



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**

**Vliv opakovaného zúžení průřezu na proudové charakteristiky**

**Effect of Multiple Stenosis on Flow Parameters**

Bakalářská práce

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO IŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Jan Kolínský

**Adam Bláha**

---

**Praha 2015**



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

pro: **p. Adama Bláhu**

program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: **bez oboru**

název česky: **Vliv opakovaného zúžení průřezu na proudové charakteristiky**

název anglicky: **Effect of multiple stenosis on flow parameters**

### **Zásady pro vypracování:**

- 1) Navrhněte geometrii opakovaného zúžení trubice a její modifikované varianty.
- 2) Pro vybrané varianty uspořádání opakovaného zúžení proměřte tlakovou ztrátu pro různé průtoky a stanovte ztrátový součinitel.
- 3) Stanovte ztrátové součinitele jednotlivých zúžení.
- 4) Metodou PIV změřte rychlostní profily toku v různých částech jednoho uspořádání experimentu.
- 5) 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

.....  
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 bakalářskou práci s názvem: „Vliv opakovaného zúžení průřezu na proudové charakteristiky“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Kolínského s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 17. 6. 2015

---

Adam Bláha

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Kolínskému za odborné a zodpovědné vedení, cenné rady, ochotu a pomoc při řešení problémů a zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat ostatním kolegům a zaměstnancům z Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky, kteří vždy v případě potřeby poradili a pomohli při řešení nejrůznějších problémů.

## Anotační list

Jméno autora: **Adam BLÁHA**

Název BP: *Vliv opakovaného zúžení průřezu na proudové charakteristiky*

Anglický název: Effect of Multiple Stenosis on Flow Parameters

Rok: 2015

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Obor studia: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Ústav: *Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky*

Vedoucí BP: *Ing. Jan Kolínský*

Bibliografické údaje: počet stran 58  
počet obrázků 39  
počet tabulek 2

Klíčová slova: Stenóza, měření tlaků, tlaková ztráta, součinitel místní ztráty, rychlostní pole, rychlostní profil, PIV

Keywords: Stenosis, pressure measurement, pressure loss, minor loss coefficient, velocity field, velocity profile, PIV

### Anotace:

*Práce se zabývá vlivem opakovaného zúžení na proudové charakteristiky. Je založena na experimentu, jehož primárním cílem je proměření tlakových ztrát a stanovení ztrátových součinitelů pro vybrané varianty uspořádání opakovaného zúžení. Pro jedno uspořádání experimentu se dále zabývá měřením rychlostních polí a vyhodnocením rychlostních profilů.*

### Abstract:

*The work deals with the effect of multiple stenosis on flow parameters. It is based on an experiment whose primary aim is to measure the pressure loss and determination of minor loss coefficient for selected layouts of multiple stenosis. For one experiment configuration also deals with the measurement of velocity fields and evaluation of velocity profiles.*

# Obsah

Seznam veličin a jednotek .....	- 1 -
1 Úvod.....	- 3 -
2 Teoretický úvod do mechaniky tekutin.....	- 4 -
2.1 Základní rozdělení tekutin.....	- 4 -
2.1.1 Z pohledu stlačitelnosti .....	- 4 -
2.1.2 Z pohledu viskozity .....	- 4 -
2.1.3 Newtonské tekutiny.....	- 5 -
2.1.4 Neneutonské tekutiny .....	- 6 -
2.2 Hydrodynamika .....	- 6 -
2.2.1 Jednorozměrné stacionární proudění ideální kapaliny .....	- 7 -
2.2.1.1 Zákon zachování hmoty – rovnice kontinuity.....	- 7 -
2.2.1.2 Zákon zachování energie – Bernoulliho rovnice.....	- 8 -
2.2.1.3 Zákon o změně toku hybnosti – Impulsová věta .....	- 9 -
2.2.2 Stacionární proudění vazké tekutiny potrubím.....	- 10 -
2.2.2.1 Základní rovnice vazké tekutiny .....	- 11 -
2.2.2.1.1 Rovnice kontinuity vazké tekutiny.....	- 11 -
2.2.2.1.2 Rozšířená Bernoulliho rovnice.....	- 12 -
2.2.2.2 Ztráty v potrubí.....	- 12 -
2.2.2.2.1 Místní ztráty.....	- 12 -
2.2.2.2.2 Třecí ztráty .....	- 13 -
3 Měření tlaku .....	- 14 -
3.1 Tlak a jeho jednotky .....	- 14 -
3.2 Kalibrace a ověřování .....	- 15 -
3.3 Rozdělení tlakoměrů .....	- 15 -
3.3.1 Etalony .....	- 15 -
3.3.1.1 Zvonový tlakoměr .....	- 16 -
3.3.1.2 Pístový tlakoměr .....	- 17 -
3.3.1.3 U – trubicový tlakoměr.....	- 18 -
3.3.1.4 Nádobkový tlakoměr.....	- 18 -
3.3.1.5 Manometr se sklonnou trubicí .....	- 19 -
3.3.2 Deformační tlakoměry .....	- 20 -
3.3.2.1 Tlakoměr s Bourdonovou trubicí .....	- 21 -

3.3.2.2	Vlnovcový tlakoměr .....	- 21 -
3.3.2.3	Tlakoměr s membránou s piezo – rezistivními prvky.....	- 21 -
3.3.2.4	Kapacitní snímač tlaku .....	- 22 -
4	Experiment.....	- 23 -
4.1	Měřicí trať .....	- 23 -
4.2	Návrh geometrie modelu.....	- 24 -
4.2.1	Tvar geometrie modelu.....	- 24 -
4.2.2	Rozměry modelu.....	- 25 -
4.2.3	Zakomponování modelu do tratě .....	- 27 -
4.3	Tlaková měření.....	- 28 -
4.3.1	Kalibrace tlakových snímačů .....	- 28 -
4.3.2	Charakteristika čerpadla .....	- 29 -
4.3.3	Měření třecích ztrát.....	- 30 -
4.3.4	Měření samotných stenóz .....	- 30 -
4.3.5	Měření kombinace 50 % a 75 % stenózy.....	- 30 -
4.3.6	Měření kombinace dvou 75 % stenóz.....	- 31 -
4.3.7	Vyhodnocení tlakové ztráty a součinitele místní ztráty .....	- 31 -
4.4	Měření rychlostního pole metodou PIV .....	- 33 -
5	Výsledky.....	- 35 -
5.1	Tlaková měření.....	- 35 -
5.1.1	Shrnutí.....	- 35 -
5.1.2	Měření samotných stenóz .....	- 36 -
5.1.3	Měření kombinace 50 % a 75 % stenózy.....	- 39 -
5.1.4	Měření kombinace dvou 75 % stenóz.....	- 40 -
5.2	Měření metodou PIV .....	- 41 -
5.2.1	Rychlostní pole .....	- 41 -
5.2.2	Rychlostní profily.....	- 42 -
6	Závěr.....	- 46 -
	Seznam zdrojů .....	- 48 -
	Seznam obrázků .....	- 49 -
	Seznam tabulek .....	- 51 -



---

## Seznam veličin a jednotek

A	(m <sup>3</sup> )	plocha
A <sub>c</sub>	(m <sup>3</sup> )	celková plocha
E	(J)	energie
E <sub>k</sub>	(J)	kinetická energie
E <sub>p</sub>	(J)	polohová energie
E <sub>s</sub>	(J)	tlaková energie
F	(N)	síla
F <sub>i</sub>	(N)	síla působící zevnitř
F <sub>e</sub>	(N)	síla působící zvenčí
Re	(1)	Reynoldsovo číslo
U	(V)	elektrické napětí
U	(J)	vnitřní energie
$\dot{V}$	(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	objemový tok
c	(m·s <sup>-1</sup> )	rychlost
d	(m)	průměr
e	(J·kg <sup>-1</sup> )	měrná energie
e	(1)	převodní číslo tlakoměru
e <sub>k</sub>	(J·kg <sup>-1</sup> )	měrná kinetická energie
e <sub>p</sub>	(J·kg <sup>-1</sup> )	měrná polohová energie
e <sub>s</sub>	(J·kg <sup>-1</sup> )	měrná tlaková energie
e <sub>z</sub>	(J·kg <sup>-1</sup> )	měrná ztrátová energie
g	(m·s <sup>-2</sup> )	gravitační zrychlení
h	(m)	výška
h <sub>z</sub>	(m)	ztrátová výška

---

$k$	(1)	součinitel konzistence
$k_c$	(1)	koeficient čerpadla
$l$	(m)	délka
$m$	(kg)	hmotnost
$\dot{m}$	( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	hmotnostní tok
$n$	(1)	Index toku
$p$	(Pa)	tlak
$\Delta p_z$	(Pa)	tlaková ztráta
$\Delta p_{z\xi}$	(Pa)	tlaková ztráta místní
$\Delta p_\lambda$	(Pa)	tlaková ztráta třecí
$q$	( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	měrná tepelná energie
$\eta$	( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	dynamická viskozita
$\kappa$	(1)	Coriolisův součinitel
$\lambda$	(1)	součinitel třecích ztrát
$\nu$	( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	kinematická viskozita
$\xi$	(1)	součinitel místní ztráty
$\rho$	( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	hustota
$\tau$	(Pa)	tečné napětí

Číselná hodnota dolního indexu značí příslušnost k místu (1,2) nebo značí parametr 50 % či 75 % stenózy (50,75).

# 1 Úvod

Nic není dokonalé, i v lidském těle se často objevují různé nedokonalosti. Jednou z takových nedokonalostí je stenóza. Stenóza z medicínského hlediska obecně představuje místní zúžení cévy, je překážkou pro proudění krve v krevním řečišti a důvodem poruchy orgánu, který céva zásobuje (mrtvice, infarkt).

Z pohledu mechaniky tekutin není stenóza nic jiného než zúžení a následné rozšíření trubice, které je příčinou místní ztráty. Dochází na ní k disipaci energie a pro udržení potřebného toku musíme do systému navíc dodávat energii, která právě vykompenzuje ztráty vzniklé disipací. V důsledku toho musí čerpadlo pracovat na vyšší výkon a dodávat proudu tekutiny více energie, díky čemuž dochází i k jeho výraznějšímu zatěžování a opotřebením.

V lidském těle čerpadlo představuje srdce a vznik stenózy je stejně jako u mechanického čerpadla důsledkem jeho většího zatěžování a opotřebením. Vznikají tak určité srdeční abnormality, zbytnění srdečního svalu, poškození cév, jejich možná ruptura a opotřebením cévních stěn.

Také se stává, že na jedné cévě je stenóz více. Pokud jsou dostatečně daleko od sebe, dojde k disipaci energie na první stenóze, vyvinutí proudění a následně k disipaci energie na druhé stenóze. Výsledná ztráta by v ideálním případě byla rovna součtu ztrát každé stenózy zvlášť. Pokud jsou však stenózy u sebe blízko, nemusí dojít k vyvinutí proudění zpět do původního stavu a ještě narušený proud začne vstupovat do druhé stenózy, což nepochybně určitým způsobem ovlivní i množství disipované energie a výslednou ztrátu.

Mým úkolem je zjistit na modelové situaci, jak moc a do jaké vzdálenosti od sebe se dvě stenózy ovlivňují.

## 2 Teoretický úvod do mechaniky tekutin

Za tekutinu se obecně považuje látka, která se vlivem vnějších sil nevratně deformuje. Nemá vlastní tvar, ten zaujímá podle prostředí, ve kterém se vyskytuje. Tekutina je samozřejmě složena z molekul, ale protože se pohybujeme v oblasti objemů tekutiny mnohem větších, než je objem molekul, její molekulovou stavbu zanedbáváme a zavádíme model tekutiny jako spojitého prostředí, tedy kontinua. Ve většině případů i nepatrné tečné síly uvedou tekutinu do pohybu.

### 2.1 Základní rozdělení tekutin

Tekutiny lze dělit dle mnoha různých kritérií. V základu je rozdělím z pohledu stlačitelnosti, uvažování jejich viskozity a dle toho, zda se řídí či neřídí Newtonovým zákonem.

#### 2.1.1 Z pohledu stlačitelnosti

Dle tohoto kritéria dělíme tekutiny na stlačitelné a nestlačitelné. Nestlačitelné tekutiny vlivem působícího tlaku jen minimálně mění svůj objem. Patří sem kapaliny, které považujeme za téměř nestlačitelné. Pro představu, zvýšíme-li tlak vody o 1000 %, změna objemu bude menší jak 1 %. Kapaliny tedy velice mírně stlačitelné jsou, ale změna objemu je natolik malá, že ji zanedbáváme a považujeme je za nestlačitelné. Tvar těchto tekutin je dán tvarem nádoby, vytvářejí volnou hladinu a v malých objemech tvoří kapky.

Stlačitelné a současně i rozpínavé tekutiny vyplňují celý objem nádoby, nevytvářejí volnou hladinu a se změnou tlaku ochotně mění svůj objem. Patří sem plyny a páry (za páry považujeme plyny, jejichž stav je blízký bodu zkapalnění), ty souhrnně označujeme jako vzdušiny.

#### 2.1.2 Z pohledu viskozity

Vazkost neboli viskozita je další důležitou vlastností tekutiny. „*Viskozita je schopnost tekutiny přenášet tečné napětí, je příčinou odporu proti pohybu částic a vzniku tečného napětí na rozhraní mezi tekutinou a stěnou.*“<sup>[1]</sup> Reálné tekutiny jsou do určité míry stlačitelné a mají svou viskozitu, v mnoha případech by však bylo

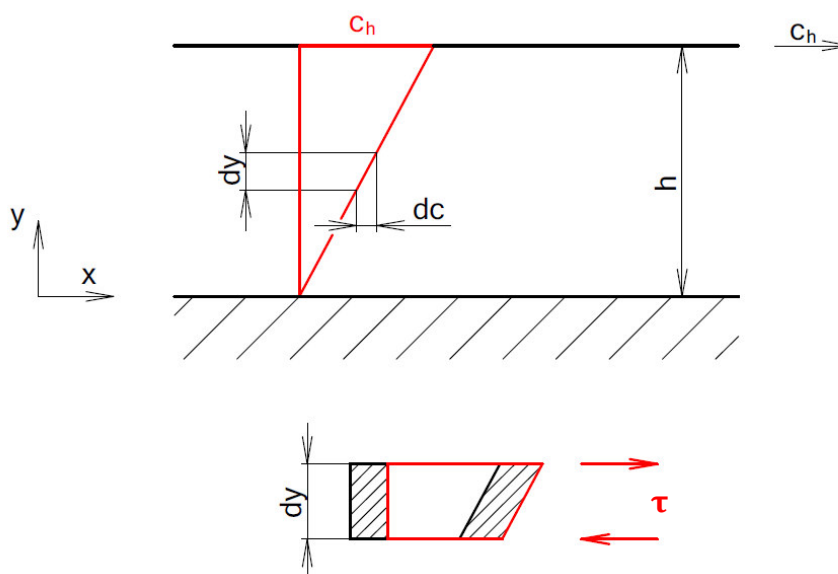
zbytečně složité uvažovat obě tyto vlastnosti, a proto se zavádí modely, které do určité míry idealizují vlastnosti tekutin.

Modely tekutin:

1. Ideální kapalina – nevazká nestlačitelná tekutina (nejjednodušší model)
2. Ideální plyn – nevazká stlačitelná tekutina
3. Vazká kapalina – vazká nestlačitelná tekutina
4. Vazký plyn – vazká stlačitelná tekutina (nejsložitější model)

### 2.1.3 Newtonské tekutiny

Newtonské tekutiny jsou tekutiny, které se řídí Newtonovým zákonem. Ten lze demonstrovat na příkladu pohybující se desky na kapalinovém filmu při laminárním proudění. Tekutina lpí na povrchu, tedy rychlost tekutiny na nepohybující se stěně je nulová a rychlost tekutiny na pohybující se desce je shodná s rychlostí unášení desky. Vlivem odporu proti pohybu tekutiny vzniká tečné napětí  $\tau$ .



Obr. 2.1 Tečné napětí mezi vrstvami newtonské tekutiny

$$\tau = \eta \cdot \frac{dc}{dy} \quad (1)$$

Newtonův zákon říká, že tečné napětí je lineárně závislé na rychlosti smykové deformace a konstantou úměrnosti je dynamická viskozita  $\eta$ . Případně může být zadána kinematická viskozita  $\nu$ , vztah mezi kinematickou a dynamickou viskozitou:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

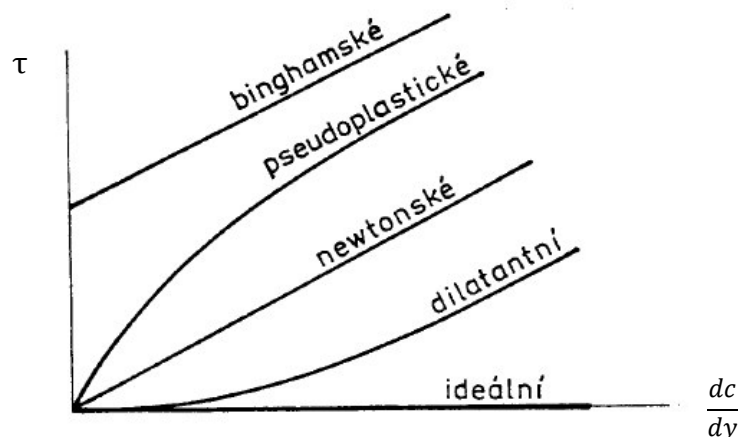
Za newtonské tekutiny můžeme především považovat vodu a vzduch.

### 2.1.4 Nenewtonské tekutiny

Nenewtonské tekutiny jsou ty, které se neřídí Newtonovým zákonem. Rychlost smykové deformace není úměrná tečnému napětí a jejich závislost obecně vyjadřuje složitější funkce. U časově nezávislých nenewtonských látek lze uplatnit obecnější vztah pro výpočet tečného napětí.

$$\tau = k \cdot \left(\frac{dc}{dy}\right)^n + \tau_0 \quad (3)$$

$k$  – součinitel konzistence  
 $n$  – index toku  
 $\tau_0$  – mezní tečné napětí



Obr. 2.2 Závislost tečného napětí na rychlosti deformace pro různé druhy tekutin převzato a upraveno [1]

## 2.2 Hydrodynamika

Hydrodynamika sleduje pohyb tekutiny neboli její tok. V zásadě nás budou zajímat dvě veličiny, a to tlak a rychlost. Obecně jsou tyto veličiny funkcí tří souřadnic a času. Tedy pro případ trojrozměrného nestacionárního (závislého na čase) proudění platí:

$$p = p(x, y, z, t) \quad (4)$$

$$c = c(x, y, z, t) \quad (5)$$

Avšak, ne veškeré proudění je takto složité, v případě kontinuálního toku přestanou být rychlost a tlak závislé na čase. V některých případech lze pro usnadnění považovat proudění za rovinné či dokonce jednorozměrné. Pro nejjednodušší případ, tedy jednorozměrné stacionární proudění, jsou rychlost a tlak závislé pouze na jedné souřadnici.

$$p = p(x) \quad (6)$$

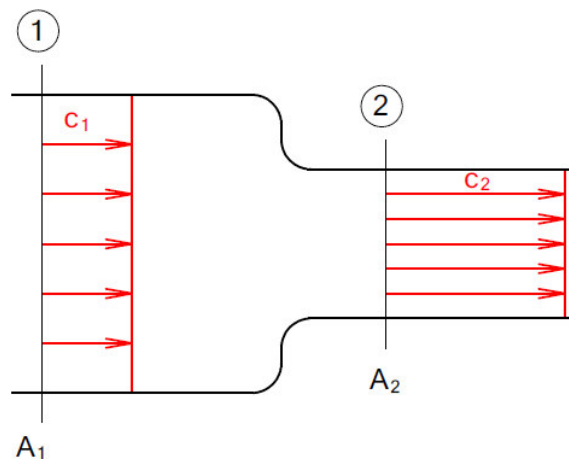
$$c = c(x) \quad (7)$$

## 2.2.1 Jednorozměrné stacionární proudění ideální kapaliny

Jedná se o nejjednodušší proudění ideální kapaliny, kterou jako model považujeme za zcela nestlačitelnou a nevazkou. Takovéto proudění popisují tři základní zákony hydrodynamiky.

### 2.2.1.1 Zákon zachování hmoty – rovnice kontinuity

Zákon zachování hmoty, či názorněji zachování hmotnostního toku, popisuje tzv. rovnice kontinuity. Ta vychází z toho, že v různých místech určité kontrolní oblasti je zachován konstantní hmotnostní tok kapaliny.



Obr. 2.3 Schéma pro odvození rovnice kontinuity

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \quad (8)$$

V případě nestlačitelné kapaliny je hustota konstantní, tudíž je zachován nejen hmotnostní tok, ale i tok objemový.

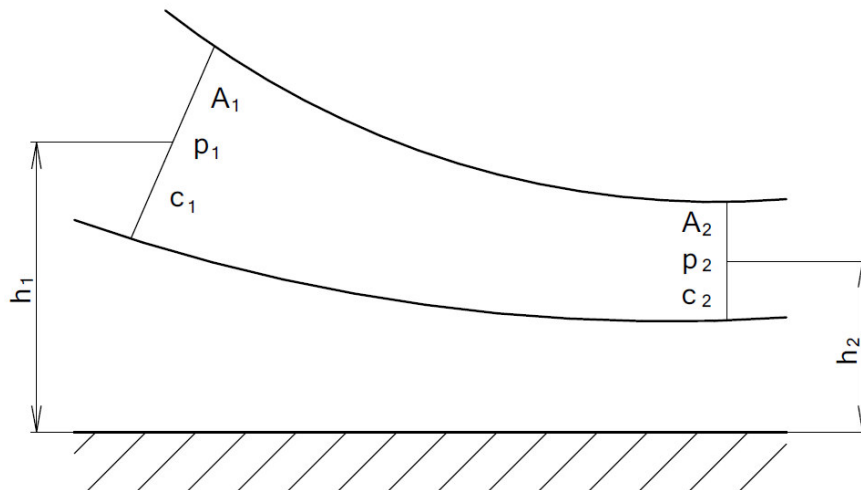
$$\rho_1 = \rho_2 = \rho = \text{konstanta}$$

$$\rho \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho \cdot c_2 \cdot A_2$$

$$\dot{V} = c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 \quad (9)$$

V zásadě platí, že čím menší bude průřez, tím větší bude rychlost a naopak.

### 2.2.1.2 Zákon zachování energie – Bernoulliho rovnice



Obr. 2.4 Schéma pro odvození Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování energie v tekutině. Celková energie je dána součtem energie vnitřní, polohové, tlakové a kinetické.

$$E = U + E_p + E_s + E_k \quad (10)$$

Při výpočtech se pracuje s měrnou energií, což je podíl energie tekutiny a její hmotnosti. Tímto způsobem energii vztáhneme k jednotce hmotnosti a s hmotností dále při výpočtech nebudeme pracovat.

$$e = \frac{E}{m} = u + e_p + e_s + e_k \quad (11)$$

Rozdíl celkové energie je dán rozdílem dílčích energií v místě 1 a 2, pro případ proudění bez přívodu tepla a mechanické energie musí být ze zákona zachování energie tento rozdíl roven nule.



$$u_2 - u_1 + g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = 0 \quad (12)$$

Význam jednotlivých členů:

$u_2 - u_1$	rozdíl měrných vnitřních energií	$g \cdot (h_2 - h_1)$	rozdíl měrných polohových energií
$\frac{p_2 - p_1}{\rho}$	Rozdíl měrných tlakových energií	$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$	Rozdíl měrných kinetických energií

Pro proudění s nulovým rozdílem vnitřních energií ( $u_2 - u_1 = 0 \Leftrightarrow T = konst.$ ) získáme Bernoulliho rovnici:

$$g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} = konst. \quad (13)$$

Případně ji můžeme upravit do formy energetických výšek:

$$h_1 + \frac{p_1}{g \cdot \rho} + \frac{c_1^2}{2 \cdot g} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{g \cdot \rho} + \frac{c_2^2}{2 \cdot g} = konst. \quad (14)$$

### 2.2.1.3 Zákon o změně toku hybnosti – Impulsová věta

Druhý Newtonův zákon říká, že síla působící na těleso je dána součinem jeho hmotnosti a zrychlení.

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{c}}{dt} \quad (15)$$

Po separaci proměnných a integraci zjistíme, že impuls síly ( $\vec{F} \cdot \Delta t$ ) je roven změně hybnosti ( $m \cdot \Delta \vec{c}$ ).

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{c} \quad (16)$$

Vydělíme-li rovnici (16) členem  $\Delta t$  a za  $m/\Delta t$  dosadíme hmotnostní tok, získáme vztah:

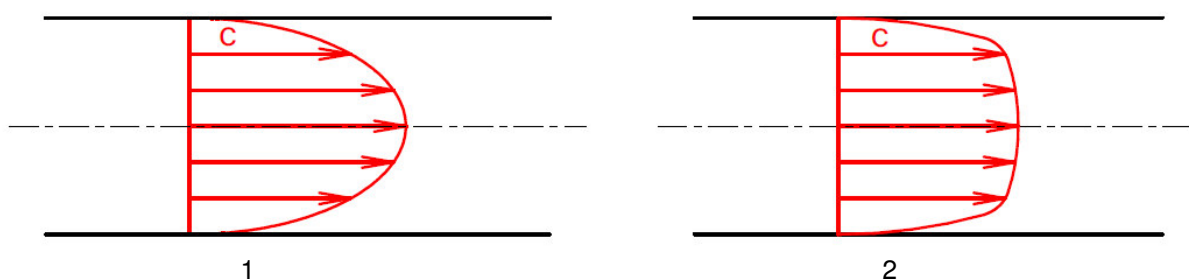
$$\vec{F} = \dot{m} \cdot (\vec{c}_2 - \vec{c}_1) \quad (17)$$

Člen na pravé straně rovnice  $\dot{m} \cdot (\vec{c}_2 - \vec{c}_1)$  představuje právě změnu toku hybnosti.

### 2.2.2 Stacionární proudění vazké tekutiny potrubím

Při proudění reálné kapaliny v mnoha případech můžeme zanedbat její stlačitelnost, ale již nemůžeme zanedbávat její vazké vlastnosti. Právě vlivem viskozity tekutiny dochází k jistým ztrátám, dochází k disipaci energie do formy, kterou již nemůžeme využít. Reálná tekutina lpí na povrchu, rychlost na povrchu je nulová a směrem k ose roste.

Obecně můžeme říci, že rychlost roste od povrchu k ose, obecně však neroste stejným způsobem. Rozložení rychlosti v potrubí ukazuje rychlostní profil, který je závislý na rychlosti proudění kapaliny, jejích vazkých vlastnostech a geometrii potrubí. Dle toho rozdělujeme proudění na laminární a turbulentní. Představa laminárního proudění spočívá v tom, že jednotlivé molekuly tekutiny se pohybují v navzájem rovnoběžných drahách a tvoří určité vrstvy, mezi kterými navzájem nepřecházejí. Rychlostní profil laminárního proudění má v ideálním případě parabolický tvar. Turbulentní proudění je neuspořádané, molekuly tekutiny se již nedrží ve svých vrstvách, mezi vrstvami přecházejí, čímž dochází k různému promíchávání tekutiny. Rychlostní profil je na čele více zploštělý.



Obr. 2.5 Rychlostní profily

1 – laminární proudění, 2 – turbulentní proudění

Kritériem přechodu mezi turbulentním a laminárním prouděním je Reynoldsovo číslo. To udává poměr mezi setrvačnými a vazkými silami.

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} \quad (18)$$

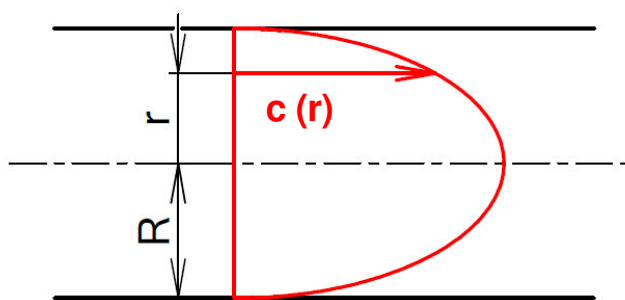
Za spodní hranici turbulence se považuje kritické Reynoldsovo číslo  $Re_K = 2300$ . Proudění s Reynoldsovým číslem menším než  $Re_K$  považujeme za laminární, s Reynoldsovým číslem větším než  $Re_K$  za turbulentní. V praxi ovšem není tento přechod striktně dán a velice záleží na okolních podmínkách. V přísných laboratorních podmínkách lze udržet laminární proudění do hodnot  $Re \sim 10^4$  a naopak v nevhodných podmínkách dochází k přechodu z laminárního proudění do turbulentního mnohem dříve.

### 2.2.2.1 Základní rovnice vazké tekutiny

Mezi základní rovnice popisující proudění vazké tekutiny patří opět rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice, avšak s drobnými úpravami.

#### 2.2.2.1.1 Rovnice kontinuity vazké tekutiny

Rovnice kontinuity pro vazkou tekutinu má takřka stejnou podobu jako rovnice kontinuity nevazké tekutiny. Problém zde nastává s rychlostí, která je funkcí poloměru potrubí.



$$d\dot{V} = c(r) \cdot dA \quad (19)$$

$$\dot{V} = \iint_A c(r) \cdot dA = c \cdot A \quad (20)$$

Obr. 2.6 Schéma pro odvození rovnice kontinuity vazké tekutiny

$$c = \frac{\dot{V}}{A} \quad (21)$$

Vztah (20) vyjadřuje tzv. střední rychlost podle objemu, kterou dále budeme dosazovat do rovnice kontinuity. Ta má pro případ vazké nestlačitelné tekutiny tvar:

$$c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 \quad (22)$$

### 2.2.2.1.2 Rozšířená Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je pro případ vazké tekutiny rozšířena o člen, který v sobě zahrnuje energii disipovanou do nevyužitelné formy, tzv. měrnou ztrátovou energii  $e_z$ . Dále je rozšířena o Coriolisův součinitel  $\kappa$ ,  $\kappa \approx 1$  pro případ turbulentního proudění,  $\kappa = 2$  pro případ laminárního proudění.

$$g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \kappa_1 \cdot \frac{c_1^2}{2} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \kappa_2 \cdot \frac{c_2^2}{2} + e_{z12} \quad (23)$$

Podle tvaru Bernoulliho rovnice dosazujeme ztrátovou energii ve formě měrné ztrátové energie  $e_z$ , ztrátové výšky  $h_z$  či ztrátového tlaku  $\Delta p_z$ .

$$e_z = g \cdot h_z = \frac{\Delta p_z}{\rho} \quad (24)$$

### 2.2.2.2 Ztráty v potrubí

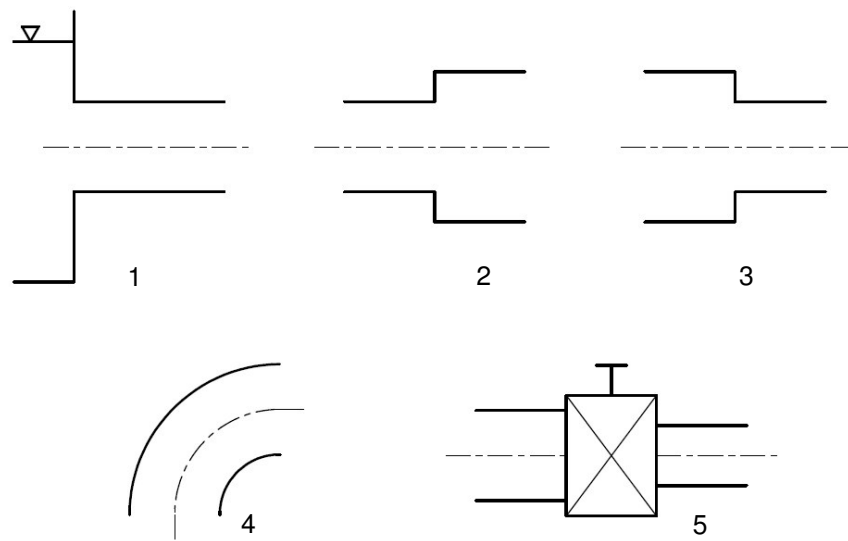
Velká část mechaniky tekutin se zabývá ztrátami, právě ztráty vzniklé disipací energie nás zajímají, protože veškerou disipovanou energii musíme pro udržení požadovaného toku do systému dodat. Ztráty jsou závislé na řadě parametrů, např. viskozitě a hustotě tekutiny, drsnosti a geometrii potrubí, ale zejména na rychlosti proudění. Dělíme je na ztráty třením v potrubí a ztráty místní, které vznikají vlivem místního narušení proudu, např. změnou geometrie potrubí (rozšíření, zúžení), změnou směru proudění (kolena) či jinými hydraulickými prvky (ventily, kohouty...). Celková ztráta energie je dána součtem jednotlivých dílčích ztrát.

$$e_{zc} = \sum_i^n e_{zi} \quad h_{zc} = \sum_i^n h_{zi} \quad \Delta p_{zc} = \sum_i^n \Delta p_{zi} \quad (25)$$

#### 2.2.2.2.1 Místní ztráty

Měrná ztrátová energie způsobená místní ztrátou je dána měrnou kinetickou energií násobenou ztrátovým součinitelem  $\xi$ . Hodnota ztrátového součinitele pro běžně užívané hydraulické prvky vztahena na místní rychlost bývá uvedena v příručkách.

$$e_z = g \cdot h_z = \frac{\Delta p_z}{\rho} = \xi \cdot \frac{c^2}{2} \quad (26)$$



Obr. 2.7 Příkladů prvků způsobujících místní ztrátu

1 – výtok z nádrže, 2 – náhlé rozšíření, 3 – náhlé zúžení, 4 – koleno, 5 – ventil

### 2.2.2.2 Třecí ztráty

Nejčastěji užívaný vztah pro výpočet měrné ztrátové energie způsobené třecí ztrátou v potrubí udává tzv. Weisbachův vzorec.

$$e_z = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2} \quad (27)$$

Člen rovnice  $\lambda$  je součinitel třecích ztrát, ten závisí na Reynoldsově čísle a charakteru proudění.

Laminární proudění  $\lambda = \frac{64}{Re} \quad (28)$

Turbulentní proudění  $\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (29)$

Při výpočtu třecích ztrát musíme dbát na správné dosazení průměru trubky, chyba průměru je daleko větší než chyba délky, jelikož s průměrem počítáme i při výpočtu střední rychlosti (20), která je ve Weisbachově vzorci v druhé mocnině.

$$e_z = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\left( \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \right)^2}{2} = \lambda \cdot \frac{l}{d^5} \cdot \frac{8 \cdot \dot{V}^2}{\pi^2} \quad (30)$$

## 3 Měření tlaku

### 3.1 Tlak a jeho jednotky

Tlak jako fyzikální veličinu můžeme definovat jako poměr jednoty síly  $F$  působící kolmo na jednotku plochy  $A$ . Ač se to na první pohled nemusí zdát zcela zřejmé, tlak je skalární veličina, nemá tedy směr, jen velikost. V současné době se za platnou jednotku tlaku používá jednotka odvozená ze soustavy SI, tedy pascal (Pa). Jeden pascal odpovídá síle jednoho newtonu rovnoměrně rozložené na ploše  $1 \text{ m}^2$ .

$$p = \frac{F}{A} \quad \left( Pa = \frac{N}{m^2} \right) \quad (31)$$

V případě nerovnoměrného rozložení síly definujeme tlak jako element síly působící na element plochy.

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (32)$$

Často se nesečkáme jen se základní jednotkou. V různých dobách a na různých místech se používaly různé jednotky, kterými se vyjadřovala velikost tlaku, s mnohými se můžeme setkat ještě dnes. Běžně se v různých odvětvích setkáváme zejména s dalšími pěti jednotkami, které vycházejí z různého vyjádření velikosti tlaku.

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 0,1 \text{ Mpa}$$

$$1 \text{ mm H}_2\text{O} = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 0,001 \cdot 9,81 = 9,81 \text{ Pa}$$

Milimetr vodního sloupce vychází z hydrostatického tlaku, jedná se o tlak, který vyvolá 1 mm sloupce vody v tíhovém poli Země.

$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Hg} = 133,322 \text{ Pa}$$

Podobně jako milimetr vodního sloupce odpovídá jeden Torr tlaku, který vyvolá 1 mm sloupce rtuti v tíhovém poli Země.

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$$

1 atm neboli fyzikální atmosféra vychází z barometrického tlaku a byla definována jako normální tlak zemské atmosféry při hladině moře.

$$1 \text{ PSI} \cong 6895 \text{ Pa}$$

Jednotka PSI (pound per square inch) vychází z principu působení jednotky síly na jednotku plochy, avšak nevychází (jako Pa) z jednotek soustavy SI, je definována jako působení libry síly na čtvereční palec.

## 3.2 Kalibrace a ověřování

Princip kalibrace přístrojů na měření tlaku vychází přímo ze samotné fyzikální definice tlaku, tedy že se jedná o sílu rovnoměrně působící na plochu, případně využívá principu hydrostatického tlaku. Zařízení používaná ke kalibraci tlakoměrů využívají definičního principu a nazývají se etalony. Při ověřování se používá stejný typ tlakoměru jako ověřovaný, má pouze vyšší přesnost.

## 3.3 Rozdělení tlakoměrů

Tlakoměry můžeme rozdělit podle různých hledisek, podle jejich konstrukce, principu měření, přesností. Dále se dělí podle toho, jaký tlak vůbec měří. Můžeme měřit tlak absolutní, vztažený k nulovému tlaku, nebo podtlak či přetlak, tedy tlak vztažený k nějaké referenční hodnotě (např. k barometrickému tlaku).

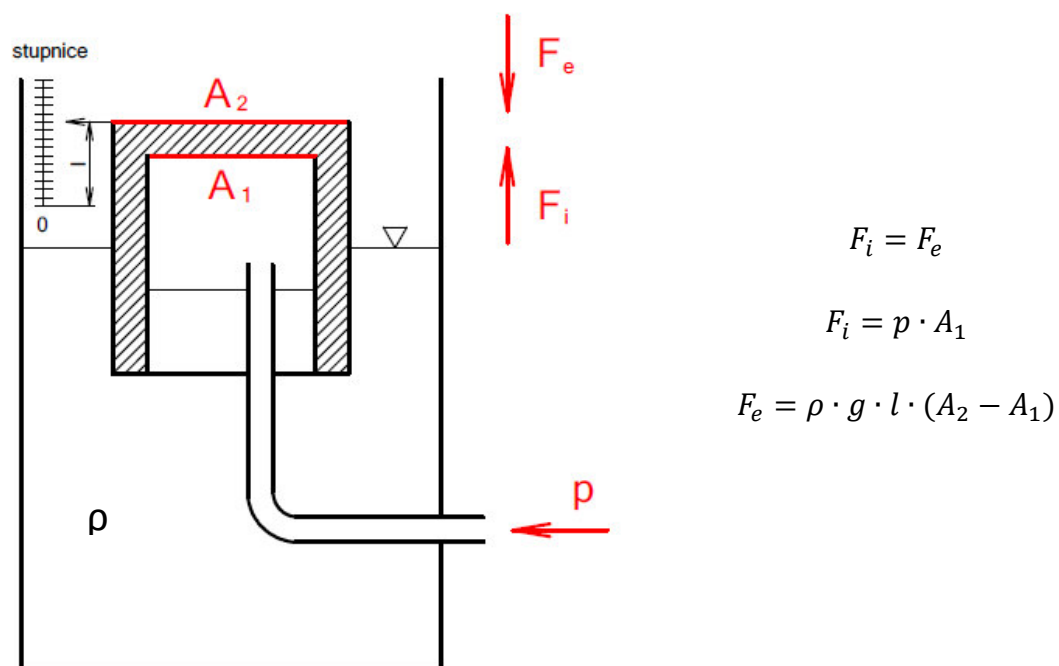
### 3.3.1 Etalony

Principy etalonových tlakoměrů vycházejí přímo z fyzikální podstaty tlaku, využívají tzv. definičního principu, tedy že tlak je definován jako síla na jednotku plochy nebo vycházejí z definice hydrostatického tlaku. Etalonové přístroje se mohou používat pro kalibraci jiných tlakoměrů, jsou určeny především pro laboratorní použití. Nejsou vhodné pro průmyslové použití především kvůli své málo robustní konstrukci a náchylnosti na změny teploty či vibrace.

### 3.3.1.1 Zvonový tlakoměr

Základem zvonového tlakoměru je nádobka naplněná kapalinou a zvon, který se do kapaliny ponoří. Pod zvon se zavádí tlak, který chceme kalibrovat, jenž způsobuje změnu polohy zvonu ve vertikálním směru. Měřítkem tlaku je zdvih zvonu. Jako kapalina do nádoby se používá olej, voda, petrolej či toluen. Jedná se o velice přesný přístroj s poměrně malým rozsahem, přesnost je až 0,02 % z rozsahu, rozsah může být do 3000 Pa. Slouží k ověřování a především kalibraci jiných tlakoměrů.

Princip zvonového tlakoměru je založen na rovnováze sil působících na zvon zevnitř, vlivem přiváděného tlaku, a vnějších sil, především gravitace.



Obr. 3.1 Schéma zvonového tlakoměru

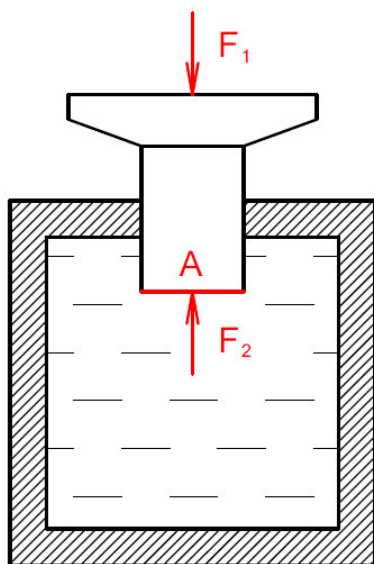
$$p = \frac{F_e}{A_1} = \frac{(A_2 - A_1)}{A_1} \cdot \rho \cdot g \cdot l \quad (33)$$



### 3.3.1.2 Pístový tlakoměr

Jedná se o přístroj využívající definičního principu tlaku jako síly na jednotku plochy. Skládá se z nádoby s kapalinou, nejčastěji olejem, uzavřenou pístem. Na píst přikládáme závaží, která vyvolají sílu  $F_1$ , z principu akce a reakce působí stejná síla  $F_2$  na píst z druhé strany. Známe-li plochu  $A$  části pístu ponořené v kapalině, snadno vypočítáme i tlak, který tíha závaží vyvolala. Tento přístroj se používá na rozdíl od zvonového tlakoměru pro větší tlaky a větší rozsahy. Běžně se řádově pohybují od desítek MPa až po stovky MPa, některé měří až jednotky GPa.

Ač se jedná o principiálně jednoduché zařízení, ve skutečnosti není zcela jednoduché ho zkonstruovat. Důležitou roli hraje těsnění pístu, požadavkem je, aby neunikala kapalina z nádoby, ale na druhou stranu je potřeba, aby bylo mezi pístem a těsněním co nejmenší tření. Další roli hraje změna objemu pístu s teplotou a mnoho dalších veličin. Z toho vyplývá, že se jedná o poměrně drahé a náchylné zařízení, je však velice přesné, až 0,015 % z měřené hodnoty, proto se používá v laboratořích zejména ke kalibraci deformačních tlakoměrů.



$$F_1 = F_2 = F$$

Obr. 3.2 Schéma pístového tlakoměru

Výsledný tlak se určí dle vztahu (31).

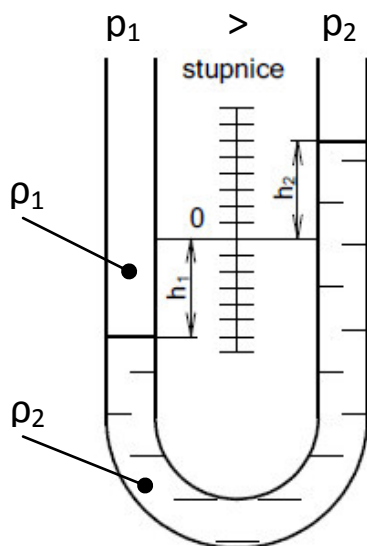
### 3.3.1.3 U – trubicový tlakoměr

Konstrukčně se jedná o jednoduchou U – trubici konstantního průměru s délkovou stupnicí a z části naplněnou kapalinou o určité hustotě  $\rho_2$ . Jako měřící médium se používá voda, rtuť či alkohol. Jeden vstup manometru připojíme k měřenému místu 1 s médiem o hustotě  $\rho_1$  a tlakem  $p_1$ , druhou k tlaku  $p_2$ . Na základě vychýlení hladiny měřícího média lze snadno vypočítat rozdíl tlaků měřeného média na vstupech do U – trubice. Tento tlakoměr využívá účinku hydrostatického tlaku, kdy výška zvednuté hladiny vyrovnává vyšší tlak měřeného média v místě s nižší hladinou.

$$h = h_1 + h_2$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h \quad (34)$$

Pokud měříme médium o mnohem menší hustotě než je hustota měřícího média, měříme-li například rozdíl tlaku vzduchu, můžeme hustotu měřeného média zanedbat.



$$\rho_1 \ll \rho_2$$

$$\Delta p = \rho_2 \cdot g \cdot h \quad (35)$$

Obr. 3.3 Schéma U – trubicového tlakoměru

### 3.3.1.4 Nádobkový tlakoměr

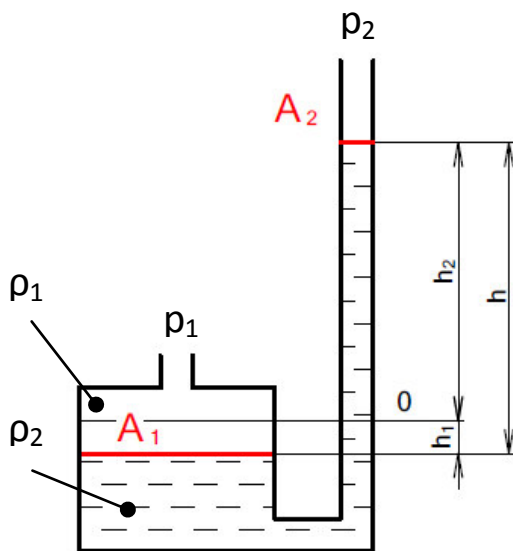
Skládá se z nádoby a trubice, které jsou vzájemně propojené. Průřez nádoby je však mnohem větší než je průřez trubice. Je založen na obdobném principu jako U – trubicový tlakoměr. Vyšší tlak přivedený např. na vstup s nádobkou bude

kompenzován hydrostatickým tlakem zvednutého sloupce kapaliny v trubici, tudíž změna tlaku na vstupech do manometru způsobí změnu výšky hladin měřícího média.

$$A_1 \cdot h_1 = A_2 \cdot h_2$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot (h_1 + h_2) = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h_2 \cdot \left( \frac{A_2}{A_1} + 1 \right)$$

$$e = \frac{A_2}{A_1} + 1 - \text{převodní číslo tlakoměru}$$



$$\rho_1 \ll \rho_2$$

$$\Delta p = \rho_2 \cdot g \cdot h_2 \cdot e \quad (36)$$

Obr. 3.4 Schéma nádobkového tlakoměru

Rozsah nádobkového tlakoměru se pohybuje od 0 – 3 kPa, přesnost 0,05 – 1 %, jedná se o přesné zařízení pro měření tlaku, lze s ním tedy měřit tlak, ale jelikož využívá definičního principu, je možné jej použít i pro kalibraci jiných, především deformačních, tlakoměrů.

### 3.3.1.5 Manometr se sklonnou trubicí

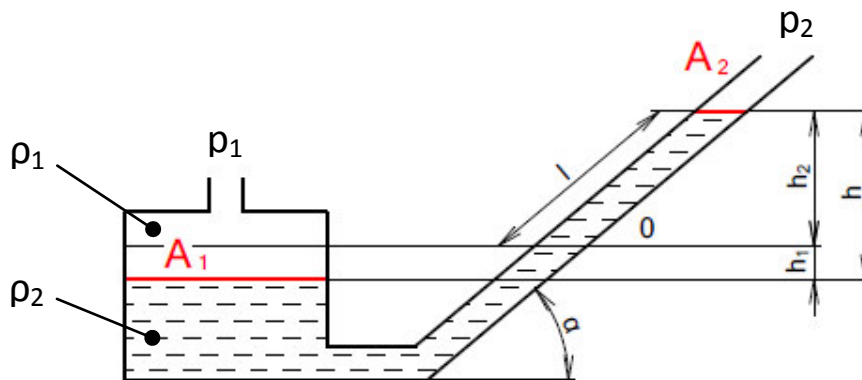
Manometr se sklonnou trubicí je velice podobný nádobkovému tlakoměru jen s tím rozdílem, že trubice je skloněna pod určitým úhlem  $\alpha$  menším jak  $90^\circ$ . Principiálně jsou tyto tlakoměry totožné, opět se zabýváme při měření tlaku změnou výšky hladiny v trubici. Při výpočtu se jen musí zohlednit právě úhel  $\alpha$ .

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot (h_1 + h_2) = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \left( \frac{A_2}{A_1} + \sin \alpha \right) \cdot l$$

$$e = \frac{A_2}{A_1} + \sin \alpha - \text{převodní číslo tlakoměru}$$

$$\rho_1 \ll \rho_2$$

$$\Delta p = \rho_2 \cdot g \cdot l \cdot e \quad (37)$$



Obr. 3.5 Schéma manometru se sklonnou trubicí

Při porovnání výpočtových vztahů pro nádobkový tlakoměr a manometr se sklonnou trubicí vidíme, že se liší pouze v konstantě manometru. Pokud bychom za úhel  $\alpha$  dosadili  $90^\circ$ , bude  $\sin \alpha = 1$  a získáme vztah pro nádobkový tlakoměr.

Přesnost manometru se sklonnou trubicí je takřka stejná jako nádobkového tlakoměru, má menší rozsah (0 – 1500 Pa) a dle sklonu trubice vyšší citlivost. Pokud bude sklon např. 1:4, zvýší se citlivost čtyřikrát oproti nádobkovému tlakoměru.

### 3.3.2 Deformační tlakoměry

Deformační tlakoměry již nepoužívají definičního principu, nelze je tedy použít ke kalibraci, naopak musejí být pravidelně kalibrovány. Jak již z názvu vyplývá, měřítkem tlaku bude míra deformace nějakého tlakoměrného tělesa. Jsou vhodné pro průmyslové měření především díky své robustní konstrukci a v porovnání s etalonovými přístroji i nízké ceně.

### 3.3.2.1 Tlakoměr s Bourdonovou trubicí

Bourdonova trubice je trubice oválného průřezu stočená do spirály, do níž přivádíme tlak. Přivedený tlak trubicí deformuje, má snahu ji narovnávat (jedná-li se o přetlak), a tato deformace je přes mechanický převod rovnou převáděna na stupnici. Trubice se běžně vyrábí z mosazi či bronzu, pro měření vysokých tlaků (až 2000 MPa) z oceli. Jedná se o mechanický přístroj, který pro svou funkci nepotřebuje elektrickou energii, je robustní, odolný a spolehlivý. Na druhou stranu však není oproti moderním elektronickým tlakoměrům příliš přesný (přesnost obvykle kolem 1 %) a obvykle nemá žádný elektrický výstup, který bychom mohli dále zpracovat.

### 3.3.2.2 Vlnovcový tlakoměr

Tento tlakoměr funguje na velice podobném principu jako tlakoměr s Bourdonovou trubicí. Tlakoměrným tělesem však není trubice svinutá do spirály, ale vlnovec. Měřený tlak přivádíme dovnitř vlnovce a ten se vlivem působení tlaku roztahuje či smršťuje. Uvnitř vlnovce může být pružina, kterou je možné změnit jeho tuhost. Velikost deformace vlnovce se převádí opět přes mechanický převod rovnou na stupnici. Rozsahy těchto tlakoměrů jsou do 0,4 MPa, přesnost okolo 2 %. Výhodou je možnost měřit i diferenční tlaky, spolehlivá mechanická konstrukce, opět nemá elektrický výstup.

### 3.3.2.3 Tlakoměr s membránou s piezo – rezistivními prvky

V tomto případě převádíme tlak na průhyb membrány. Míru průhybu membrány měříme pomocí tenzometrů zapojených do můstku. Při výrobě je prostor nad membránou uzavřen a je v něm referenční tlak známé hodnoty. Přivedeme-li pod membránu tlak stejný jako je referenční, nedojde k deformaci membrány a na výstupu naměříme nulu. Bude-li tlak pod membránou větší, membrána se zdeformuje, zdeformují se i tenzometry, změní se jejich elektrický odpor a na výstupu bude nenulový elektrický signál (napětový či proudový). Nespornou výhodou je možnost elektrický signál následně zpracovávat pomocí výpočetní techniky či zakomponovat tento tlakoměr do různých aplikací. V dnešní době se používají nejčastěji.

### 3.3.2.4 Kapacitní snímač tlaku

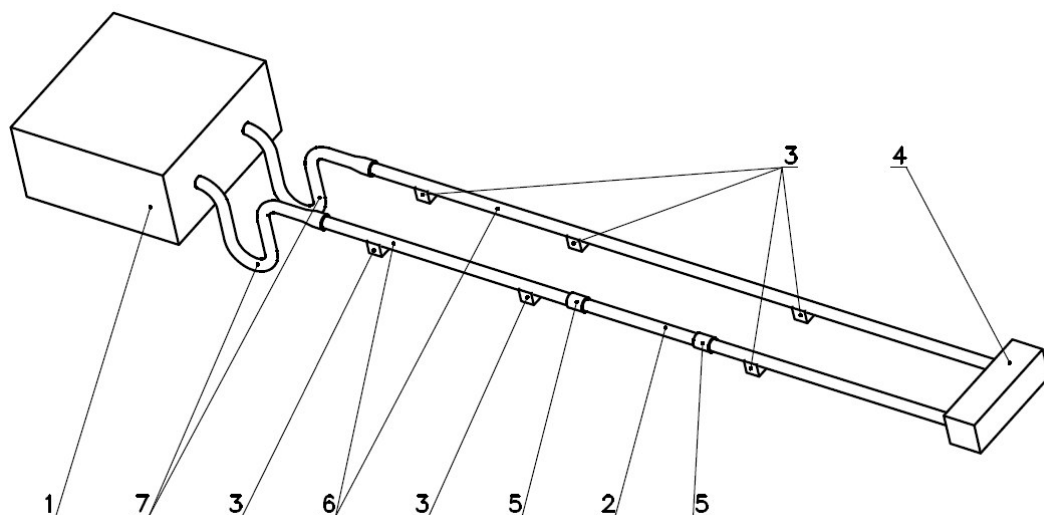
Vlivem přivedeného tlaku dochází, stejně jako v předchozím případě, k průhybu membrány, průhyb membrány pomocí převodového mechanismu způsobuje pohyb elektrod (oddalují se či přibližují), které fungují jako kondenzátory. Kapacita kondenzátoru závisí na dielektriku mezi elektrodami, plochách elektrod a jejich vzdálenosti. Vzdálenost elektrod i dielektrikum jsou stále stejné, ale při pohybu elektrod dochází ke změně jejich plochy a dojde tedy ke změně jejich kapacity. Měřítkem změny tlaku je změna kapacity, která se následně převede na elektrický signál.

## 4 Experiment

Experimentální část mé bakalářské práce nejprve zahrnuje návrh geometrie opakovaného zúžení, tlakové měření a měření rychlostních profilů metodou PIV. Nejprve jsem navrhl geometrii modelu 50 % a 75 % stenózy. Nejobsáhlejší část experimentu představuje tlakové měření. Pro vybrané varianty uspořádání opakovaného zúžení jsem proměřil tlakové ztráty pro různé průtoky a stanovil ztrátové součinitele. Na závěr jsem pro jedno uspořádání experimentu provedl měření rychlostních profilů toku v různých oblastech pomocí optické metody PIV.

### 4.1 Měřicí trať

Veškeré návrhy jsem prováděl pro již sestavenou vodní trať v laboratoři hemodynamiky. Z uspořádání této tratě jsem vycházel při návrhu geometrie zúžení i variant vzdáleností jednotlivých zúžení od sebe. Pro jednotlivá měření jsem trať účelně modifikoval, vyměnitelnou rovnou část nahrazoval různými variantami uspořádání modelů a pro tlaková měření umístil do předem připravených míst tlakové snímače. V případě optického měření byla modifikace poněkud rozsáhlejší. Zahrmovala umístění modelu do vhodně upravené nádoby s vodou, vytvoření konstrukce pro správné a stabilní umístění kamery nad snímanou část modelu a přípravu a správné nastavení laserového zdroje.



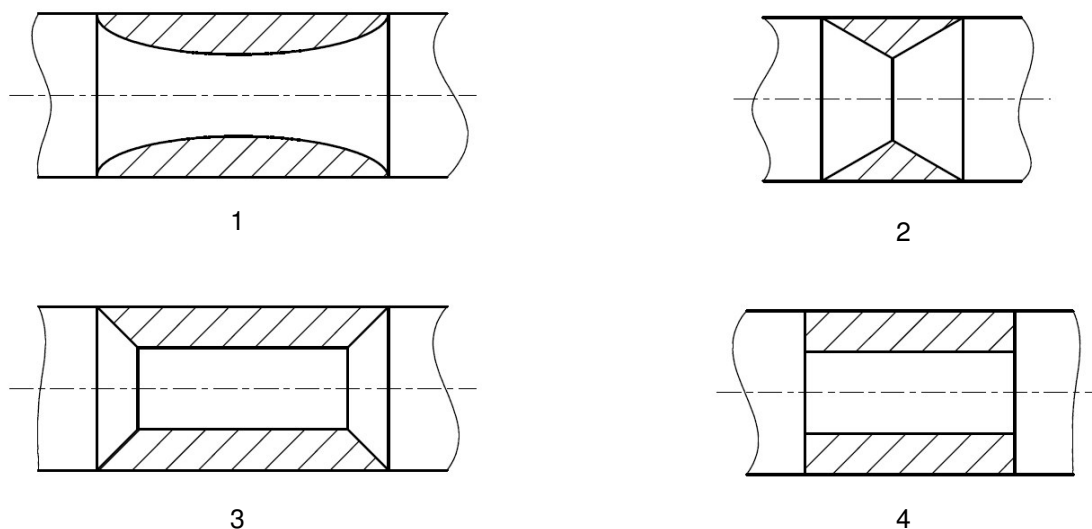
Obr. 4.1 Schéma tratě

- 1 – čerpadlo, 2 – vyměnitelná část tratě, 3 – místa pro připojení tlakových snímačů,  
4 – odvzdušňovací nádoba, 5 – spojka, 6 – trubky tratě, 7 – propojovací hadice

## 4.2 Návrh geometrie modelu

### 4.2.1 Tvar geometrie modelu

Stenóza v lidském těle obecně nemá přesně definovanou geometrii, každý z nás je jiný a nikde zkrátka není dáno, jaká stenóza se kde udělá a jaký bude mít přesný tvar. V mém případě bude model představovat rotačně symetrické zúžení na 50 % a 75 % původního průřezu. V takovém případě by model nejideálněji neměl ostré přechody a zúžení by v řezu mělo půleliptický tvar. Takovýto model by však byl pro mé účely výrobně příliš složitý a rozdíl při měření mezi ním a jinými alternativami by nebyl příliš znatelný.



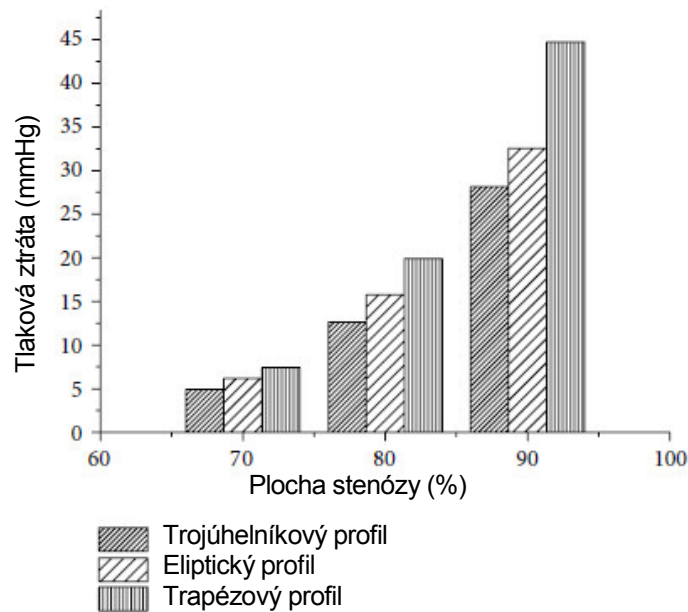
Obr. 4.2 Možné tvary modelů

1 – eliptický model, 2 – trojúhelníkový model, 3 – trapézový model, 4 – clonka

Výrobně nejjednodušší variantou by byla jednoduchá clonka se skokovým zúžením průřezu, takováto varianta by ale byla pravděpodobně tou nejméně autentickou a svým tvarem má ke skutečné stenóze nejdále. Další alternativou byl model s pozvolným zúžením a následujícím pozvolným rozšířením bez zúžené rovné části. Tato geometrie měla v numerické simulaci uvedené v článku S. Kamangara z roku 2014 tlakovou ztrátu menší než v případě eliptického modelu, ale stále se mu velice blížila [4]. Třetí alternativa představovala kompromis mezi předchozími dvěma variantami, jedná se v podstatě o clonku s vnitřním sražením, tedy s pozvolným zúžením, rovnou zúženou částí a pozvolným rozšířením. Tato



geometrie měla v již zmíněné numerické simulaci tlakovou ztrátu mírně větší než eliptický model, ale v případě stenózy s maximálním zúžením 75 % jsou získané hodnoty stále velice blízké [4]. Nakonec jsem se rozhodl pro poslední variantu, ta výrobně nepředstavuje zásadní problém, nebude problematické vytvořit v případě potřeby i více stenóz stejné geometrie jen s malými rozměrovými odchylkami a její tlaková ztráta bude blízká zúžení s půleliptickým profilem.



Obr. 4.3 Závislost tlakové ztráty na velikosti zúžení převzato a upraveno [4]

#### 4.2.2 Rozměry modelu

Model bude umístěn v trubce o vnitřním průměru 14 mm. Zúžení bude představovat v jednom případě 50 %, v druhém případě 75 % z původní plochy.

Celkový průřez trubky:

$$A_C = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 49 \cdot \pi \cong 153,9 \text{ mm}^2 \quad (38)$$

Zúžení na 50 % původního průřezu:

$$A_{50} = \frac{A_C}{2} = \frac{49}{2} \cdot \pi \cong 76,97 \text{ mm}^2 \quad (39)$$

$$d_{50} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{50}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{49}{2} \cdot \pi}{\pi}} = 7 \cdot \sqrt{2} \cong 9,9 \text{ mm} \quad (40)$$

Z 50 % zúžení průřezu vyplývá vnitřní průměr stenózy 9,9 mm, což je poněkud nestandardní hodnota a výrobně by mohla představovat problém, proto volím vnitřní průměr této stenózy  $D_{50} = 10 \text{ mm}$ .

$$A_{50}^* = \frac{\pi \cdot d_{50}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 25 \cdot \pi \cong 78,54 \text{ mm}^2 \quad (41)$$

$$\frac{A_{50}^*}{A_C} \cdot 100 = \frac{25 \cdot \pi}{49 \cdot \pi} \cdot 100 = 51 \% \rightarrow \text{zúžení } 49 \% \quad (42)$$

Při změně vnitřního průměru na 10 mm se změní i procentuelní zúžení průvodního průřezu z 50 % na 49 %, vzhledem k přehlednosti 1 % rozdíl zanedbám a nadále budu tuto stenózu považovat za 50 %.

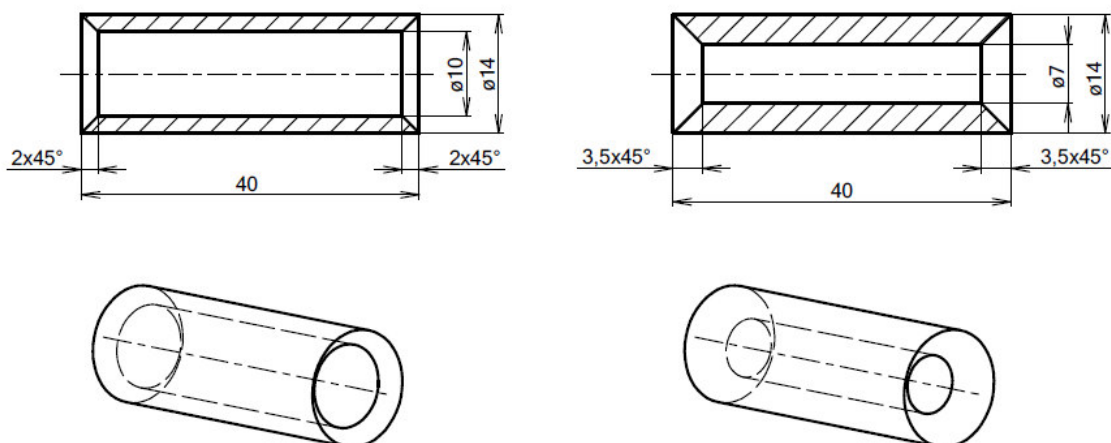
Zúžení na 75 % původního průřezu:

$$A_{75} = \frac{A_C}{4} = \frac{49}{4} \cdot \pi \cong 38,48 \text{ mm}^2 \quad (43)$$

$$d_{75} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{75}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{49}{4} \cdot \pi}{\pi}} = 7 \text{ mm} \quad (44)$$

V případě 75 % zúžení vychází vnitřní průměr 7 mm.

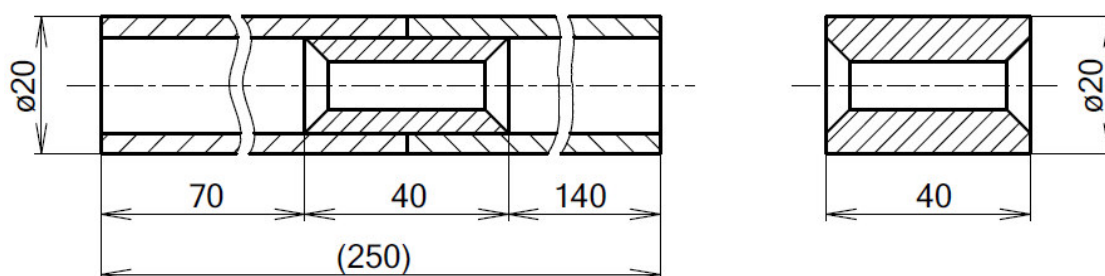
Vzhledem k rozměrům snadno vyměnitelného dílu měřící tratě a předpokládanému umístění modelů volím délku obou modelů 40 mm a vzhledem k výrobní jednoduchosti vnitřní sražení 45°.



Obr. 4.4 Výsledná geometrie stenóz (vlevo 50 %, vpravo 75 %)

### 4.2.3 Zakomponování modelu do tratě

Vodní trať obsahuje 500 mm dlouhý, snadno vyměnitelný díl. Právě do této části tratě budu zakomponovávat své modely. Samotnou geometrii modelu stenózy již mám vyřešenou, nyní však nastává otázka, jakým způsobem modely dostat do samotné tratě. Po různých úvahách a konzultacích jsem dospěl k závěru, že nejjednodušším řešením bude vyrobený model vlepít do trubky pevně daných rozměrů do předem definovaného místa. Tímto způsobem je umístěn jeden model 50 % a jeden model 75 % stenózy, toto řešení se pro plánovaný experiment ukázalo jako vhodné, až v závěru měření byl nevyhnutelný mechanický zásah. Druhý model 75 % stenózy byl vyhotoven tak, aby jej bylo možné rovnou zařadit do vodní tratě mezi vymezovací trubky.

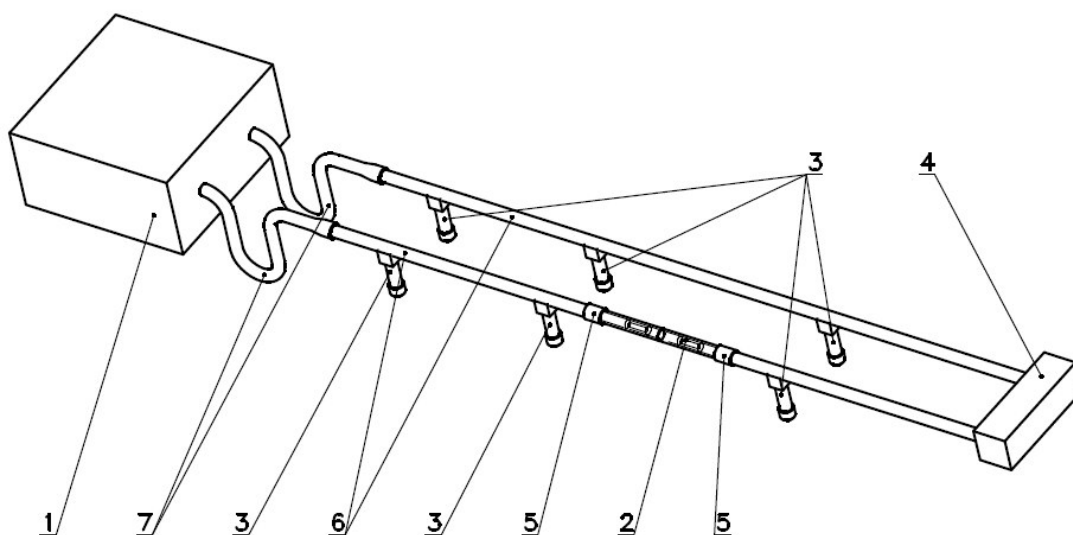


Obr. 4.5 Umístění modelu (vlevo model vlepěný mezi trubkami, vpravo volný model)

Kratší úsek 70 mm před modelem představuje pětinašobek vnitřního průměru trubky a delší úsek 140 mm desetinásobek vnitřního průměru trubky.

### 4.3 Tlaková měření

Tlakové měření jsem prováděl za účelem zjištění tlakové ztráty modelů stenóz v různých variantách vzdáleností od sebe a vyhodnocení ztrátového součinitele  $\xi$ . Před započítím samotného měření ještě bylo nutné kalibrovat tlakové snímače a zjistit charakteristiku čerpadla. Následné tlakové měření se skládalo ze tří částí, nejprve jsem měřil tlakové ztráty a vyhodnocoval ztrátové součinitele samotných stenóz, následně kombinace 50 % a 75 % stenózy ve čtyřech uspořádáních a na závěr kombinace dvou 75 % stenóz ve větším množství variant vzájemných vzdáleností.



Obr. 4.6 Schéma trati pro tlaková měření

- 1 – čerpadlo, 2 – část s modely stenóz, 3 – tlakové snímače, 4 – odvzdušňovací nádoba,  
5 – spojka, 6 – trubky trati, 7 – propojovací hadice

#### 4.3.1 Kalibrace tlakových snímačů

Měření tlaků jsem prováděl pomocí snímačů s membránou s pizo – rezistivními prvky, jejichž princip je popsán v kapitole 3.3.2.3. Výstupem z použitých tlakových snímačů není přímo tlak, ale určitý napěťový signál. Jeho nespornou výhodou je možnost dalšího zpracování pomocí výpočetní techniky, avšak bez kalibrace zkrátka informaci o tlaku nedostaneme.

Osobně jsem kalibraci snímačů neprováděl, ale zmíním alespoň její princip. Základ tvořila dlouhá trubice se stupnicí, v jejíž spodní části byl umístěn tlakový snímač. Do

trubice se postupně lila voda a na základě znalosti výšky vodního sloupce bylo možné snadno stanovit hydrostatický tlak dle vztahu:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (45)$$

Snímač zaznamenal určitý napěťový signál, ke kterému se přiřadil daný tlak. Tento postup se opakoval pro několik hodnot tlaků a pro každý snímač zvlášť. Z výsledků se sestavily charakteristiky snímačů, ze kterých bylo možné zjistit potřebné koeficienty. Těmito koeficienty již stačí vynásobit napěťový signál a získáme žádaný signál tlakový.

### 4.3.2 Charakteristika čerpadla

Pro provoz vodní tratě jsem použil čerpadlo řízené počítačem. Přes USB rozhraní je možné u tohoto čerpadla nastavovat průtok, vstupní hodnotou je však opět napěťový signál. Naštěstí výrobce poskytuje k čerpadlu i jeho charakteristiku, takže nebyla bezpodmínečně nutná kalibrace. Charakteristika čerpadla je lineární a při vstupním napěťovém signálu  $U = 4 \text{ V}$  je průtok čerpadla  $\dot{V} = 90 \text{ ml/s}$ . Z těchto hodnot lze snadno určit koeficient čerpadla  $k_c$ , kterým když vynásobíme vstupní napěťový signál, získáme průtok.

$$k_c = \frac{\dot{V}}{U} = \frac{90}{4} = 22,5 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \quad (46)$$

Tab. 4.1 Přehled měřených režimů

U (V)	$\dot{V}$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	c ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Re (1)
0,4	9	0,058	806
0,8	18	0,117	1611
1,2	27	0,175	2417
1,6	36	0,234	3222
2	45	0,292	4028
2,4	54	0,351	4834
2,8	63	0,409	5639
3,2	72	0,468	6445
3,6	81	0,526	7251
4	90	0,585	8056

### 4.3.3 Měření třecích ztrát

Jako první tlakové měření jsem prováděl měření tlakových ztrát způsobených třecí ztrátou. Jednalo se o měření na trati bez dalších vřazených odporů za účelem zjištění třecích ztrát a jejich srovnání s teoretickými hodnotami vycházejících ze vztahu (27). Při tomto měření jsem se potýkal s mnoha problémy. Nejprve byl problém na straně napájení tlakových snímačů, po několika hodinách hledání problému jsem zjistil závadu na jednom z přívodních kabelů. Samotné měření také neprobíhalo ideálně. Jelikož jsem měřil velice malé tlakové rozdíly, docházelo ke značnému ovlivnění měření vnějšími vlivy a také jsem se dostával až za hranici přesnosti tlakových snímačů. Výsledky se poněkud značně odchylovaly od vypočtených hodnot, proto jsem usoudil, že při zohledňování třecí ztráty v dalších experimentech budu vycházet ze vztahu (27).

### 4.3.4 Měření samotných stenóz

Abych zjistil, jak se zúžení ovlivňují, musím nejprve zjistit, jak se chovají nezávisle na sobě. Vyměnitelnou rovnou část měřicí tratě jsem nahrazoval trubicí s modelem stenózy a následně měřil jednotlivě tlakové ztráty jedné 50 % stenózy a dvou 75 % stenóz. Měření jsem prováděl pro osm režimů průtoků od 9 do 72 ml/s.

### 4.3.5 Měření kombinace 50 % a 75 % stenózy

Druhá, již obsáhlejší část tlakového měření se týkala měření kombinace 50 % a 75 % stenózy ve čtyřech uspořádáních. K dispozici jsem měl dvě trubky daných rozměrů, v každé z nich byl pevně zalepen jeden model stenózy v přesně definovaném místě. Měření jsem prováděl pro dvě vzájemné vzdálenosti modelů stenóz, 140 a 280 mm, což odpovídá desetinásobku a dvacetinásobku vnitřního průměru trubky vodní tratě. V těchto vzdálenostech jsem nejprve proměřil modely v uspořádání, kdy byla první 75 % stenóza a druhá 50 % a následně jsem to samé měření opakoval pro opačné pořadí modelů.

První měření jsem prováděl opět pro osm režimů, od 9 do 72 ml/s, po zjištění dílčích výsledků a po konzultaci jsem se rozhodl následující měření provádět pro deset režimů průtoků od 9 do 90 ml/s.

Výsledky této kombinace však nebyly příliš přesvědčivé, ukazovaly, že výsledná tlaková ztráta a ztrátový součinitel jsou téměř rovny součtu tlakových ztrát a ztrátových součinitelů jednotlivých stenóz, což naznačovalo téměř žádné vzájemné ovlivnění. Neprůkaznost výsledků jsem přisuzoval velmi malé tlakové ztrátě 50 % stenózy, jejíž hodnoty byly mnohem menší než u 75 % stenózy a v daných podmínkách tak nedošlo k významnému a věrohodně zaznamenanému ovlivnění.

#### 4.3.6 Měření kombinace dvou 75 % stenóz

Z výsledků předchozího měření jsem usoudil, že bude rozumnější zjišťovat ovlivnění dvou 75 % stenóz, jejichž tlaková ztráta a ztrátový součinitel jsou v porovnání s 50 % stenózou mnohem vyšší a tudíž jejich vzájemné ovlivnění bude výraznější. Měření jsem prováděl pro osm variant vzájemných vzdáleností, nejprve od 70 mm až po 350 mm s krokem 70 mm a následně pro velmi malé vzdálenosti 14, 28 a 42 mm. Měření jsem prováděl opět pro osm režimů průtoků od 9 do 72 ml/s.

Tuto kombinaci jsem realizoval pomocí modelu 75 % stenózy pevně zalepeného v trubce z předchozího měření a druhého samostatného modelu. Potřebné vzdálenosti jsem sestavoval pomocí vymežovacích trubek a gumových spojek.

Z dílčích výsledků první série měření (vzdálenosti stenóz 70 – 350 mm) jsem však usoudil, že by bylo vhodné ještě proměřit modely v menších vzdálenostech, což vyžadovalo mechanický zásah do trubky s vlepeným modelem. Provedla se tedy úprava kratší části trubky a vzdálenosti mezi modely jsem nastavoval pomocí drobných vymežovacích trubiček, spíše vymežovacích prstenů.

#### 4.3.7 Vyhodnocení tlakové ztráty a součinitele místní ztráty

Všechna tlaková měření probíhala takřka stejně. Před započítáním každého měření jsem vždy prováděl nulový odečet tlaků na zaplavené trati za klidu. Po nulovém odečtu následovalo samotné měření tlaků pro různé režimy proudění. Změřil jsem tlaky před stenózou a za ní. Od takto naměřených hodnot jsem pro zjištění skutečných tlaků odečetl hodnoty z nulového odečtu. Ze zjištěných tlaků jsem stanovil tlakovou ztrátu  $\Delta p_z$  jako rozdíl tlaků před a za stenózou. Abych zjistil tlakové

ztráty způsobené místní ztrátou na stenózách, odečetl jsem ještě od členu  $\Delta p_z$  třecí ztrátu potrubí stanovenou ze vztahu (27). Potřebnou hodnotu součinitele třecích ztrát jsem vypočetl v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla ze vztahů (28) nebo (29).

$$\Delta p_{z\xi} = \Delta p_z - \Delta p_\lambda \quad (47)$$

Po zjištění tlakových ztrát jsem mohl vyhodnotit součinitele místních ztrát stenóz v různém uspořádání. Stanovené hodnoty tlakových rozdílů na stenózách v závislosti na rychlosti jsem proložil křivkou charakterizovanou rovnicí:

$$y(x) = a \cdot x^2 \quad (48)$$

Kde člen  $y(x)$  představuje tlakovou ztrátu  $\Delta p_{z\xi}$  (Pa), člen  $x$  rychlost  $c$  (m/s) a člen  $a$  je koeficient vycházející z interpolace.

$$y(x) = \Delta p_z \text{ (Pa)} \quad (49)$$

$$x = c \text{ (m/s)} \quad (50)$$

Nyní mohu dosadit členy (49) a (50) do rovnice (48) a získám vztah pro tlakovou ztrátu z interpolovaných hodnot:

$$\Delta p_{z\xi} = a \cdot c^2 \quad (51)$$

Při výpočtu místní tlakové ztráty budu vycházet z rovnice (26) jejíž úpravou získám vztah:

$$\Delta p_{z\xi} = \rho \cdot \xi \cdot \frac{c^2}{2} \quad (52)$$

Členy (51) a (52) jsou si vzájemně rovny.

$$\Delta p_{z\xi} = a \cdot c^2 = \rho \cdot \xi \cdot \frac{c^2}{2} \quad (53)$$



Z rovnice (53) lze již snadnou matematickou úpravou vyjádřit součinitel místní ztráty  $\xi$ .

$$\xi = \frac{2 \cdot a \cdot c^2}{\rho \cdot c^2} = \frac{2 \cdot a}{\rho} \quad (54)$$

#### 4.4 Měření rychlostního pole metodou PIV

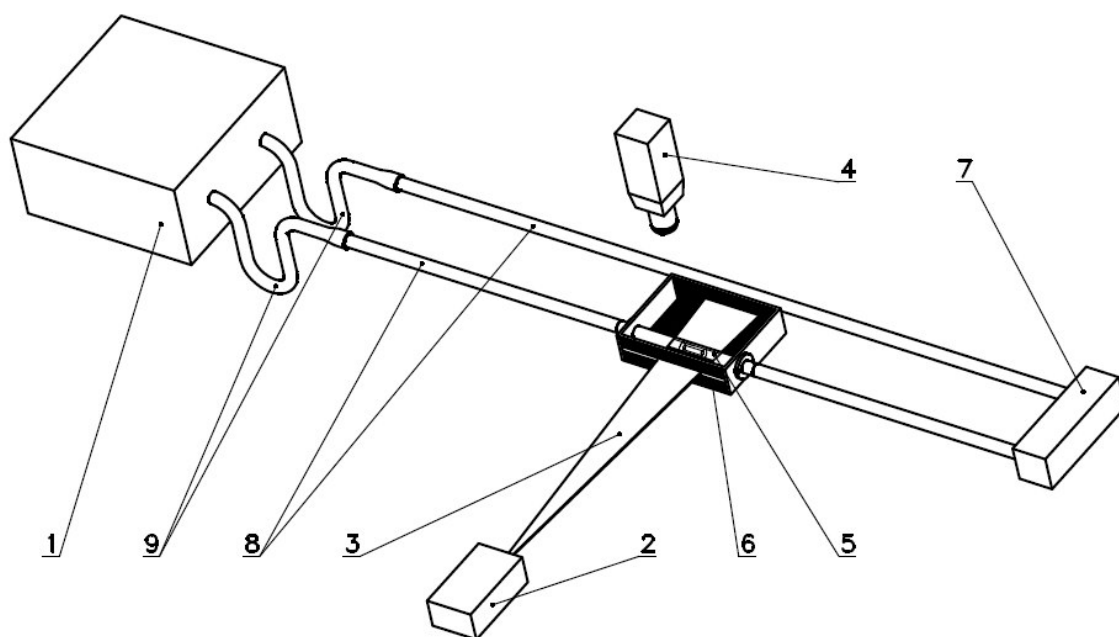
Metoda PIV (particle image velocimetry) je optická metoda, používající se pro měření a vizualizaci rychlostního pole pohybující se tekutiny. Název napovídá, že se jedná o měření rychlosti obrazu částic rozptýlených v měřeném médiu.

Experiment se sestává z měřeného modelu, laserové diody, vysokorychlostní kamery a vyhodnocovacího softwaru. Proud tekutiny s přidanými drobnými částicemi, které mají poměrně přísně danou geometrii a velikost, ve zkoumaném místě prosvěcujeme tenkým laserovým břítem, tedy paprskem laseru rozptýleným do roviny. Tímto způsobem si z měřeného místa vytkneme řez, ve kterém zkoumáme rychlostní pole. Částice rozptýlené v tekutině odrážejí světlo, které se snímá pomocí vysokorychlostní kamery. V mém experimentu je měřená část modelu v nádobce s vodou, za účelem minimalizace nežádoucích jevů při průchodu světla mezi dvěma prostředími s rozdílnými optickými vlastnostmi. Opticky má voda k trubce z plexiskla mnohem blíže než vzduch a lze takto poměrně jednoduše minimalizovat nežádoucí lomy a odlesky na rozhraní těchto prostředí.

Ve 2D PIV metodě se používá jedna vysokorychlostní kamera, jejíž optická osa leží kolmo na rovinu řezu, tak je možné zjišťovat 2 složky rychlostí. Ve složitějších případech, kdy chceme zjistit všechny 3 složky rychlostí, se používá kamer více. Ve stereo PIV metodě jsou to 2 kamery snímající jednu rovinu pod předem definovanými úhly, ve 3D PIV se používají až 4 kamery s přesně daným rozmístěním snímající silný list světla (nejen rovinu). Kamerou nasnímáme danou frekvencí určitý počet snímků, které dále vyhodnocujeme pomocí PC softwaru.

Software striktně vzato nezjišťuje pohyb jednotlivých částic, neoznačí si jednotlivé částice a nezjišťuje jejich posunutí. Sejmутý obraz v určité chvíli pro něj představuje jen matematickou funkci jasů, kdy každému pixelu na obrázku přiřadí určitou hodnotu jasů. Následně již pracuje jen s maticí čísel, která představují právě

množství jasů jednotlivých pixelů. Tento postup opakuje pro předem zadané množství snímků a následně porovnává jen matematické funkce. Snímek rozdělí na několik předem definovaných oblastí a hledá nejpravděpodobnější posunutí funkce v jednotlivých oblastech, z čehož následně vyhodnotí rychlostní pole. Výsledkem je snímek s množstvím šipek, které představují velikost a směr rychlosti proudění, kdy každá šipka náleží jedné oblasti.



Obr. 4.7 Schéma tratě PIV

- 1 – čerpadlo, 2 – zdroj laseru, 3 – laserový břit, 4 – vysokorychlostní kamera,  
5 – vyměnitelná část tratě s modelem stenózy, 6 – nádoba s vodou, 7 – odvzdušňovací nádoba,  
8 – trubky tratě, 9 – propojovací hadice

## 5 Výsledky

V následující kapitole uvedu nejprve výsledky tlakových měření, které zahrnují výsledné součinitele místní ztráty a grafické závislosti pro různé režimy proudění při různých variantách uspořádání stenóz. V druhé části uvedu výsledky z měření metodou PIV, tedy rychlostní pole a rychlostní profily za 75 % stenózou.

### 5.1 Tlaková měření

#### 5.1.1 Shrnutí

V následující tabulce jsou shrnuty stanovené součinitele místní ztráty pro různé varianty uspořádání stenóz.

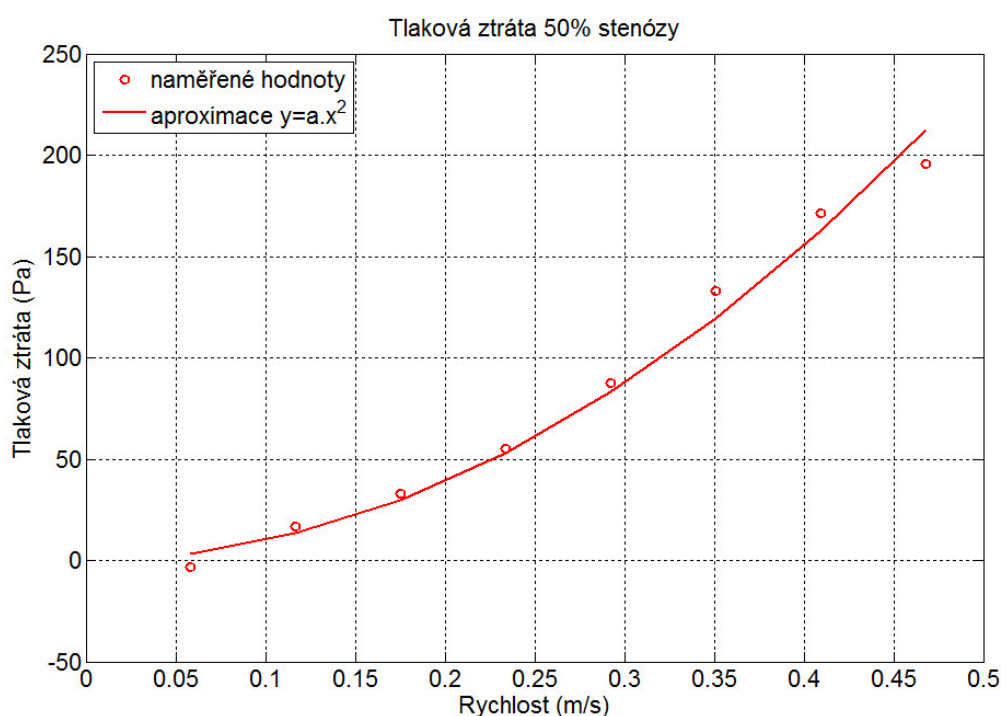
Tab. 5.1 Shrnutí výsledků tlakových měření

Uspořádání stenóz	Vzdálenost $l$ (mm)	Součinitel místní ztráty $\xi$ (1)
50 %		1,95
75 % varianta „1“		15,49
75 % varianta „2“		14,83
50 % a 75 %	140	16,38
	280	16,30
75 % a 50 %	140	16,83
	280	16,27
dvě 75 %	14	23,18
	28	27,23
	42	28,95
	70	29,68
	140	29,47
	210	29,38
	280	29,71
	350	29,45

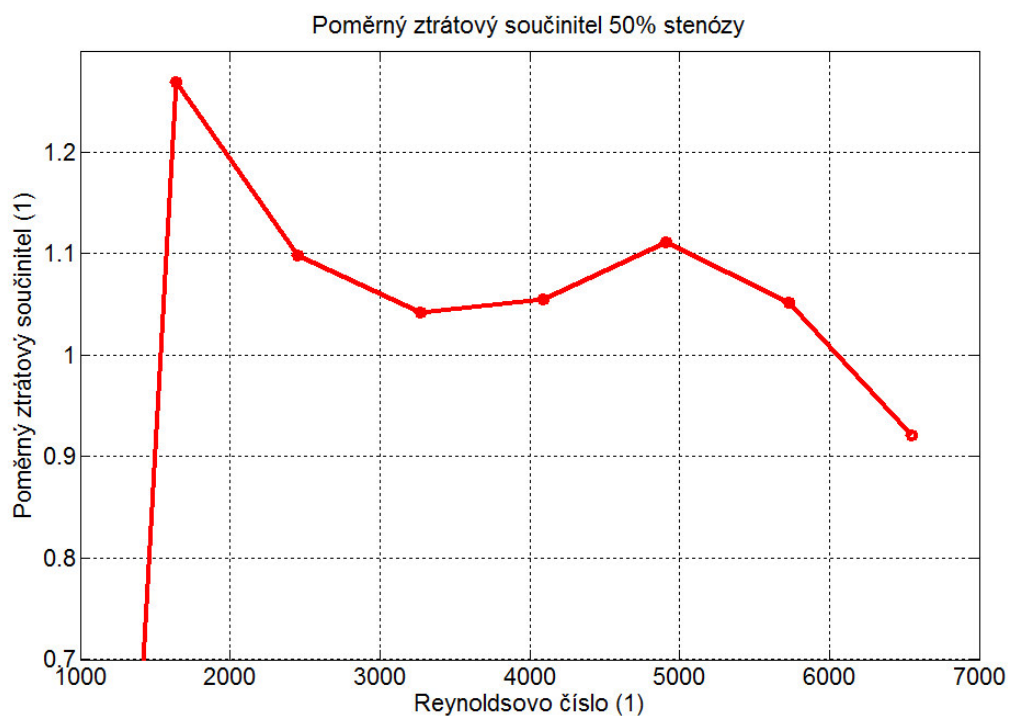
### 5.1.2 Měření samotných stenóz

První série grafů (obr. 5.1, 5.3, 5.5) ukazuje závislost tlakové ztráty na rychlosti pro samotné stenózy. Naměřené hodnoty jsou proloženy křivkou charakterizovanou rovnicí  $y(x) = a \cdot x^2$ .

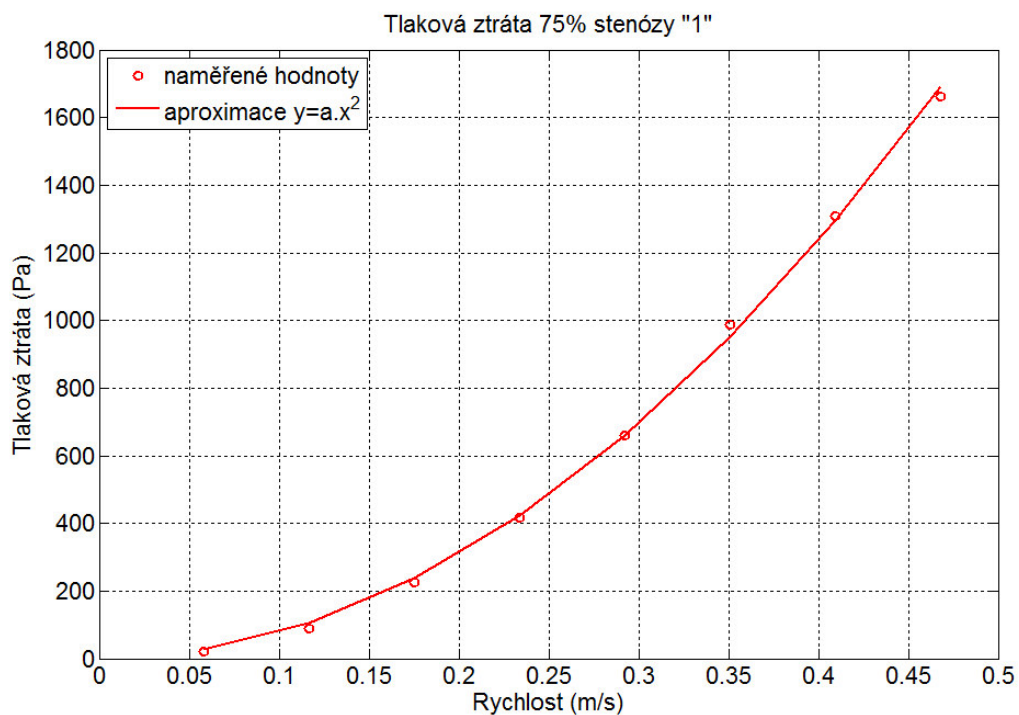
Druhá série grafů (obr. 5.2, 5.4, 5.6) ukazuje závislost poměrného ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle. Poměrný ztrátový součinitel je dán podílem výsledného součinitele a součinitele vyhodnoceného pro daný režim proudění. Grafy tedy ukazují, jak moc se naměřené hodnoty odchyľují od ideálních.



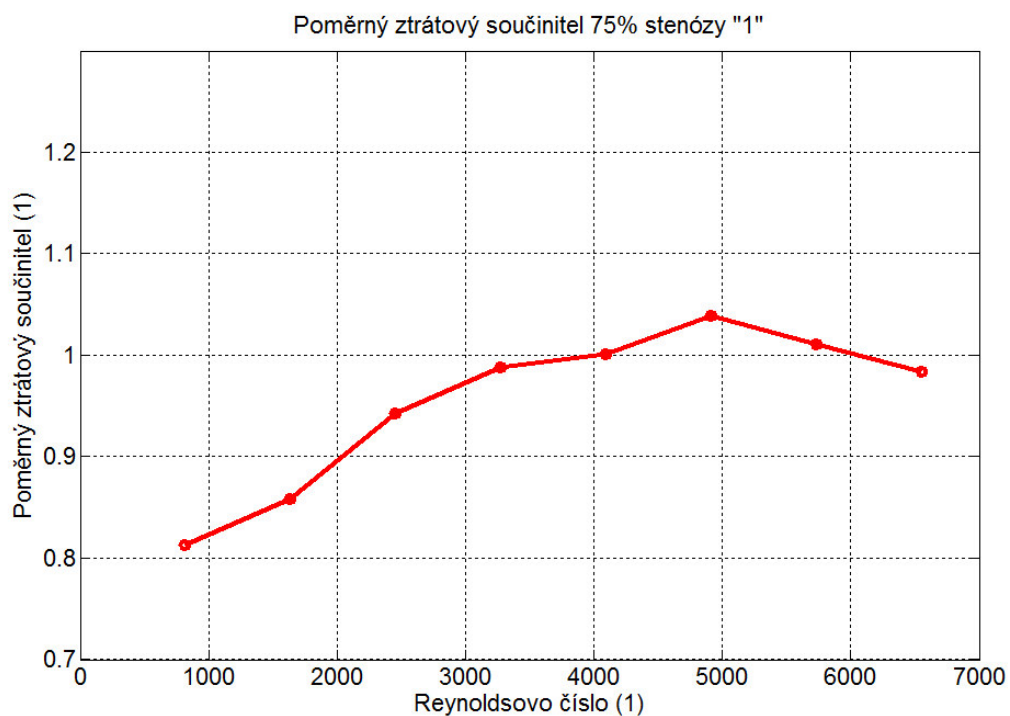
Obr. 5.1 Závislost tlakové ztráty na rychlosti 50 % stenózy



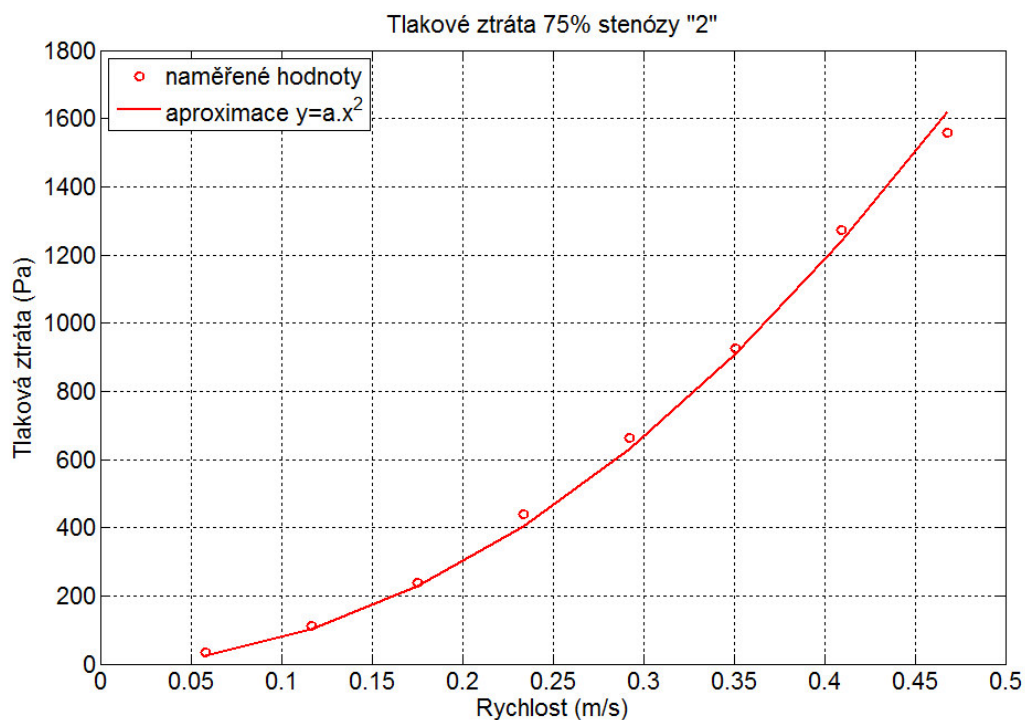
Obr. 5.2 Závislost poměrného ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle 50 % stenózy



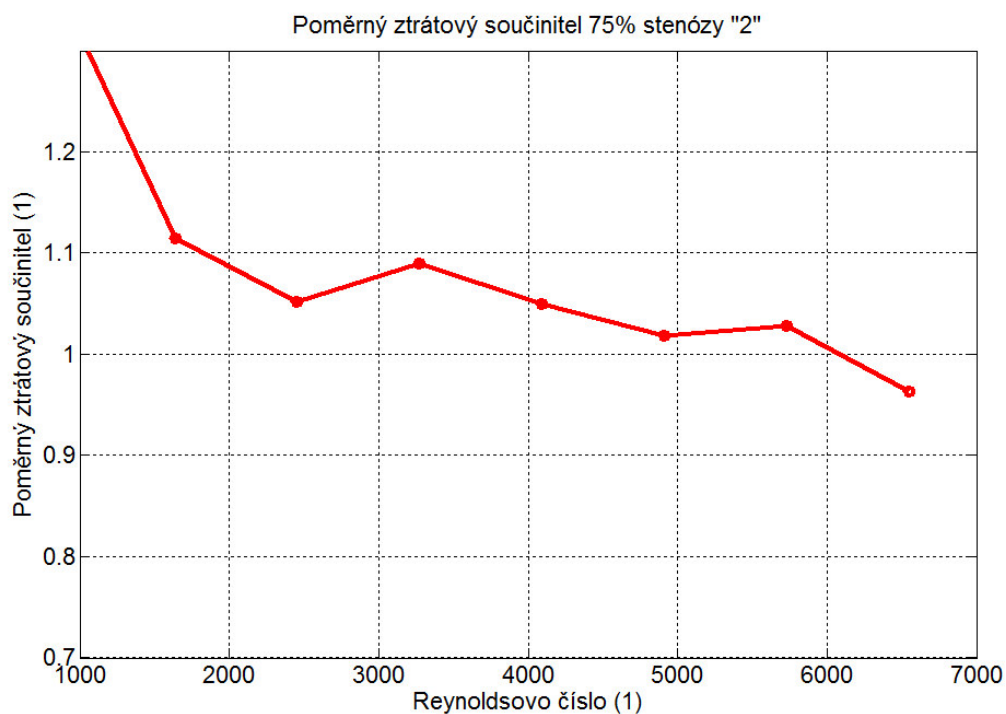
Obr. 5.3 Závislost tlakové ztráty na rychlosti 75 % stenózy „1“



Obr. 5.4 Závislost poměrného ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle 75 % stenózy „1“



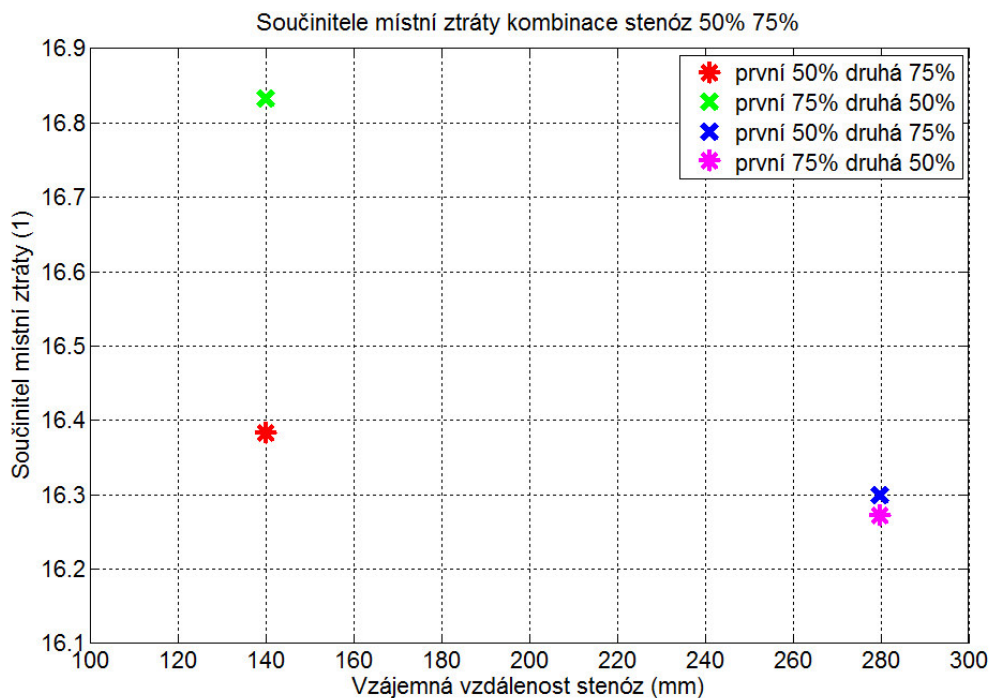
Obr. 5.5 Závislost tlakové ztráty na rychlosti 75 % stenózy „2“



Obr. 5.6 Závislost poměrného ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle 75 % stenózy „2“

### 5.1.3 Měření kombinace 50 % a 75 % stenózy

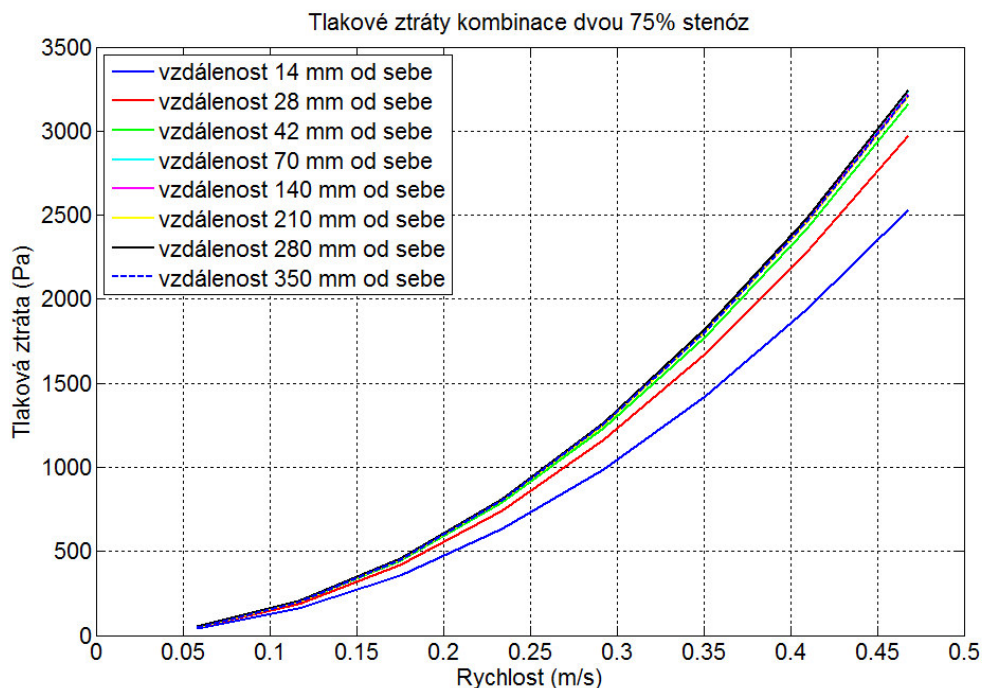
Graf zobrazuje závislost součinitele místní ztráty na vzájemné vzdálenosti stenóz pro kombinaci 50 % a 75 % stenózy ve dvou variantách uspořádání.



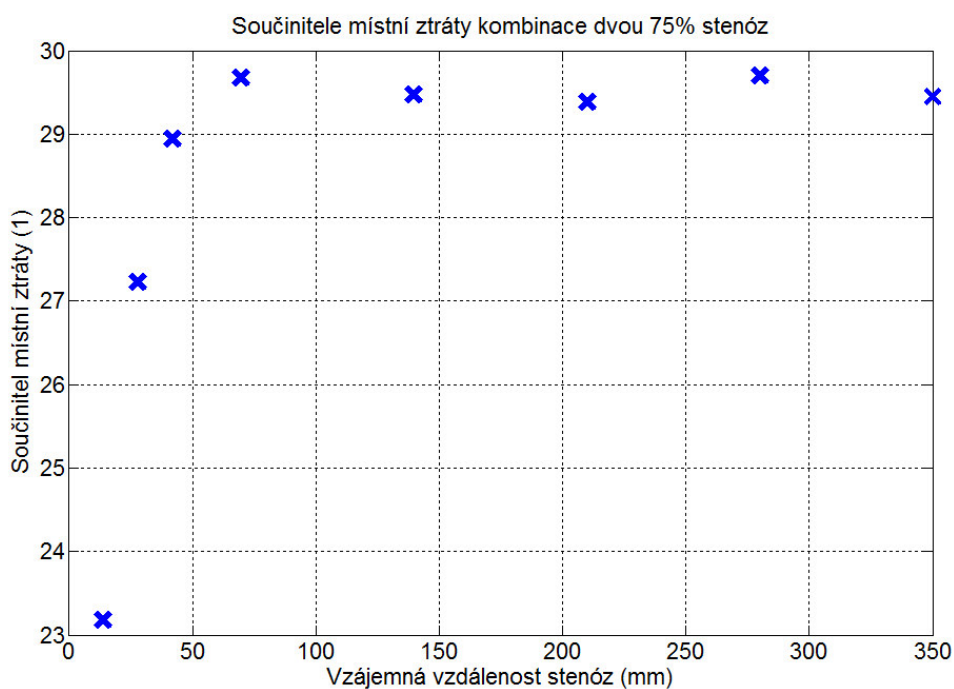
Obr. 5.7 Závislost součinitele místní ztráty na vzájemné vzdálenosti 50 % a 75 % stenózy

### 5.1.4 Měření kombinace dvou 75 % stenóz

První graf ukazuje závislost tlakové ztráty na rychlosti pro osm různých variant vzájemných vzdáleností dvou 75 % stenóz. Na druhém grafu je zobrazena závislost ztrátového součinitele dvou 75 % stenóz na jejich vzájemné vzdálenosti.



Obr. 5.8 Závislost tlakové ztráty na rychlosti pro různá uspořádání dvou 75 % stenóz



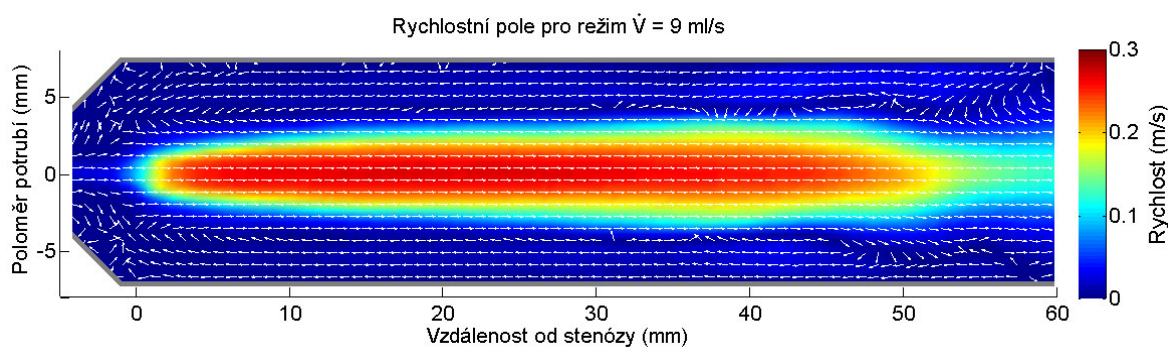
Obr. 5.9 Závislost součinitele místní ztráty na vzájemné vzdálenosti dvou 75 % stenóz



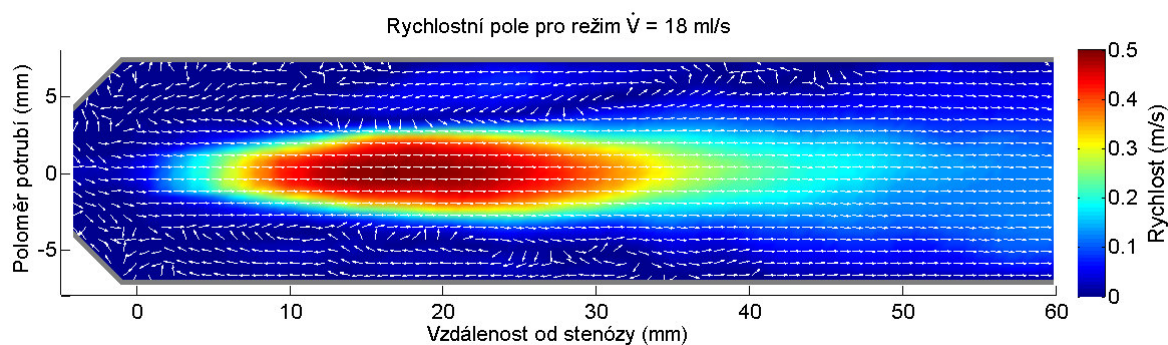
## 5.2 Měření metodou PIV

### 5.2.1 Rychlostní pole

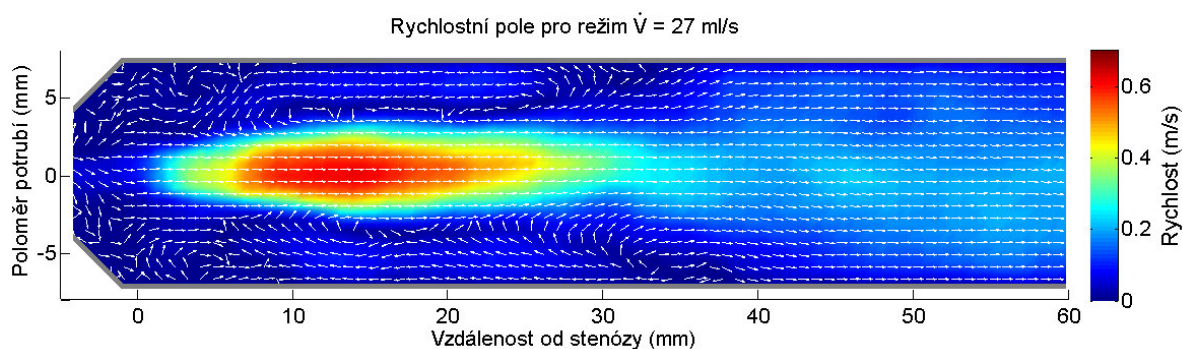
Grafy rychlostních polí zobrazují rozložení rychlostí v nezúžené trubce za 75 % stenózou do vzdálenosti 60 mm od hranice stenózy pro čtyři režimy proudění. Směr rychlosti ukazuje šipka a absolutní velikost rychlosti je dána barvou.



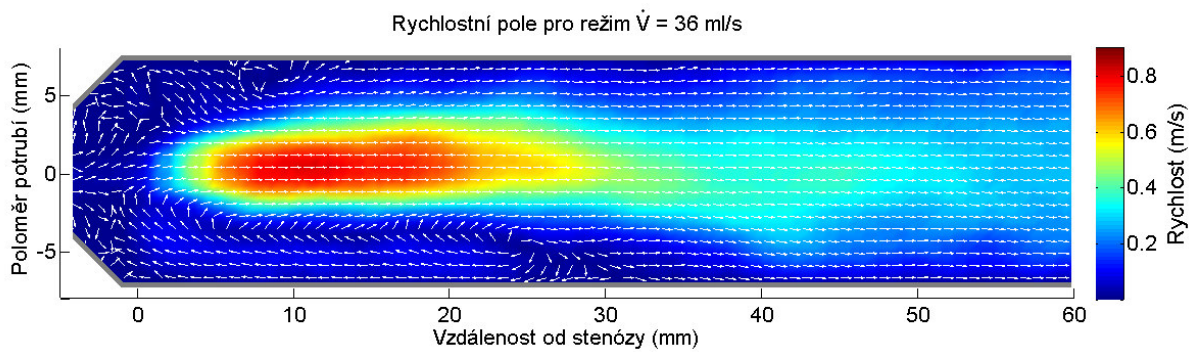
Obr. 5.10 Rychlostní pole pro režim  $\dot{V}=9 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 5.11 Rychlostní pole pro režim  $\dot{V}=18 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$

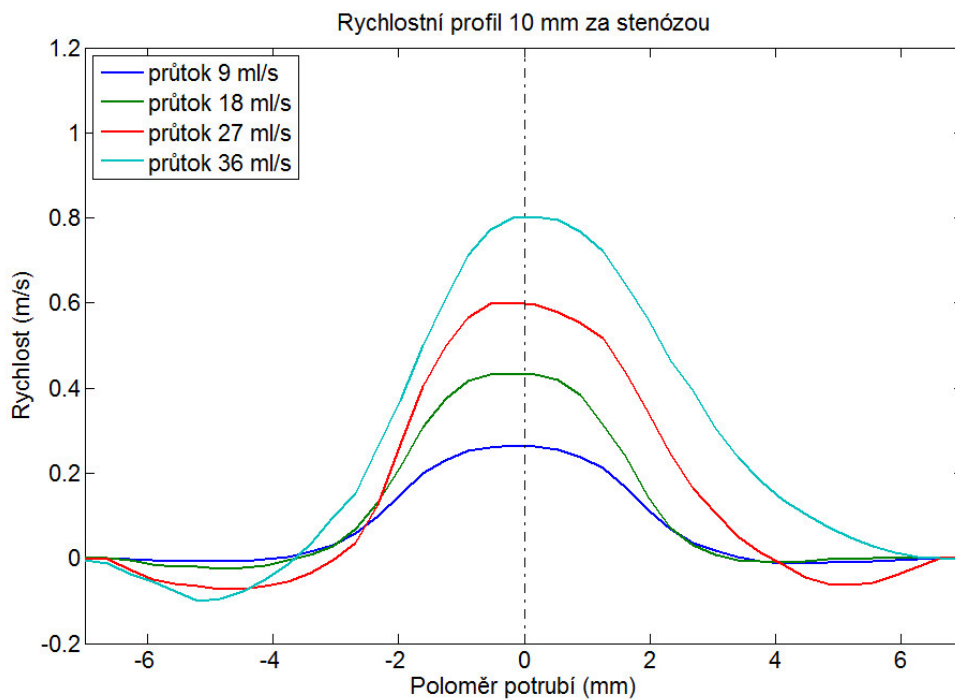


Obr. 5.12 Rychlostní pole pro režim  $\dot{V}=27 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$

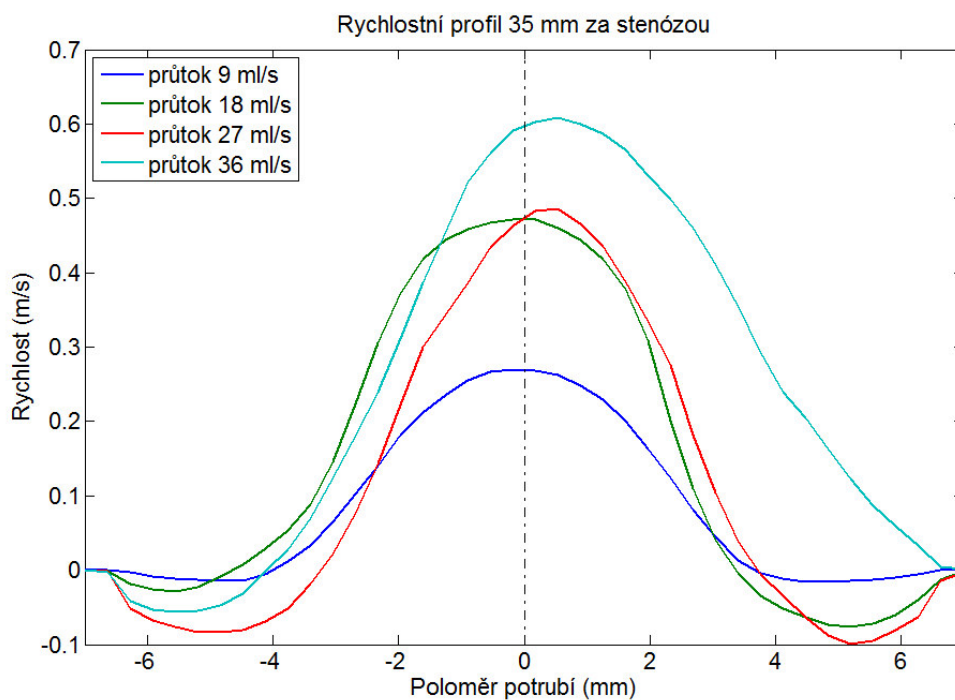
Obr. 5.13 Rychlostní pole pro režim  $\dot{V} = 36 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ 

### 5.2.2 Rychlostní profily

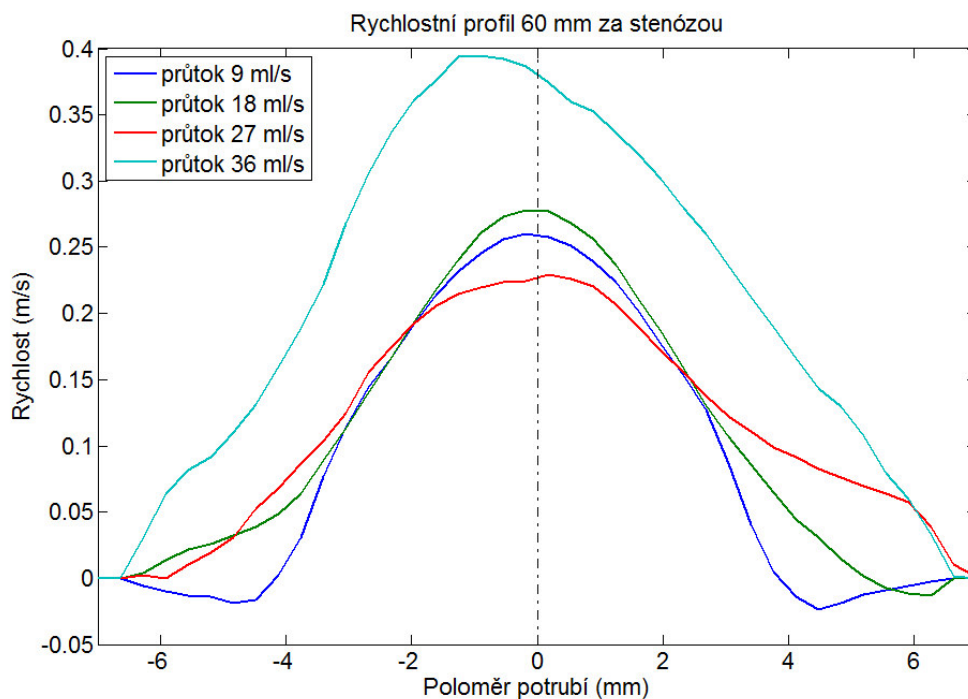
Grafy rychlostních profilů ukazují rozložení rychlosti v nezúžené trubce za 75 % stenózou v závislosti na poloměru trubky v různých řezech potrubí pro čtyři režimy proudění.



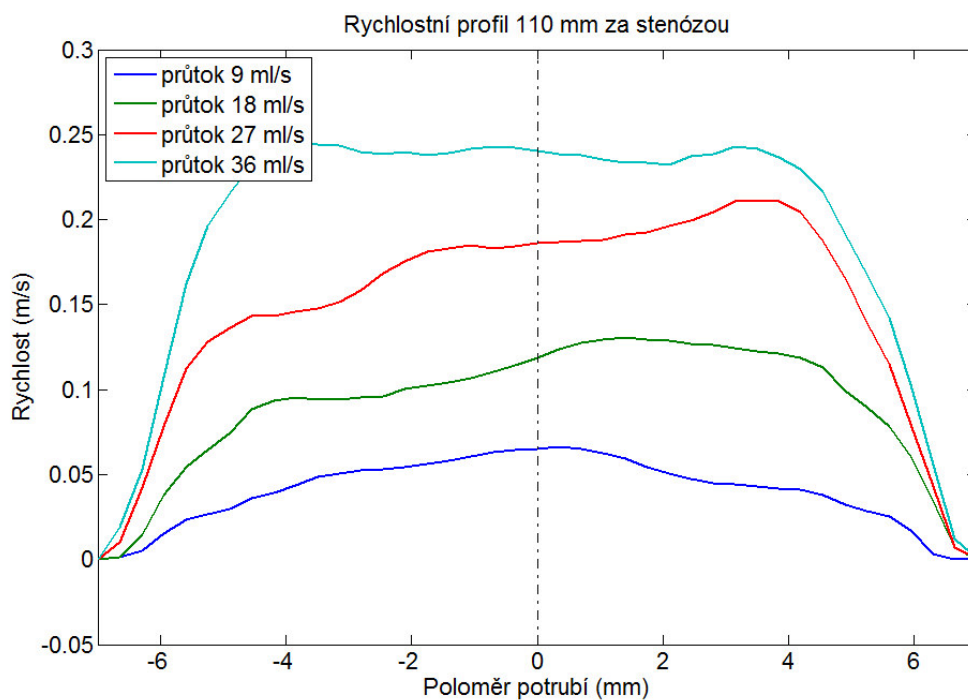
Obr. 5.14 Rychlostní profil 10 mm za stenózou



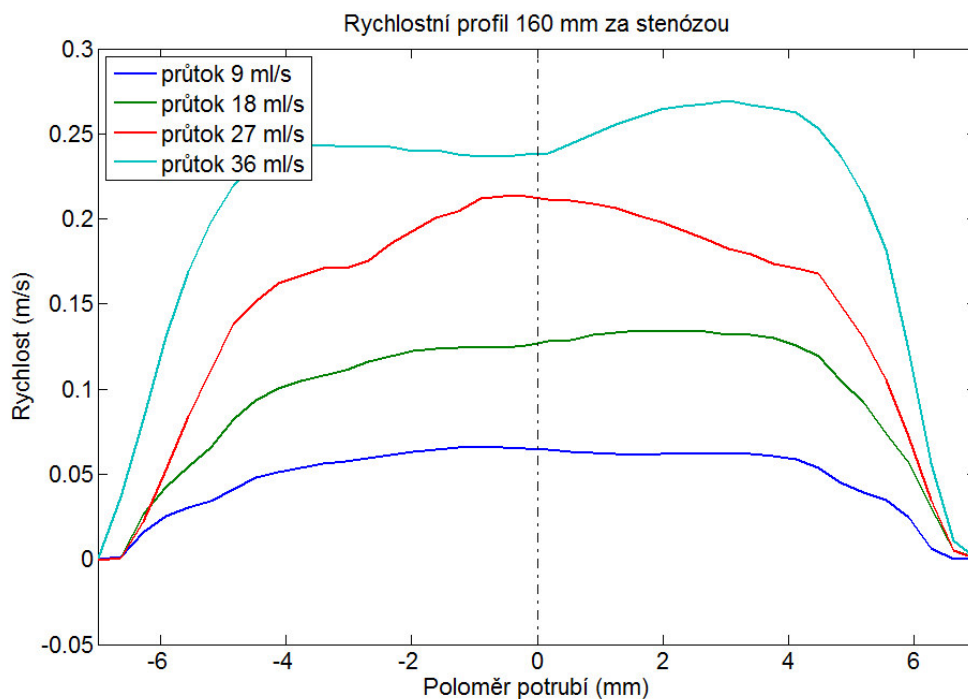
Obr. 5.15 Rychlostní profil 35 mm za stenózou



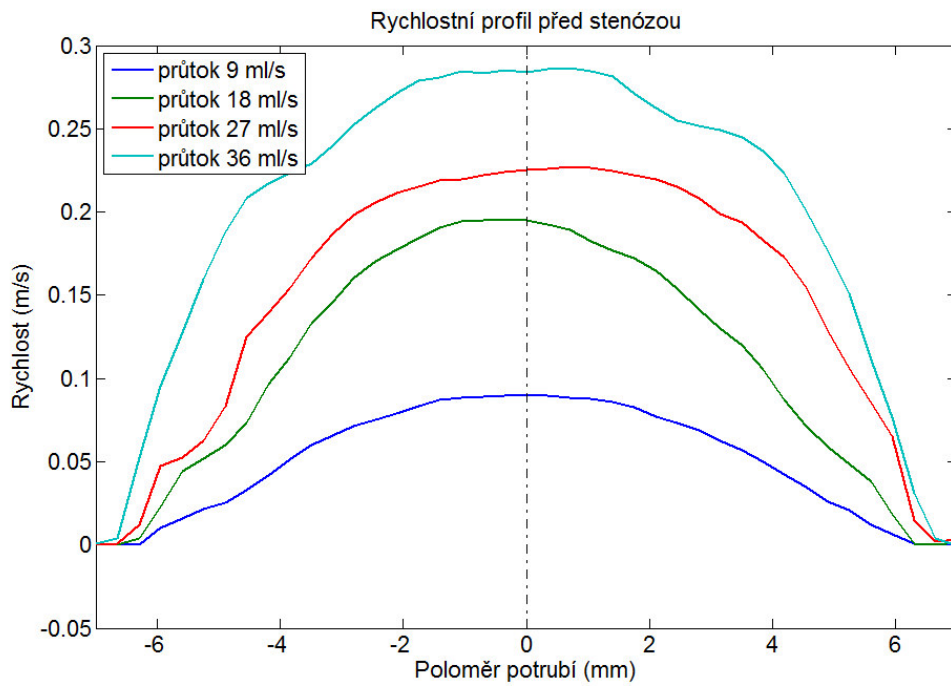
Obr. 5.16 Rychlostní profil 60 mm za stenózou



Obr. 5.17 Rychlostní profil 110 mm za stenózou

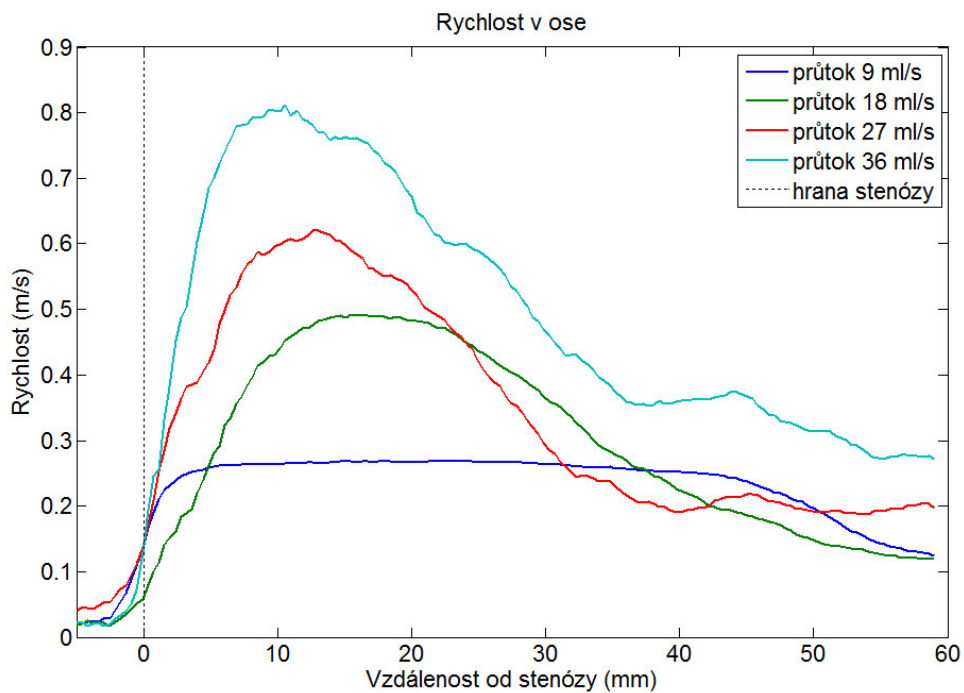


Obr. 5.18 Rychlostní profil 160 mm za stenózou



Obr. 5.19 Rychlostní profil před stenózou

Poslední graf ukazuje rozložení rychlosti v ose potrubí v závislosti na vzdálenosti od stenózy pro čtyři režimy proudění.



Obr. 5.20 Rychlost v ose

## 6 Závěr

Hlavním úkolem mé bakalářské práce bylo stanovení tlakové ztráty a vyhodnocení ztrátového součinitele opakovaného zúžení a zjištění, jak moc a do jaké vzdálenosti se jednotlivá zúžení ovlivňují.

Nejprve jsem zjistil parametry samotných zúžení. V případě 50 % stenózy vyšel ztrátový součinitel  $\xi = 1,95$ , v případě první varianty 75 %  $\xi = 15,49$  a v případě druhé varianty 75 %  $\xi = 14,83$ . Z grafických závislostí tlakové ztráty na rychlosti je ve všech případech patrné, že naměřené hodnoty mají poměrně jasný trend a aproximované funkci  $y(x) = a \cdot x^2$  se celkem přesně blíží. Závislost poměrného ztrátového součinitele ukazuje, jak moc se naměřené hodnoty liší od ideálních. Ve všech třech případech se více odchyľují hodnoty prvních měření při pomalejších režimech, od hodnoty Reynoldsova čísla okolo  $Re = 2000$  se naměřené hodnoty stabilizují a aproximované funkci jsou velice blízko. Dále je již z výsledků ztrátových součinitelů a grafických závislostí patrné, že tlakové ztráty a celkové ovlivnění proudění 50 % stenózou budou v porovnání se 75 % stenózou minimální.

Následně jsem měřil kombinaci 50 % a první varianty 75 % stenózy. Pokud by se jednotlivá zúžení neovlivňovala, výsledný ztrátový součinitel by byl roven součtu ztrátových součinitelů jednotlivých zúžení. Ztrátové součinitele pro dvě varianty uspořádání a dvě různé vzdálenosti jsou znázorněny na obr. 5.7. Hodnoty všech těchto součinitelů jsou si však velice blízké i blízké součtu ztrátových součinitelů jednotlivých zúžení a nenaznačují jakékoli výrazné vzájemné ovlivnění.

V posledním tlakovém měření jsem zjišťoval vzájemné ovlivnění dvou variant 75 % stenóz. Jednotlivé 75 % stenózy oproti 50 % stenóze mnohem výrazněji ovlivňují proudění, navíc jsem měření prováděl ve větším rozsahu vzdáleností. Z grafických závislostí na obr. 5.8 a 5.9 jasně vyplívá, že výrazně se dvě 75 % stenózy ovlivňují jen v prvních třech měřeních, tedy do vzdálenosti 42 mm, což odpovídá trojnásobku vnitřního průměru nezúžené trubky. Od této vzdálenosti daná kombinace nevykazuje žádné výrazné vzájemné ovlivnění.

Dále jsem se pro doplnění tlakových měření věnoval měření rychlostí pomocí optické metody PIV. Měřil jsem rychlostní pole za první variantou 75 % stenózy v několika oblastech. Nejprve jsem vyhodnotil rychlostní pole pro 4 režimy proudění. Na daném úseku je ve všech případech velice patrné urychlení proudu kolem osy a úplav v blízkosti stěn. Při nejrychlejšímu režimu vykazuje proudění určité známky neuspořádanosti a nesymetričnosti. V několika řezech rychlostního pole jsem dále vyhodnotil rychlostní profily za stenózou a pro porovnání jeden rychlostní profil neovlivněného proudu před stenózou. Na prvních dvou rychlostních profilech je ve všech čtyřech režimech velice patrné urychlení proudu ve středu trubky a úplav u stěn. Od 60 mm za stenózou se již proudění začíná stabilizovat a postupně vyvíjet, je to také oblast, od které již není patrné vzájemné ovlivnění dvou stenóz z tlakového měření. Zajímavá je i nesymetričnost rychlostního profilu při nejrychlejšímu režimu proudění při průtoku 36 ml/s a fakt, že i v řezech dále za stenózou se nestabilizuje do parabolického profilu a kolem osy se mírně prohlubuje. Ani neovlivněný rychlostní profil není zcela parabolický, nejvýraznější chyby do rychlostního profilu pravděpodobně vnášejí odlesky na rozhraní trubky a okolního prostředí. Vyhodnotil jsem i rychlost v ose, která v mnoha případech může být i rychlostí maximální. Maximální rychlost je zajímavá např. pro medicínské účely, jelikož se dle ní při některých vyšetřovacích metodách může stanovit stupeň stenózy.

Vyhodnotil jsem tlakové ztráty a ztrátové součinitele pro různá uspořádání opakovaného zúžení a zjistil, že k nejvýraznějšímu ovlivnění dvou 75 % stenóz dochází do vzdálenosti, která odpovídá trojnásobku vnitřního průměru nezúžené trubky. Dále jsem proměřil rychlostní pole za 75 % stenózou a v několika řezech vyhodnotil rychlostní profily, čímž jsem naplnil zadání bakalářské práce.

## Seznam zdrojů

- [1] JEŽEK, J., VÁRADIOVÁ, B., ADAMEC, J. Mechanika tekutin. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000
- [2] ADAMEC, Josef. Mechanika tekutin. [přednáška]. Praha: ČVUT, 2014
- [3] Genick Bar-Meir. Basics of Fluid Mechanics [online]. Genick Bar-Meir. [cit. 30.4.2015]. Dostupné z: <<http://www.potto.org/fluidMech/index.php>>
- [4] KAMANGAR, S. et al. Numerical Investigation of the Effect of Stenosis Geometry on the Coronary Diagnostic Parameters, Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal, 2014
- [5] ADRIAN, R. J., WESTERWELL, J. Particle image velocimetry. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-0-521-44008-0
- [6] Particle image velocimetry (PIV) [online]. Dantec Dynamics A/S. [cit. 19.4.2015]. Dostupné z: <<http://www.dantecdynamics.com/particle-image-velocimetry>>
- [7] NOVÁK, Martin. Technická měření [přednáška]. Praha: ČVUT, 2014



---

## Seznam obrázků

Obr. 2.1 Tečné napětí mezi vrstvami newtonské tekutiny.....	- 5 -
Obr. 2.2 Závislost tečného napětí na rychlosti deformace pro různé druhy tekutin.....	- 6 -
Obr. 2.3 Schéma pro odvození rovnice kontinuity.....	- 7 -
Obr. 2.4 Schéma pro odvození Bernoulliho rovnice.....	- 8 -
Obr. 2.5 Rychlostní profily.....	- 10 -
Obr. 2.6 Schéma pro odvození rovnice kontinuity vazké tekutiny.....	- 11 -
Obr. 2.7 Příklady prvků způsobujících místní ztrátu.....	- 13 -
Obr. 3.1 Schéma zvonového tlakoměru.....	- 16 -
Obr. 3.2 Schéma pístového tlakoměru.....	- 17 -
Obr. 3.3 Schéma U – trubicového tlakoměru.....	- 18 -
Obr. 3.4 Schéma nádobkového tlakoměru.....	- 19 -
Obr. 3.5 Schéma manometru se sklonnou trubicí.....	- 20 -
Obr. 4.1 Schéma tratě.....	- 23 -
Obr. 4.2 Možné tvary modelů.....	- 24 -
Obr. 4.3 Závislost tlakové ztráty na velikosti zúžení.....	- 25 -
Obr. 4.4 Výsledná geometrie stenóz.....	- 27 -
Obr. 4.5 Umístění modelu.....	- 27 -
Obr. 4.6 Schéma tratě pro tlaková měření.....	- 28 -
Obr. 4.7 Schéma tratě PIV.....	- 34 -
Obr. 5.1 Závislost tlakové ztráty na rychlosti 50 % stenózy.....	- 36 -
Obr. 5.2 Závislost poměrného ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle 50 % stenózy.....	- 37 -

---

Obr. 5.3 Závislost tlakové ztráty na rychlosti 75 % stenózy „1“ .....	- 37 -
Obr. 5.4 Závislost poměrného ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle 75 % stenózy „1“ .....	- 38 -
Obr. 5.5 Závislost tlakové ztráty na rychlosti 75 % stenózy „2“ .....	- 38 -
Obr. 5.6 Závislost poměrného ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle 75 % stenózy „2“ .....	- 39 -
Obr. 5.7 Závislost součinitele místní ztráty na vzájemné vzdálenosti 50 % a 75 % stenózy .....	- 39 -
Obr. 5.8 Závislost tlakové ztráty na rychlosti pro různá uspořádání dvou 75 % stenóz .....	- 40 -
Obr. 5.9 Závislost součinitele místní ztráty na vzájemné vzdálenosti dvou 75 % stenóz .....	- 40 -
Obr. 5.10 Rychlostní pole pro režim $\dot{V}=9 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ .....	- 41 -
Obr. 5.11 Rychlostní pole pro režim $\dot{V}=18 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ .....	- 41 -
Obr. 5.12 Rychlostní pole pro režim $\dot{V}=27 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ .....	- 41 -
Obr. 5.13 Rychlostní pole pro režim $\dot{V}=36 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ .....	- 42 -
Obr. 5.14 Rychlostní profil 10 mm za stenózou .....	- 42 -
Obr. 5.15 Rychlostní profil 35 mm za stenózou .....	- 43 -
Obr. 5.16 Rychlostní profil 60 mm za stenózou .....	- 43 -
Obr. 5.17 Rychlostní profil 110 mm za stenózou .....	- 44 -
Obr. 5.18 Rychlostní profil 160 mm za stenózou .....	- 44 -
Obr. 5.19 Rychlostní profil před stenózou .....	- 45 -
Obr. 5.20 Rychlost v ose .....	- 45 -

---

## Seznam tabulek

Tab. 4.1 Přehled měřených režimů.....- 29 -

Tab. 5.1 Shrnutí výsledků tlakových měření.....- 35 -