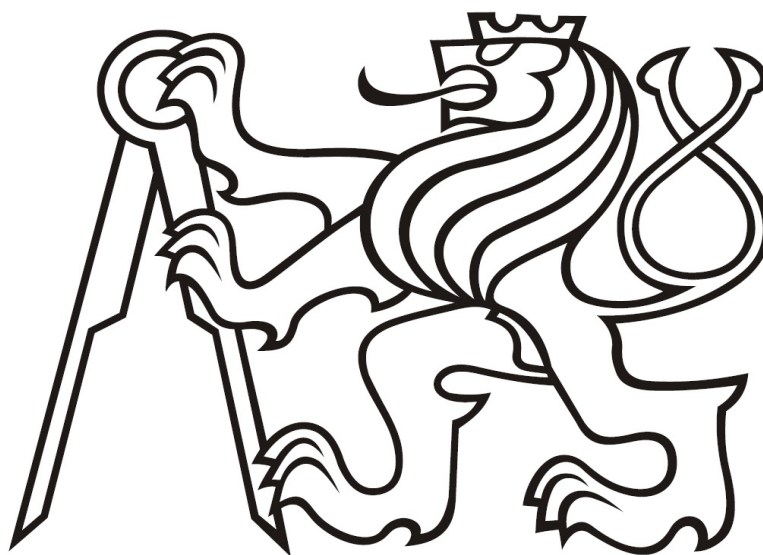


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv geometrie bifurkace na proudové pole

Tadeáš Balek

2015

Vedoucí práce: Ing. Ludmila Nováková, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze 19. 6. 2015

.....

Tadeáš Balek

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Tadeáš Balek
Název práce:	Vliv geometrie bifurkace na proudové pole
Title:	The Effect of Bifurcation Geometry on Flow Pattern
Rozsah práce:	počet stran: 59 počet obrázků: 59 počet tabulek: 9 počet příloh: 2
Rok:	2014/2015
Studijní program:	Aplikovaná mechanika
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí práce:	Ing. Ludmila Nováková, Ph. D.
Klíčová slova:	Tlakový ztrátový součinitel, lidská karotická bifurkace, geometrie bifurkace, rychlostní pole
Keywords:	Pressure loss coefficient, human Carotid bifurcation, bifurcation geometry, velocity field

Cílem práce je stanovení vlivu geometrie bifurkace na proudové pole. Dílčími cíli bylo určení tlakových ztrátových součinitelů, provedení měření rychlostního pole metodou PIV a vizualizace proudění v různých geometriích skleněných modelů lidské karotické bifurkace. Experiment proběhl v režimech stacionárního proudění. Rozsah měřených průtoků odpovídá rozsahu průtoků v cévách. Jako proudící medium byla použita voda. Měření tlakových ztrátových koeficientů bylo provedeno membránovými senzory BHV. Z naměřených dat byly vyhodnoceny ztrátové koeficienty jednotlivých modelů. Z experimentálních dat získaných metodou PIV bylo vyhodnoceno 2D rychlostní pole. Z vizualizace a PIV byl posouzen vliv geometrie na proudění v bulbu bifurkace. Proudění bylo vizualizováno aplikací kontrastního barviva.

Abstract

The aim of this thesis is to determine the effect of geometry on the flow pattern in glass models of human Carotid bifurcation. Partial goals were to determine the pressure loss coefficients of bifurcation models, measurements of velocity fields by PIV method and visualization of the fluid flow in models with different geometries. The experiment was conducted in a stationary flow. The range of measured flow rate corresponds to the range of blood flow in the arteries. The water was used as the flowing medium. Measurements of pressure loss coefficients were done using BHV membrane sensors. The loss coefficients of each model were evaluated from the data. 2D velocity fields were evaluated from the experimental data obtained by PIV method. The influence of model geometry on the flow in the bifurcation was assessed from visualizations and PIV measurements. The flow was visualized by application of the contrast dye.

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval především vedoucímu své práce Ing. Ludmile Novákové Ph. D. za trpělivé vedení a spoustu cenných rad ve všech fázích vzniku této diplomové práce. Také bych velmi rád poděkoval Ing. Ondřejovi Veselému za pomoc při stavbě měřicí trati, měření modelů bifurkace pomocí PIV metody, vytváření vizualizací, měření tlakových ztrátových součinitelů a významnou pomoc při vyhodnocování dat a konzultacích výsledků měření. Dále chci poděkovat Ing. Janovi Kolínskému za praktické rady při provádění experimentu a vyhodnocování výsledků a Ing. Michalu Schmirlerovi Ph. D. za koordinaci výroby součástí pro měřicí trať. V neposlední řadě chci poděkovat Petru Mihalovovi za řemeslnou práci na komponentech měřicí trati a panu Michalovi Zahradníkovi za výrobu skleněných modelů.

Obsah

1 Seznam použitých symbolů.....	2
2 Úvod.....	4
3 Karotická bifurkace.....	5
4 Metody zkoumání karotické bifurkace.....	7
4.1 Magnetická rezonance.....	7
4.2 Počítačová tomografie.....	7
4.3 Duplexní ultrazvuk.....	7
4.4 Numerické metody simulací CFD.....	8
4.4.1 Numerická simulace DNS.....	8
4.4.2 Metoda LES.....	8
4.4.3 Kombinace metod.....	8
4.5 Metoda PIV.....	9
5 Parametry proudění v modelu.....	10
5.1 Bernoulliho rovnice.....	10
5.2 Reynoldsovo číslo	10
5.3 Třecí ztráty	10
5.4 Místní ztráty.....	11
6 PIV metoda.....	12
6.1 Metodika PIV	12
6.2 Popis základní metody 2D PIV.....	12
6.3 Popis jednotlivého měření.....	13
7 Měřicí trať.....	14
7.1 Popis měřicí trati.....	14
7.2 Návrh trati.....	16
7.3 Konstrukce trati.....	16
8 Modely.....	20
8.1 Popis modelů bifurkace	20
8.2 Návrh modelů bifurkace	21
8.3 Výroba modelů.....	24
9 Metodika experimentu.....	25
9.1 Kalibrace turbínkových průtokoměrů.....	25
9.2 Měření tlakových ztrát.....	28
9.2.1 Použité přístroje a software.....	29
9.3 Měření metodou PIV.....	29
9.3.1 Použité přístroje a software.....	30
9.4 Vizualizace proudění.....	32
9.4.1 Použité přístroje.....	32
10 Výsledky měření.....	33
10.1 Tlakové ztrátové součinitele.....	33
10.1.1 Vyhodnocená data Model 1.....	34
10.1.2 Vyhodnocená data Model 2.....	38
10.1.3 Vyhodnocená data Model 3.....	41
10.2 Měření metodou PIV.....	44
10.2.1 Model 1.....	44
10.2.2 Model 2.....	45
10.2.3 Model 3.....	47
10.3 Vizualizace proudění.....	48
11 Závěr.....	50
12 Literatura.....	52

13 Seznam obrázků.....	55
14 Seznam tabulek.....	57
15 Seznam rovnic.....	58
16 Seznam příloh.....	59

1 Seznam použitých symbolů

g	[m.s ⁻²]	gravitační zrychlení
h	[m]	výška
p	[Pa]	tlak
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota vody
e_z	[J.kg ⁻¹]	měrná ztrátová energie
p_z	[Pa]	ztrátový tlak
Q	[l.s ⁻¹]	průtok vody potrubím
Q_j	[l.s ⁻¹]	průtok vody pro j-té měření
V_i	[l]	objem pro i-té měření
t_j	[s]	čas j-tého měření
u	[V]	napětí z turbínkového průtokoměru
\bar{Q}	[l.s ⁻¹]	průměrná hodnota j-tých měření průtoku
\bar{u}	[V]	průměrná hodnota napětí z turbínkového průtokoměru
k_k	[1]	kalibrační koeficient turbínkového průtokoměru
Δp_1	[Pa]	tlaková ztráta ve větvi s bulbem
Δp_2	[Pa]	tlaková ztráta ve větvi bez bulbu
$\Delta \tau$	[s]	časový interval mezi snímky
Δx	[m]	posuv částice ve směru osy x
Δy	[m]	posuv částice ve směru osy y
w_x	[m.s ⁻¹]	rychlost částice ve směru osy x
w_y	[m.s ⁻¹]	rychlost částice ve směru osy y
v	[m.s ⁻¹]	střední objemová rychlost

c	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	střední rychlost
ν	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita tekutiny
k/d	[1]	relativní drsnost
l	[m]	délka potrubí
d	[m]	průměr potrubí
λ	[1]	součinitel třecích ztrát
ζ	[1]	ztrátový součinitel

2 Úvod

Tato práce vznikla na základě vzájemné spolupráce Fakulty Strojní ČVUT a 1. lékařské fakulty UK v Praze. Při výzkumu proudění v kardiovaskulárním systému člověka. Výzkum je zaměřen na vzájemnou interakci krve se stěnami cév, chování proudu v určitých útvarech cévního systému a vliv tvaru (geometrie) daných míst krevního řečiště na proudění krve v těchto místech.

Cílem práce je posoudit vliv geometrie bulbu karotické bifurkace na součinitele tlakové ztráty a vizualizovat proudění v modelech. Za tímto účelem byly navrženy tři modely s rozdílným tvarem a velikostí bulbu. Na těchto modelech proběhlo měření tlakových ztrátových součinitelů a vizualizace metodou PIV ve stacionárních režimech proudění. Pro zviditelnění chování proudu tekutiny v modelech bifurkace bylo využito vstříknutí kontrastního barviva do proudu před modelem a byl pořízen video záznam.

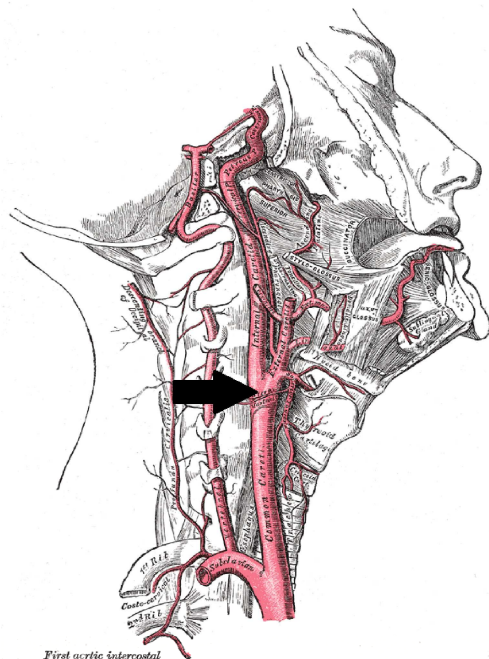
V klinickém výzkumu jsou k měření proudění v bifurkaci používány *in vivo* metody např.: UVP (Ultrasound Velocity Profile). Pro zjištění geometrie je používána metoda CTAG (Computed Tomography Angiography). Přesnost *in vivo* metod je omezená, proto se v současné době výzkum proudění v bifurkaci provádí v laboratoři a také se numericky modeluje. V laboratoři je možné použít široké spektrum metod pro měření rychlostí např.: PIV (Particle Image Velocimetry), LDA (Laser Doppler Anemometry) nebo UVP (Ultrasound Velocity Profile).

Výzkum proudění tekutiny bifurkací má velký význam pro pochopení funkce bulbu a také pro včasnou diagnostiku onemocnění. Bulby bifurkací se mají tendenci zanášet "nečistotami". Tyto usazeniny narušují správnou funkci krevního oběhu v daném místě. Pokud se problému zanesení a narušení proudění krve nevěnuje pozornost, může usazenina zcela znemožnit průtok krve a způsobit i smrt jedince. Je tedy důležité vědět, jak se v bifurkaci proud chová pro možnost určení příčiny usazování a lepší zacílení léčby. [1]

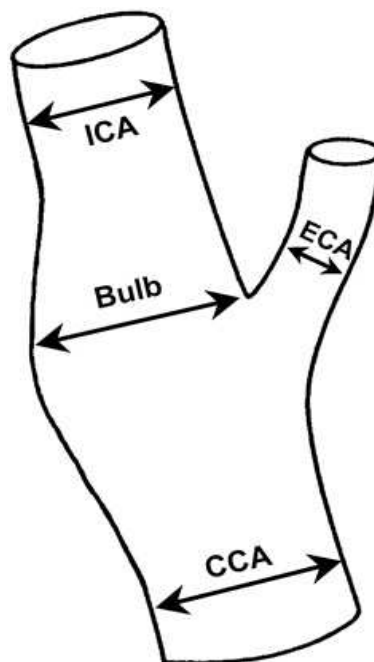
Aby bylo možné uskutečnit měření, bylo třeba navrhnout a sestavit měřící trať a navrhnout a nechat vyrobit modely bifurkací. Další text bude věnován teoretickému rozboru proudění v bifurkaci, návrhu modelů, konstrukci experimentální trati, realizaci experimentu a vyhodnocení naměřených dat.

3 Karotická bifurkace

Karotická bifurkace (Obr. 1) je rozdělení krkavice (Common Carotid Artery-CCA) do dvou větví - vnitřní (Internal Carotid Artery-ICA) vedoucí krev do mozku a vnější karotidy (External Carotid Artery-ECA) vedoucí krev do obličeje. Na vnitřní karotidě se vyskytuje tzv. sinus (bulb, výduť), který je vidět na Obr. 2.

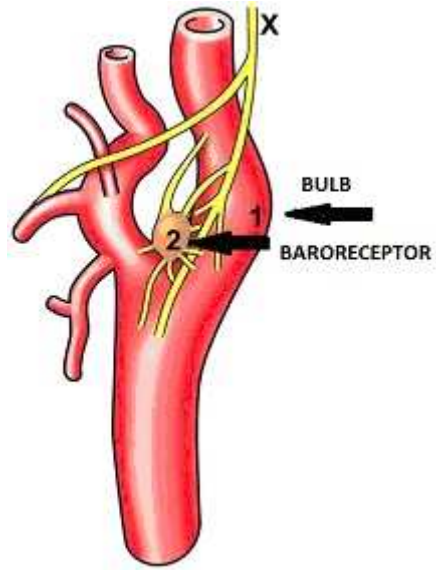


Obr. 1: Umístění karotické bifurkace [2]



Obr. 2: Karotické bifurkace (sinus - bulb) [3]

Karotický sinus je citlivý na změny tlaku krve. V místě karotického bulbu se nachází velmi významný baroreceptor (viz Obr.3). Baroreceptory jsou mechanoreceptory, které reagují na rychlé změny tlaku v artériích a kompenzují je na úroveň středních tlakových hodnot. Je-li narušena funkčnost baroreflexního mechanismu, nedochází k regulaci tlakových změn arteriální krve, což má za následek významné kolísání krevního tlaku. Taková situace může mít v dlouhodobém horizontu vliv na změny geometrie bulbu. V důsledku porušených parametrů hemodynamiky (smykové napětí na stěně, recirkulace...) se na stěně mohou usazovat aterosklerotické pláty, které – jsou-li velké a nestabilní – způsobují ischemické choroby. [4], [5], [6], [7]



Obr. 3: Umístění baroreceptoru v karotické bifurkaci [8]

4 Metody zkoumání karotické bifurkace

Každoročně podle statistik WHO (World Health Organisation) narůstá výskyt cévních mozkových příhod (ICMP) v populaci o 1–1,5 % ročně. Kombinace rizikových faktorů, které způsobují ICMP, má na svědomí až 9% úmrtí v celosvětovém měřítku. Téměř třetina pacientů na ICMP zemře, další třetina má celoživotní následky. Příčinou, která často vede k ICMP, je ateroskleróza spolu s rizikem následků v podobě zahuštění a tvrdnutí cévních stěn, popřípadě s rizikem tvorby aterosklerotických plátů a následnou trombózou. Zmínky o možné spojitosti mezi ICMP a zúžením (stenózou) vnitřní karotické artérie (ICA) se datují ke konci 19.století. Mnohé další studie potvrdily tuto přímou souvislost. Měření stupně stenózy a hemodynamických parametrů je hlavním prediktorem pro riziko mrtvice.

Pro diagnostiku závažnosti stenotických arteriálních změn byla původně hojně využívána metoda rentgenové angiografie. Díky její invazivnosti byla tato metoda postupně nahrazena metodami MRI – magnetická rezonance, CT – počítačová tomografie, duplexní ultrazvuk. [10]

4.1 Magnetická rezonance

MRI je díky svým atributům a využití poměrně komplexní. Je využitelná – v dnešní době již bez použití kontrastní látky (principy „time-off-flight“- TOF, „phase contrast“-PC), také pro vyšetření karotických cév. Tato metoda má však své limity – není vhodná tam, kde se očekává turbulentní proudění. [10]

4.2 Počítačová tomografie

CT je neinvazivní metoda, která umožňuje díky použití rentgenového záření zobrazit tělo v řezech. Tímto zobrazením lze rozlišit takové měkké tkáně a patologické procesy v nich, které se při podání kontrastní látky (nebo bez ní) vykazují odlišnou hustotou od okolního prostředí.

4.3 Duplexní ultrazvuk

Díky klasické sonografii lze získat informace o parametrech statických tkání. Díky Dopplerovu jevu je možné získat doplňující informace např. o pohybu krve. Duplexní

ultrazvuk umožňuje získat dvojrozměrné zobrazení struktury cévního systému včetně proudu krevní hmoty, Dopplerova jevu lze využít také pro měření rychlosti toku krve a k zobrazení struktury cév. Základním principem Dopplerova jevu je popis změny frekvence a vlnové délky signálu vysílanému proti signálu přijímanému. Změna frekvence je způsobena existující vzájemnou rychlostí mezi vysílačem a přijímačem.

4.4 Numerické metody simulací CFD

Významnými metodami mapujícími stenotické struktury jsou numerické metody simulací proudění tekutin využívající softwarových řešení CFD (Computational Fluid Dynamics), postavených na RANS rovnicích (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations), na základě kterých je možné zmapovat i nestabilní toky. V případě CFD je pro řešení přenosu hybnosti při proudění použita rovnice kontinuity a rovnice zachování hybnosti. CFD aplikace jsou obsaženy např. v komplexním softwarovém řešení Ansys, modul Fluent.

4.4.1 Numerická simulace DNS

Vhodným a používaným systémem pro numerickou simulaci přechodných jevů je systém DNS (Direct Numerical Simulation), který řeší celé spektrum turbulentních výkyvů. Poprvé byla tato metoda použita pro simulaci proudění v stenóze karotidy v roce 2008 [8]. Výsledky této metody lze považovat za srovnatelné s exaktním měřením.

4.4.2 Metoda LES

Další metodou, která byla původně navržena v roce 1963 Josephem Smagorinskym jako matematický model pro simulaci atmosférických proudů vzduchu, je metoda LES (Large Eddy Simulation). LES se v současné době používá pro nejrůznější aplikace v technice, včetně aplikací pro výzkum a modelaci proudění, vírů a smykového napětí podél mezní vrstvy stenózní atrié. [10]

4.4.3 Kombinace metod

Existují i studie srovnávající výsledky jednotlivých metod, respektive návazně metody využívající či kombinující například metodu MRI a CFD. Viz například [4], kde Milner s kolektivem srovnávali geometrie bifurkace zjištěné metodou MRI s numerickou simulací ideálního modelu karotidy modelovaného metodou CFD.

Většina studií s kombinací MRI a CFD metody na karotidách však byla prováděna na modelech nevykazujících patologické změny. V modelech stenóz, kde dochází k velkému rozptylu rychlostí, vykazuje metoda MRI nedostatky.

4.5 Metoda PIV

Právě PIV (Particle Image Velocimetry) může sloužit jako validační metoda k oběma výše zmíněným metodám – klinické MRI a numerické simulace CFD. Aplikace PIV v kardiovaskulární problematice je velmi rozšířená, pravděpodobně nejčetnější výzkumy jsou prováděny na modelech trombóz srdečních chlopní [12] nebo například mozkových aneurismat [13]. Jednou z nemoha publikovaných studií s použitím metody PIV pro model karotidy je studie publikovaná Buchmannem a kolektivem – viz [14].

5 Parametry proudění v modelu

V této kapitole je nastíněna teorie proudění tekutin a přiblížena problematika místní ztráty v bifurkaci.

5.1 Bernoulliova rovnice

Bernoulliova rovnice vyjadřuje zákon zachování energie. Z fyziky se jedná o první větu termodynamiky. Protože nás zajímá reálná - tedy viskózní tekutina budeme dále pracovat s tzv. rovnicí energetickou nebo rozšířenou Bernoulliovou rovnicí. Bernoulliovu rovnici mezi dvěma průřezy, kde dochází k disipaci a tím ke změně vnitřní energie můžeme psát ve tvaru:

$$g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + e_z ; \quad (1)$$

kde e_z je měrná ztrátová energie. [15]

Pro účely této práce se vztah (1) redukuje na:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + e_z ; \quad (2)$$

kde $h_1 = h_2$ z (1). Uvažuje se laminární proudění s nevyvinutým profilem.

5.2 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo se značí Re a vyjadřuje poměr $Re = \frac{c \cdot d}{\nu}$ (3), kde c je střední rychlost, d průměr potrubí a ν je kinematická viskozita tekutiny. Pro přechod z laminárního do turbulentního proudění je důležité tzv. kritické Reynoldsovo číslo Re_k , což je dolní kritické číslo a jeho hodnota pro potrubí kruhového průřezu je $Re_k = 2300$. [15], [16]

V prováděném experimentu se hodnota Reynoldsova čísla pohybovala pod hodnotou Re_k a jednalo se tedy o laminární proudění.

5.3 Třecí ztráty

Pro potrubí kruhového průměru jsou třecí ztráty závislé na vlastnostech tekutiny (hustota,

viskozita, atd.) a na vlastnostech potrubí (délka, průměr, drsnost). Pro výpočet třecích ztrát se nejčastěji používá Wiesbachův vztah:

$$e_z = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (4)$$

kde v je střední objemová rychlost, l délka potrubí, d průměr potrubí, λ součinitel třecích ztrát $\lambda = f(Re, k/d)$, kde k/d je relativní drsnost. [15]

Při vyhodnocování tlakových ztrátových součinitelů modelů bifurkací hrají jistou roli i třecí ztráty v modelech bifurkací.

5.4 Místní ztráty

Místní ztráty se připočítávají k třecím ztrátám. Jsou způsobené geometrií cesty, kterou tekutina protéká (ztráty změnou směru, změna průřezu, atd.). Velikost místní ztráty vypočítáme z:

$$e_z = \zeta \cdot (v^2/2); \quad (5)$$

kde ζ je ztrátový součinitel závislý na geometrii místní ztráty. [15] Určuje se většinou experimentálně a jeho hodnoty lze vyhledat v příručkách [16].

Existují místní ztráty na vstupu do potrubí, změna směru proudu (koleno, ohyb), náhlé rozšíření, náhlé zúžení a další. Mezi místní ztráty řadíme i ztrátu v bifurkaci. Bifurkace způsobuje ztráty kinetické energie proudu arteriální krve. V místě změny průřezu a směru proudu dochází k odtržení proudu od stěny, což má za následek vznik vírů, tím je kinetická energie proudu snížena o kinetickou energii těchto vírů. [15], [16]

Určení ztrátového součinitele u bifurkace je ale poměrně složité. Závisí například na rychlostech kapaliny v jednotlivých větvích bifurkace a na úhlu, který svírá jeden výstup s druhým. [16] Dalším faktorem, na kterém závisí tlaková ztráta, je zaoblení výstupů z modelu. Proto spojky pro napojení modelů do experimentální trati navržené v této práci mění velmi povolna průřez modelu na průřez trubky trati. Skutečnost, že v těle je bifurkace 3D útvar, způsobuje místní ztráty, které významným způsobem ovlivňují proudové pole v bifurkaci.

6 PIV metoda

V následující kapitole je pojednáno o metodě PIV (Particle Image Velocimetry), její metodice, uplatnění a popisu měření.

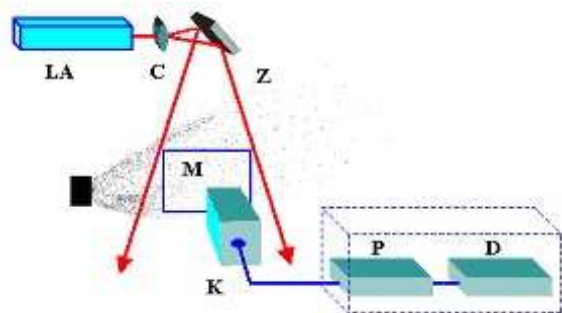
6.1 Metodika PIV

Metoda PIV vizualizuje proudění zaváděním částic a díky počítačovému zpracování obrazu umožňuje vytvořit vektorové mapy rychlostí proudového pole. Metoda je rozšířena a hojně využívána nejen ve strojírenství, leteckém a automobilovém průmyslu, je využívána také k simulacím v lékařství [21],[22].

Důležitou výhodou PIV je schopnost měření okamžitých rychlostí s vysokým prostorovým a časovým rozlišením. Díky této možnosti se PIV metoda ujala pro hemodynamické studie na kardiovaskulárních modelech. Účinnost a transparentnost PIV inspirovala k vývoji dalších technik, jako například ultrazvukové PIV (echo-PIV), mikro-PIV (μ PIV), mikro ultrazvuk PIV, x-ray PIV, z nichž všechny využívají základní princip této metody.

6.2 Popis základní metody 2D PIV

Příklad varianty zařízení pro PIV je schématicky znázorněn na Obr. 4. Světelný svazek vedený optickým vláknem z pulzního laseru LA prochází cylindrickou čočkou C, která upravuje jeho tvar do podoby „světelného nože“ a po odraze na zrcadle Z je jím osvětlena vybraná měřicí rovina M. Optické vlákno je vhodné použít pro méně přístupná místa kvůli usnadnění manipulace. Kolmo k rovině „světelného nože“ je umístěna kamera K, obvykle se



Obr. 4: Schema měření metodou PIV [14]

používá CCD kamera, která umožňuje počítačové zpracování měření. Počítač má integrovanou digitalizační kartu a PIV procesor, který zpracovává data z jednoho měření.

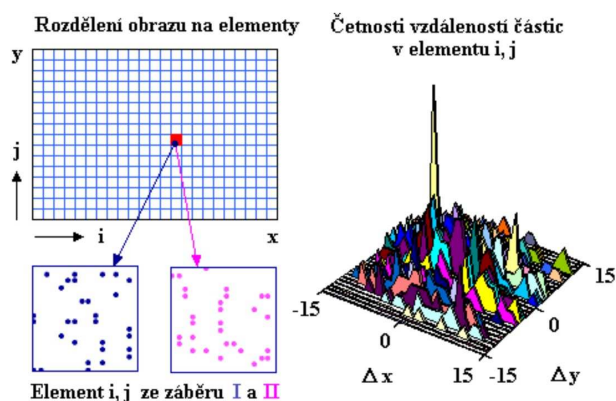
Tato data se použijí pro vektorovou mapu rychlostního pole. Pokud je třeba získat střední hodnoty rychlostí v rovině M, je nutné data z několika měření v rovině M zpracovat pomocí datového procesoru. To zajistí vyšší přesnost výsledků. Stejně tak lze provést několik měření v paralelních rovinách a získat tak střední hodnoty rychlostí v dané rovině nebo obraz 3D proudění. [19], [20]

6.3 Popis jednotlivého měření

Pulsní laser vyšle obvykle dva (lze i více) světelné pulsy se známou frekvencí, kamera K zaznamená obrazy částic v různých časových intervalech, přičemž interval mezi snímky je $\Delta\tau$. PIV procesor P analyzuje polohy částic v jednotlivých záběrech a vyhodnotí posun částic Δx a Δy (měřítko zobrazení je známé). Složky rychlostí w_x a w_y v daném místě, lze při známé hodnotě $\Delta\tau$ a $\Delta x, \Delta y$ vypočítat podle vztahu:

$$w_x = \frac{\Delta x}{\Delta\tau}; \quad w_y = \frac{\Delta y}{\Delta\tau} \quad (6),(7)$$

Pro vyhodnocení posuvu částic $\Delta x, \Delta y$ existují různé metody. Obvykle se provádí tak, že oba záběry jsou rozděleny na elementy. Element je definován jako dostatečně malá část obrazu s dostatečným počtem obrazových bodů. Pokud se v elementu nachází pouze jedna viditelná částice, stanovíme Δx a Δy jako rozdíl poloh částice v obrazech II a I. Pokud je v elementu zřetelných částic více, stanovíme Δx a Δy z četností vzdáleností částic v obrazech II oproti I, viz Obr. 5. Výsledek Δx a Δy ve vyšetřovaném elementu je pak dán vzdáleností s



Obr. 5: Stanovení Δx a Δy [14]

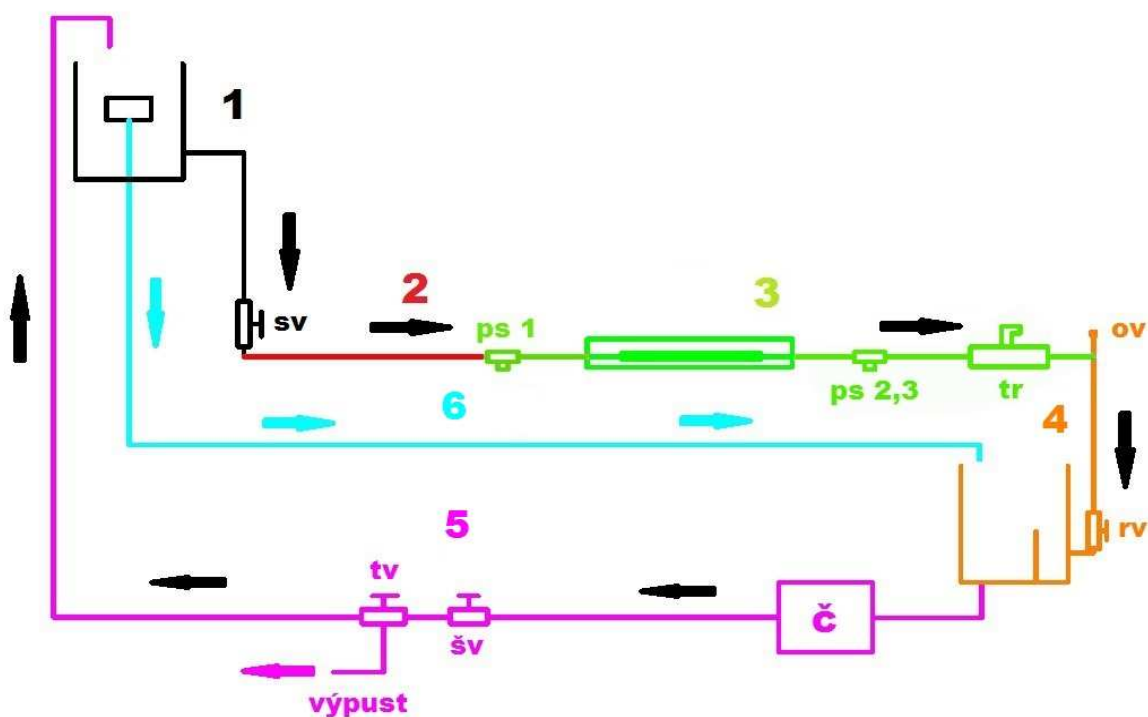
nevyšší četností. Výsledkem měření a zpracování výsledků jsou pak vizualizace pohybujících se částic (kvalitativní výsledky) a vektorová mapa rychlostí (kvantitativní výsledky). [17], [18], [19], [20]

7 Měřicí trať

Pro uskutečnění experimentu bylo třeba navrhnout a sestavit měřicí trať pro stacionární proudění. Za tímto účelem byla sestavena experimentální trať, o níž pojednává následující text.

7.1 Popis měřicí trati

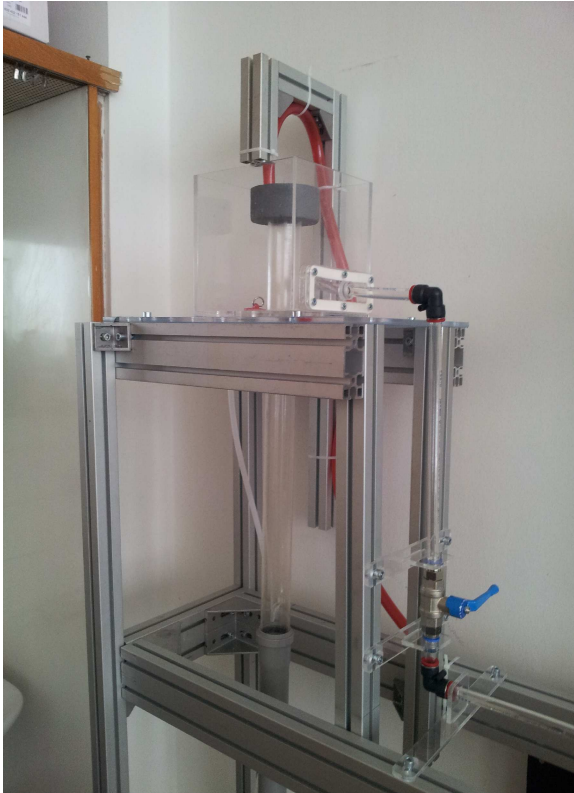
Jedná se o trať pro stacionární proudění. Lze ji rozdělit do několika částí, které ukazuje schéma měřicí trati na Obr. 6. Černé šipky naznačují směr proudění v experimentální trati a bleděmodré šipky ukazují směr toku vody z přepadu. Vstupní část se sestává ze vstupní nádoby (rezervoáru) s přepadem pro zajištění konstantní hladiny a stavěcího ventilu (sv), který slouží k uzavření vstupní části, aby bylo možné rozpojit trať v následujících částech. Vstupní část je vidět na Obr. 7. Ustalovací část, kterou tvoří rovná trubka, slouží k uklidnění



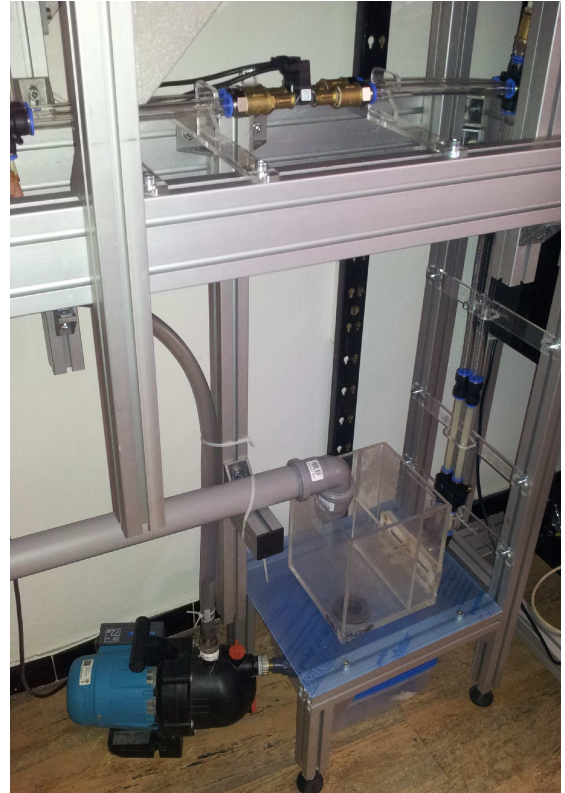
Obr. 6: Schema měřicí trati : 1 – vstupní část, 2 – ustalovací část, 3 – měřicí část, 4 – výstupní část, 5 – přečerpávací část, 6 – odpadní část

proudu tekutiny před vstupem do měřicí části. Měřicí část se skládá z měřicí nádoby s modelem, z míst pro odběr statického tlaku ze stěny (ps 1, 2, 3) viz Obr. 6 a 9 a z

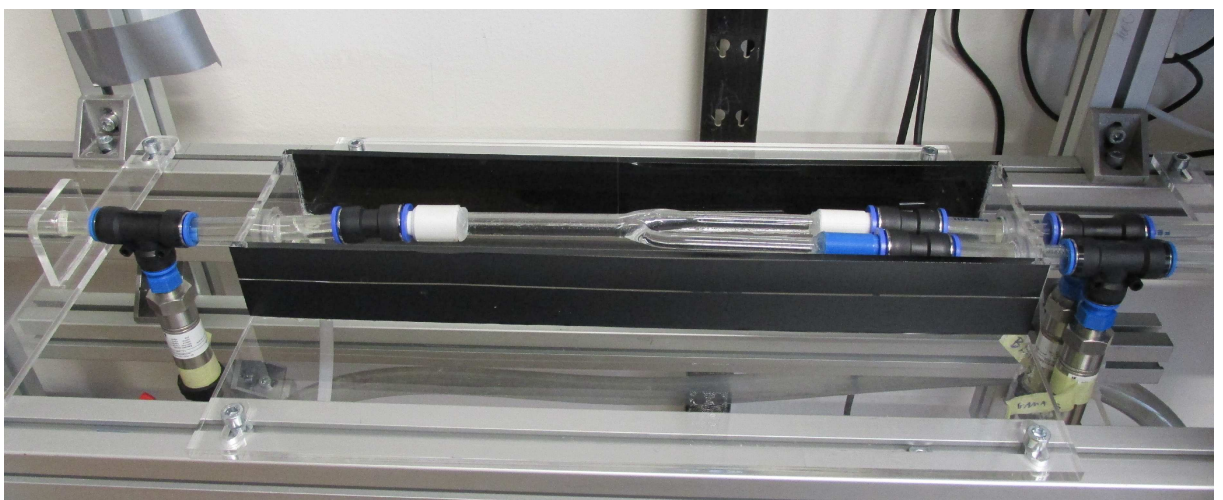
turbínkových průtokoměrů (tr) Obr. 6 a 8. Součástí výstupní části jsou odvzdušňovací ventily (ov), regulační ventily (rv) a výstupní nádoba s přepadem pro udržení konstantní hladiny. Výstupní část je možné vidět na Obr. 8. Následuje přečerpávací část, kde je čerpadlem (č) odčerpána voda přes škrťací ventil (šv) a trojcestný (vypouštěcí) ventil (tv) zpět do vstupní nádoby. Část odpadní vede přebytečnou vodu z rezervoáru do výstupní nádoby.



Obr. 7: Vstupní část trati



Obr. 8: Turbínkové průtokoměry a výstupní část trati



Obr. 9: Měřící nádoba s modelem, tlakové snímače

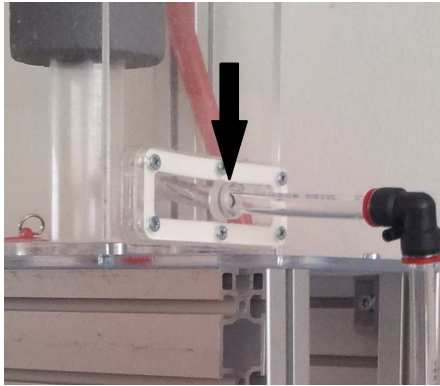
7.2 Návrh trati

Pro návrh měřicí trati byly stanoveny základní požadavky. Bylo třeba zajistit dostatečný tlakový spád s ohledem na požadované průtoky (od 4 – 20 ml/s) a měřicí rozsahy použitých tlakových snímačů. Jedním z hlavních návrhových faktorů byl proto vnitřní průměr trubek měřicí trati. Vzhledem k měření tlakových ztrát byl vnitřní průměr trubek přizpůsoben tak, aby tlakové ztráty větví byly v měřitelném rozsahu snímačů tlaku a zároveň průtoky odpovídaly průtokům v cévách. [1] Dostatečného tlakového spádu trati bylo dosaženo zvýšením vstupní nádoby viz Obr. 7 a 13. Při návrhu bylo počítáno i s nutnou rezervou tlakového spádu kompenzující třecí ztráty v trati a místní ztráty jejích komponentů. Dále bylo třeba navrhnout experimentální trať co možná nejkompaktněji, kvůli omezenému prostoru laboratoře a také co nejmenšímu objemu vody v trati. Trať musela umožňovat měření a regulaci průtoků v obou větvích nezávisle na sobě. Pro měření průtoků byly zvoleny turbínkové průtokoměry, v jejichž měřitelném rozsahu se pohyboval návrhový rozsah průtoků. K regulaci byly použity dva ventily FESTO stavebnice. Bylo třeba navrhnout systém napojení modelů do trati. To muselo být kvůli výměně modelů snadno rozebíratelné a zároveň těsné. Aby bylo možné vyměnit měřené modely, aniž by se musela vypustit celá měřicí trať, byl navržen systém uzavření měřicí části trati. Pro měření tlakových ztrát bylo třeba vyřešit napojení tlakových snímačů do experimentální trati. Dalšími požadavky na měřicí trať byla možnost jejího snadného odvodu a vypuštění. Kvůli prováděným měřením bylo třeba navrhnout trať tak, aby se dala použít pro různá měření s minimálními úpravami. V neposlední řadě byla požadavkem na měřicí trať jednoduchost a praktičnost jejího použití a obsluhy.

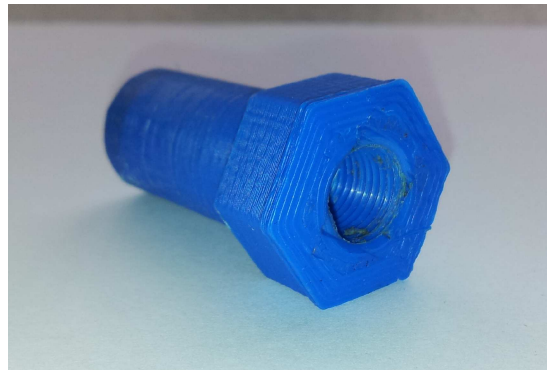
7.3 Konstrukce trati

Nosná konstrukce měřicí trati byla sestavena ze stavebnice Alutec. S ohledem na návrhové požadavky na experimentální trať byl zvolen pro její stavbu systém stavebnice FESTO s hadicemi o vnitřním průměru 11 mm a vnějším napojovacím průměru 16 mm. Díky systému hadic a spojovacího materiálu FESTO byly splněny požadavky na těsnost spojů, jejich relativně snadnou rozebíratelnost, ale hlavně možnost díky speciálně zkonstruovaným a vyrobeným nástavcům jednoduchého zapojení modelů a měřicího aparátu do experimentální trati. Hadice byla zvolena z průhledného materiálu, aby bylo možné sledovat, kde se drží vzduchové bubliny a bylo tak jednodušší trať odvodu. Hadici bylo nutné na několika

místech podepřít speciálně navrženými vodícími držáky vyrobenými z plexiskla. Tímto bylo zabráněno hadici v prohýbání a byla zajištěna neměnná poloha hadic v průběhu experimentu. Pro zapojení tlakových snímačů bylo využito spojky ve tvaru T ze stavebnice FESTO a speciálně navrženého přípravku viz Obr. 11. Ten byl navržen tak, aby se dal zapojit přímo do



Obr. 10: Přírubový systém, nákrůžek



Obr. 11: Přípravek pro zapojení tlakových snímačů

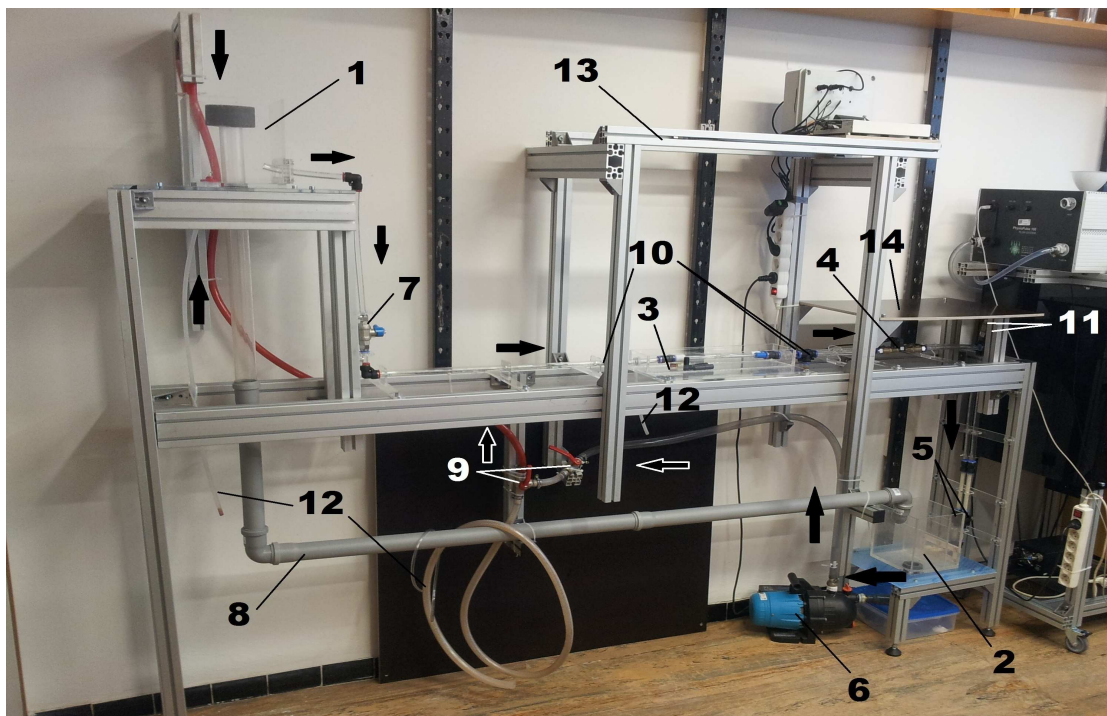


Obr. 12: Model s nalepenými spojkami

spojky FESTO a bylo možné do něj napojit tlakový snímač. Místa odběrů tlaku byla vzdálena 15 cm na obou stranách od měřeného modelu. Celek se zapojenými tlakovými snímači je znázorněn na Obr. 9. Výkresová dokumentace přípravku je v příloze 1. Přípravek byl vyroben metodou 3D tisku. Pro napojení modelů do trati byly zkonstruovány a vyrobeny metodou 3D tisku spojky umožňující napojení modelů do trati pomocí spojovacích součástí stavebnice FESTO. Pro každý model byly vyrobeny tři spojky. Ke spojení skleněných modelů a plastových spojek bylo využito sanitárního silikonu. Na Obr. 12 je ukázán model s nalepenými spojkami a na Obr. 9 pak model zapojený do měřicí trati. Výkresová dokumentace spojek je v příloze 2. Vstupní a výstupní nádoby byly vyrobeny externí firmou z plexiskla a byly osazeny přírubovým systémem (Obr. 10), který umožňuje napojení libovolného pokračování trati. Pro konstrukci měřicí trati bylo třeba vyrobit dvě speciální příruby pro napojení nádob do trati. Pro utěsnění hadic v přírubě bylo použito o – kroužku v

nákrůžku, který byl přilepen na přírubu viz Obr. 10. Příruby i nákrůžek pro vstupní a výstupní nádoby byli vyrobeny z plexiskla. Aby mohlo být uskutečněno měření metodou PIV, kde musí být měřený model zatopený vodou, bylo třeba vyrobit měřicí nádobu (Obr. 9). Měřicí nádoba byla vyrobena z plexiskla tak, aby bylo možné pohodlně manipulovat s modelem uvnitř. Utěsnění hadice v měřicí nádobě bylo zajištěno nalepením nákrůžků s o – kroužky stejně jako u přírub vstupní a výstupní nádoby. Nad měřicí nádobou byla namontována platforma na umístění měřicího zařízení např. měřicí karty tlakových snímačů nebo kamery pro měření metodou PIV. Vedle platformy pro měřicí techniku byl umístěn stolek pro počítač viz. Obr. 13.

Stacionárního proudění bylo dosaženo přepadem ve vstupní nádobě, která byla umístěna na vyvýšeném podstavci kvůli dostatečnému tlakovému spádu v trati viz. Obr. 13 nebo Obr. 7.



Obr. 13: Měřicí trať - 1-vstupní nádoba s přepadem, 2-výstupní nádoba, 3-měřicí nádoba s modelem, 4-turbínkové průtokoměry, 5-regulační ventily, 6-čerpadlo, 7-uzavírací ventil, 8-odpad, 9-škrťací vypouštěcí ventil, 10-přípravky pro tlakové snímače, 11-odvzdušňovací ventily, 12-systém vypuštění trati, 13-platforma pro měřicí přístroje, 14-stolek

Uzavírací ventil (Obr. 6, Obr. 7 , Obr. 13) byl zařazen, aby bylo možné uzavřít průtok další částí trati a tím bylo umožněno vyměnit model, aniž by musela být vypuštěna celá měřicí trať. Do přečerpávající části trati byl umístěn škrťací a trojcestný vypouštěcí ventil. Škrčení čerpadla bylo nutné z důvodu jeho přebytečného výkonu a vypouštěcí ventil sloužil k

jednoduchému vypuštění měřicí trati. Vypouštění vstupní a měřicí nádoby bylo umožněno pomocí hadiček zalepených do dna nádob. Odpad na Obr. 6 a 13 byl sestaven ze systému odpadních trubek a kolen o průměru 60 mm, aby odváděl přebytečnou vodu z přepadu do výstupní nádoby.

8 Modely

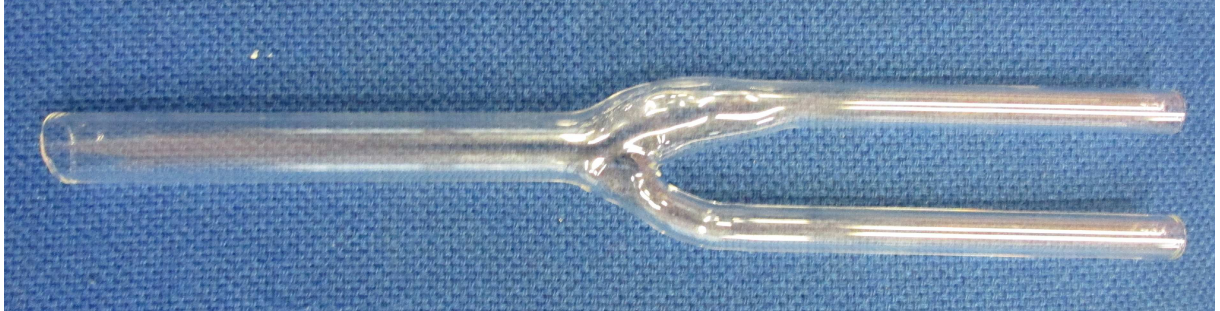
Pro uskutečnění experimentu bylo třeba navrhnout a nechat vyrobit modely bifurkací s ohledem na sledované parametry a použité experimentální metody. V dalším textu se nachází návrhové parametry pro modely a jejich popis. Při návrhu modelů bifurkace byly zváženy možnosti výroby průhledných modelů pro měření PIV metodou a měření tlakových ztrátových součinitelů. V [23] byl použit model z PET plastu vyrobený technologií vakuového tváření. Jeho přednostmi byla vysoká přesnost, možnost výroby několika kusů a velmi dobré optické vlastnosti. Zásadním nedostatkem bylo, že z technologických důvodů musel být vyroben model ze dvou částí a následně slepen. Samotné lepení byl složitý proces, který se navíc mnohdy musel několikrát opakovat z důvodu protékání spoje. Lepený spoj znemožňoval sledování proudění v rovině švu a v jeho blízkém okolí. Dalším problémem byla odolnost PET plastu vůči poškrábání a také tuhost modelu. Díky tomu byl problém model napojit na měřicí trať, aniž by došlo k jeho poškození a spoj mezi modelem a měřicí trať bylo velmi obtížné utěsnit.

8.1 Popis modelů bifurkace

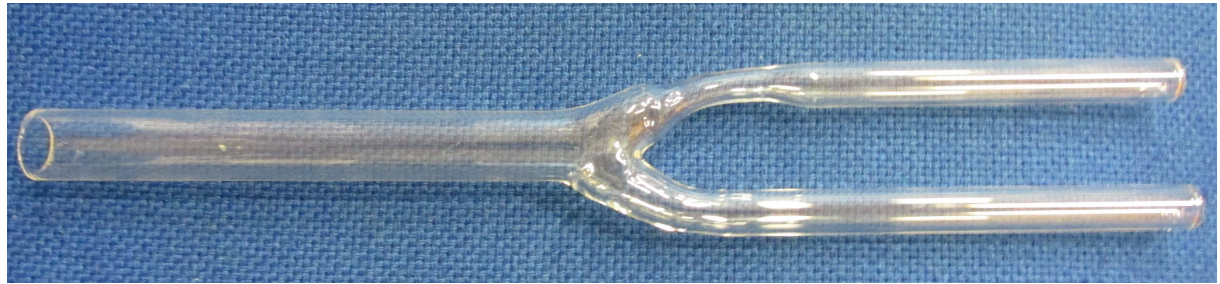
Cílem práce je zjistit vliv geometrie bulbu karotické bifurkace na tlakové ztrátové součinitele. Pro měření byly navrženy a vyrobeny tři modely představující karotickou bifurkaci a její okolí lišící se tvarem a velikostí bulbu. Tvary modelů byly konzultovány s lékaři z 1. lékařské fakulty UK. Model číslo 1 reprezentuje zdravou ideální bifurkaci (Obr. 14). Model číslo 2 (Obr. 15) byl navržen s rozšířeným bulbem. Model číslo 3 (Obr. 16) byl navržen se zúžením takzvanou stenózou.



Obr. 14: Model 2 se zvětšeným bulbem



Obr. 15: Model 1 zdravá bifurkace

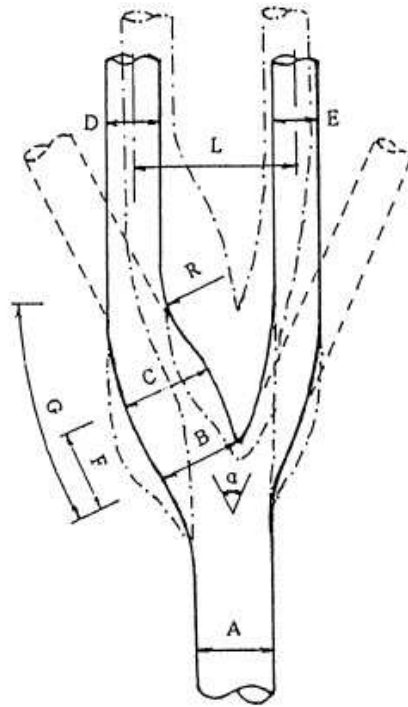


Obr. 16: Model 3 se stenózou

8.2 Návrh modelů bifurkace

Modely bifurkací pro experimentální měření tlakových ztrátových součinitelů a pro vizualizace musí splňovat dané parametry s ohledem na podobnost se skutečnou lidskou geometrií karotické bifurkace, cíl měření a použité metody. Hlavními návrhovými parametry jsou velikost a rozměry modelu, geometrie bulbu a materiál, z kterého bude model vyroben. Materiál pro výrobu modelů bifurkací musí mít dobré optické vlastnosti tj. mít index lomu světla co možná nejpodobnější indexu lomu světla vody. Tento požadavek vychází z použití PIV metody. Další požadavek je trvanlivost modelu. Pro další výzkum je třeba modely uchovat a je nežádoucí, aby modely degradovaly nebo bylo možné je poškodit standardní manipulací, čímž by bylo znemožněno jejich další použití. V tomto směru je od modelů vyžadována odolnost vůči poškrábání. Materiál musí umožňovat výrobu modelu tak, aby nebylo třeba model dělit na dvě poloviny a poté slepovat. Pro zjednodušení úlohy je třeba zavést základní předpoklady. Jedním z nich je předpoklad rovinnosti karotické bifurkace. To znamená, že osy vstupní a obou výstupních větví modelů jsou v jedné rovině. Modely se liší pouze velikostí bulbu a ostatní geometrie zůstává stejná. Modely jsou vyrobeny ze skla. [1]

Při návrhu bylo využito dat z [24] a [25]. Rozměry modelů bifurkací jsou uvedeny v Tab. 1 až 3. Schematické zobrazení modelů bifurkací jsou zobrazeny na Obr. 18 až Obr. 19. Na Obr. 17 jsou zobrazeny rozměry z Tab. 1 až 3. [1]



Obr. 17: Určení rozměrů modelů[18]

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	G [mm]	L [mm]	R [mm]	α [°]
Rozměr	12	12,8	13,6	8,4	6,8	11,2	25,6	28,8	28,8	53

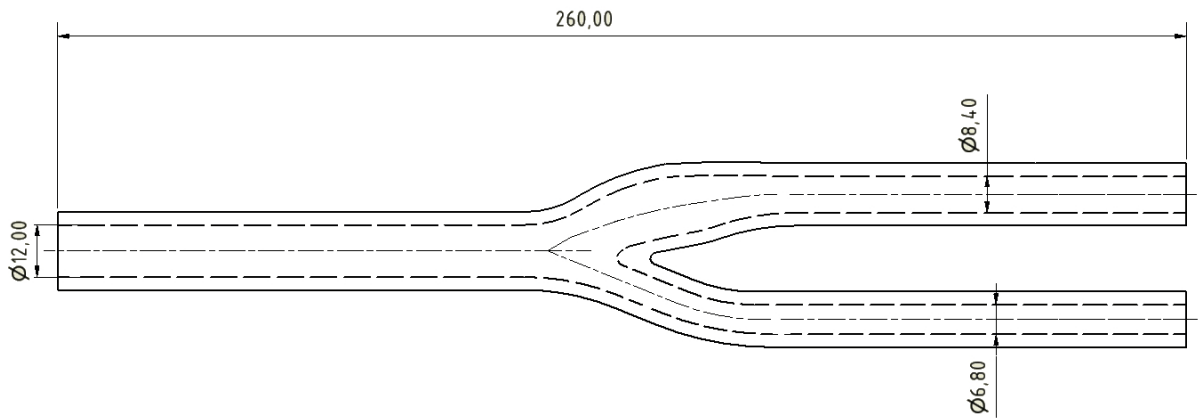
Tab. 1: Rozměry modelu bifurkace 1

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	G [mm]	L [mm]	R [mm]	α [°]
Rozměr	12	17,9	24,3	8,4	6,8	11,2	25,6	28,8	16,2	53

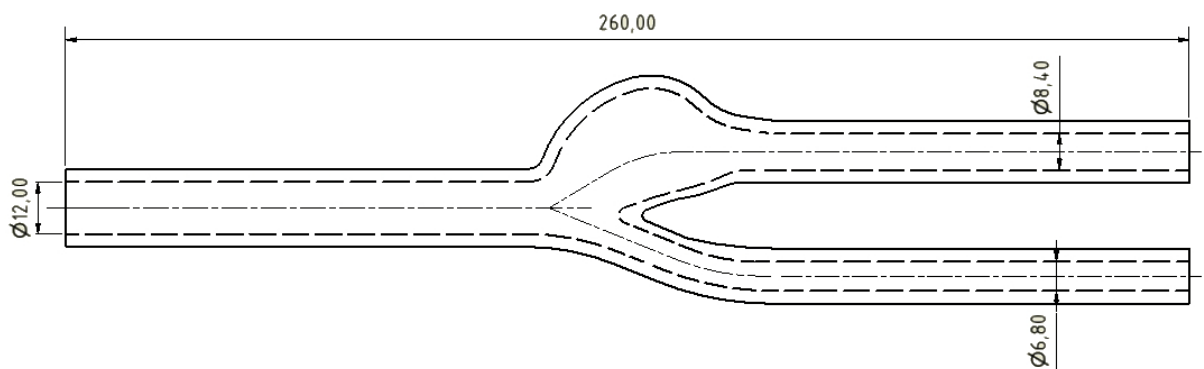
Tab. 2: Rozměry modelu bifurkace 2

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	G [mm]	L [mm]	R [mm]	α [°]
Rozměr	12	12,8	5,5	8,4	6,8	11,2	25,6	28,8	-	53

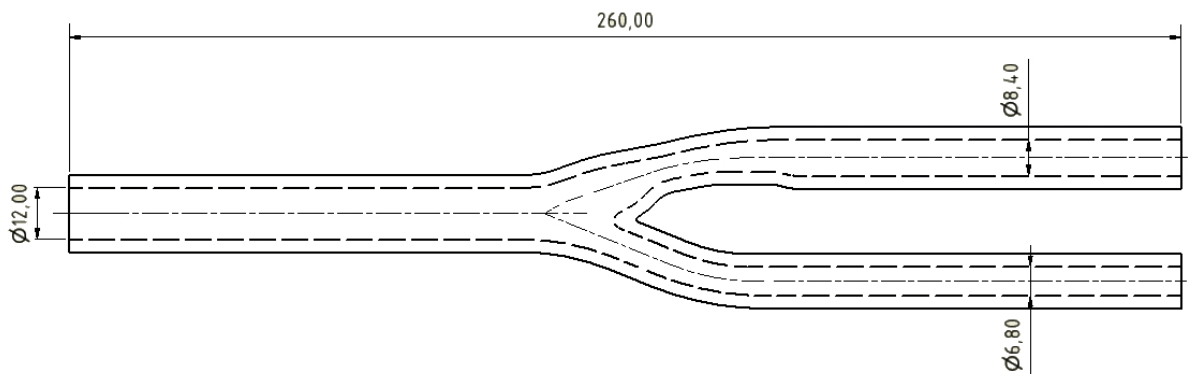
Tab. 3: Rozměry modelu bifurkace 3



Obr. 18: Bifurkace 1 - zdravá geometrie



Obr. 19: Bifurkace 2 se zvětšeným bulbem



Obr. 20: Bifurkace 3 se stenózou

Z důvodu jednoduché zástavby do měřicí trati bez potřeby dalších úprav byla délka všech třech modelů bifurkací navržena shodná. To je patrné ze schématických zobrazení modelů na Obr. 18 až 20.

8.3 Výroba modelů

Skleněné modely byly vyrobeny sklenářem na zakázku. Kvůli ruční výrobě byly vneseny nepřesnosti v rozměrech modelů oproti původním návrhovým rozměrům. Tyto nepřesnosti byly zohledněny v dalším textu. Skutečné vnitřní rozměry modelů ukazuje Tab. 4.

	Průměr vstupní větve [mm]	Průměr větve s bulbem [mm]	Průměr větve bez bulbu [mm]
Model 1	11,7	7,4	6,3
Model 2	12,5	7,3	6,7
Model 3	12,6	7,2	6,4

Tab. 4: Skutečné rozměry modelů bifurkací

9 Metodika experimentu

V následujícím textu je přiblížena příprava měření a vybavení experimentu a metodika jednotlivých měření pro dané úkoly.

9.1 Kalibrace turbínkových průtokoměrů

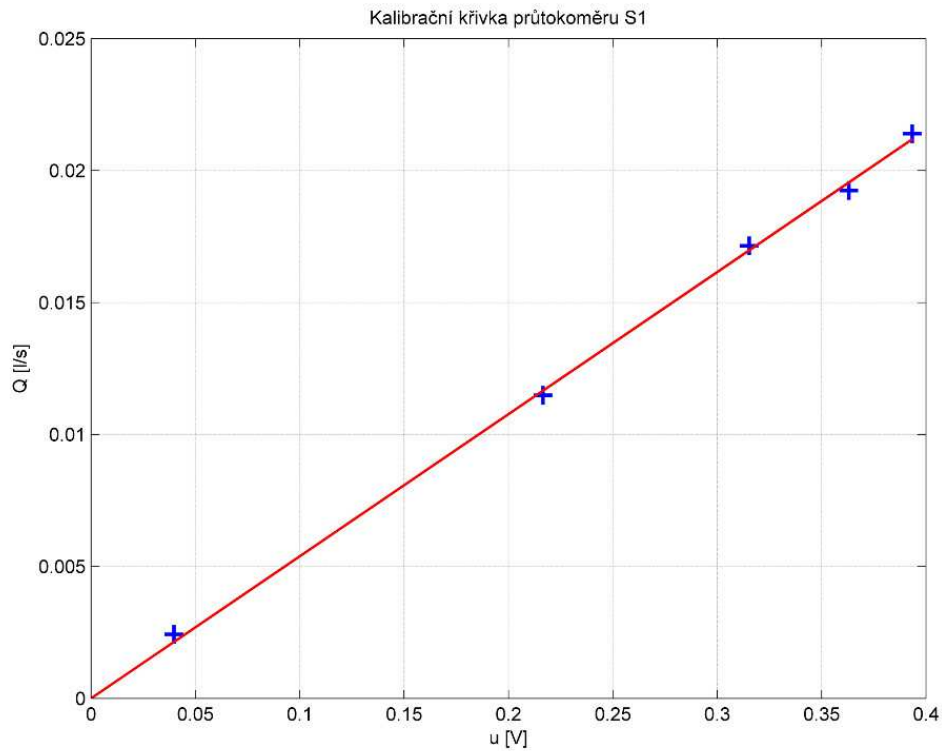
Aby bylo možné použít zabudované turbínkové průtokoměry (průtokoměry Badger Meter Vision 1000 a měřicí karta National Instruments USB – 6229, SN 12ED9D9), bylo třeba provést jejich kalibraci. Pro kalibraci průtokoměrů byla zvolena volumetrická metoda kalibrace. Pro získání kalibračních dat byly sledovány dvě veličiny. Napětí jako výstup z průtokoměrů bylo zaznamenáno pomocí měřicí karty National Instruments a počítače s programem napsaným pro tento účel v softwaru MATLAB. Další veličinou byl čas, za který natekl do odměrného válce objem $V = 0,25$ l vody (u posledního měření byl z časových důvodů objem zmenšen na 0,1 l). Měření při jednom konstantním průtoku proběhlo třikrát. Následující měření bylo provedeno po seškrvení větve s kalibrovaným průtokoměrem. Druhá větev byla uzavřena. Naměřené a vypočtené hodnoty pro oba průtokoměry jsou uvedeny v Tab. 5 a 6. Ze získaných dat byly vyhodnoceny kalibrační křivky (Obr. 21 a 22) obou průtokoměrů. V Tab. 5 a 6 jsou hodnoty průtoku Q vypočteny dle vzorce:

$$Q_j = \frac{V_i}{t_j} ; \quad (8)$$

kde V_i je měřený objem vody, t_j je čas, za který daný objem nateče, i je číslo měření a j představuje jedno ze třech opakování měření. Hodnoty \bar{Q} a \bar{u} v Tab. 5 a 6 jsou aritmetické průměry ze třech opakování hodnot Q_j respektive hodnot u_j pro jednotlivá měření. Z rovnice přímky proložené vynesené závislosti napětí u na průtoku Q na Obr. 21 a 22 byly získány kalibrační koeficienty obou průtokoměrů. Pro průtokoměr 1 s označením signálu S1 měl koeficient rovnice proložené přímky hodnotu 0,05385 [-] a u průtokoměru 2 s označením signálu S2 měl koeficient hodnotu 0,05897 [-]. Tyto koeficienty byly dále zakomponovány do programu používaného k měření průtoků v obou větvích měřicí trati.

měření č.	t [s]	Q [l/s]	\bar{Q} [l/s]	u [V]	\bar{u} [V]	V [l]
1	11,87	0,021	0,021	0,389	0,393	0,25
	11,64	0,021		0,392		
	11,63	0,021		0,400		
2	12,90	0,019	0,019	0,363	0,363	0,25
	12,92	0,019		0,360		
	13,16	0,019		0,366		
3	14,53	0,017	0,017	0,316	0,315	0,25
	14,64	0,017		0,318		
	14,56	0,017		0,311		
4	21,88	0,011	0,011	0,218	0,217	0,25
	21,16	0,012		0,217		
	22,28	0,011		0,215		
5	41,69	0,002	0,002	0,038	0,040	0,1
	40,47	0,002		0,037		
	41,47	0,002		0,044		

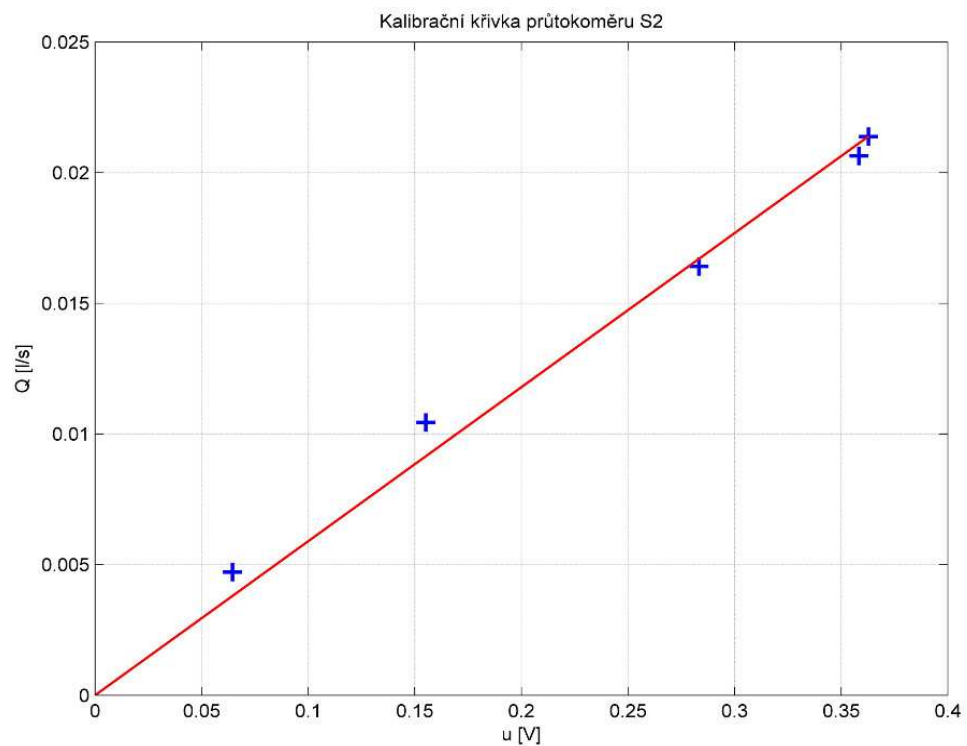
Tab. 5: Kalibrační data průtokoměru 1



Obr. 21: Kalibrační křivka průtokoměru 1

měření č.	t [s]	Q [l/s]	\bar{Q} [l/s]	u [V]	\bar{u} [V]	V [l]
1	11,91	0,021	0,021	0,359	0,363	0,25
	11,75	0,021		0,366		
	11,93	0,022		0,363		
2	12,12	0,021	0,021	0,355	0,358	0,25
	12,05	0,021		0,357		
	12,16	0,021		0,364		
3	15,22	0,016	0,016	0,285	0,283	0,25
	15,10	0,017		0,282		
	15,37	0,016		0,283		
4	24,00	0,010	0,010	0,176	0,155	0,25
	24,06	0,010		0,172		
	23,78	0,011		0,118		
5	21,34	0,005	0,005	0,070	0,064	0,1
	21,16	0,005		0,061		
	21,16	0,005		0,062		

Tab. 6: Kalibrační data průtokoměru 2



Obr. 22: Kalibrační křivka průtokoměru 2

9.2 Měření tlakových ztrát

Pro měření tlakových ztrát bylo třeba navrhnout vhodné režimy proudění. Režimy proudění byly navrženy přepočtem přes Reynoldsovo číslo tak, že Reynoldsovo číslo v bifurkaci v těle odpovídalo Reynoldsovu číslu ve vstupní větvi měřeného modelu bifurkace. [1] Režimy proudění byly voleny tak, aby se jednalo o laminární proudění a jsou zobrazeny v Tab. 7. Přehled rozmezí Reynoldsových čísel v jednotlivých větvích modelů bifurkací je v Tab. 8. Reynoldsovo číslo bylo v Tab. 8 počítáno dle vzorce:

$$Re = \frac{4 \cdot Q_i \cdot d_i}{\pi \cdot d_i^2 \cdot \nu} ; \quad (9)$$

kde Q_i je průtok danou větví [l/s], d_i je průměr dané větve [m] a ν je kinematická viskozita vody [m²/s].

Průtok vstupní větvi bifurkace Q_1 [ml/s]		Průtok větví bifurkace bez bulbu Q_3 [ml/s]				
		2	4	6	8	10
Průtok větví bifurkace s bulbem Q_2 [ml/s]	2	4	6	8	10	12
	4	6	8	10	12	14
	6	8	10	12	14	16
	8	10	12	14	16	18
	10	12	14	16	18	20

Tab. 7: Režimy pro měření tlakových ztrát

		Vstupní Větev Re [-]	Větev s bulbem Re [-]	Větev bez bulbu Re [-]
Model 1	Re_{\min}	410,7	324,6	381,3
	Re_{\max}	2053,3	1623,2	1906,6
Model 2	Re_{\min}	384,4	329,1	358,6
	Re_{\max}	1921,9	1645,5	1792,8
Model 3	Re_{\min}	381,3	333,7	375,4
	Re_{\max}	1906,6	1668,3	1876,8

Tab. 8: Rozmezí Reynoldsových čísel ve větvích modelů

Odběr statického tlaku byl proveden třemi tlakovými snímači. Kalibrace snímačů proběhla v rámci jejich zástavby do jiné trati v laboratoři hemodynamiky a nestacionárního proudění. Hodnoty konstant snímačů jsou převzaty z [26]. Díky speciálním koncovkám byl zajištěn odběr statického tlaku ze stěny. Snímače tlaku byly umístěny 15 cm od modelu. Rozvržení

experimentu je vidět na Obr. 9. Na Obr. 23 je vidět měřicí trať v konfiguraci pro měření tlakových ztrát.

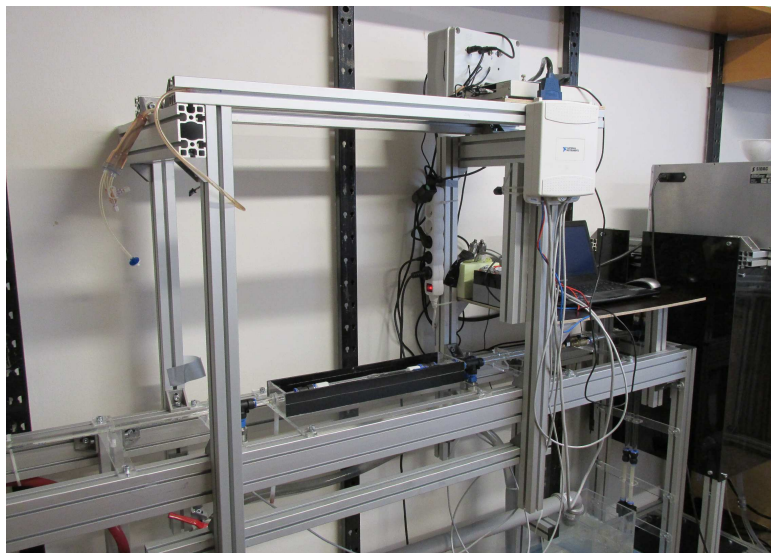
Měření proběhlo pro kombinaci 25 průtoků viz. Tab. 7. Jedna sada experimentálních dat byla získána nastavením konstantního průtoku ve větvi s bulbem (např.: 2 ml/s) a postupným nastavením a proměřením všech pěti průtoků (2, 4, 6, 8, 10 ml/s) ve větvi bez bulbu. Další sada byla pro průtok ve větvi s bulbem 4 ml/s atd.. Pro každou sadu dat byl naměřen nulový odečet při zavřených obou větvích trati.

9.2.1 Použité přístroje a software

Talkové snímače: 3 x senzor TSZ – 2000 G, BHV

Měřicí karta: National Instrumental NI SCC - 68

PC s programem MATLAB



Obr. 23: Měřicí trať při měření tlakových ztrát

9.3 Měření metodou PIV

Měření metodou PIV bylo doprovodným měřením k tlakovým ztrátám. Mělo především za úkol podat informace a náhled na chování proudu tekutiny v bifurkaci. Konkrétní zájem byl sledování rychlostního pole v oblasti bulbu. Pro měření metodou PIV bylo z důvodu časové náročnosti vybráno jen několik režimů proudění, u kterých se provedlo měření rychlostního pole. Vybrané režimy ukazuje Tab. 9. Režimy z Tab. 9 byly naměřeny u všech modelů.

Pro zviditelnění proudění byly použity postříbřené reflexní mikročástice (Dantec S-HGS, 10 μm). Lasery byly nastaveny tak, aby osvětlovaly požadovanou část modelu a zároveň se eliminovaly nežádoucí odrazy způsobené nedokonalostmi modelů. Laserový list byl nastaven na tlouštku 1,5 mm pomocí tmavé pásky nalepené na měřicí nádobu. List osvětloval model v jeho osové rovině. Kvůli nedostatečnému osvětlení bylo nutné použít dva lasery. Na Obr. 24 je vidět uspořádání měřicí trati pro měření metodou PIV.

Průtok vstupní větvi bifurkace Q_1 [ml/s]		Režimy pro PIV				
		Průtok větvi bifurkace bez bulbu Q_3 [ml/s]				
		2	4	6	8	10
Průtok větvi bifurkace s bulbem Q_2 [ml/s]	2	4	6	8	10	12
	4	6	8	10	12	14
	6	8	10	12	14	16
	8	10	12	14	16	18
	10	12	14	16	18	20

Tab. 9: Režimy měřené metodou PIV

9.3.1 Použité přístroje a software

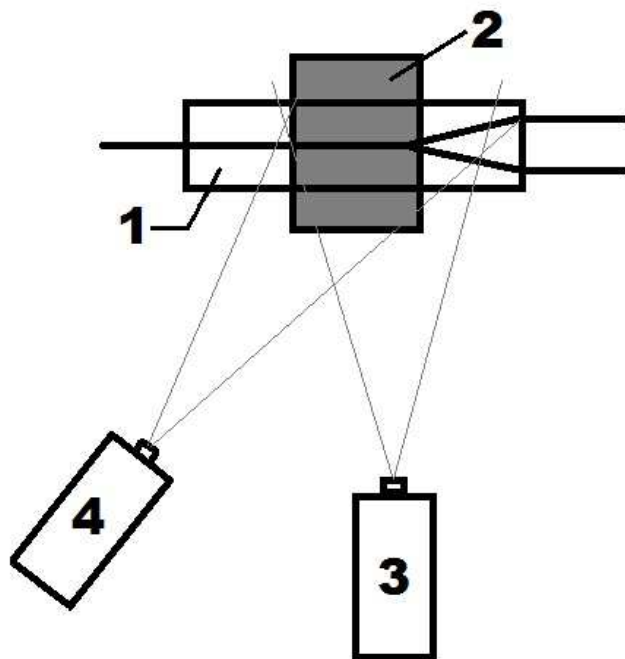
Kamera: OLYMPUS i – SPEED DF, SN 1200409

Objektiv: Nikon ED, AF micro NICOR 70 – 180 mm 1 : 4,5 – 5,6 s přidaným filtrem pro vlnovou délku světla produkovaného lasery

Laser 1: Peakpower 10W wavelenght 500 – 600 nm, zdroj DPSSL DRIVER

Laser 2: Peakpower 10W wavelenght 500 – 600 nm, zdroj DPSSL DRIVER

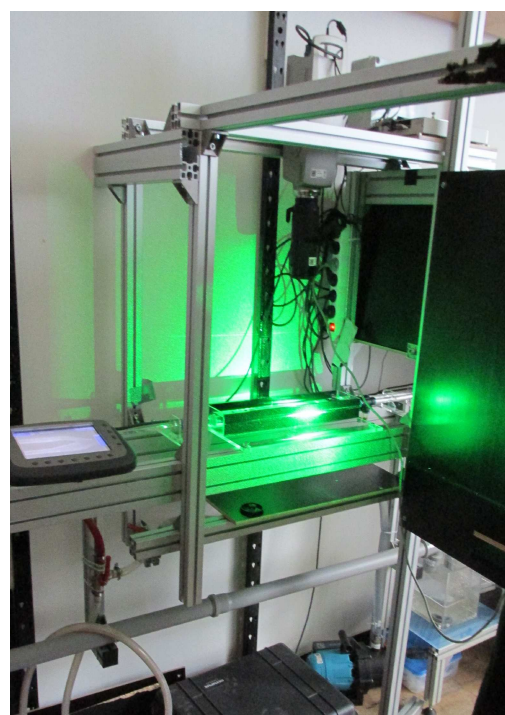
PC s programem Speed Studio a Dantec Dynamic Studio



Obr. 24: Schématické uspořádání experimentu metody PIV – 1 měřící nádoba s modelem, 2 kamera, 3 laser 1, 4 laser 2



Obr. 25: Detail laseru 1

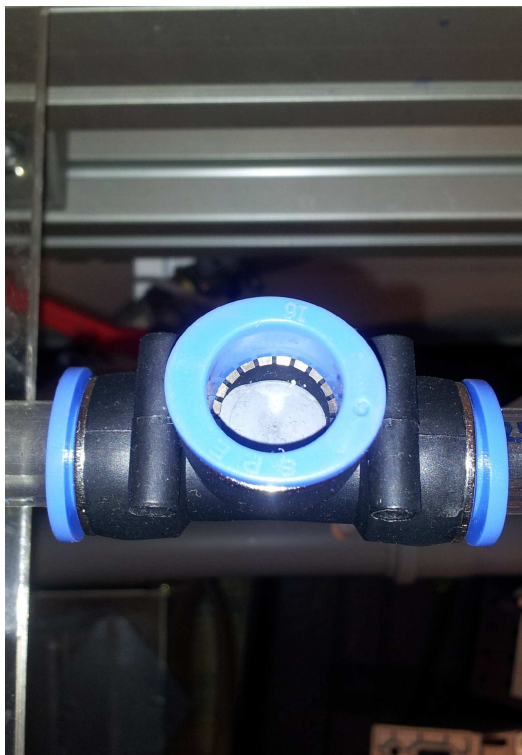


Obr. 26: Ukázka měření metodou PIV

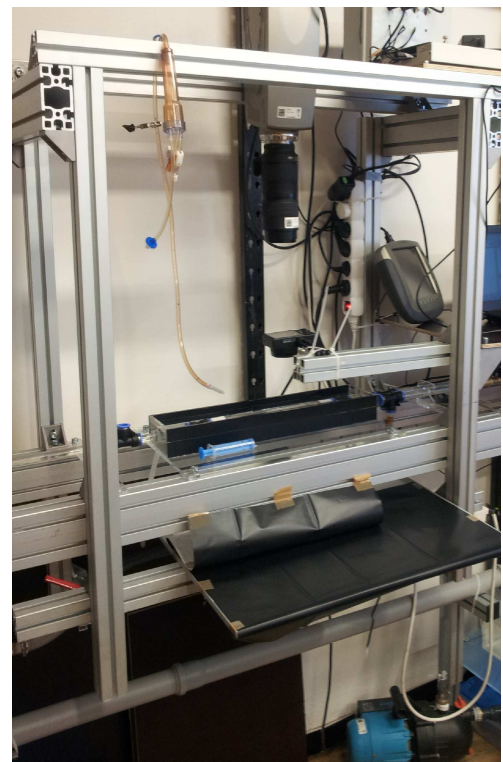
9.4 Vizualizace proudění

Vizualizace měla stejně jako měření PIV metodou podpůrný charakter k měření tlakových ztrát. Kvůli výraznému 3D proudění, které v bifurkaci nastává, bylo nutné udělat si ucelenější představu o chování proudění v modelech bifurkací.

Pro vizualizaci bylo do proudu tekutiny vstříknuto malé množství kontrastního barviva. Videozáznam byl pořízen pomocí fotoaparátu. Dostatečné osvětlení měřeného prostoru bylo zajištěno umístěním LED panelu pod model. [1] Jako kontrastní barvivo byl použit tiskařský inkoust. Barvivo bylo do proudu tekutiny vpraveno díky speciálně upravené spojce systému FESTO ve tvaru T, do které byl vložen na míru uříznutý kus gumy viz Obr. 27. Takto upravená spojka umožňovala proniknutí jehly pro vstříknutí barviva a zároveň těsné spojení. Barvivo bylo do proudu tekutiny dávkováno buď ručně injekční stříkačkou nebo hadičkou z rezervoáru pro kontinuální tok barviva.



Obr. 27: Uspořádání měřící trati pro vizualizace



Obr. 28: Ukázka měřící trati při vytváření vizualizací

9.4.1 Použité přístroje

Fotoaparát: Canon SX 170 IS, SN 863063019090

10 Výsledky měření

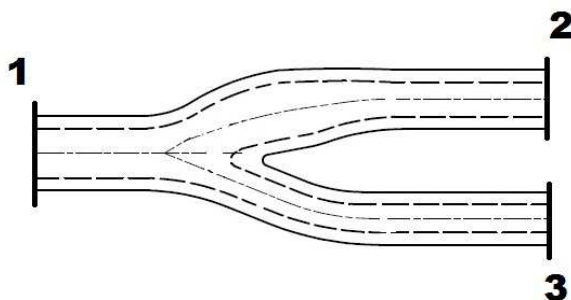
Další text je věnován vyhodnocení naměřených dat pro jednotlivé úkoly. Tedy získání tlakových ztrátových koeficientů modelů, vizualizace proudění metodou PIV a vstříknutím kontrastního barviva do proudu tekutiny.

10.1 Tlakové ztrátové součinitele

Naměřená experimentální data byly zaznamenána, zpracována a vyhodnocena v programu MATLAB. Nulový klidový odečet byl odečten od naměřených dat podle vzorce:

$$p_i = (p_j - p_0) \cdot k_k, \quad (10)$$

kde p_i skutečné tlaky při proudění, p_j jsou naměřené tlaky, p_0 je nulový klidový odečet a k_k je kalibrační koeficient daného senzoru. Tím byla získána sada skutečných tlaků. Bernoulliho rovnice (2) byla zapsána mezi průřezy 1 - 2 a 1 - 3 na Obr. 29. Tedy:



Obr. 29: Schéma pro vyhodnocení tlaků

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_{z1}}{\rho}; \quad (11)$$

kde p_i jsou skutečné tlaky při proudění dle (10), v_i jsou rychlosti v daných průřezech, p_{z1} je ztrátový tlak větve s bulbem a ρ je hustota vody. V rovnici (11) je $i = 1, 2$. Algebraickými úpravami byl získán vztah:

$$p_{z1} = (p_1 - p_2) + \frac{v_1^2}{2} \rho - \frac{v_2^2}{2} \rho; \quad (12)$$

$$\text{Rychlosti } v_i \text{ byly spočtené ze vztahu: } v_i = \frac{4 \cdot Q_j}{\pi \cdot d_i^2} ; \quad (13)$$

kde Q_j jsou průtoky danou větví [l/s] a $i = 1, 2, 3$ dle Obr. 29. Analogicky byl odvozen vztah pro ztrátový tlak ve větvi bez bulbu:

$$p_{z2} = (p_1 - p_3) + \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho - \frac{v_3^2}{2} \cdot \rho ; \quad (14)$$

Tlakové ztrátové součinitele ζ byly vyhodnoceny ze vztahů:

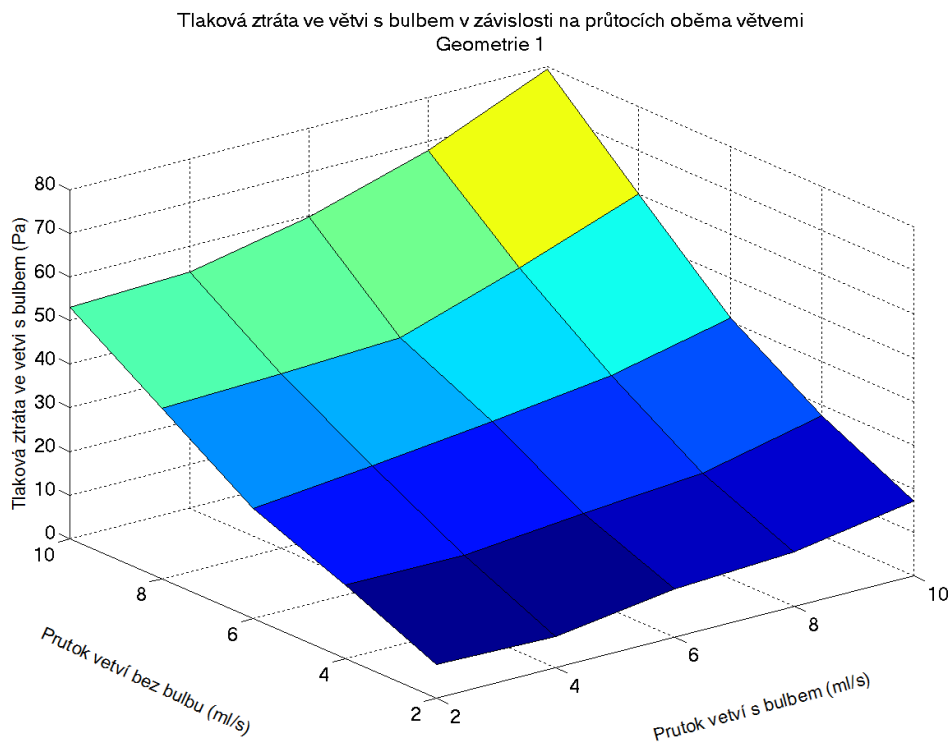
$$\zeta_1 = \frac{p_{z1} \cdot 2}{\rho \cdot v_i} ; \quad \zeta_2 = \frac{p_{z2} \cdot 2}{\rho \cdot v_i} ; \quad (15), (16)$$

kde ζ_1 je tlakový ztrátový součinitel větve s bulbem a ζ_2 je tlakový ztrátový součinitel větve bez bulbu.

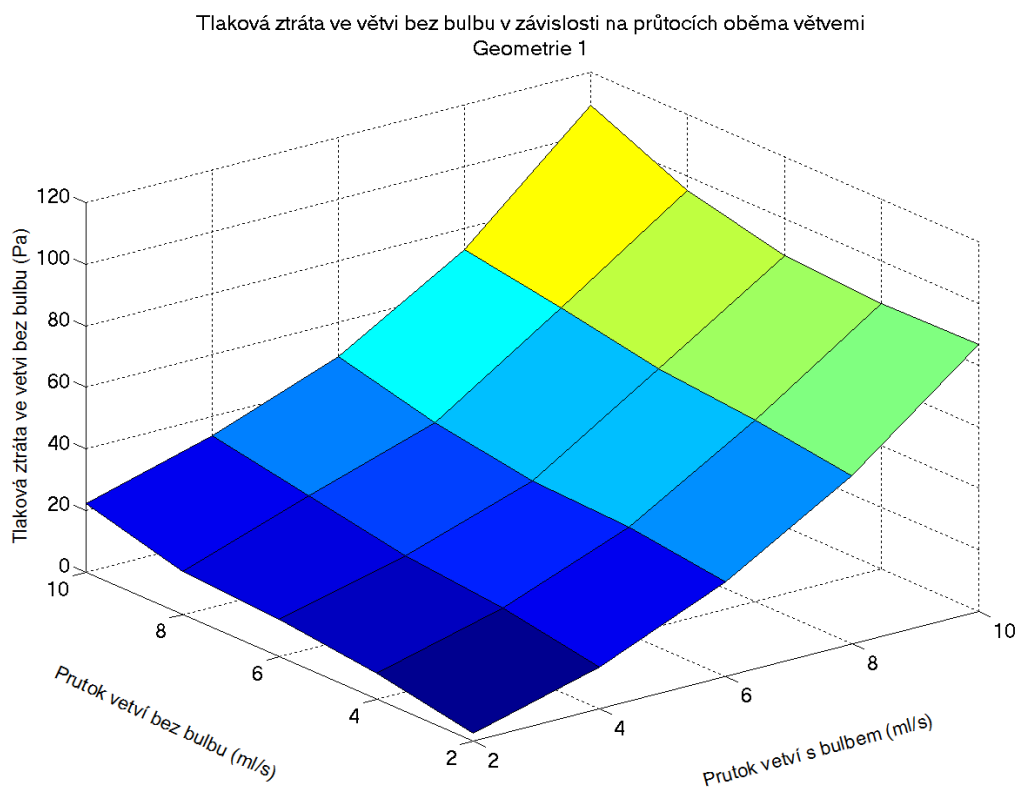
Pro jednotlivé modely byly vyhodnoceny tlakové ztráty ve větvi s bulbem $\Delta p_1 = p_1 - p_2$ a ve větvi bez bulbu $\Delta p_2 = p_1 - p_3$ a vyneseny do závislostí tlakové ztráty větve bifurkace na průtocích větví s a bez bulbu. Pro model 1 viz Obr. 30 respektive Obr. 31. Pro model 2 viz Obr. 36 respektive Obr. 37. Pro model 3 viz Obr. 42 respektive Obr. 43. Dále byly vyhodnoceny tlakové ztrátové součinitele pro větve modelů s a bez bulbu dle (15) respektive (16), které byly vyneseny do grafů závislostí tlakových ztrátových součinitelů ζ na průtocích oběma větvemi modelů. Tyto závislosti jsou zobrazeny na Obr. 32 až 35 pro model 1, na Obr. 38 až 41 pro model 2 a na Obr. 44 až 47 pro model 3.

10.1.1 Vyhodnocená data Model 1

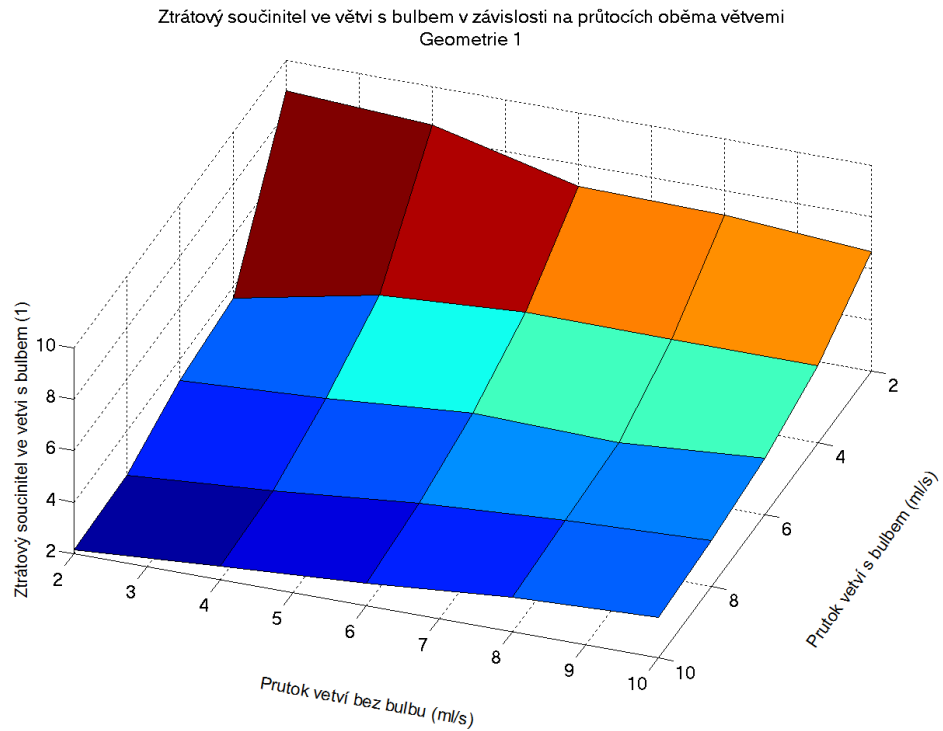
Z Obr. 30 a 31 je vidět, že pro stoupající průtoky roste tlaková ztráta v obou větvích. Tlaková ztráta ve větvi bez bulbu (Obr. 31) je vyšší než ztráta ve větvi s bulbem. To je způsobeno menším průměrem větve bez bulbu a tím vyšší rychlostí v ní. Tlakový ztrátový součinitel vykazuje pro zvyšující se průtoky také rostoucí trend, jak je vidět na Obr. 32, 33, 34, 35. Ve vyhodnocených datech pro tlakové ztrátové součinitele jsou vidět chybně naměřené hodnoty pro nízké průtoky vykazující opačný trend než ostatní měření.



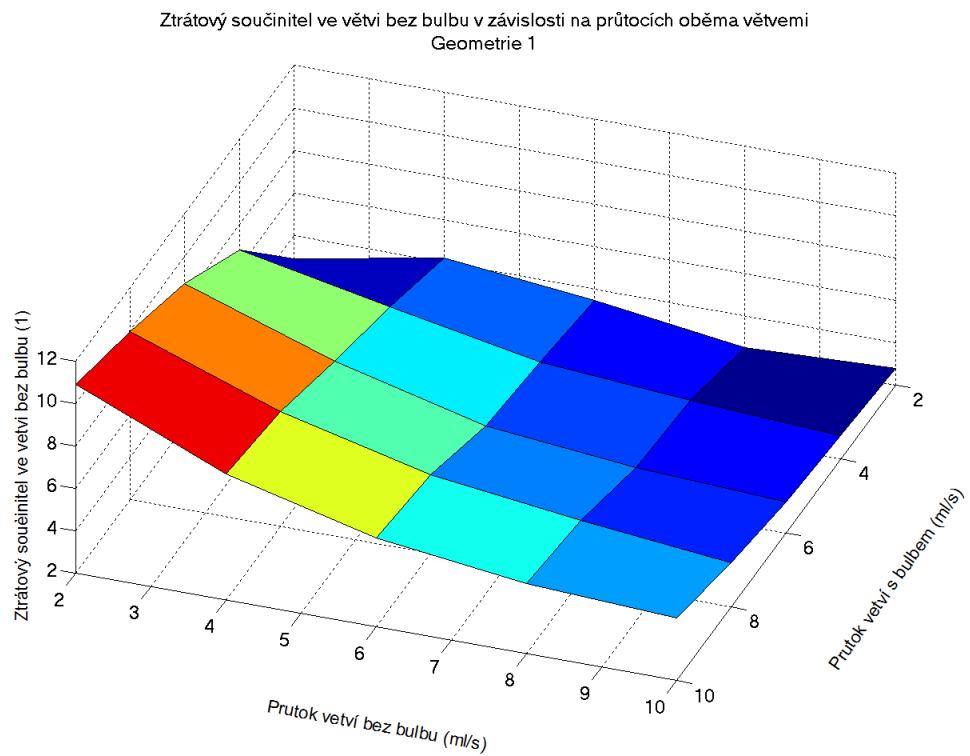
Obr. 30: Tlaková ztráta ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1



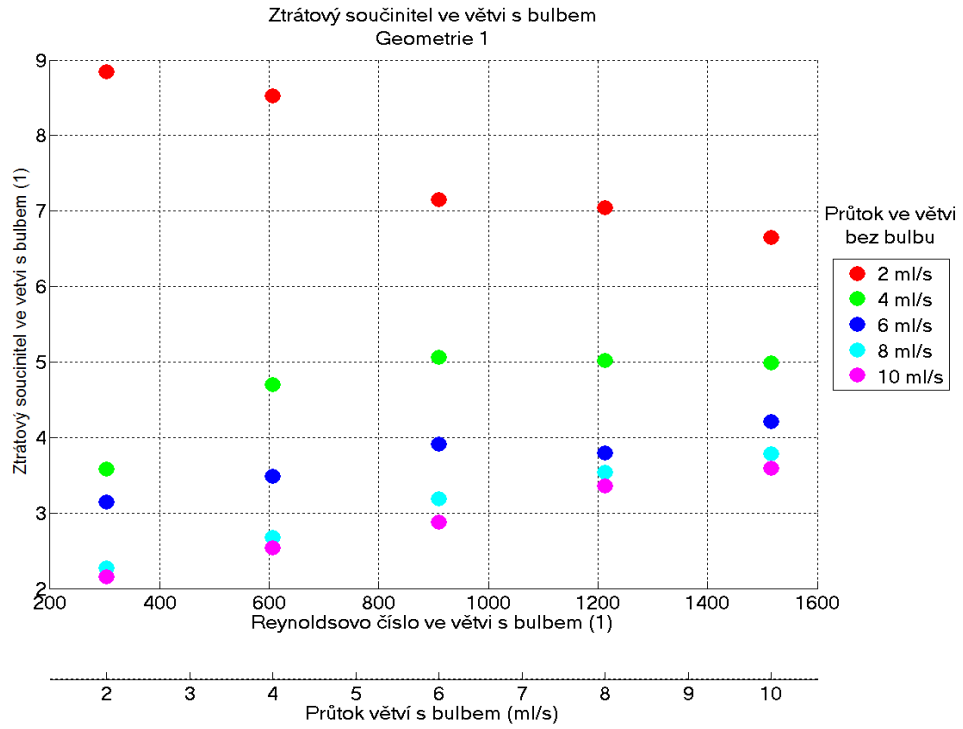
Obr. 31: Tlaková ztráta ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1



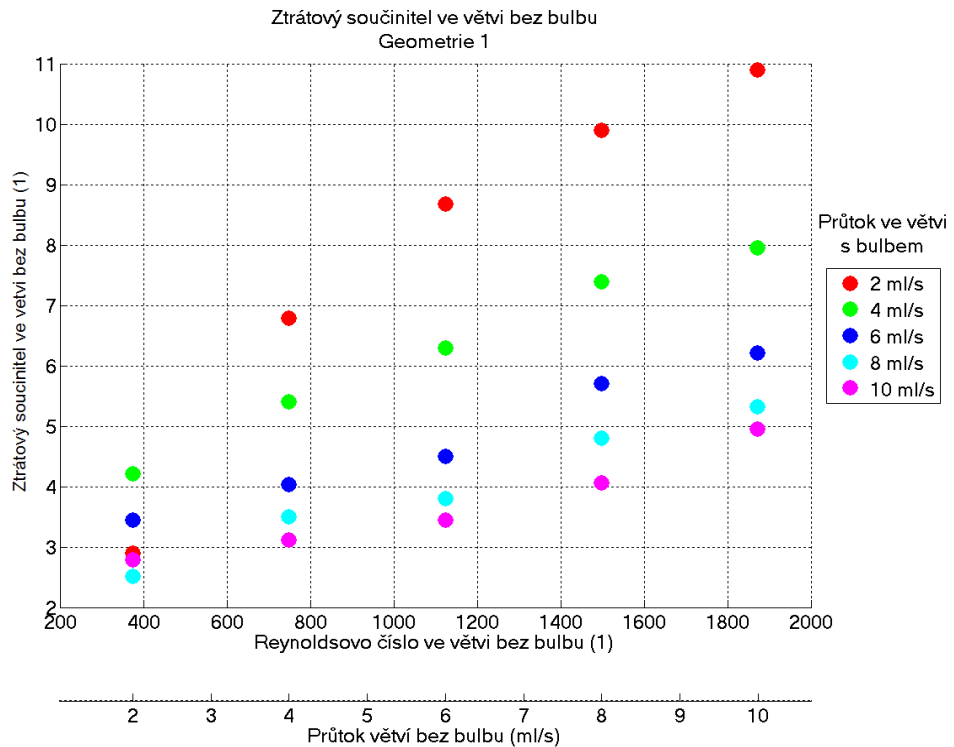
Obr. 32: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1



Obr. 33: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1



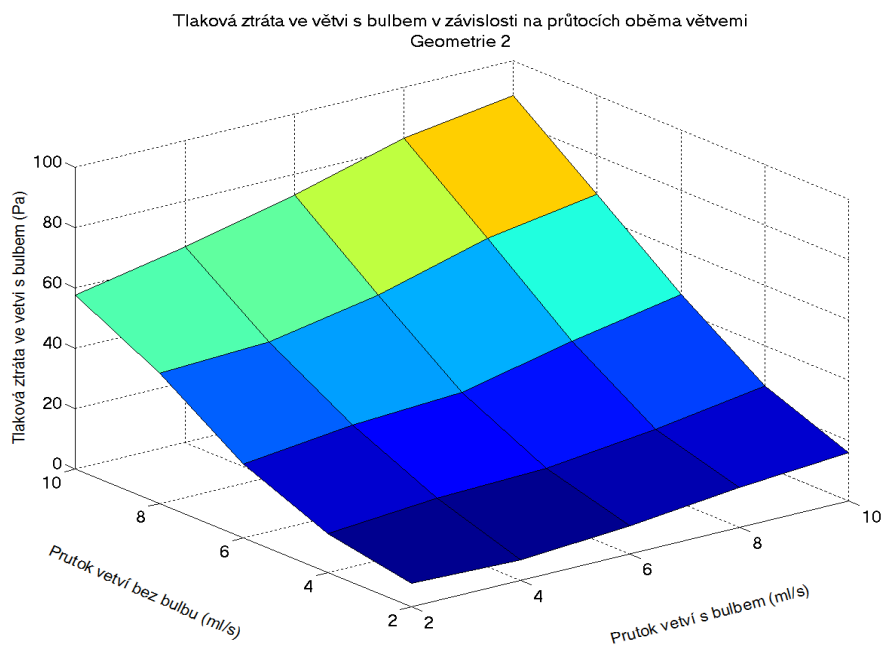
Obr. 34: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1, Reynoldsovo číslo



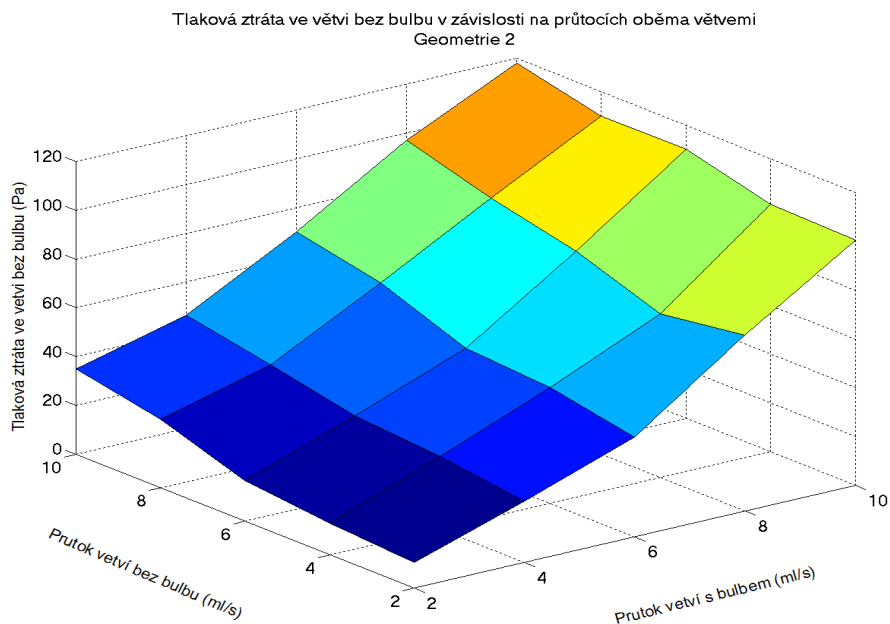
Obr. 35: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1, Reynoldsovo číslo

10.1.2 Vyhodnocená data Model 2

Pro model 2 vychází vyšší tlakové ztráty než pro model 1. Rostoucí trend při zvyšujících se průtocích je u modelu 2 zachován Obr. 36 a 37. Stejně tak i nepřesnosti tlakových ztrátových součinitelů pro malé průtoky.

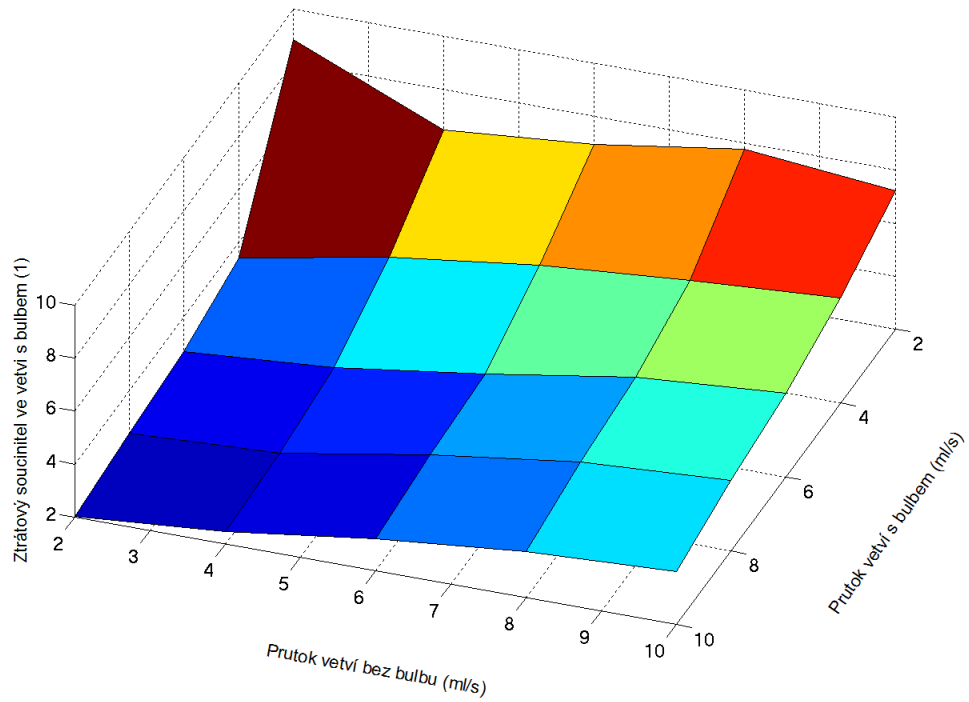


Obr. 36: Tlaková ztráta ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2



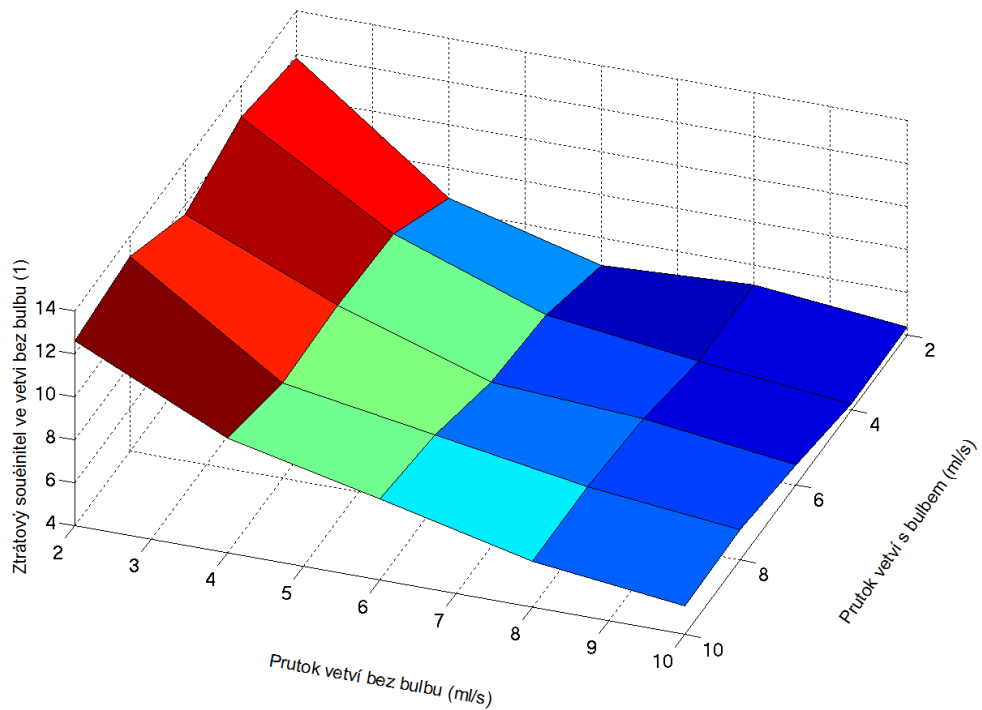
Obr. 37: Tlaková ztráta ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2

Ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi
Geometrie 2

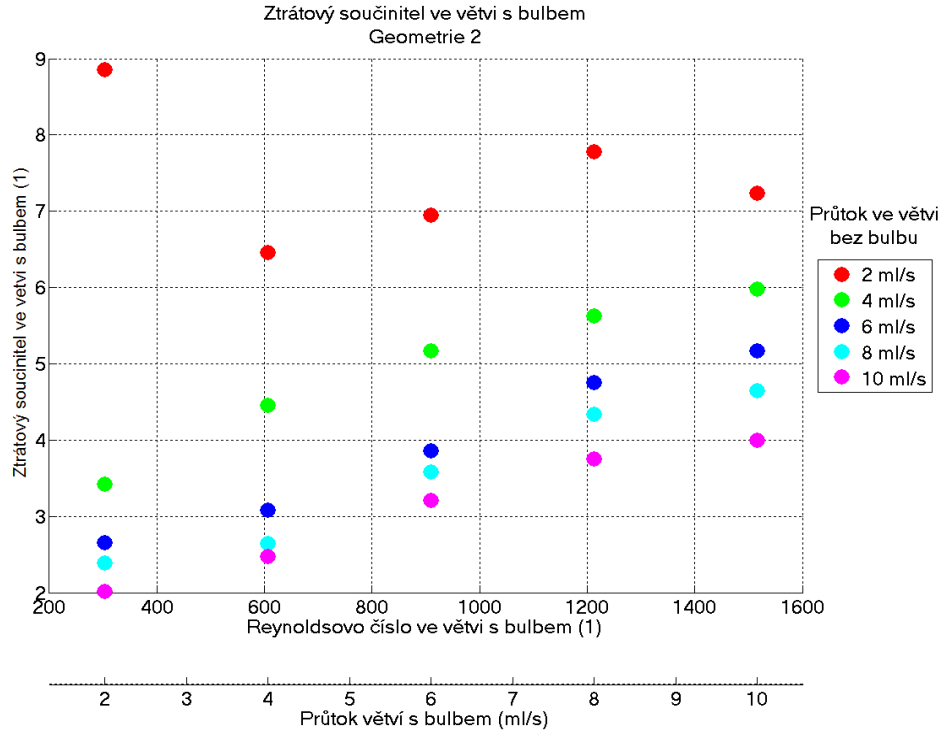


Obr. 38: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2

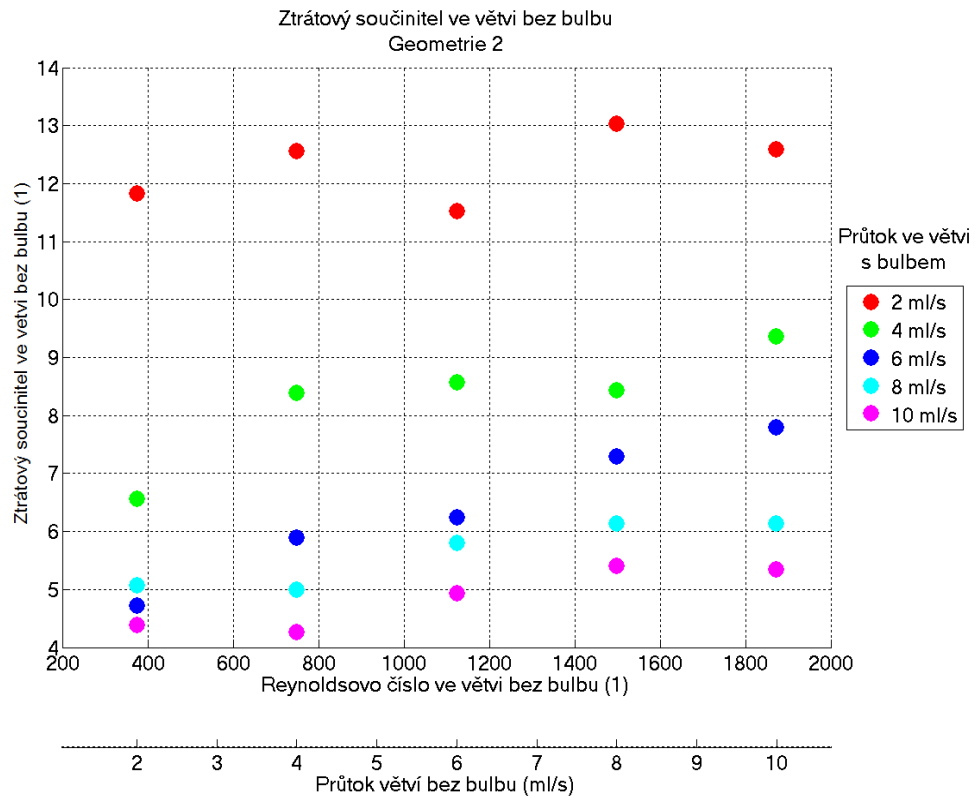
Ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi
Geometrie 2



Obr. 39: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2



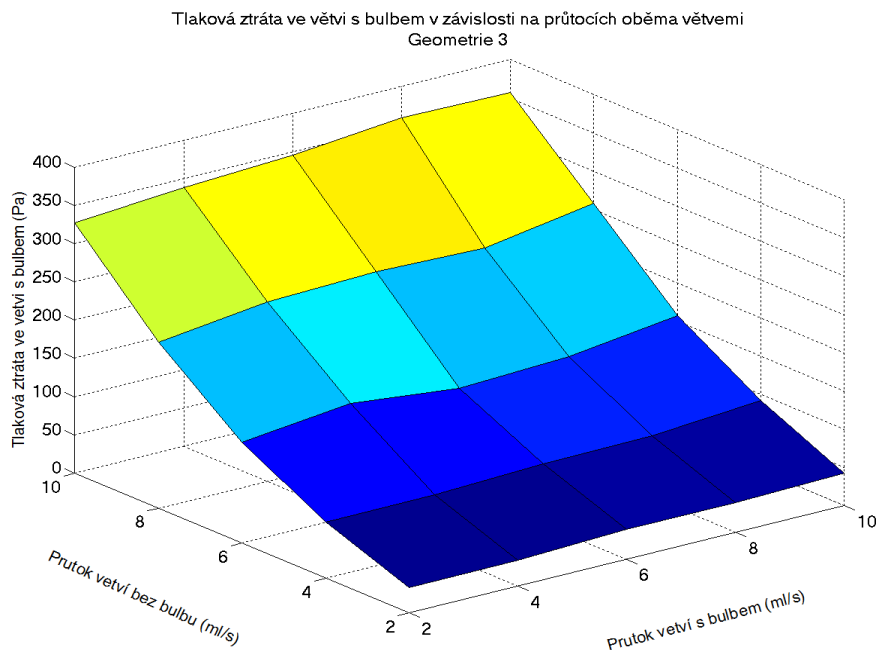
Obr. 40: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2, Reynoldsovo číslo



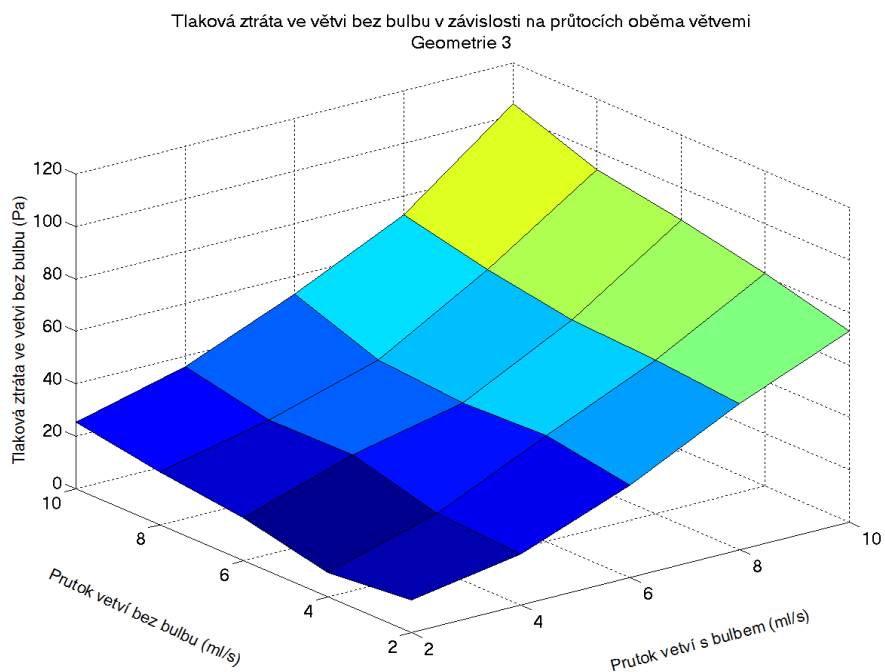
Obr. 41: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2, Reynoldsovo číslo

10.1.3 Vyhodnocená data Model 3

Model bifurkace se stenózou vykazuje ze všech měřených modelů nejvyšší tlakovou ztrátu v větvi s bulbem. Avšak ve větvi bez stenózy je tlaková ztráta srovnatelná s modelem 1.

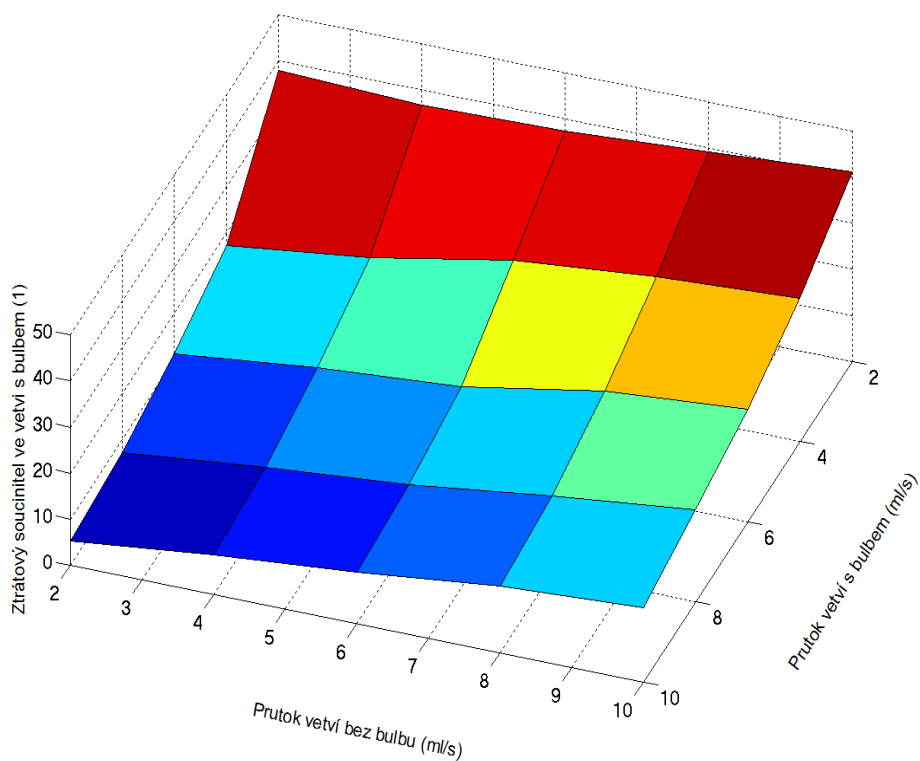


Obr. 42: Tlaková ztráta ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3



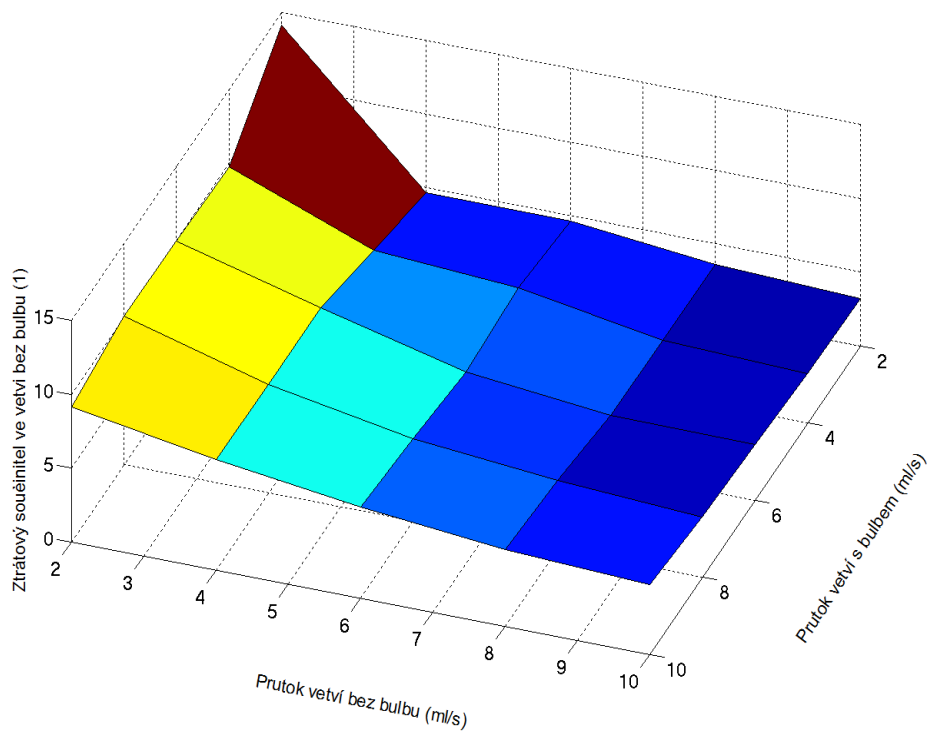
Obr. 43: Tlaková ztráta ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3

Ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi
Geometrie 3

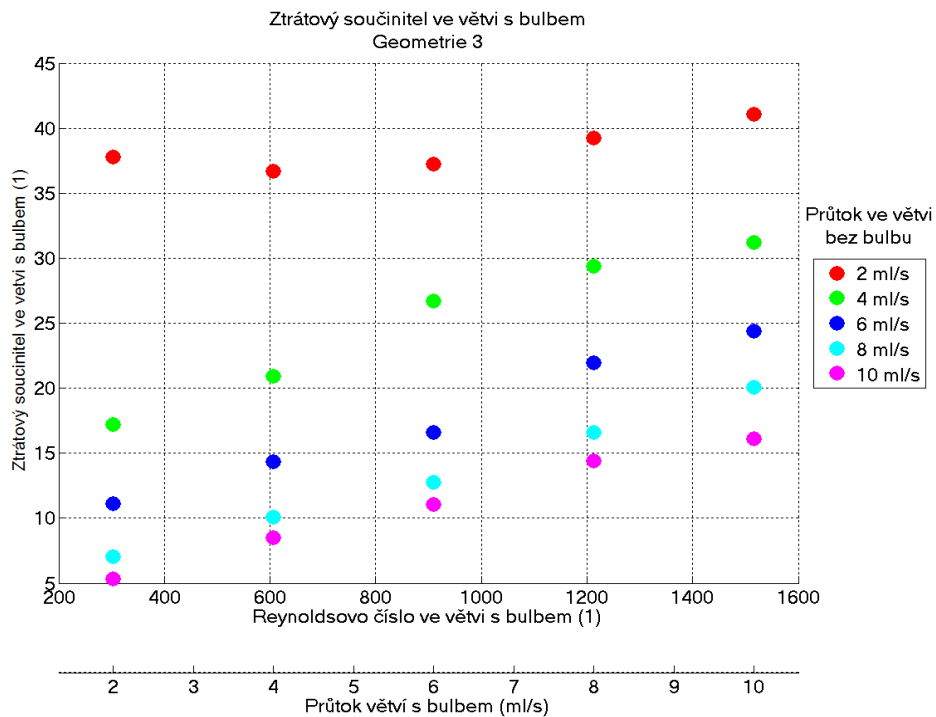


Obr. 44: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3

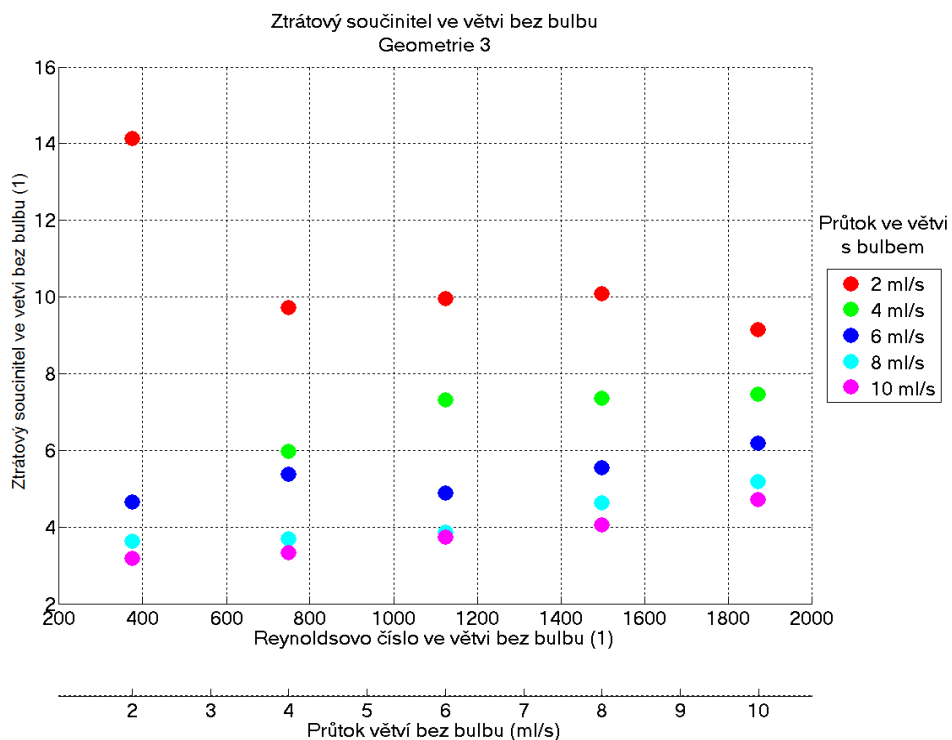
Ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi
Geometrie 3



Obr. 45: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3



Obr. 46: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3, Reynoldsovo číslo



Obr. 47: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3, Reynoldsovo číslo

10.2 Měření metodou PIV

Pro účely této práce byla zpracována experimentální data z měření metodou PIV v software Dantec Dynamic studio. Odtud získané vektorové pole dat bylo dále vyhodnoceno v programu MATLAB. Pro různé režimy byly zvoleny vhodné frekvence snímání, tak aby byl signál z kamery co možná nejlepší. Protože se v modelech bifurkace nachází místa jak s rychlým prouděním (hlavní proud), tak místa s pomalým prouděním (např.: recirkulace v bulbu), bylo třeba volit frekvenci snímání (fps) s určitým kompromisem tak, aby bylo možné vyhodnotit rychlostní pole v celém modelu.

Zajímavým režimem proudění je režim „2, 6“, kde je ve větvi s bulbem průtok 2 ml/s a ve větvi bez bulbu 6 ml/s. Tento režim odpovídá poměru průtoků větvemi karotické bifurkace v těle. Proto je vyhodnocen v dalším textu.

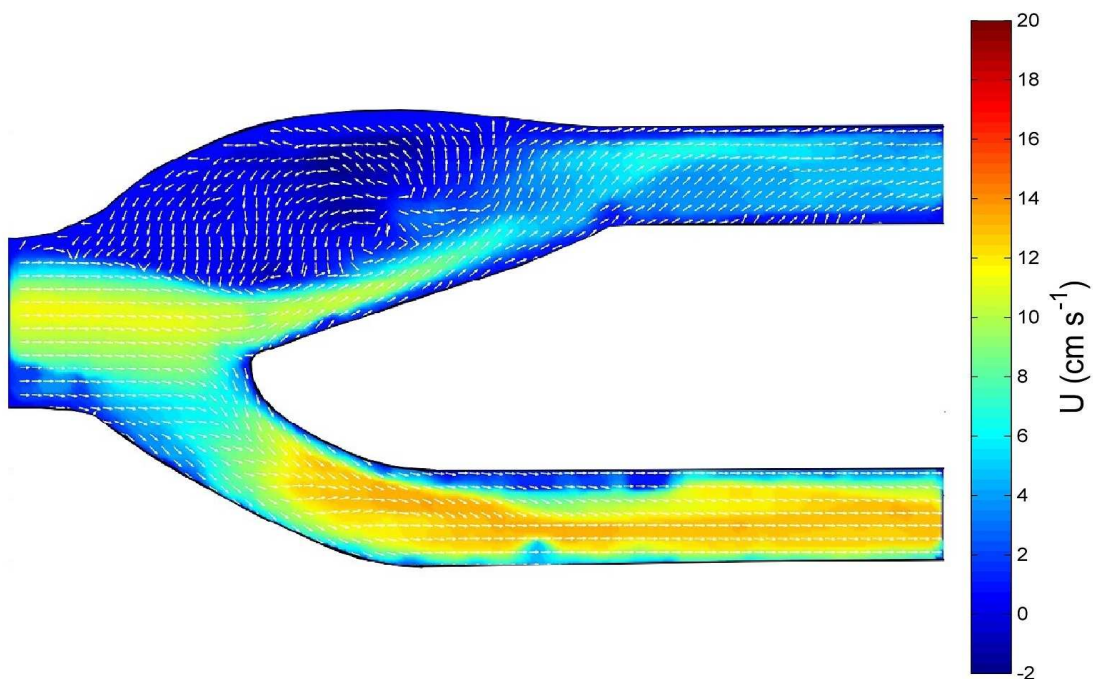
Pro režim 2, 6 byly pro jednotlivé modely vyhodnoceny mapy rozložení rychlostí ve sledované rovině modelu (Obr. 48 pro model 1, Obr. 50 pro model 2, Obr. 52 pro model 3) a proudnice (Obr. 49 pro model 1, Obr. 51 pro model 2, Obr. 53 pro model 3).

Na Obr. 48 a 50 lze sledovat zpětné proudění a vznik víru, který ubírá energii hlavnímu proudu. Z Obr. 49, 51 a 53 je patrné, že v bifurkaci dochází k velmi významnému 3D proudění. U modelu bifurkace se stenózou (Obr. 51 a 52) je vidět urychlení proudu tekutiny ve zúžení stenózy. Tento jev představuje v těle veliké nebezpečí s ohledem na významné narušení hemodynamiky v daném místě.

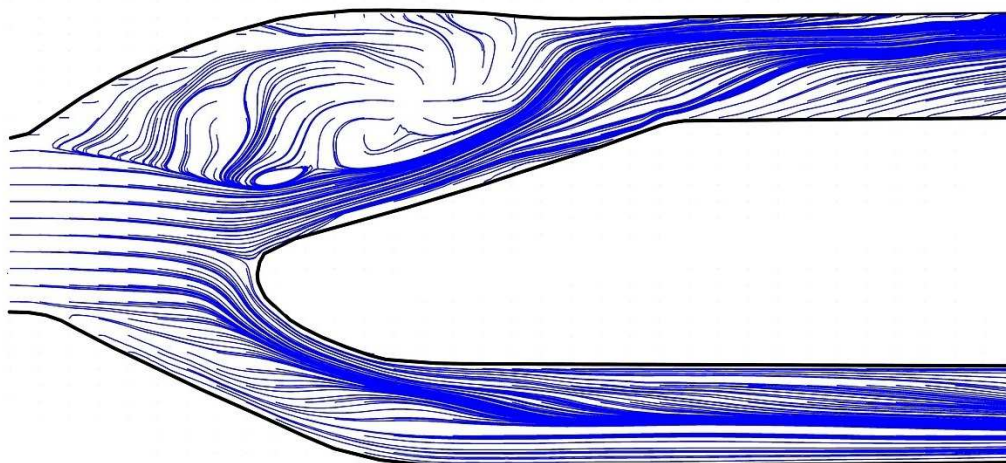
Na Obr. 48, 50 a 52 je možné sledovat rozdělení přitékajícího hlavního proudu. Vzhledem k danému režimu proudění (režim 2, 6) se větší část hlavního proudu odklání do větve bez bulbu. V mapách rozložení rychlostí (Obr. 48, 50 a 52) jsou naznačeny směry toku tekutiny v daném modelu bifurkace.

10.2.1 Model 1

V modelu 1 představujícím zdravou bifurkaci lze sledovat na Obr. 48 a 49 zpětné proudění a vír, který ovlivňuje hlavní proud. Obr. 49 ukazuje, že se proud za bulbem přimiká k horní hraně modelu. To přisuzují ovlivnění proudu recirkulací v bulbu. Proudnic ve větvi bez bulbu naznačují, že se zde proud stáčí do spirály, což je dobře vidět na videozáznamech z vizualizace.



Obr. 48: Mapa rozložení rychlosti pro režim 2, 6 u modelu 1

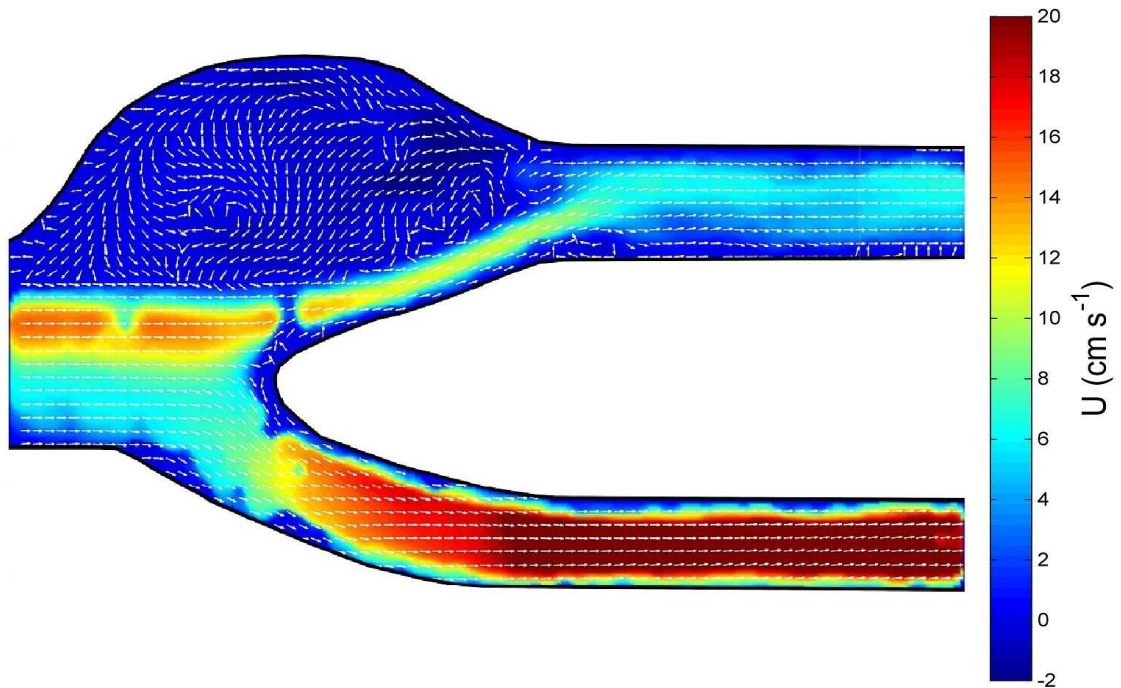


Obr. 49: Proudnice pro režim 2, 6 u modelu 1

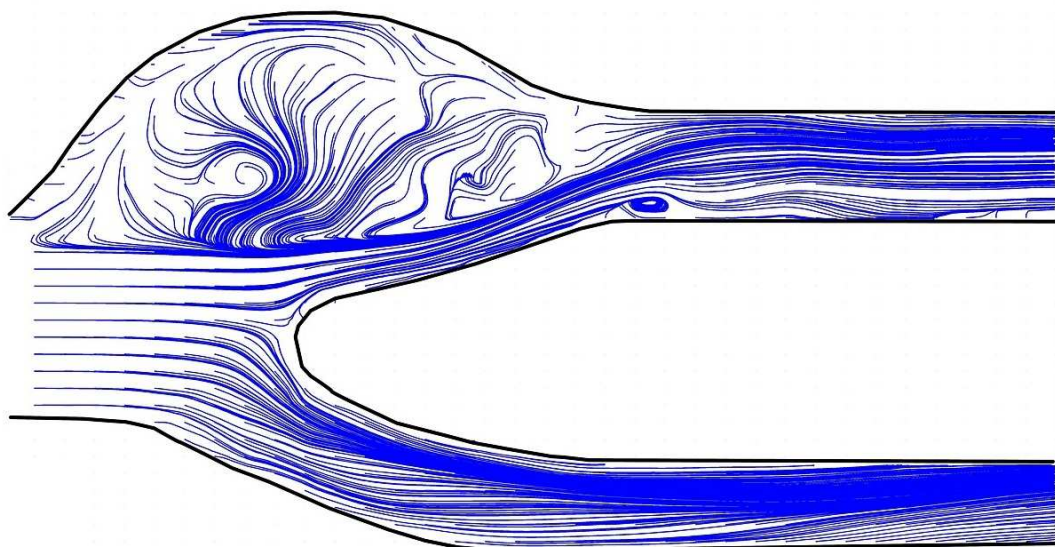
10.2.2 Model 2

V případě modelu 2 je z Obr. 50 a 51 patrné, že ovlivnění proudu zpětným prouděním v

bulbu není tak výrazné jako u modelu 1. Tím, že proud nebyl tak výrazně ovlivněn recirkulací v bulbu, si vysvětlují odtržení proudu na vnitřní hraně bifurkace za bulbem viz Obr. 51. Ve větvi bez bulbu je stejně jako u modelu 1 patrný 3D charakter proudění.



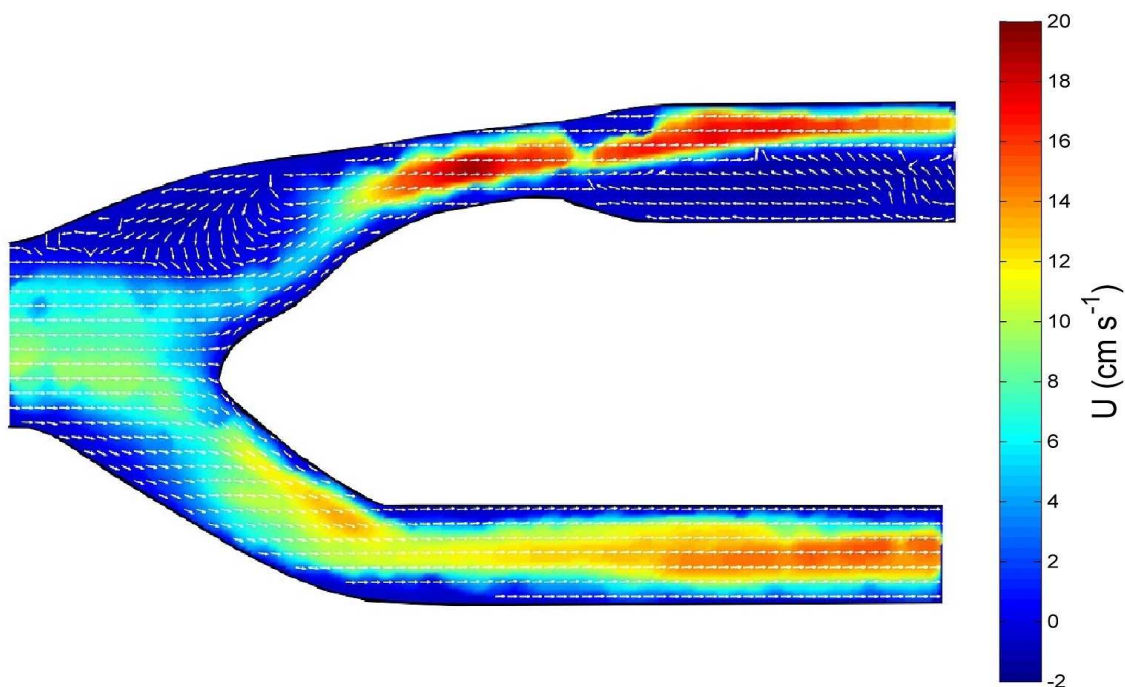
Obr. 50: Mapa rozložení rychlosti pro režim 2, 6 u modelu 2



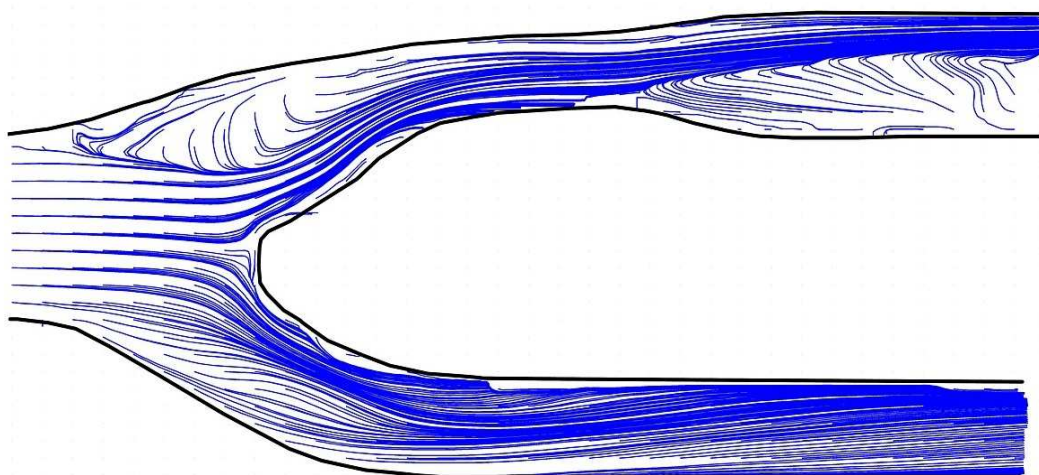
Obr. 51: Proudnice pro režim 2, 6 u modelu 2

10.2.3 Model 3

V modelu bifurkace se stenózou vzniká zpětné proudění před zúžením a za ním. Na Obr. 52 je patrné výrazné urychlení tekutiny ve stenóze. To přispívá ke zvýšení tlakové ztráty ve větvi se stenózou.



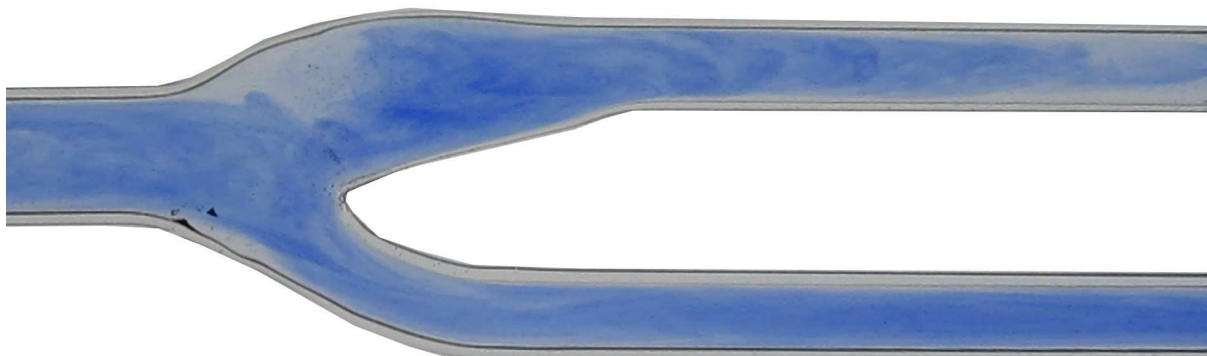
Obr. 52: Mapa rozložení rychlosti pro režim 2, 6 u modelu 3



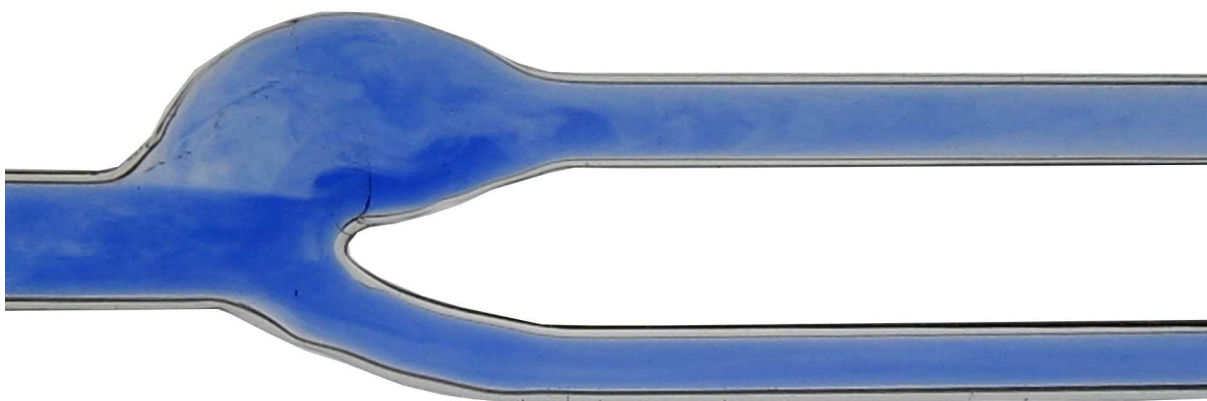
Obr. 53: Proudnice pro režim 2, 6 u modelu 3

10.3 Vizualizace proudění

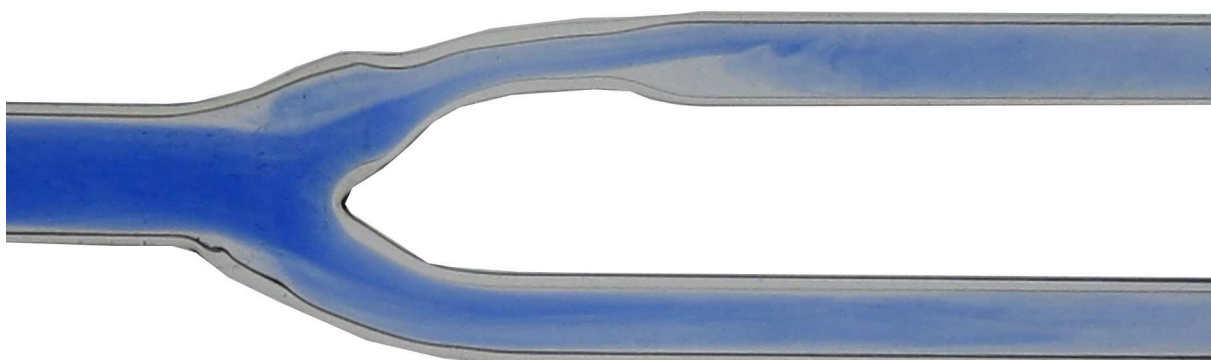
Na Obr. 54 až Obr. 56 jsou zobrazeny ukázky vizualizace proudění v modelech bifurkací při režimu „2, 6“, z nichž je patrné 3D chování tekutiny v bifurkaci.



Obr. 54: Vizualizace proudění v modelu 1 při režimu 2, 6

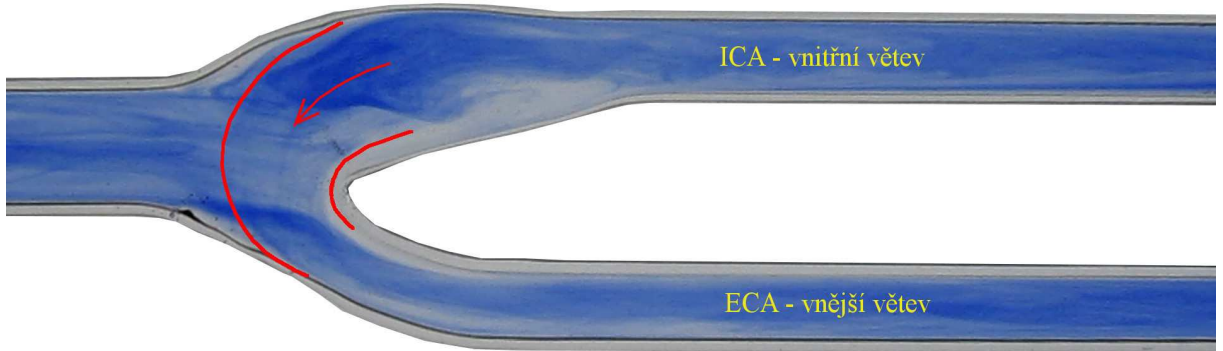


Obr. 55: Vizualizace proudění v modelu 2 při režimu 2, 6



Obr. 56: Vizualizace proudění v modelu 3 při režimu 2, 6

Z vizualizace je na videozáznamu i z obrázků patrné podtékání proudu tekutiny z bulbu do větve bez bulbu. Tento úkaz má vliv na tlakové ztrátové součinitele ve větvích bifurkací. Díky podtékání tekutiny z bulbu do větve bifurkace bez bulbu je tlakový ztrátový součinitel jedné větve závislý na průtocích v obou větvích. Na Obr. 57 a 58 je zobrazeno červeně podtékání. U bifurkace 2 je podtékání proudu jen malé. Videozáznamy jsou na přiloženém DVD.



Obr. 57: Ukázka podtékání proudu z bulbu - model 1



Obr. 58: Ukázka podtékání proudu z bulbu - model 2



Obr. 59: Ukázka podtékání proudu z bulbu - model 3

11 Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na vliv geometrie bulbu v lidské karotické bifurkaci. Pro uskutečnění experimentu bylo třeba navrhnout a sestavit měřící trať pro stacionární průtoky a navrhnout a nechat vyrobit zkušební modely s různou geometrií bulbu. Hlavním cílem práce bylo z naměřených dat vyhodnotit tlakové ztráty a tlakové ztrátové součinitele jednotlivých větví bifurkace. Pro získání povědomí o rozložení rychlosti bylo provedeno měření rychlostního pole metodou PIV a pro ucelenější představu o 3D charakteru proudění v bifurkaci byla provedena vizualizace proudění pomocí aplikace kontrastní látky do proudu tekutiny a pořízení videozáznamů.

Z naměřených dat se dá usuzovat, že tvar a velikost bulbu karotické bifurkace má zásadní vliv na tlakové ztráty a proudové pole. Model bifurkace se zvětšeným bulbem má oproti zdravé bifurkaci vyšší tlakovou ztrátu větve s bulbem, ale nižší tlakovou ztrátu větve bez bulbu. To může být způsobeno větším vírem v bulbu bifurkace modelu 2, který však oproti zdravé bifurkaci zasahuje méně do hlavního proudu, tím mu neubírá tolik energie a tlaková ztráta je nižší. Tlaková ztráta bifurkace se stenózou je u větve s bulbem (stenózou) výrazně vyšší. Na velikost tlakové ztráty větve bez bulbu má jen malý vliv. Geometrie bifurkace se stenózou vykazuje dle předpokladů z naměřených modelů nejvyšší tlakovou ztrátu v obou větvích. U modelů 1 a 2 tedy zdravé bifurkace respektive bifurkace se zvětšeným bulbem je tlaková ztráta ve větvi bez bulbu větší než ve větvi s bulbem. To odpovídá poměru tlakové ztráty v těle. Oproti tomu u modelu se stenózou je tlaková ztráta výrazně vyšší ve větvi s bulbem a to téměř až 4 krát. To je z hlediska hemodynamiky v těle zásadní problém.

Ve všech geometriích modelů není součinitel tlakové ztráty ζ konstantní, ale se vzrůstající rychlostí proudění klesá. To může být způsobeno podtékáním proudu z bulbu do vnější větve. Na Obr. 57 až 59 je podtékání zobrazeno. U bifurkace 2 je podtékání proudu jen malé a nezpůsobuje klesající trend součinitele tlakové ztráty.

Výsledek experimentu se plně shoduje s předpoklady a skutečným prouděním krve v těle. Získané výsledky korespondují s hypotézou, že u zdravé bifurkace bulb reguluje průtok do vnitřní větve (s bulbem) přivádějící krev do mozku.

Z Obr. 34, 35, 40, 41, 46 a 47 je znatelné, že přesnost měřených dat pro měření nízkých průtoků je nedostatečná. To může být způsobeno tím, že se pohybujeme na hranici

měřitelných rozsahů jak tlakových snímačů, tak i turbínkových průtokoměrů. Grafy pro průtoky 2 ml/s vykazují odchylky. Na Obr. 34, 35, 40, 41, 46 a 47 je patrné, že tlakový ztrátový koeficient vykazuje opačný trend než ostatní průtoky. Nepřesnosti v experimentálních datech mohly být způsobeny citlivostí tlakových snímačů na otřesy měřící trati. Vliv na výsledky experimentu mohly mít i vibrace měřící trati způsobené čerpadlem. Tento rušivý element by bylo dobré do budoucna omezit nebo nejlépe odstranit.

V následujícím výzkumu by mohly být modely proměřeny v nestacionárním proudění a pro zjištění závažnosti jednotlivých geometrií by bylo vhodné naměřit více modelů s menšími rozdíly v geometrii.

12 Literatura

- [1] BALEK Tadeáš, *Proudění tekutiny bifurkací*, Sborník konference Studentské tvůrčí činnosti 2015, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, ISBN 978-80-01-05727-8.
- [2] *Common carotid artery*. Wikipedia [online]. [cit. 6.6.2015]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Common_carotid_artery.
- [3] *Sex Differences in Carotid Bifurcation Anatomy and the Distribution of Atherosclerotic Plaque*. American Heart Association [online]. [cit. 7.6.2015]. Dostupné z: <http://stroke.ahajournals.org/content/32/7/1525.figures-only>
- [4] BEVEGARD, B.S., STEPHERD, J.T., *Circulatory effects of stimulating the carotid arterial stretch in man at rest and during exercise*, The Journal of Clinical Investigation [online], January 1966, 45(1): 132-142, [cit. 7.6.2015]. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC292674/>
- [5] BRISTOW H J. David, HONOUR A. John, PICKERING George W., SLEIGHT Peter, SMYTH Harley S., *Diminished Baroreflex Sensitivity in High Blood Pressure*, American Heart Association [online]. [cit. 7.6.2015]. Dostupné z: <http://circ.ahajournals.org/content/39/1/48.short>
- [6] KLABUNDE, Richard E., PhD, *Cardiovascular Physiology Concepts - Arterial Baroreceptors*, www.cvphysiology.com [online]. [cit. 7.6.2015]. Dostupné z: <http://www.cvphysiology.com/Blood%20Pressure/BP012.htm>
- [7] EL ETER, Eman, Dr, *Arterial Blood Pressure, 2012*, www.slideplayer.com [online]. [cit. 8.6.2015]. Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/3334362/>
- [8] LEE, Seung E., LEE Sang-Wook, Fischer, Paul F., BASSIOUNY Hisham, S., LOTH Francis, *Direct Numerical Simulation of Transitional Flow in a Stenosed Carotid Bifurcation*, 2008. US National Library of Medicine [online]. [cit. 17.6.2015]. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3279123/>
- [9] MITTAL, R., SIMMONS, S. P., UDAYKUMAR, H. S., *Application of large-eddy simulation to the study of pulsatile flow in a modeled arterial stenosis*. 2001, Journal of Biomechanical Engineering, vol. 123, pp. 325-332 [online]. [cit. 17.6.2015]. Dostupné z:

<http://biomechanical.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1405936>

[10] MILNER, J. S., MOORE, J. A., RUTT, B. K., *Hemodynamics of human carotid artery bifurcations: Computational studies with models reconstructed from magnetic resonance imaging of normal subjects*. 1998, *Journal of Vascular Surgery*, vol. 28, pp. 143-156, [online]. [cit. 17.6.2015]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0741521498702101>

[11] KAMINSKY, R., KALLWEIT, S., ROSSI, M., *PIV measurements of flows in artificial heart valves. Particle Image Velocimetry: New Developments and Recent Applications*, 2008.

[12] Takanobu Yagi, Ayaka Sato, Manabu Shinke, Sara Takahashi, Yasutaka Tobe, Hiroyuki Takao, Yuichi Murayama, Mitsuo Umezu, *Experimental insights into flow impingement in cerebral aneurysm by stereoscopic particle image velocimetry: transition from a laminar regime*, US National Library of Medicine [online]. [cit. 17.6.2015]. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23427094>

[13] N. A. Buchmann, C. Atkinson, M. C. Jeremy, *et al.* (2011), *Tomographic particle image velocimetry investigation of the flow in a modeled human carotid artery bifurcation*. Springer Link [online]. [cit. 17.6.2015]. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-011-1042-1>

[14] *Carotid sinus pressure receptors*, Studyblue [online]. Dostupné z: <https://www.studyblue.com/notes/n/anatomy/deck/1803005>

[15] JEŽEK, Jan, VARÁDIOVÁ, Blanka, ADAMEC, Josef. *Mechanika tekutin – skriptum*, Vydavatelství ČVUT, 2000.

[16] IDELCHIK, I. E. *Handbook of Hydraulic Resistance*, Jaico Books, 2005, ISBN 81 – 7992 – 118 – 2

[17] RAFFEL, Markus, WILLERT, Christian E., KOMPENZANS, Jürgen, *Particle Image Velocimetry*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 3 - 540 - 63683 - 8.

[18] ŠKARDA, Zdeněk , *Návrh točivé redukce na zadané parametry páry a metoda měření 3D PIV za lopatkováním – bakalářská práce*, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní

[19] NOVOTNÝ, Jan , PĚTA, Milan, *Postup měření metodou PIV*, ČVUT Praha

[20] *Metoda PIV*, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, skripta.

[21] YAGI, T., SATO, A., SHINKE, M., *Experimental Insights into Impingement in*

Cerebral Aneurysm by stereoscopic PIV: Transition from a Laminar Regime, www.rsif.royalsocietypublishing.org [online]. [cit. 11.6.2015]. Dostupné z: <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/10/82/20121031>

[22] KEFAYATI, Sarah, *PIV-based Investigation of Hemodynamic Factors in Diseased Carotid Artery Bifurcations with Varying Plaque Geometries*, Graduate Program in Physics, The University of Western Ontario London, Ontario, Canada, 2013.

[23] BALEK, Tadeáš. *Modelování proudu tekutiny v bifurkaci* - bakalářská práce, ČVUT v Praze, Fakulta Strojní, 2012.

[24] Goubergrits, L., Affeld, K., Fernandez-Britto, J., Falcon, L.: *Geometry of the Human Common Carotid Artery. A Vessel Cast Study of 86 Specimens*. Pathology Research and Practice, 2002, str. 543-551.

[25] Neil W. Bressloff: *Parametric Geometry Exploration of the Human Carotid Artery Bifurcation*. Journal of Biomechanics, November 2006, str. 2483-2491.

[26] KOLÍNSKÝ Jan, NOVÁKOVÁ Ludmila, ADAMEC Josef: Experimentální stanoviště pro měření třecích ztrát a místních ztrát při nestacionárním proudění kapaliny, *Funkční vzorek*, FS ČVUT v Praze, Laboratoře U12112, 2014.

13 Seznam obrázků

Obr. 1: Umístění karotické bifurkace [2]	5
Obr. 2: Karotické bifurkace (sinus - bulb) [3].....	5
Obr. 3: Umístění baroreceptoru v karotické bifurkaci [8].....	6
Obr. 4: Schema měření metodou PIV [14].....	12
Obr. 5: Stanovení Δx a Δy [14].....	13
Obr. 6: Schema měřicí trati : 1 – vstupní část, 2 – ustalovací část, 3 – měřicí část, – výstupní část, 5 – přečerpávací část, 6 – odpadní část.....	4 14
Obr. 7: Vstupní část trati.....	15
Obr. 8: Turbínkové průtokoměry a výstupní část trati.....	15
Obr. 9: Měřicí nádoba s modelem, tlakové snímače.....	15
Obr. 10: Přírubový systém, nákrůžek.....	17
Obr. 11: Přípravek pro zapojení tlakových snímačů.....	17
Obr. 12: Model s nalepenými spojkami.....	17
Obr. 13: Měřicí trať - 1-vstupní nádoba s přepadem, 2-výstupní nádoba, 3-měřicí nádoba s modelem, 4-turbínkové průtokoměry, 5-regulační ventily, 6-čerpadlo, 7-uzavírací ventil, 8- odpad, 9-škrťací avypouštěcí ventil, 10-přípravky pro tlakové snímače, 11-odvzdušňovací ventily, 12-systém vypuštění trati, 13-platforma pro měřicí přístroje, 14-stolek.....	18
Obr. 14: Model 2 se zvětšeným bulbem.....	20
Obr. 15: Model 1 zdravá bifurkace.....	21
Obr. 16: Model 3 se stenózou.....	21
Obr. 17: Určení rozměrů modelů[18].....	22
Obr. 18: Bifurkace 1 - zdravá geometrie.....	23
Obr. 19: Bifurkace 2 se zvětšeným bulbem.....	23
Obr. 20: Bifurkace 3 se stenózou.....	23
Obr. 21: Kalibrační křivka průtokoměru 1.....	26
Obr. 22: Kalibrační křivka průtokoměru 2.....	27
Obr. 23: Měřicí trať při měření tlakových ztrát.....	29
Obr. 24: Schématické uspořádání experimentu metody PIV – 1 měřicí nádoba s modelem, 2 kamera, 3 laser 1, 4 laser 2.....	31
Obr. 25: Detail laseru 1.....	31
Obr. 26: Ukázka měření metodou PIV.....	31
Obr. 27: Uspořádání měřicí trati pro vizualizace.....	32
Obr. 28: Ukázka měřicí trati při vytváření vizualizací.....	32
Obr. 29: Schéma pro vyhodnocení tlaků.....	33
Obr. 30: Tlaková ztráta ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1.....	35
Obr. 31: Tlaková ztráta ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1.....	35
Obr. 32: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1.....	36
Obr. 33: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1.....	36
Obr. 34: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 1, Reynoldsovo číslo.....	37
Obr. 35: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma	

větvemi pro model 1, Reynoldsovo číslo.....	37
Obr. 36: Tlaková ztráta ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2.....	38
Obr. 37: Tlaková ztráta ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2.....	38
Obr. 38: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2.....	39
Obr. 39: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2.....	39
Obr. 40: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2, Reynoldsovo číslo.....	40
Obr. 41: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 2, Reynoldsovo číslo.....	40
Obr. 42: Tlaková ztráta ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3.....	41
Obr. 43: Tlaková ztráta ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3.....	41
Obr. 44: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3.....	42
Obr. 45: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3.....	42
Obr. 46: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi s bulbem v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3, Reynoldsovo číslo.....	43
Obr. 47: Tlakový ztrátový součinitel ve větvi bez bulbu v závislosti na průtocích oběma větvemi pro model 3, Reynoldsovo číslo.....	43
Obr. 48: Mapa rozložení rychlosti pro režim 2, 6 u modelu 1.....	45
Obr. 49: Proudnice pro režim 2, 6 u modelu 1.....	45
Obr. 50: Mapa rozložení rychlosti pro režim 2, 6 u modelu 2.....	46
Obr. 51: Proudnice pro režim 2, 6 u modelu 2.....	46
Obr. 52: Mapa rozložení rychlosti pro režim 2, 6 u modelu 3.....	47
Obr. 53: Proudnice pro režim 2, 6 u modelu 3.....	47
Obr. 54: Vizualizace proudění v modelu 1 při režimu 2, 6.....	48
Obr. 55: Vizualizace proudění v modelu 2 při režimu 2, 6.....	48
Obr. 56: Vizualizace proudění v modelu 3 při režimu 2, 6.....	48
Obr. 57: Ukázka podtékání proudu z bulbu - model 1.....	49
Obr. 58: Ukázka podtékání proudu z bulbu - model 2.....	49
Obr. 59: Ukázka podtékání proudu z bulbu - model 3.....	49

14 Seznam tabulek

Tab. 1: Rozměry modelu bifurkace 1.....	22
Tab. 2: Rozměry modelu bifurkace 2.....	22
Tab. 3: Rozměry modelu bifurkace 3.....	22
Tab. 4: Skutečné rozměry modelů bifurkací	24
Tab. 5: Kalibrační data průtokoměr 1.....	26
Tab. 6: Kalibrační data průtokoměr 2.....	27
Tab. 7: Režimy pro měření tlakových ztrát.....	28
Tab. 8: Rozmezí Reynoldsových čísel ve větvích modelů.....	28
Tab. 9: Režimy měřené metodou PIV.....	30

15 Seznam rovnic

(1)	Obecná bernoulliova rovnice [7]	10
(2)	Upravená bernoulliova rovnice [7]	10
(3)	Vztah pro reynoldsovo číslo [7]	10
(4)	Weisbachův vztah [7]	11
(5)	Vztah pro místní ztráty [7]	11
(6)	Složka rychlosti w_x []	13
(7)	Složka rychlosti w_y []	13
(8)	Výpočet průtoku Q	25
(9)	Přepočet reynoldsova čísla	28
(10)	Vztah pro získání skutečného tlaku odečtením nulového odečtu	33
(11)	Bernoulliova rovnice mezi body 1 a 2	33
(12)	Ztrátový tlak ve větvi s bulbem p_{z1}	33
(13)	Vztah pro výpočet rychlostí	34
(14)	Ztrátový tlak ve větvi bez bulbu p_{z2}	34
(15)	Vztah pro výpočet tlakového ztrátového součinitele ve větvi s bulbem	34
(16)	Vztah pro výpočet tlakového ztrátového součinitele ve větvi bez bulbu	34

16 Seznam příloh

Příloha 1: Výkresová dokumentace k přípravku pro tlakové snímače

Příloha 2: Výkresová dokumentace ke spojkám pro připojení modelů do trati