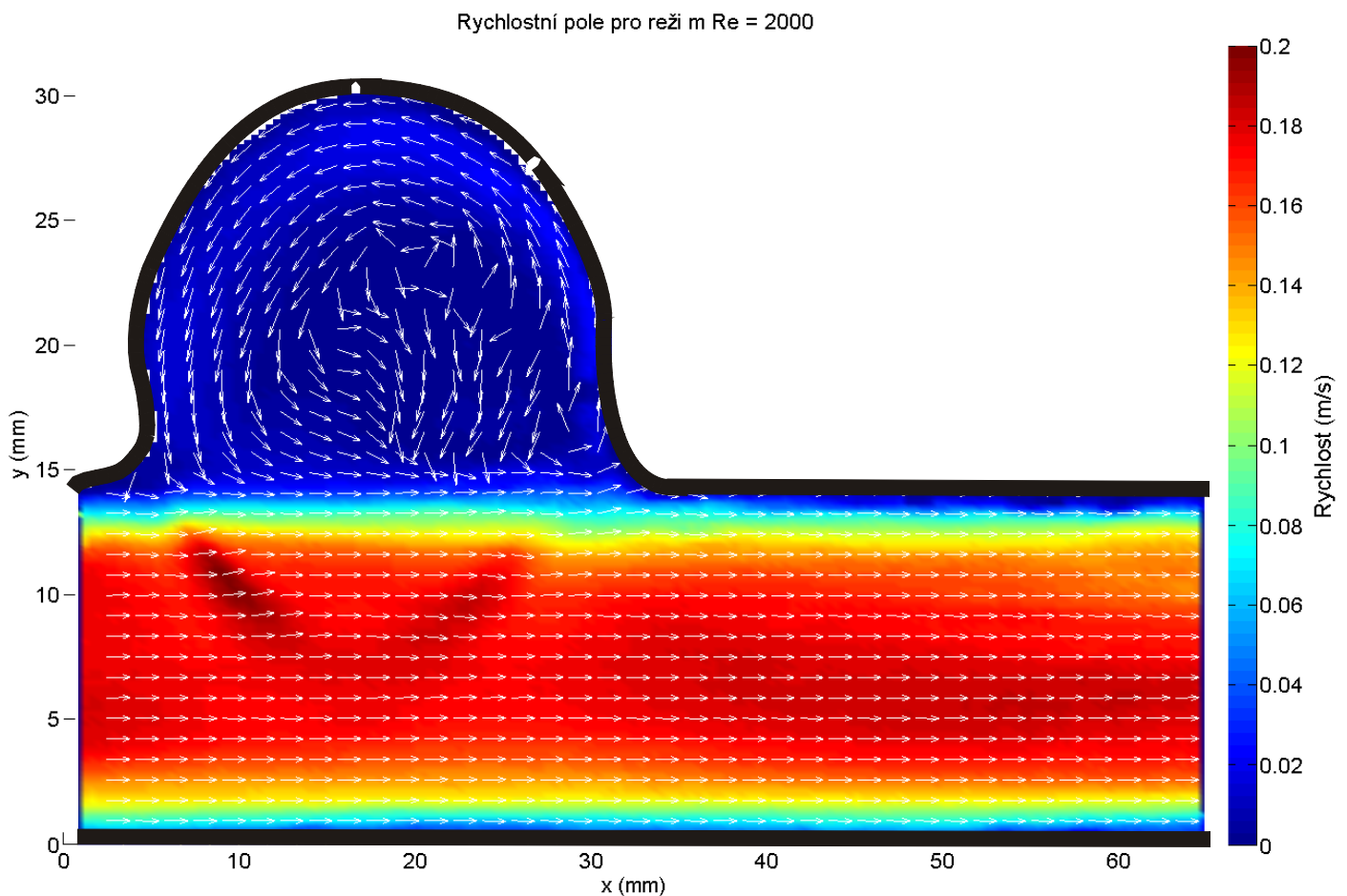
Na grafu 6 je patrné, že rychlost hlavního toku je až patnáctkrát větší než rychlost toku proudící kapaliny v aneurysmatu. Dále si můžeme všimnout, že vír, který byl na grafech 4 a 5 je pravidelný a symetrický a pozorujeme, že jednotlivé vektory nemají stejný směr, ale naopak různý. To může být způsobeno větší rychlostí proudící kapaliny.



Graf 6 – Rychlostní pole pro Reynoldsovo číslo 1500

5.2.3 Graf pro Reynoldsovo číslo 2000

Při měření pro Reynoldsovo číslo 2000 se nacházíme skoro na rozhraní turbulentního a laminárního proudění $Re \geq 2300$. Rychlostní pole zjištěné z tohoto měření je zobrazeno na grafu 7. To způsobuje chaotické uspořádání rychlostních vektorů v aneurysmatu. Z grafu není patrné, jestli se vír pravidelně po jednom cyklu „vyplachuje“, jako tomu bylo u předchozích rychlostí, nebo zda se v aneurysmatu drží. Proto se jím budeme zabývat v dalším měření pro jednotlivé časové úseky.

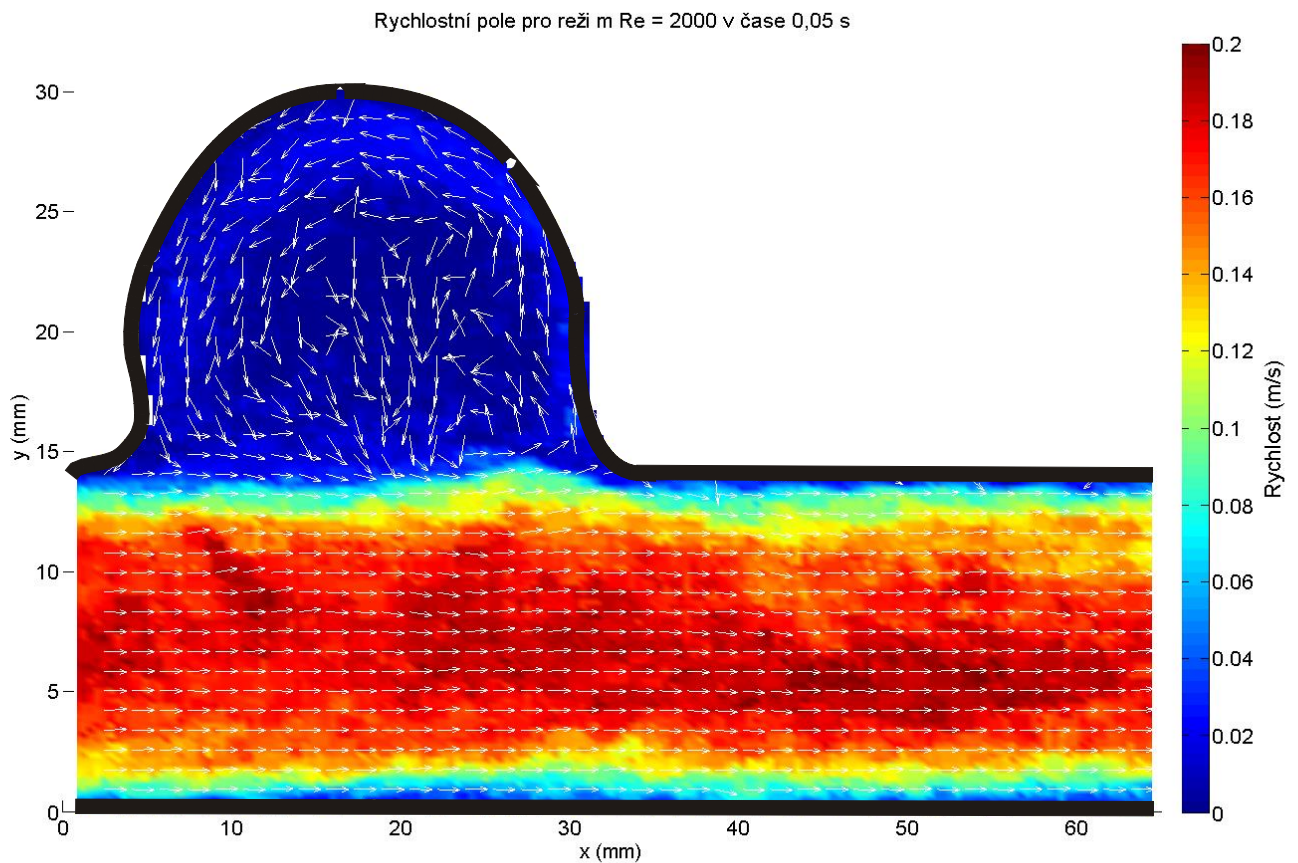


Graf 7 – Rychlostní pole pro Reynoldsovo číslo 2000

5.3 Zhodnocení výsledků PIV experimentu pro různé časové okamžiky

5.3.1 Zhodnocení grafu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 0,05 sec

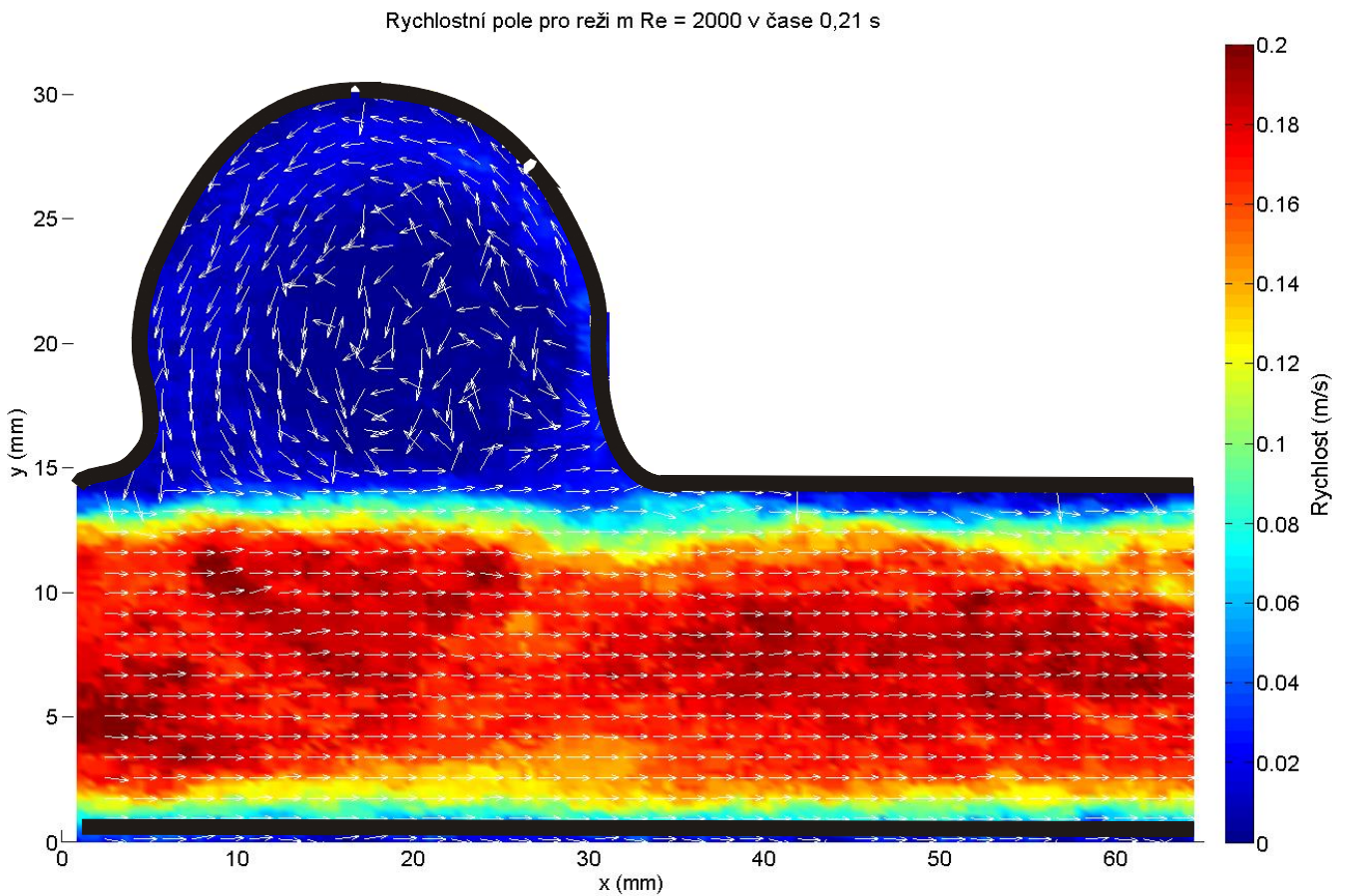
Protože proudění v čase 0 sec nemělo požadovanou rychlost, nebudeme proto tento okamžik brát za začátek měření, ale nýbrž čas 0,05 jako začátek smluvní. V grafu je patrné, že hlavní tok naráží o stěnu aneurysmatu a pomalu se začíná tvořit nepravidelný vír.



Graf 8 – Rychlostní pole v čase 0,05 sec

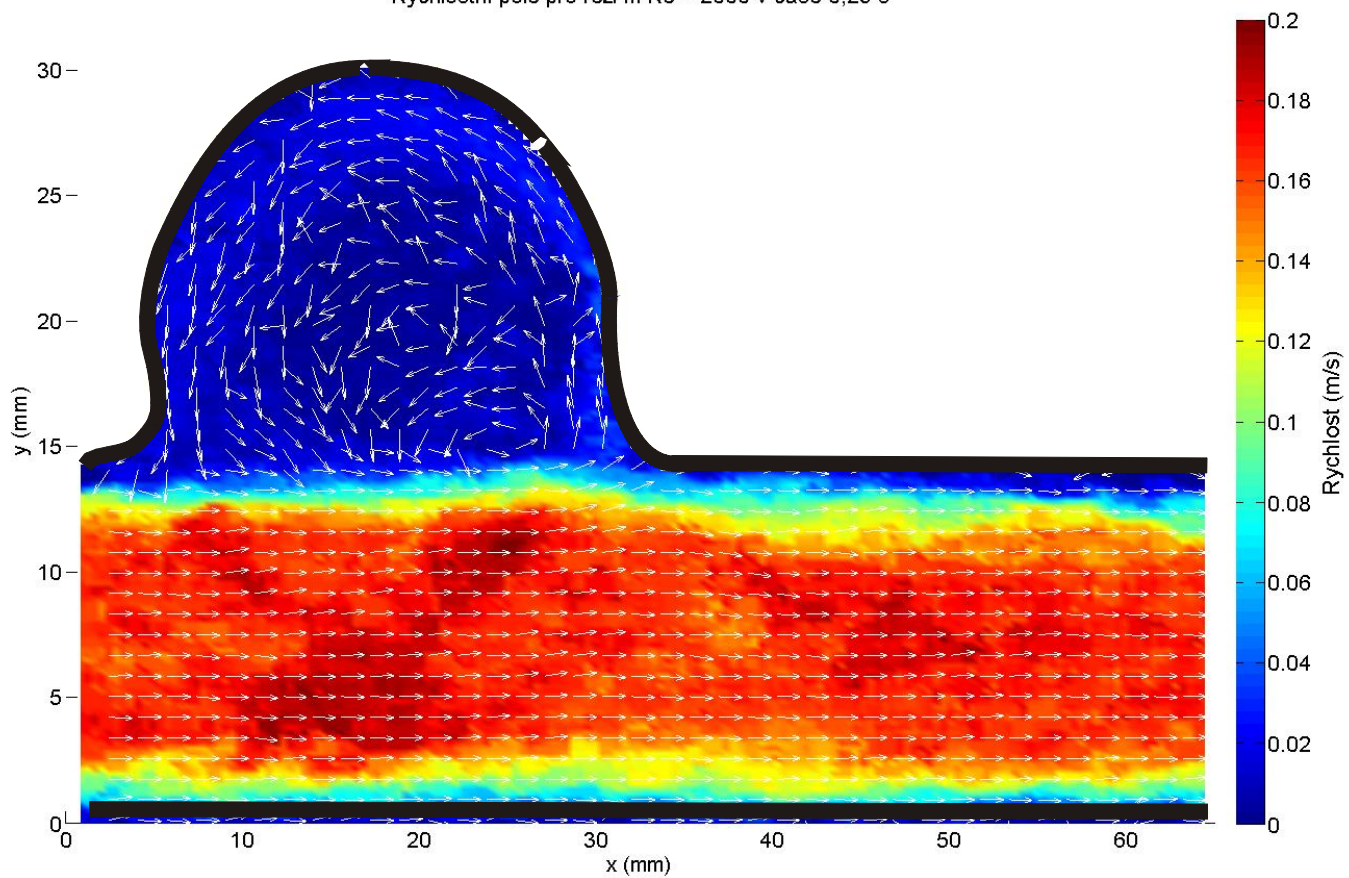
5.3.2 Zhodnocení grafu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 0,21 sec a 0,29 sec

Na těchto grafech je patrný přetrvávající vír, který setrvává v aneurysmatu. Budeme tedy tyto dva grafy nazývat výdrží. Na grafu 9 je uspořádání vektorů stále chaotické, kdežto na grafu 10 se začíná tvořit symetrický vír. Ten je stejný jako při předešlých stacionárních rychlostech.



Graf 9 – Rychlostní pole v čase 0,21 sec

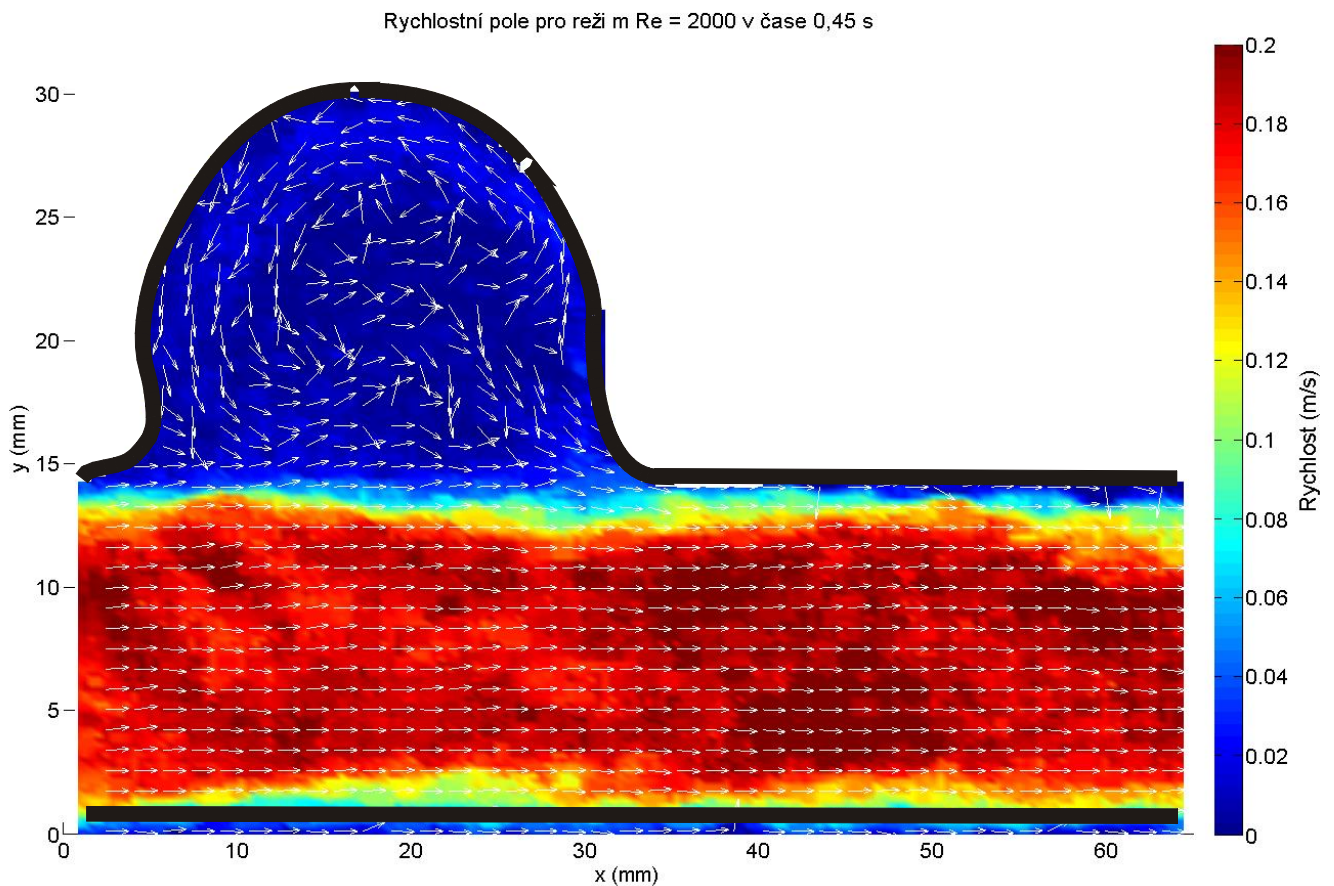
Rychlostní pole pro reži m Re = 2000 v čase 0,29 s



Graf 10 – Rychlostní pole v čase 0,29 sec

5.3.3 Zhodnocení grafu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 0,45 sec

Tento případ budeme nazývat výplach. Rychlost pole pro tento okamžik je zobrazen na grafu 11, ze kterého je patrné, že symetrický vír zanikl a velká část tekutiny se vypouští z aneurysmatu ve směru hlavního toku modelu. To samozřejmě vyvolalo reakci v celém aneurysmatu, kde je patrné opět chaotické uspořádání rychlostních vektorů proudící tekutiny. Ze stanovení delšího záznamu lze komentovat, že popsané fáze v podkapitolách 5.3.1-3 se opakují v cyklu.



Graf 11 – Rychlostní pole v čase 0,45 sec

6. Popis PLIF experimentu

PLIF a PIV metoda si jsou velmi podobné. V tomto experimentu se použije stejná experimentální trať, jako tomu bylo u PIV experimentu, ale s tím rozdílem, že na vysokorychlostní kameru se namontuje filtr, který uvidí pouze zvolené světlo o vlnové délce 570 nm . Do modelu už nebudeme přivádět částice o stejné hustotě, nýbrž předem namíchaný roztok Rhodaminu. Rhodamin je druh barviva, který se používá při optických metodách jako stopovací látka v tekutině pro určení směru proudu, případně jeho poměru, pokud se rozděluje. Kamera bude snímat díky použitému filtru pouze tento namíchaný roztok, který odpovídá danému barevnému rozhraní. Díky tomu můžeme měřit koncentraci namíchaného roztoku v modelu aneurysmatu.

6.1 Zhotovení injekčního vstřiku před model aneurysmatu

Před modelem byl zřízen injekční vstup pro zavedení barviva do toku proudící kapaliny modelem.

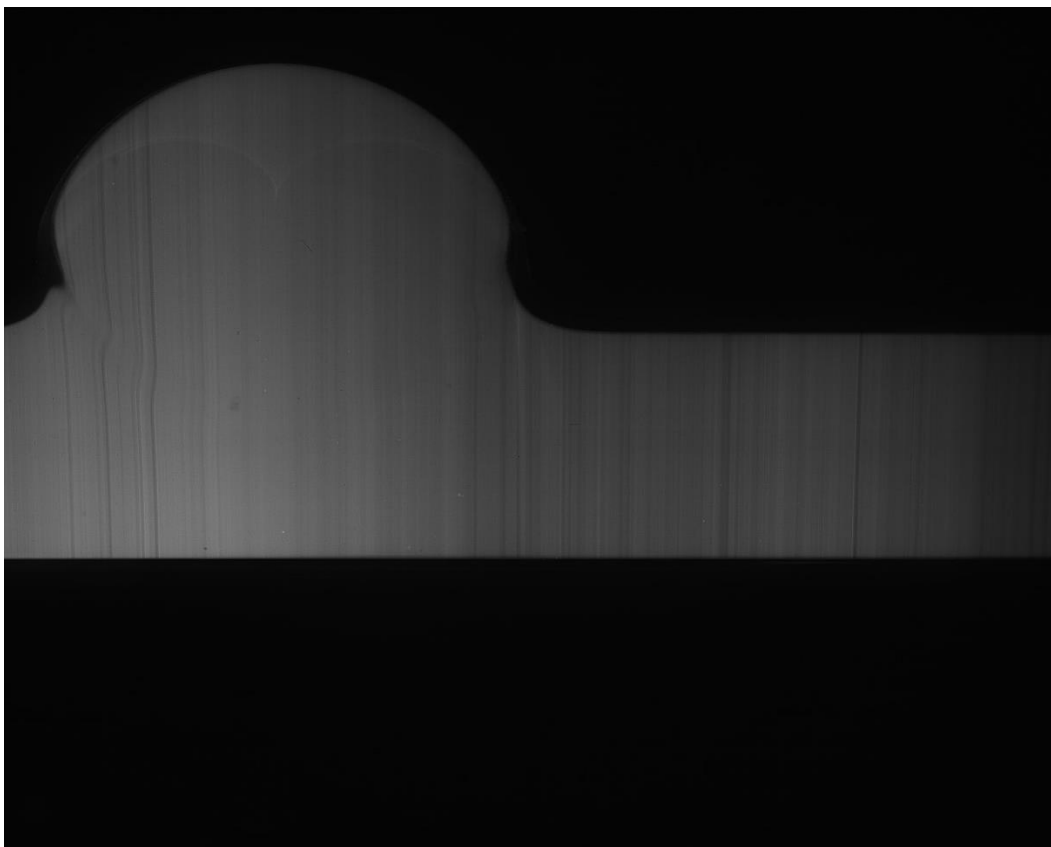
6.2 Kalibrace

Pro provedení experimentu je nutná kalibrace celé soustavy. Kalibrace se provede tak, že naměříme 3 režimy koncentrace roztoku v modelu. V podstatě s touto kalibrací pak budeme poměřovat jednotlivá naměřená data, a budeme tak vědět, kolik koncentrace látky se právě v určitém místě modelu nachází.

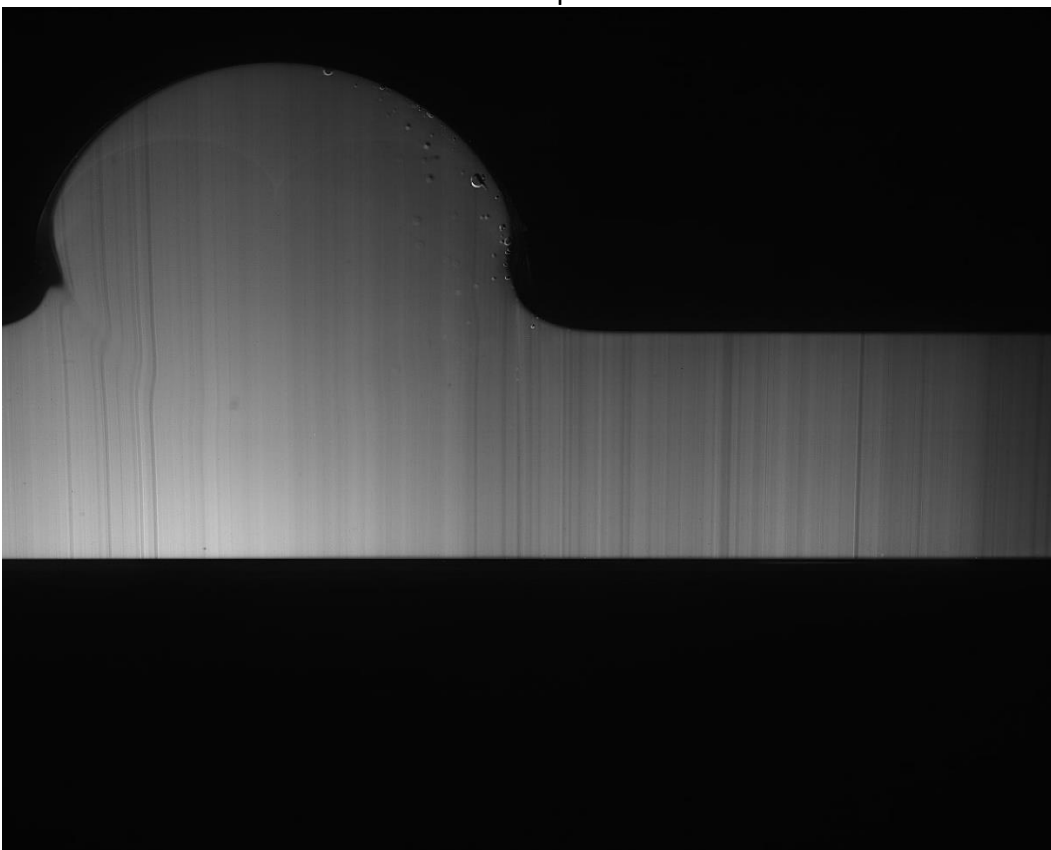
Tabulka 3 – měřené režimy pro kalibraci

Koncentrace roztoku [%]	0	50	100
-------------------------	---	----	-----

Zde si uvedeme výsledky jednotlivých kalibračních měření. Naměřenou hodnotu pro 0% neuvádíme, jelikož obrázek by byl pouze černý.



Obrázek 13 – Naměřená hodnota pro 50 % koncentrace roztoku



Obrázek 14 – Naměřená hodnota pro 100 % koncentrace roztoku

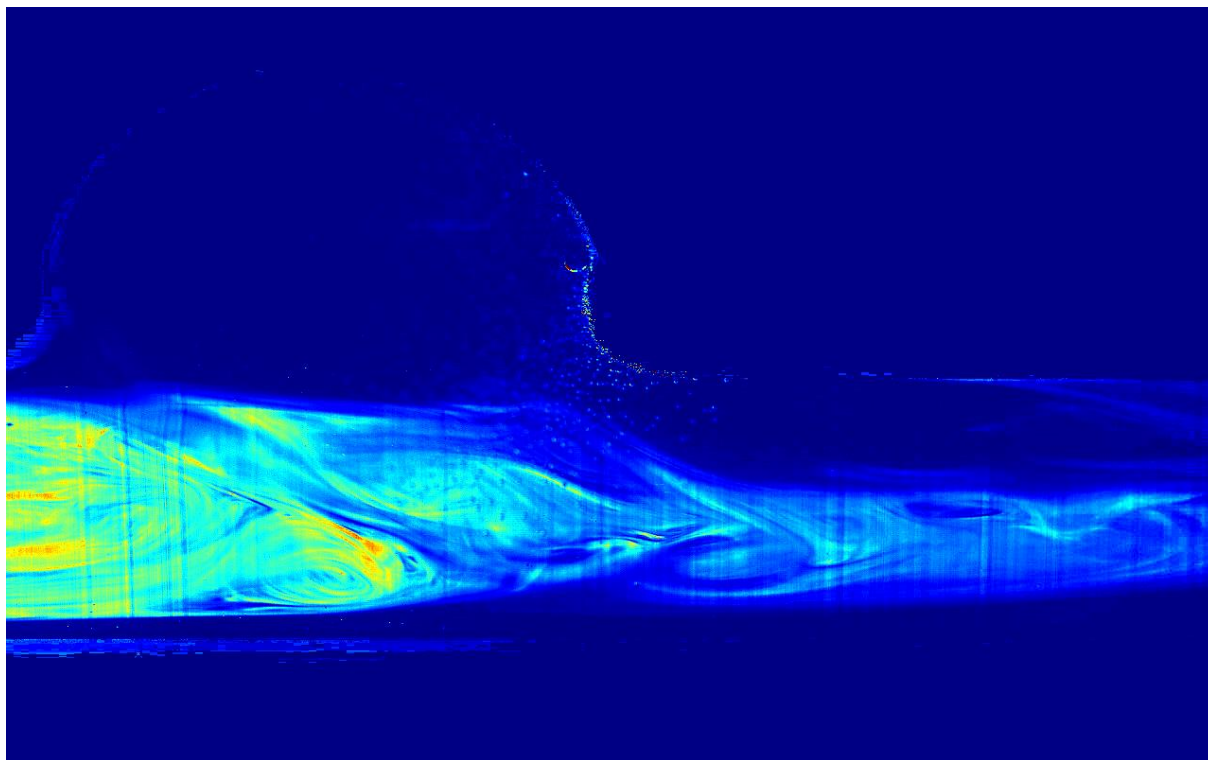
7. Pole koncentrací změřené metodou PLIF

Po zpracování dat v Matlabu jsme získali jednotlivá koncentrační pole pro různé průtoky v modelu aneurysmatu. Reynoldsova čísla se shodují s měřenými režimy v metodě PIV.

7.1 Zhodnocení výsledků PLIF experimentu pro Reynoldsovo číslo 500 v různých časových okamžicích

7.1.1 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 500 v čase 1 sec.

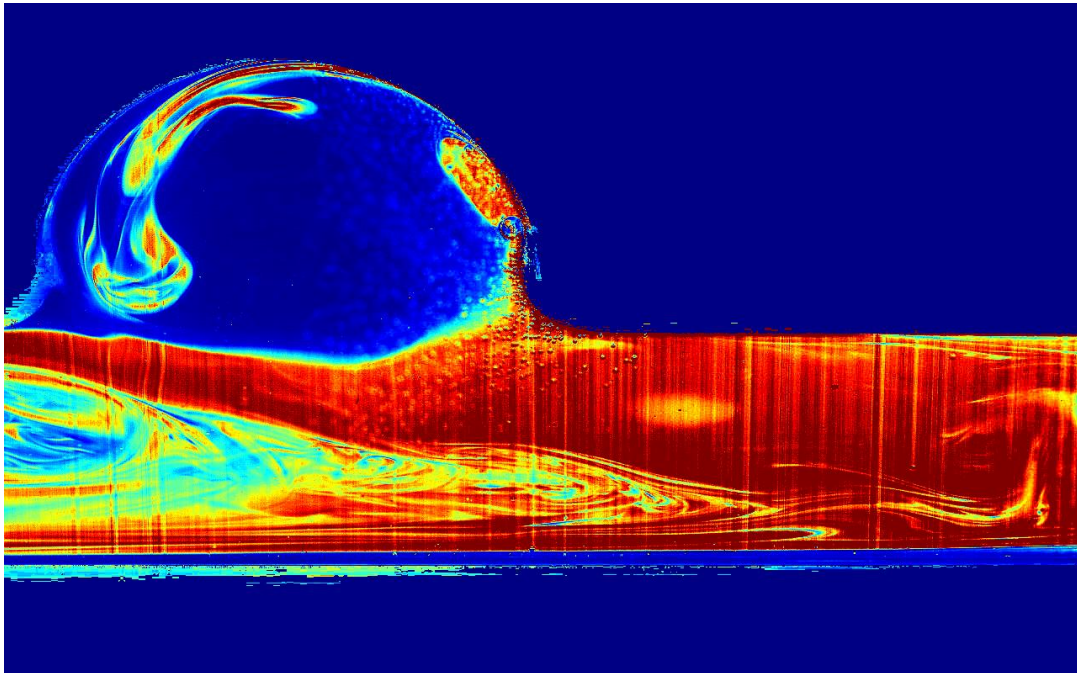
Na obrázku 15 jsou zobrazeny výsledky měření v čase 1 sec. Tento okamžik budeme považovat za začátek měření. Při všech měřeních pomocí metody PLIF byl čas 0 sec určen okamžikem, kdy barvivo vstoupilo do sledované oblasti. Na tomto obrázku je vidět pouze přívod barviva do modelu.



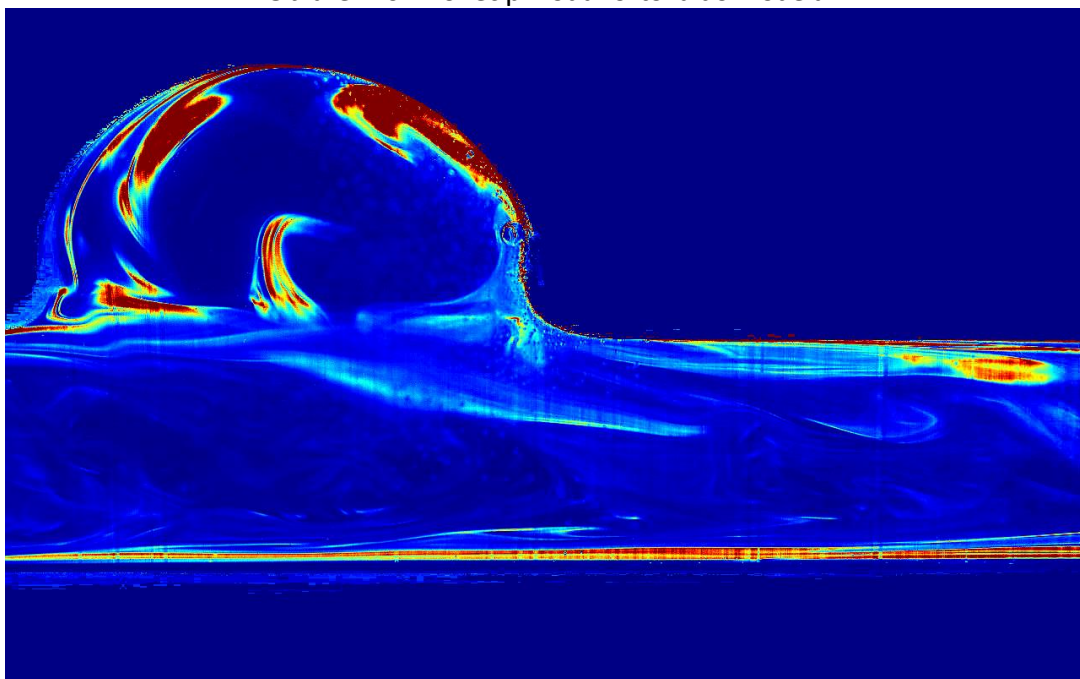
Obrázek 15 – Přívod roztoku do kapaliny

7.1.2 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 500 v čase 3 a 6 sec.

Měření v čase 3 sec znázorňuje konec přívodu roztoku do modelu. Tento okamžik je znázorněn na obrázku 16, na kterém je patrné plnění aneurysmatu roztokem. Čas 6 sec je zobrazen na obrázku 17, na kterém můžeme pozorovat vyplachování našeho modelu aneurysmatu. K vyplachování aneurysmatu dochází velmi pomalu a tvoří se tam malý vír. Oba obrázky potvrzují výsledky měřené v metodě PIV.



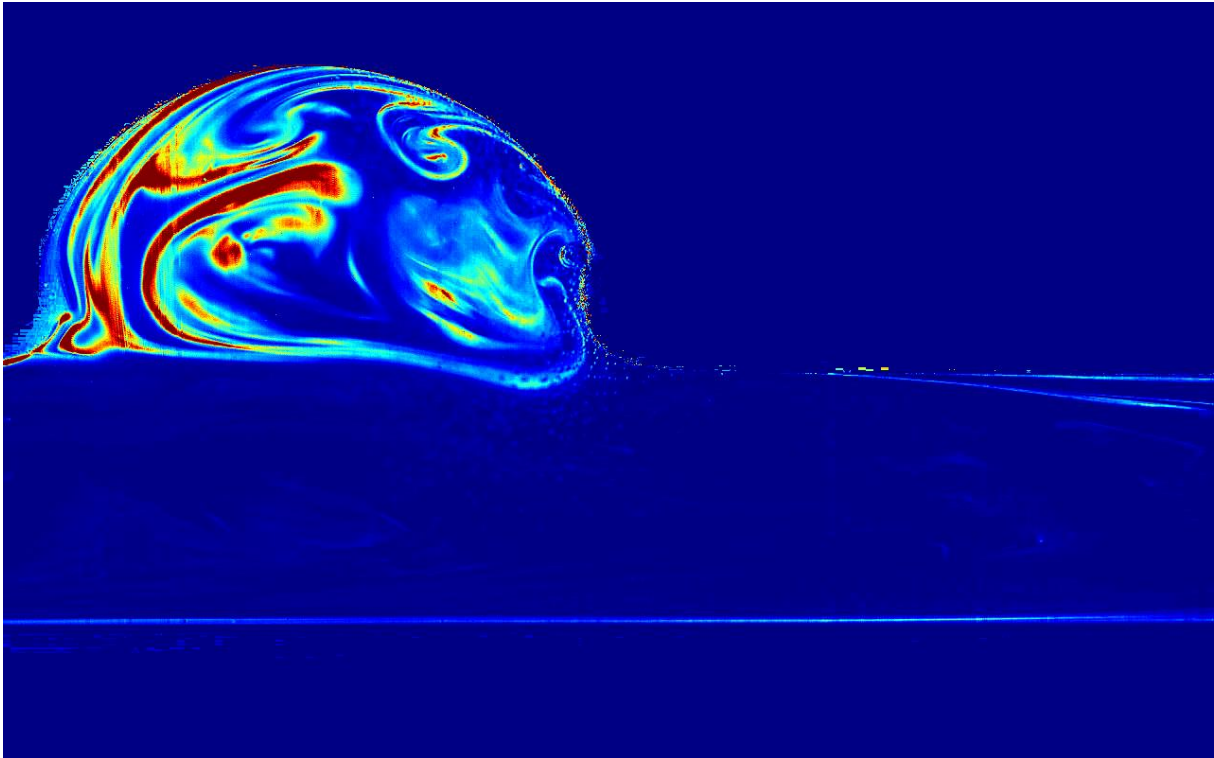
Obrázek 16 – Konec přívodu roztoku do modelu



Obrázek 17 – Začátek vyplachování aneurysmatu

7.1.3 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 500 v čase 14 sec.

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, k vyplachování aneurysmatu dochází velmi pomalu, což je způsobeno malou rychlostí proudící kapaliny a velmi stabilním rozhraním obou oblastí. V aneurysmatu se tvoří malý vír, který se zde pak drží. Úplné vypláchnutí aneurysmatu přesáhlo časovou mez daného měření.

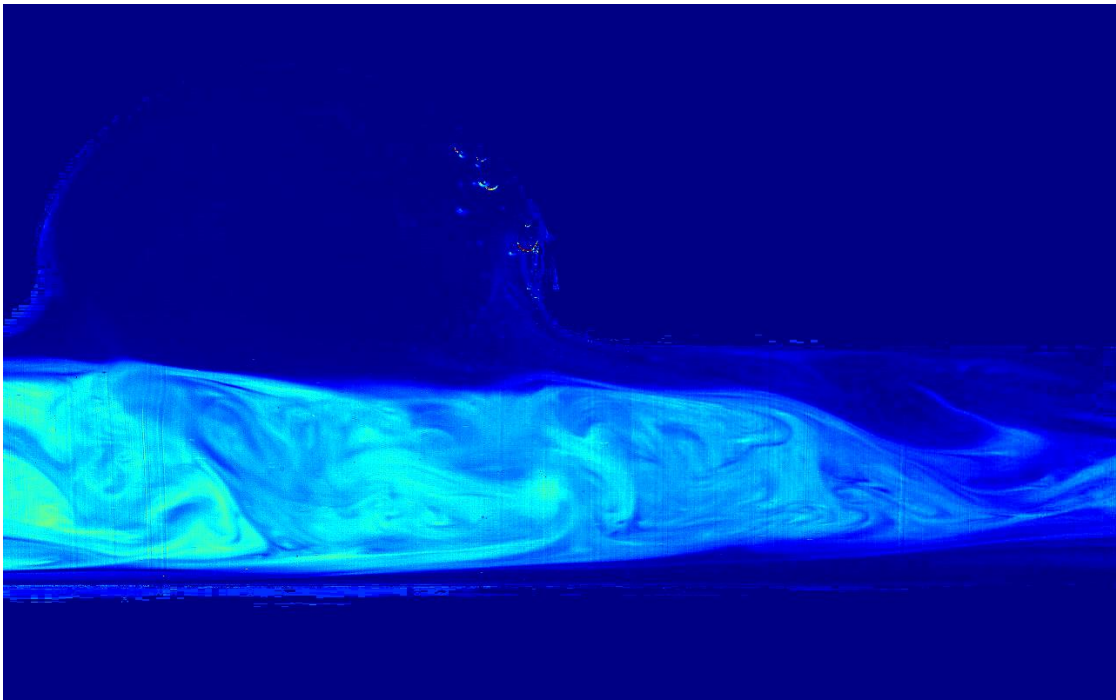


Obrázek 18 – Vyplachování aneurysmatu v čase 14 sec

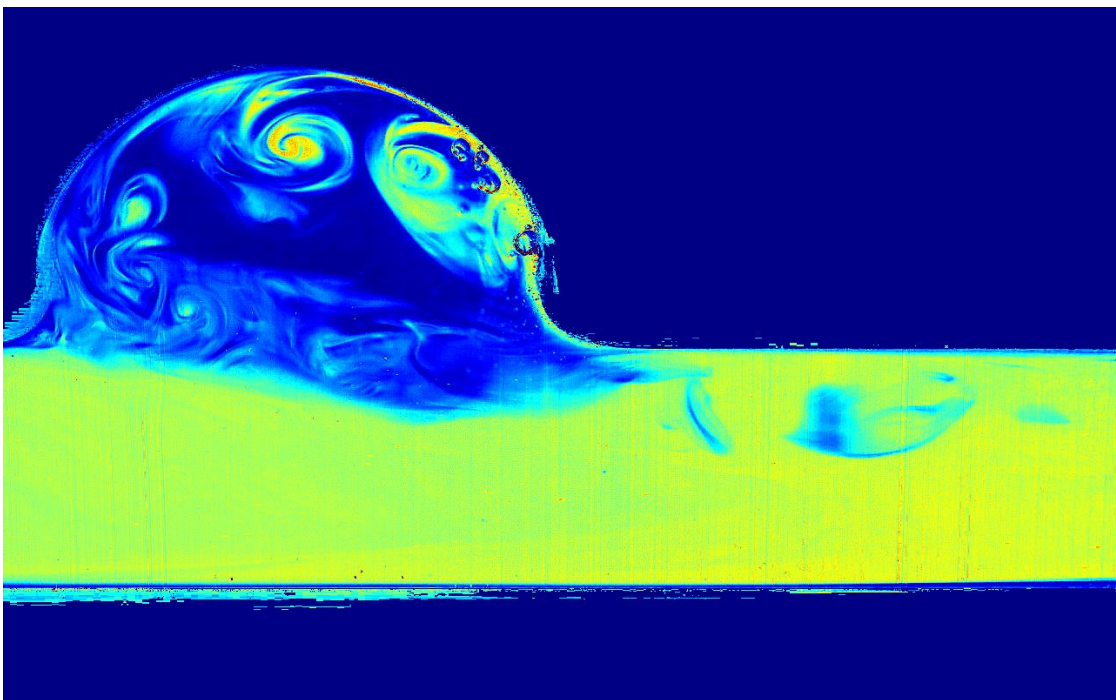
7.2 Zhodnocení výsledků PLIF experimentu pro Reynoldsovo číslo 1500 v různých časových okamžicích

7.2.1 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 1000 v čase 0,5 a 1 sec.

Na obrázku 19 vidíme pouze přívod roztoku do modelu aneurysmatu. Na obrázku 20 si už ale můžeme všimnout plnění aneurysmatu a tvoření malých vírů po obvodu výrůstku. Tento jev se v metodě PIV nezobrazil.



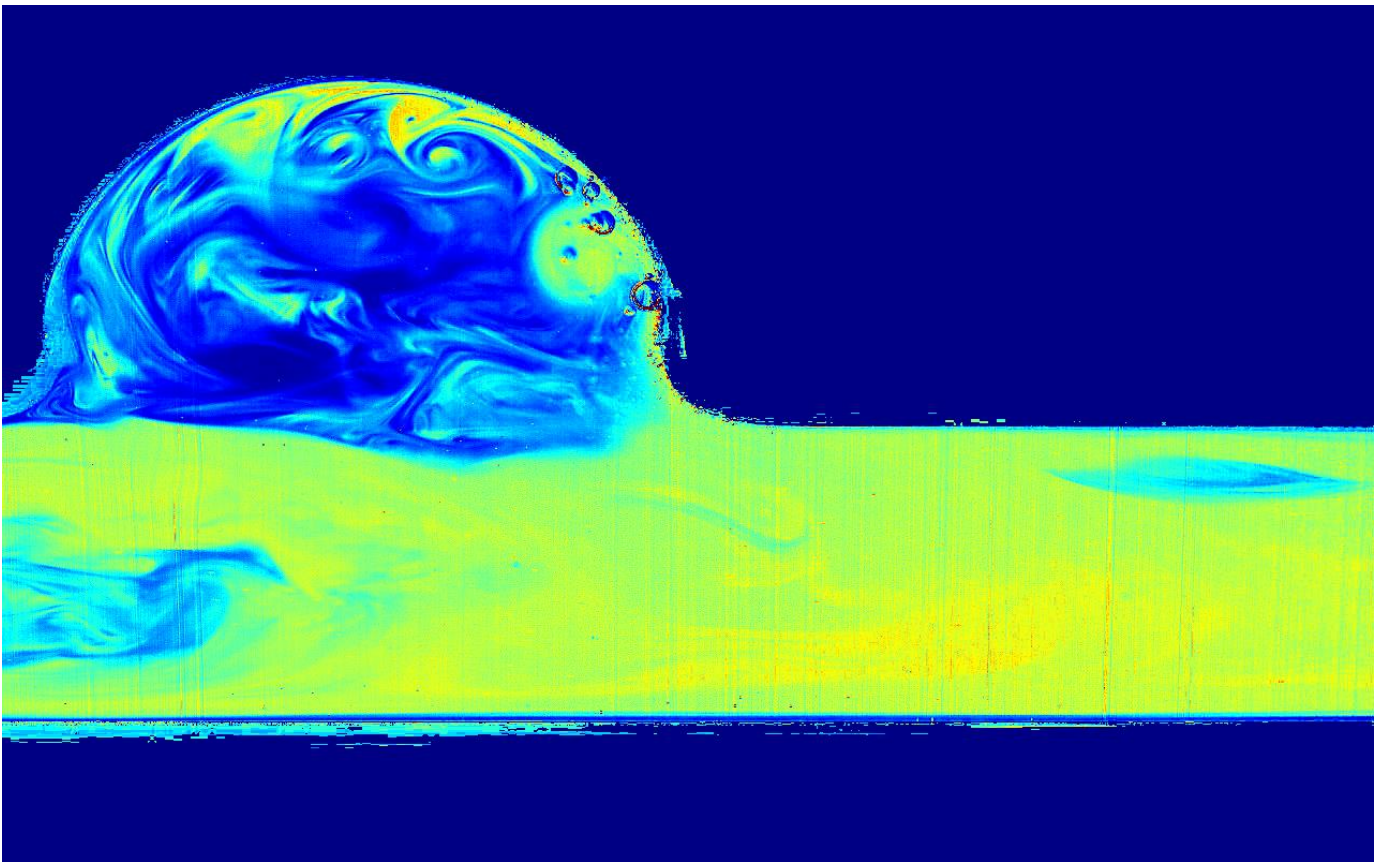
Obrázek 19 – Přívod roztoku do modelu



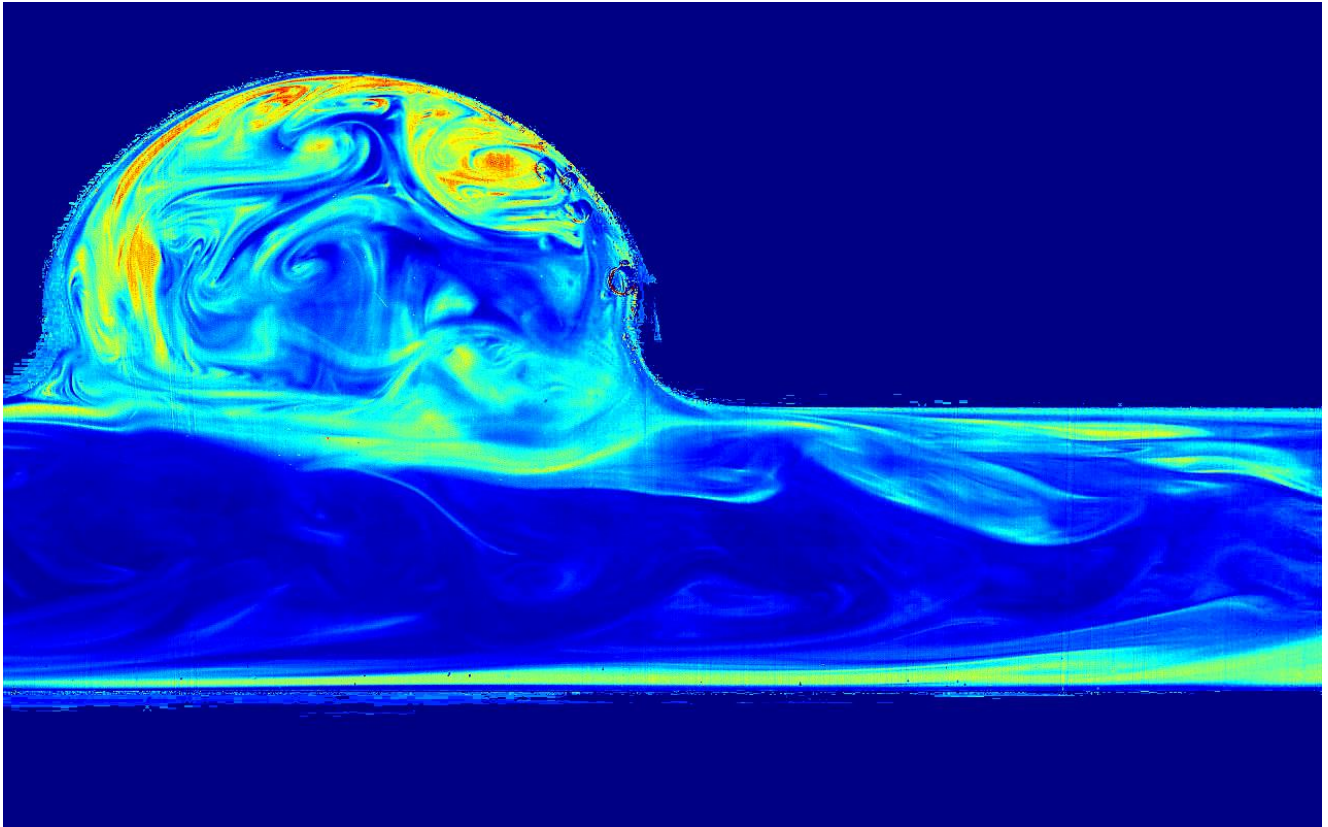
Obrázek 20 - Plnění aneurysmatu

7.2.2 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 1500 v čase 4 až 6 sec.

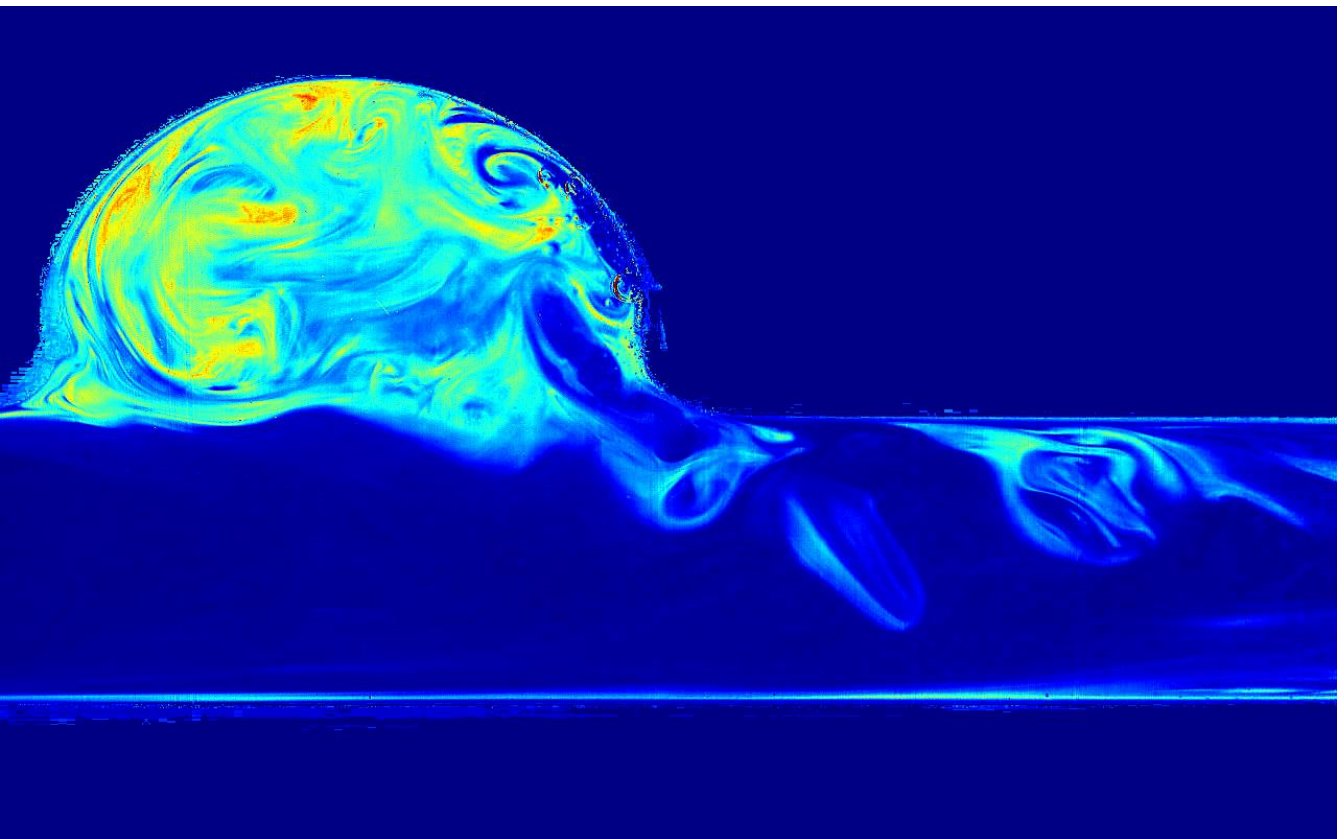
Na obrázku 21 vidíme průběh plnění aneurysmatu pro Reynoldsovo číslo v čase 4 sec. Zároveň se jedná o konec přívodu roztoku do modelu. Na obrázku 21 je zřetelně vidět hlavní tok, který proudí v dolní části modelu. Na obrázcích 22 a 23 už můžeme sledovat začínající vyplachování aneurysmatu, který se téměř zaplnil roztokem. Roztok se vyplachuje v určitých intervalech po nevelkých částech a k výplachu dochází skokově.



Obrázek 21 – Konec přívodu roztoku do modelu a plnění aneurysmatu



Obrázek 22 – Vyplachování aneurysmatu v čase 5 sec

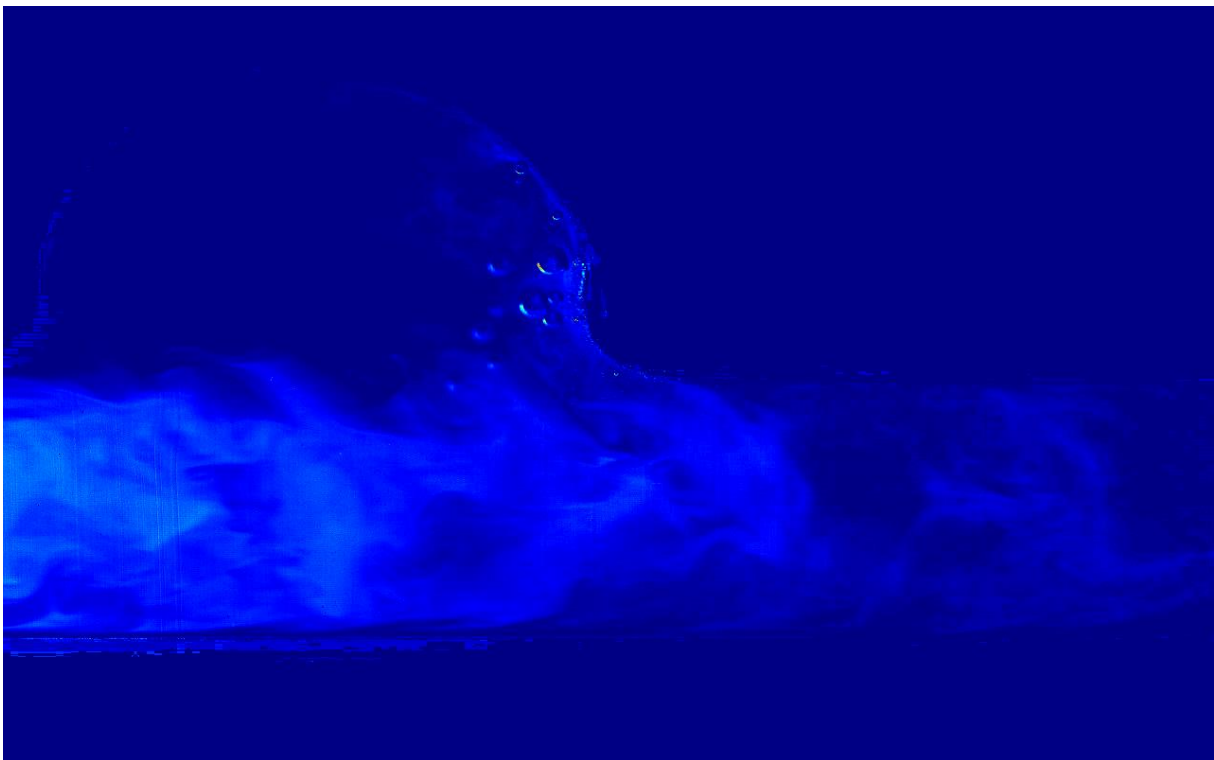


Obrázek 23 – Vyplachování aneurysmatu v čase 6 sec

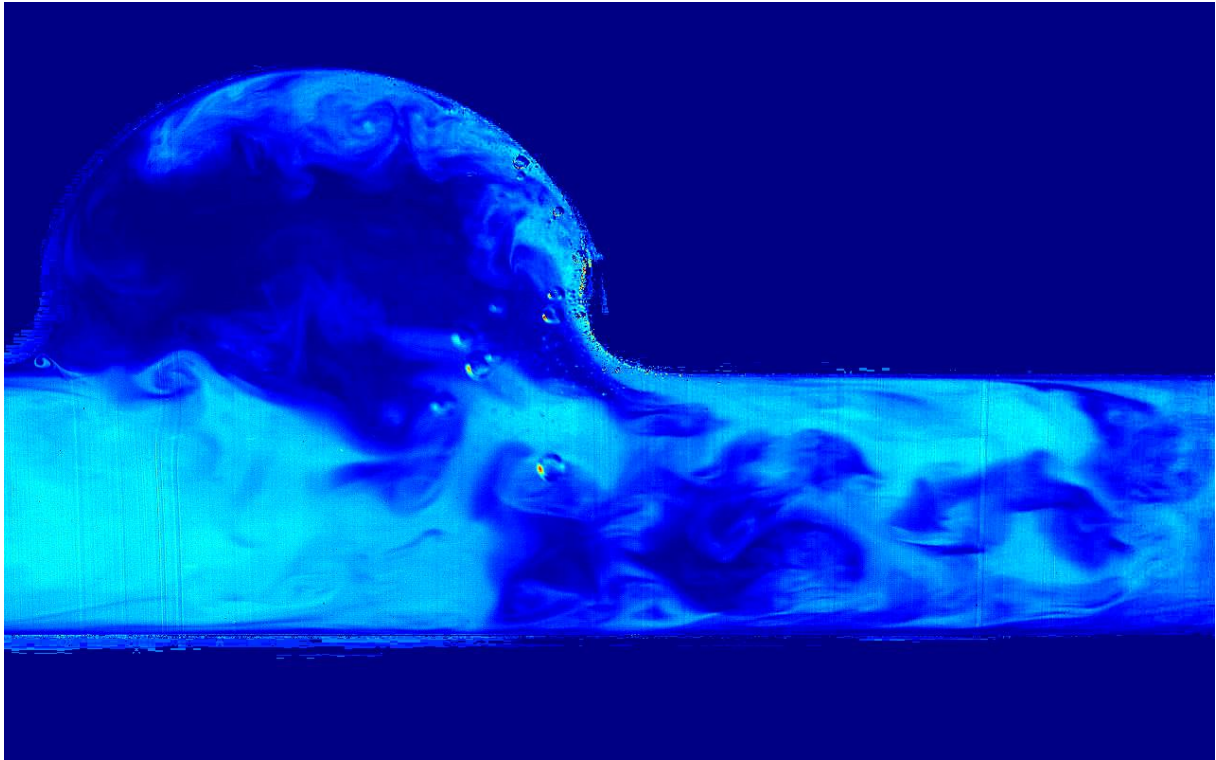
7.3 Zhodnocení výsledků PLIF experimentu pro Reynoldsovo číslo 2000

7.3.1 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 0,5 a 1 sec.

Měření v čase 0,5 sec znázorňuje obrázek 24, na kterém je opět vidět začátek přívodu roztoku do měřené části. Měření v čase 1 sec znázorňuje obrázek 25, na kterém je patrný začátek plnění aneurysmatu, ale zároveň okamžité vyplachování čisté vody z něj. To je způsobeno velkou rychlostí proudící kapaliny a vyšší dynamikou míšení látky mezi oblastí hlavního toku a oblastí aneurysmatu.



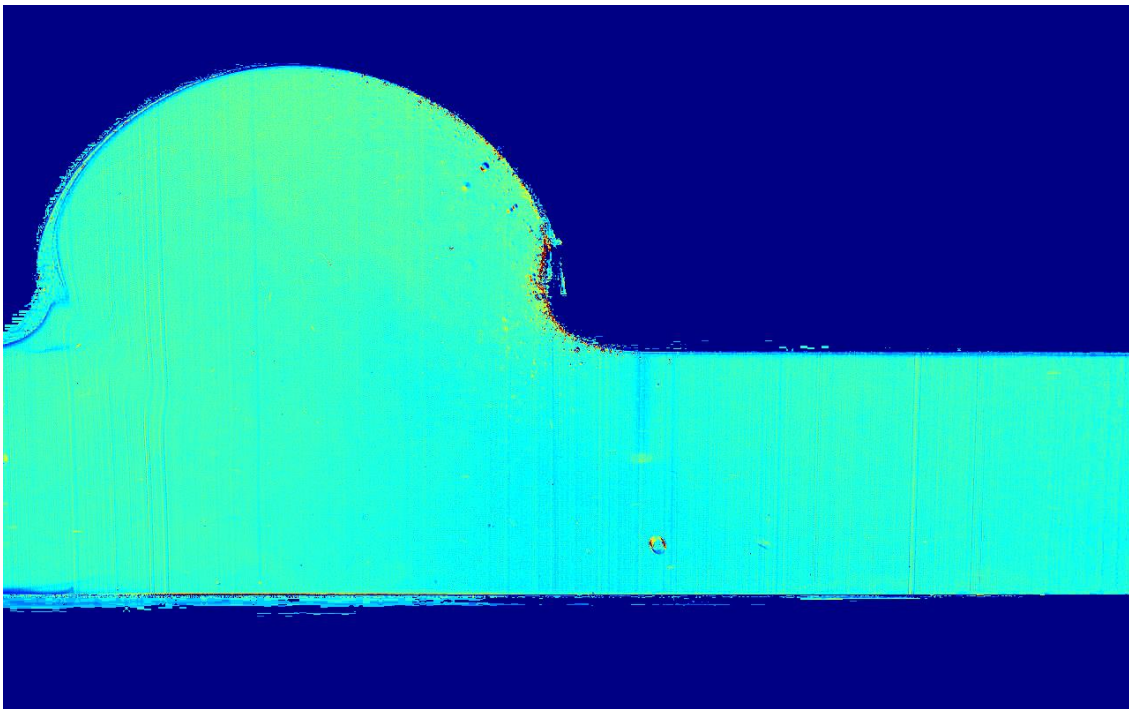
Obrázek 24 – Přívod roztoku do modelu



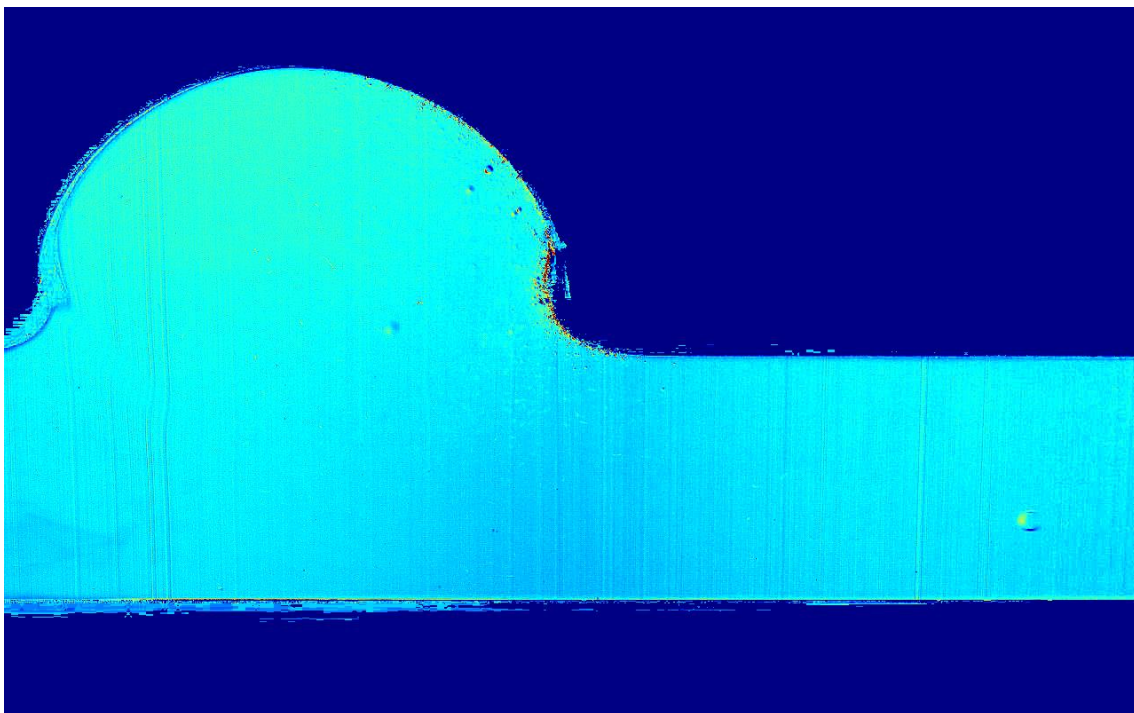
Obrázek 25- Plnění a okamžitý výplach aneurysmatu

7.3.2 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 2 a 5 sec.

Vzhledem k velké rychlosti proudící tekutiny v modelu a přiblížení se k turbulentnímu proudění, toho z obrázků 26 a 27 bohužel moc nevyčteme. Stejně jako u PIV výsledku pro tento režim je i zde patrné, že roztok se rozprostře po celém aneurysmatu, a my proto nemůžeme určit, co se přesně v které části děje.



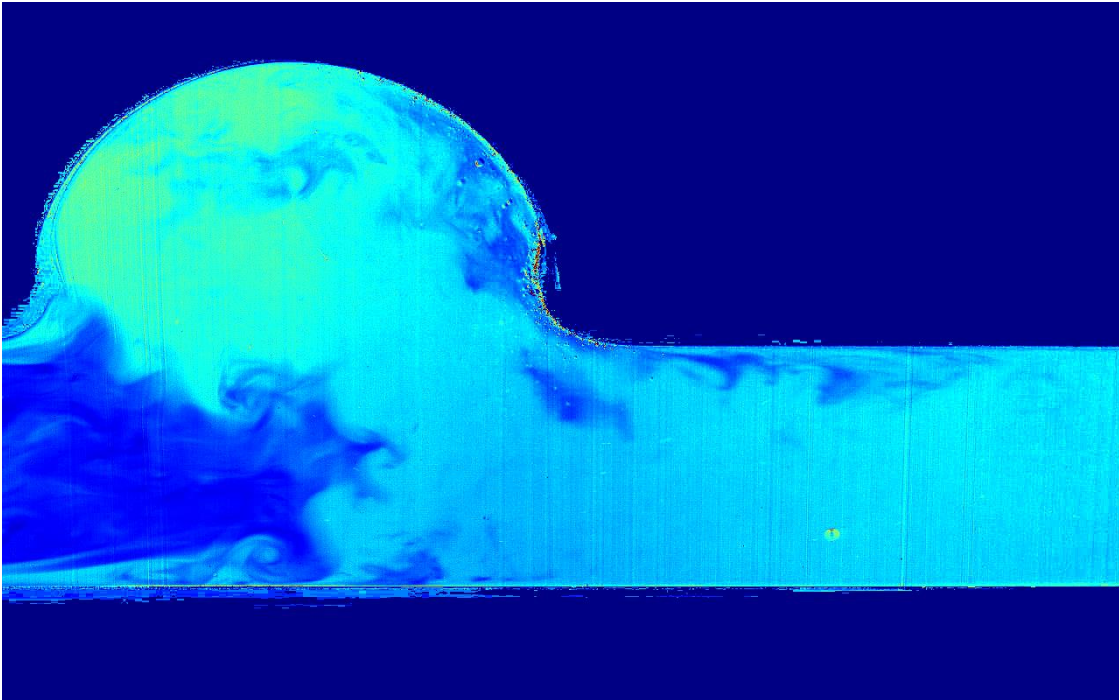
Obrázek 26 – vyplněné aneurysma roztokem v čase 2 sec



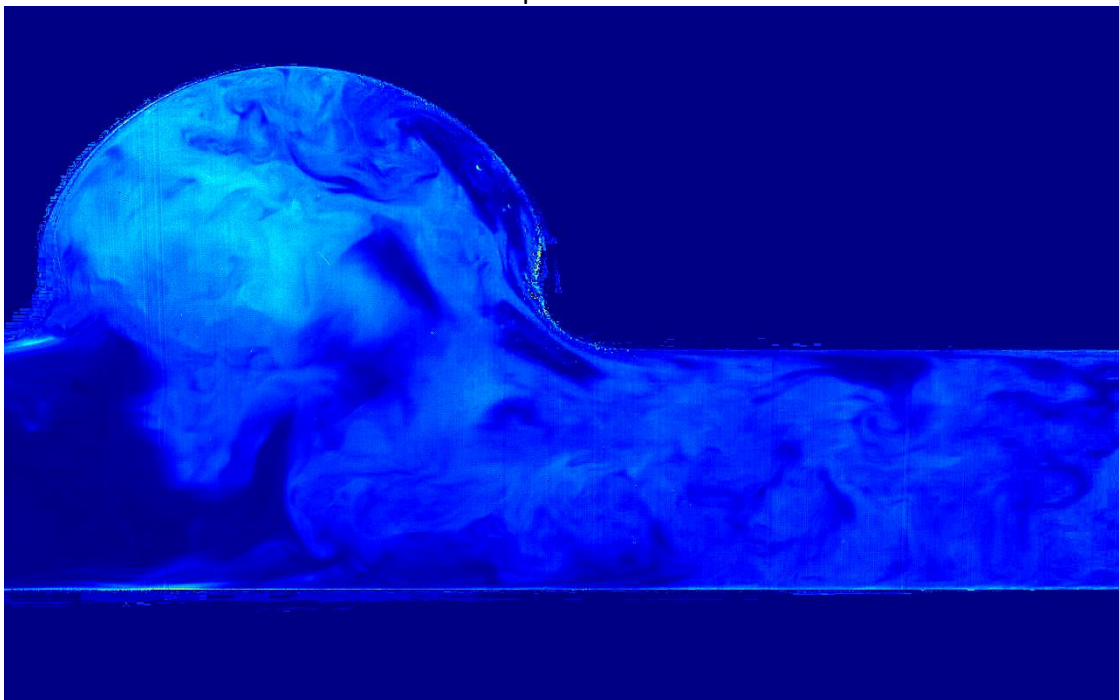
Obrázek 27 – vyplněné aneurysma roztokem v čase 5 sec

7.3.2 Zhodnocení režimu pro Reynoldsovo číslo 2000 v čase 2 a 5 sec.

Měření v čase 2 sec zobrazuje obrázek 28. Na něm je patrný konec přívodu roztoku do modelu. Měření v čase 5 sec znázorňuje obrázek 29. Tento okamžik nám ukazuje výplach aneurysmatu. Je patrné, že k vyplachování nedochází po částech, jako tomu bylo u předchozích režimů, ale kontinuálně. Během několika okamžiků je koncentrace roztoku v aneurysmatu nulová.



Obrázek 28 – Konec přívodu roztoku do modelu



Obrázek 29 – Okamžité vyplachování aneurysmatu

8. Závěr

8.1 Činnosti předcházející vlastnímu měření

K realizaci bakalářské práce bylo nutné vytvořit model aneurysmatu s přesnými parametry, který jsem nejdříve vytvořil v 3D programu SolidWorks. Následně se sestavila experimentální trať pro danou optickou metodu. Potom se musely vypočítat jednotlivé střední rychlosti, průtoky a napětí na čerpadle pro pevně určená Reynoldsova čísla, abychom věděli, při jaké rychlosti máme nastavit na čerpadle kolik voltů.

8.2 Vlastní experiment a diskuze výsledků

Dále proběhl celý experiment PIV metodou, čemuž následovalo zhodnocení výsledků vyhotovených v Matlabu a v Dantec Studiu. Výsledkem metody jsou jednotlivá vektorová rychlostní pole pro různá Reynoldsova čísla. Z výsledků vyplývá, že tři ze čtyř mnou naměřených režimů se moc neliší. Čtvrtý režim, který se měřil skoro na rozhraní turbulentního proudění, je těžko charakterizovatelný touto metodou. Proto jsem se jím zabýval ještě dále a pokoušel jsem se vyhodnotit jednotlivé časové okamžiky právě tohoto proudění.

Po změření a zhodnocení všech režimů pomocí PIV metody se upravila experimentální trať, aby vyhovovala metodě PLIF tím, že se na vysokorychlostní kameru přimontoval filtr, který vidí pouze určité světelné rozhraní. Poté proběhl celý experiment pro již zmíněná čtyři a mnou zvolená Reynoldsova čísla, která se shodovala s měřenými Reynoldsovými čísly v metodě PIV. Po změření všech režimů se jednotlivá data zpracovala opět v Matlabu. Výsledkem pak byly jednotlivé pole koncentrace pro čtyři režimy, na kterých můžeme popisovat chování kapaliny a její koncentraci v určitém okamžiku na určitém místě. Z jednotlivých výsledků jsem mohl určit různé časové okamžiky, na kterých jsem byl schopen komentovat například přívod roztoku do modelu aneurysmatu, plnění aneurysmatu a dobu, po kterou roztok setrval ve výrůstku, než se zcela vyplavil. Z výsledků opět vyplývá, že se tři režimy ze čtyř velice podobají. Čtvrtý režim ani touto metodou nebylo možno zcela do podrobnosti vyhodnotit.

8.3 Návrhy na možné podrobnější zpracování problematiky

V této bakalářské práci jsem se zaměřil pouze na proudění v rovině hlavního toku a měřil jsem pouze čtyři stacionární průtoky. Abychom mohli chování proudu v celém aneurysmatu popsat detailněji, bylo za potřebí sledovat a vyšetřit pohyb částic i v jiných rovinách a také změřit nejenom režimy stacionární, ale i nestacionární.

Měření i v jiných rovinách by nám dalo kompletní 3D obraz o celkovém chování kapaliny v aneurysmatu, díky němuž bychom byli schopni získat další informace. Například kdy se bude aneurysma zanášet, a jestli je model symetrický. Nestacionární průtoky by se přiblížili realitě, protože srdce pracuje periodicky, a jedná se tedy o zdroj nestacionárního proudu.

9. Seznam použité literatury

- [1] *MOJE KREV*. [cit. 2015-06-18]. Dostupné z: <http://www.moje-krev.cz/cevni-soustava/>
- [2] LASHERAS, Juan C. The Biomechanics of Arterial Aneurysms. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2007, **39**(1): 293-319 [cit. 2015-06-18]. DOI: 10.1146/annurev.fluid.39.050905.110128. ISSN 0066-4189. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.fluid.39.050905.110128>
- [3] ZEMAN, Miroslav. *Speciální chirurgie*. 2. vyd. Praha: Galén, 2004, xxiii, 575 s. ISBN 80-726-2260-9.
- [4] WIKI SKRIPTA. [cit. 2015-06-08]. Dostupné z <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Aneurysma>
- [5] WIKI SKRIPTA. [cit. 2015-06-08]. Dostupné z <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Aneurysma>
- [6] VUT FME. [cit. 2015-06-08]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0307.htm>

10. Přílohy

[1] CD – Video s jednotlivými stacionárními režimy