

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2341 Strojírenství  
Studijní zaměření: Energetické zdroje a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Návrh a realizace experimentálního zařízení  
pro měření tlakových ztrát

Autor: **Ing. Vladislav SÍŤAŘ**  
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jiří POLANSKÝ, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. Vladislav SÍTAŘ**  
Osobní číslo: **S09B0033P**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **Energetické zdroje a zařízení**  
Název tématu: **Návrh a realizace experimentálního zařízení pro měření tlakových ztrát**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


Máte za úkol:

1. Vypracovat návrh a výpočet celé měřicí soustavy s minimálně 8 měřícími body.
2. Vypracovat schéma zařízení včetně kusovníku jednotlivých dílů.
3. Sestavit a zprovoznit měřicí zařízení.
4. Otestovat a vytvořit krátký manuál pro používání zařízení pro edukační účely.

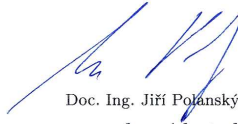
Rozsah grafických prací: **výkresová dokumentace**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- **Linhart J.: Mechanika tekutin I., ZČU, Plzeň 2009**
- **Noskovič J. a kol.: Mechanika tekutin, SNTL, Praha 1987**
- **Ďaďo S. a kol: Měření průtoku a výšky hladiny, BEN, Praha 2005**
- **Kolář V. a kol.: Hydraulika, SNTL, Praha 1983**
- **Katalogy výrobců hydraulických zařízení**

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.**  
Katedra energetických strojů a zařízení  
Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.**  
Katedra energetických strojů a zařízení  
Datum zadání bakalářské práce: **3. listopadu 2011**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 3. října 2011

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Autorská práva**

Podle Zákona o právu autorském, č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. CR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledku bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Doc. Ing. Jiřímu Polanskému, Ph.D za příkladné vedení bakalářské práce, panu Miroslavu Sládkovi za pomoc s technickou realizací experimentálního zařízení a prováděných měřeních, pánům Ing. Kamilu Sedlákoví, Ing. Jaroslavu Štěchovi, Ing. Janu Čulíkovi za cenné odborné rady.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Sít'ář	<b>Jméno</b> Vladislav		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2341 Strojírenství			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Polanský, Ph.D.		<b>Jméno</b> Jiří	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>		
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Návrh a realizace experimentálního zařízení pro měření tlakových ztrát			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	44	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	39	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	5
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	<p>Bakalářská práce se zabývá návrhem laboratorního standu pro měření tlakových ztrát. Je zde popsána problematika tlakových ztrát a jejich měření, proveden návrh okruhu a analytický výpočet tlakových ztrát. V závěru jsou uvedeny naměřené hodnoty, provedeno porovnání výsledků a navržen metodický výukový manuál.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	<p>tlaková ztráta, potrubní systém, ztrátový součinitel, statický tlak, dynamický tlak, odběr kapaliny, rychlost proudění</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Sít'ář	Name Vladislav		
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2341 Engineering			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Polanský, Ph.D.	Name Jiří		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>		
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design and Execution of Experimental Stand for Measurement of Pressure Losses			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	44	<b>TEXT PART</b>	39	<b>GRAPHICAL PART</b>	5
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	<p>This Bachelor thesis deals with the design of the laboratory stand for measurement of pressure losses. The problem of pressure losses with their measurement is described. Next, circuit design and analytical calculation of pressure losses are performed. In the closing part, measured values, comparison of results and methodical training manual are introduced.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>pressure loss, piping system, loss coefficient, static pressure, dynamic pressure, collection of fluid, flow velocity</p>

## Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek .....	- 2 -
Úvod .....	- 4 -
1 Měření tlaku a použité technologie .....	- 5 -
1.1 Měření tlaku .....	- 5 -
1.2 Měření statického tlaku .....	- 6 -
1.3 Otvory v trubkách.....	- 6 -
1.4 Umístění odběrů .....	- 7 -
1.5 Přenos kapaliny a měření výšky hladiny.....	- 8 -
2 Měření průtoku .....	- 10 -
3 Tlakové ztráty.....	- 12 -
3.1 Hydraulické odpory.....	- 13 -
3.2 Třecí odpory v potrubích.....	- 14 -
3.3 Místní odpory .....	- 16 -
3.3.1 Ztráta náhlým rozšířením průřezu .....	- 17 -
3.3.2 Ztráta náhlým zúžením průřezu.....	- 18 -
3.3.3 Ztráta změnou směru proudění.....	- 19 -
3.3.4 Odpory v armaturách.....	- 21 -
4 Návrh sestavy .....	- 22 -
4.1 Potrubní systém .....	- 22 -
4.2 Nádrž .....	- 23 -
4.3 Stojany.....	- 23 -
4.4 Redukce .....	- 23 -
4.5 Čerpadlo .....	- 24 -
4.6 Schéma okruhu .....	- 24 -
5 Analytický výpočet .....	- 25 -
5.1 Hydraulická drsnost.....	- 25 -
5.2 Tlakové ztráty.....	- 25 -
6 Naměřené hodnoty .....	- 31 -
7 Návod na používání laboratorního pracoviště.....	- 35 -
7.1 Teoretický úvod.....	- 35 -
7.2 Popis obvodu .....	- 35 -
7.3 Popis důležitých použitých prvků .....	- 35 -
7.4 Postup měření a zpracované výpočty .....	- 36 -
7.5 Vyhodnocení měření .....	- 37 -
8 Závěr.....	- 38 -
Použitá literatura .....	- 39 -
Seznam příloh.....	- 39 -



## Seznam použitých symbolů a zkratk

### Použité značky a symboly

Název veličiny	Značka veličiny	Značka základní jednotky veličiny
Tíhové zrychlení	$g$	$m/s^2$
Výška	$h$	$m$
Hustota	$\rho$	$kg/m^3$
Přetlak	$\delta p$	$Pa$
Absolutní tlak	$p$	$Pa$
Tlaková ztráta, změna tlaku	$\Delta p, p_z, \delta p$	$Pa$
Dynamický tlak	$p_{dyn}$	$Pa$
Kinetický tlak	$p_{kin}$	$Pa$
Součinitel stlačitelnosti	$s$	-
Průřez	$S$	$m^2$
Rychlost proudění	$w$	$m/s$
Objemový průtok	$Q_v, \dot{V}$	$m^3/s$
Indukované napětí	$U_i$	$V$
Magnetická indukce	$B$	$T$
Vzdálenost elektrod	$d$	$m$
Hmotnostní síla	$F_m$	$N$
Tlaková síla	$F_p$	$N$
Třecí síla	$F_t$	$N$
Setrvační síla	$F_s$	$N$
Hmotnost	$m$	$kg$
Dráha	$s$	$m$
Rozptýlená měrná energie	$e_r$	$J/kg$
Ztrátový součinitel	$\zeta$	-
Ztrátová výška	$h_z$	$m$
Tlaková výška	$H_0$	$m$
Měrná energie	$Y_0$	$J/kg$
Třecí ztrátový součinitel	$\zeta_t$	-
Místní ztrátový součinitel	$\zeta_m$	-
Součinitel tření	$\lambda$	-
Délka potrubí	$l$	$m$
Průměr potrubí	$D, d$	$m$
Reynoldsovo číslo	$Re$	-
Drsnost potrubí	$k, \Delta$	$m$
Poměrná drsnost	$k_r$	-
Tloušťka vazké podvrstvi	$\delta_p$	$m$
Neurčené koeficienty	$n, \beta$	-
Poloměr trubky	$R$	$m$
Ztrátový součinitel zúžení průřezu	$\zeta_z$	-
Ztrátový součinitel rozšíření průřezu	$\zeta_r$	-
Součinitel zúžení	$\varepsilon$	-
Třecí tlaková ztráta	$p_{zt}$	$Pa$

Tlaková ztráta vířením	$p_{zv}$	$Pa$
Poloměr zakřivení kolene	$r_s$	$m$
Ztrátový součinitel kolene	$\zeta_k$	-
Ztrátový součinitel čtvrtkruhového kolene	$\zeta_{90}$	-
Úhel středového oblouku	$\delta$	$^\circ$
Ztrátový součinitel kohoutu	$K, \zeta_{ko}$	-
Tloušťka trubky	$s$	$m$
Příkon	$P$	$W$
Otočení kohoutu	$O$	$^\circ$
Rozdíl výšek hladin	$\Delta h$	$m$
Kinematická viskozita	$\nu$	$m^2/s$
Výška vodního sloupce zjištěná měřítkem	$h_{vsl}$	$m$
Výška měřítka nad zemí	$h_{mnz}$	$m$
Výška odběru nad zemí	$h_{onz}$	$m$

### Použité zkratky

PVC	polyvinylchlorid
PP	polypropylen
PE	polyetylén
DN	jmenovitá světlost potrubí

## Úvod

Cílem této bakalářské práce je provést návrh laboratorního pracoviště, na kterém budou moci být měřeny nejjednodušší vizuální metodou tlakové ztráty na jednotlivých úsecích. Pro názorné výukové účely je dále nutné zpracovat podklady pro měření na tomto pracovišti.

Provést samotný návrh je možné třemi způsoby. První způsob je nejjednodušší, kdy návrh spočívá v sestavení obdobného pracoviště, které je už někde využíváno. Nevýhodou může být problém se sestavením odlišných dílů a prvků nebo nemožnosti sehnat potřebná zařízení. Druhý způsob spočívá v analytickém návrhu před sestavením celé soustavy. Tato cesta je velmi nevýhodná, protože nikdy není možné zjistit přesné chování jednotlivých prvků z informací daných výrobcem, například průtok kapaliny nebo ztrátové součinitele jednotlivých úseků atd. Posledním způsobem je postup, kdy se sestaví celý okruh a následně se provádí změny co do prvků, tak i jejich vzájemném propojení. Tato metoda je výhodná v případě, že je možné měnit veškerou topologii obvodu, například zkracovat trubky, použít trubky s menším průtočným prořezem apod. Poslední metoda je však náročná s ohledem na finance.

Během návrhu bylo využito prvního a třetího způsobu. Nejprve byla provedena inspirace v dostupných návodech na cvičení z mechaniky tekutin z VŠB-TU v Ostravě, jak rozpoložít jednotlivé prvky ve schématu, které použít a které nikoliv. Dále bylo pokračováno třetím způsobem, kdy byla prováděna částečná měření a z nich vyvozeny patřičné úpravy ve schématu.

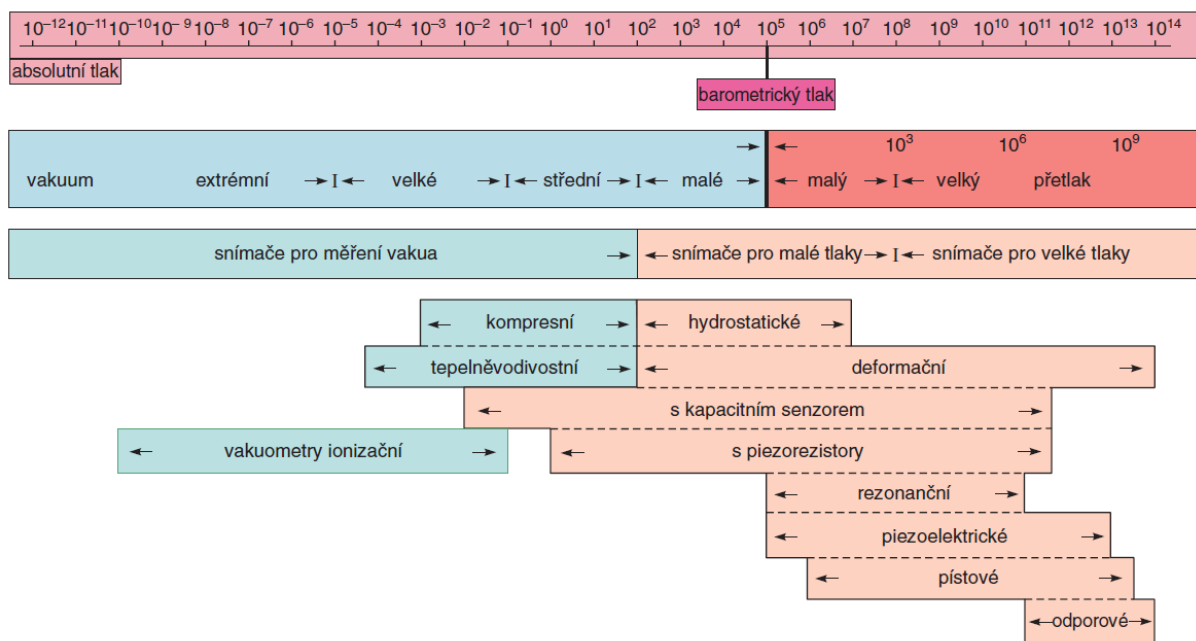
Každý navržený úsek musí splňovat základní požadavky. Nejdůležitější požadavek spočívá ve schopnosti naměřit to, co je žádáno. Jinak řečeno, na každém navrženém úseku musí být vidět, že dochází ke změně statického tlaku. Dále, jednotlivé úseky by měly být rozložitelné. Rozhodně významným požadavkem je cenová dostupnost všech prvků z návrhu. Z tohoto důvodu byly navrženy jednotlivé úseky z trubek spojovaným prostým zasunutím do sebe.

Bakalářská práce se zabývá popisem měření tlaku a průtoku, které jsou na daném laboratorním pracovišti nezbytné pro ověření analytického návrhu. Dále jsou v práci popsány principy vzniku tlakových ztrát, jejich rozdělení a výpočty. Vzhledem k využitým prvkům v návrhu jsou popsány po teoretické stránce jen vybrané partie. Použitými elementy jsou koleno, rovné trubky o dvou různých průtočných průřezích, prvek se zúžením a rozšířením průtočného průřezu, kohout a kombinace kolen s rovnými potrubními úseky o různých délkách. Naměřené hodnoty tlakových ztrát jsou pak porovnány s analytickým výpočtem a provedeno zhodnocení možných vlivů na případné rozdílnosti těchto hodnot. V závěru práce je zpracován návod na použití laboratorního pracoviště. Jinak řečeno uveden postup, jak provést samotné měření a využití naměřených hodnot pro analýzu chování všech prvků a měřených úseků.

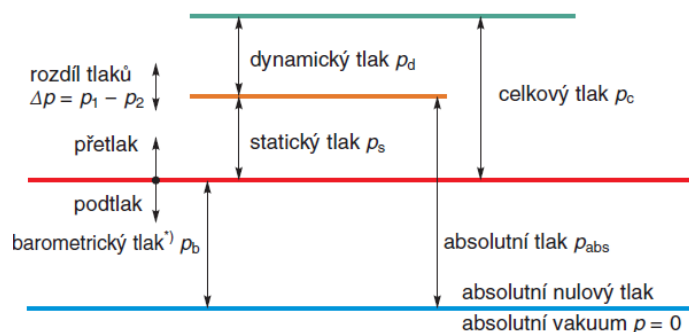
# 1 Měření tlaku a použité technologie

## 1.1 Měření tlaku

Měřit tlak v tekutině je možné pomocí mnoha různých principů. Při využití většiny principů se neměří přímo tlak, ale jeho silový účinek na pružný člen nebo vzniklé napětí v daném členu. Tyto principy jsou například kapacitní, indukční, piezoelektrický, odporový s tenzometry a další.<sup>1)</sup> Každý princip je vhodný jen pro určité rozsahy tlaků v tekutině, viz. obr. 1.2. Měřit je možné statický tlak, dynamický tlak nebo i celkový tlak. Pro všechna tato měření je však nutné použít různých zařízení, jako například Pitotovu trubici pro celkový tlak, odběry skrze vyvrtané díry v potrubí pro statický tlak nebo Prandtlovu či Venturiho trubici pro dynamický tlak. Grafické zobrazení tlaků je ilustrováno na obrázku 1.2. Zde je patrné, že všechny měřené tlaky, statický, dynamický i celkový jsou ve skutečnosti přetlaky vůči atmosférickému tlaku za daných podmínek.



Obr. 1.1 Orientační rozdělení snímačů tlaku podle měřícího rozsahu [2]



<sup>1)</sup> normální barometrický tlak  $p_{bn} = 101\,325$  Pa

Obr. 1.2. Grafické zobrazení tlaků [2]

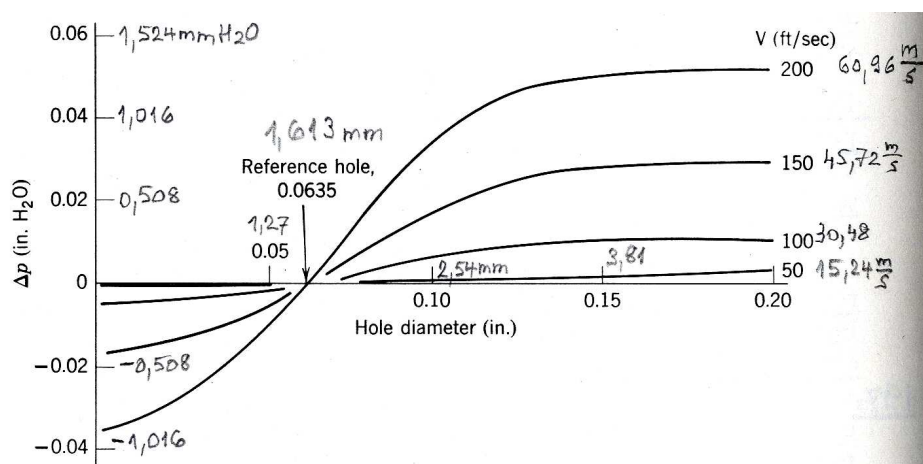
## 1.2 Měření statického tlaku

Měření statického tlaku se provádí hlavně pro zjišťování průtoku. Kromě toho, měření statického tlaku umožňuje sledovat velikost tlakových ztrát v potrubí při proudění kapaliny. Statický tlak je možné měřit třemi různými způsoby. První možností je pomocí malých děr, které jsou vyvrtány do stěn v potrubí v takových místech, kde je průtok kapaliny relativně nerušený. Druhou možnost představují čidla s malými otvory, které jsou umístěny v usměrněném proudu. Třetí možnost je použití těles se speciálním tvarem, skrze které protéká měřená kapalina. Těmito mohou být například různé kulové, válcové, klínové nebo kuželové sondy [4].

Pro měření tlakové ztráty v různých částech potrubí byl zvolen hydrostatický princip, tedy přeměna statického tlaku na hydrostatický. Vlivem vyššího tlaku v potrubí než-li v okolním prostředí dochází k vytlačení tekutiny skrze vyvrtanou díru ve stěně trubky do připevněného odběru a dále skrze hadice a další členy do otevřené skleněné trubice.

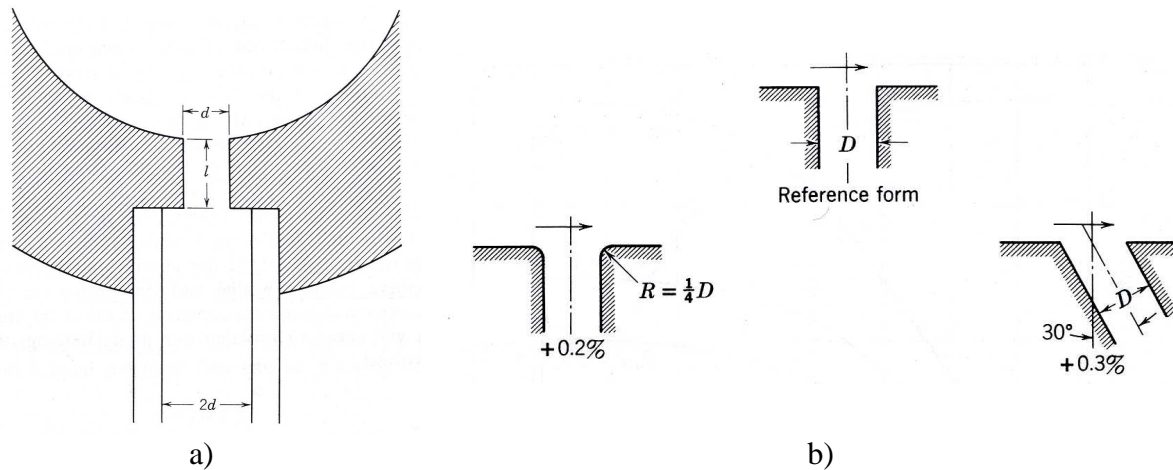
## 1.3 Otvory v trubkách

Pro přesné snímání statického tlaku musí být otvory ve stěnách trubky co nejmenší, kdy daná díra musí být vrtaná kolmo ke stěně. Toto přináší spoustu problémů nejen s výrobou takovýchto malých otvorů, ale i s následnou pomalou změnou tlaku ve snímači oproti tlaku v proudící kapalině [4]. Podle [3] by se měl průměr díry pohybovat mezi 0,3 mm až 0,5 mm. Nicméně, jiné literatury uvádí vhodnou velikost průměru díry od 2 mm do 3 mm v závislosti na průměru potrubí. V případě, že by otvor byl příliš veliký, docházelo by zároveň k měření i části dynamického tlaku vlivem vtékání kapaliny. Kompromisní velikost průměru otvoru je uvedena v [4]. Tato hodnota nabývá velikosti 1,613 mm jako referenční hodnoty. Ostatní velikosti průměrů otvorů jsou s touto hodnotou porovnávány a sledován vliv na velikost změřeného tlaku při různých rychlostech proudění (obr. 1.3).



Obr. 1.3 Vliv velikosti díry na změřený tlak [4]

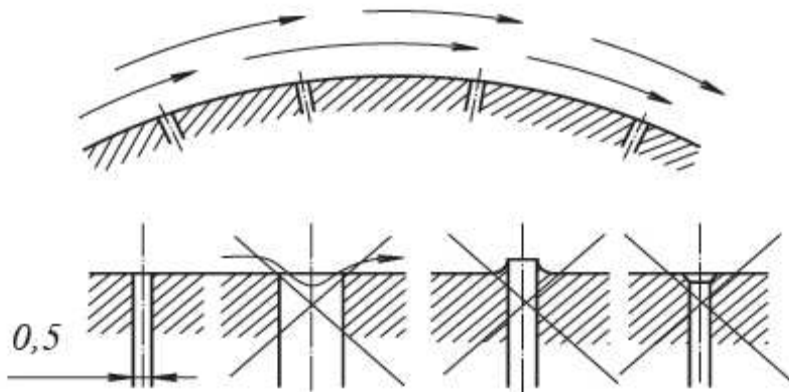
Samotná geometrie otvoru má také vliv na přesnost měření. Díra by měla být kruhového průřezu s parametry uvedenými na obrázku 1.4 a. Toto platí pro  $0,5 < l/d < 6$ . Nicméně, vzhledem možnostem, ale hlavně kvůli použitému typu potrubí, kdy tloušťka stěny nabývá velikosti 1,8 mm, nebyly vyvrtány otvory do potrubí podle výše uvedených pravidel. Do trubek byly vrtány díry o průměru 6 mm a vytvořeny závitové vnitřní stěny. Samotná velikost díry pro snímání tlaku byla volena o průměru 2 mm, a tedy dosaženo přiblížení velikosti otvoru k hodnotě 1,613 mm.



Obr. 1.4 Geometrie vrtaného otvoru a) požadované rozměry, b) vliv zaoblení hran otvorů [4]

Hrany otvorů by neměly být zaoblené nebo zkosené. Každá tato změna oproti hranatému otvoru způsobuje změnu měřeného tlaku. Takovéto některé příklady jsou na obrázku 4 b v zobrazení procentuelního podílu odchylky dynamického tlaku [4].

Také by do proudu kapaliny neměly zasahovat žádné ořepky z technologie vrtání otvoru, popřípadě samotný odběr nesmí zasahovat do proudu (obr. 1.5). Tyto prvky by způsobovaly přidavné víření v oblasti otvoru a tím měnily rozložení tlaku v okolí tohoto místa. Na úkor statického tlaku by se zde zvyšovala hodnota dynamického tlaku.



Obr. 1.5 Nežádoucí tvarování otvorů pro měření statického tlaku [3]

## 1.4 Umístění odběrů

Odběry tekutiny jsou připevněny v určitých, předem zvolených místech. Odběry jsou vyrobeny z mosazných trubiček o vnějším průměru 7 mm a délce 22 mm, do kterých jsou vyvrtány dvě různé sousední díry. Díra, která prochází skrze celý odběr má průměr 2 mm. V části, kam se nasouvá hadička je vnitřní průměr odběru zvětšen na 5 mm do hloubky 15 mm. Na části odběru, který je ve stěně, je vytvořen závit. Připojení je tedy provedeno našroubováním tak, že žádná část odběru nezasahuje do proudící kapaliny. Kvůli zabezpečení těsnosti je také každý odběr přilepen k trubce (obr. 1.6).



Obr. 1.6 Mosazný odběr

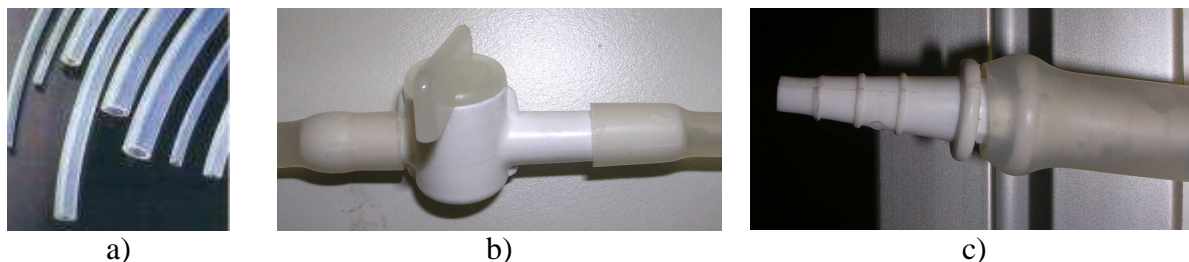
Každý odběr je volen ve vhodné vzdálenosti před každou změnou průřezu, změnou směru proudění nebo deformací vnitřního povrchu. Toto je voleno s ohledem na měření tlakové ztráty celého prvku a zabránění nepřesného měření. Nepřesnost může být vnesena špatným dosednutím trubek, kdy vznikají nežádané drážky mezi potrubními kusy. Dále, před každým odběrem je volena uklidňující délka potrubí tak, aby byl odečítán tlak ustáleného proudění. Umístění výstupního odběru musí také zajistit, aby proudění bylo ustálené a nedocházelo v daném místě k víření tekutiny (obr. 1.7). Jelikož nebyla nalezena žádná platná norma kde by byla popsány informace o nutném umístění otvorů pro odběr kapaliny, tato místa byly volena s ohledem na tvar prvku a bylo přihlédnuto k informacím popisujícím tuto problematiku skrze měřidla průtoku.



Obr. 1.7 Příklad umístění odběru na dlouhé trubce

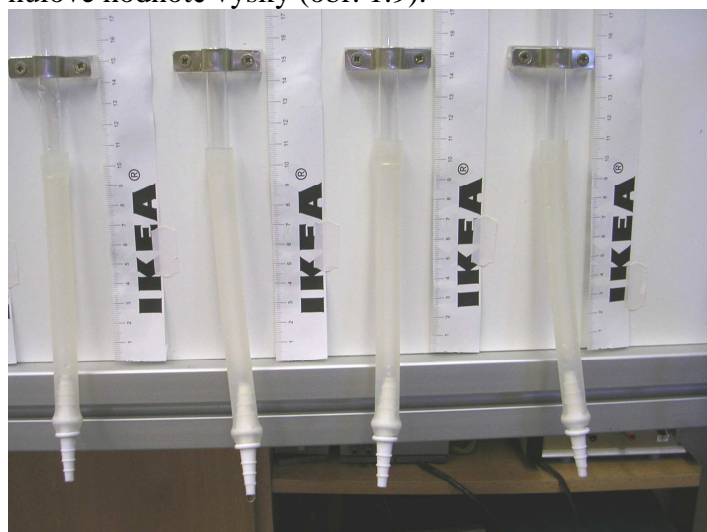
### **1.5 Přenos kapaliny a měření výšky hladiny**

Na každý odběr je nasazena silikonová hadička o průměru 3/7 mm (obr. 1.8 a). Tyto hadice jsou dlouhé cca 100 mm a na druhém konci jsou navlečeny na kohout z PVC (obr. 1.8 b). Kohouty slouží k možnosti manipulace s trubicemi nebo deskou při nemožnosti přerušení průtoku kapaliny skrze celý okruh. Z kohoutu jsou hadice připevněny na PVC redukci. Tato redukce (obr. 1.8 c) také umožňuje jednoduché rozpojení a měřicího okruhu a také odděluje hadice natažené na skleněné trubice (6/10 mm) od přenosových (3/7 mm, popřípadě 4/8 mm).



Obr. 1.8 Spojovací prvky a) silikonové hadice, b) kohout, c) redukce

Skleněné trubice jsou 1 500 mm dlouhé a jsou připevněny k dřevotřískové desce. Mezi deskou a trubicemi jsou umístěny plexisklové hranoly, které zajišťují oddálení trubic od desky. Připevnění hranolů a trubic je provedeno vruty přes tvarovaný hliníkový plech a gumové pásky, které slouží k lokálnímu snížení namáhání trubic. Vedle každé trubice je přilepené měřítko, kde lze odečíst výšku vodního sloupce v *mm*. Spodní okraj desky odpovídá nulové hodnotě výšky (obr. 1.9).



Obr. 1.9 Připevnění trubic a měřítek

Výška vodního sloupce v trubici odpovídá velikosti přetlaku v proudící kapalině vůči atmosférickému tlaku a spočítá se dle rovnice 1.1,

$$\delta p = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \quad (1.1)$$

kde  $\rho \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$  je hustota kapaliny,  $g \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}]$  tíhové zrychlení a  $h \text{ [m]}$  výška vodního sloupce v trubici. Tlaková ztráta vybraného úseku se pak vypočítá jako rozdíl příslušných dvou výšek hladin (rov. 1.2).

$$\Delta p = \delta p_1 - \delta p_2 \text{ [Pa]} \quad (1.2)$$

Při tomto měření se měří celkový přetlak, který je dán složkou statickou (hydrostatickou) a složkou dynamickou. Statický tlak  $p_{stat}$  se spočítá podle rovnice 1.1, dynamický tlak podle rovnice 1.3, kde  $s [-]$  je součinitel stlačitelnosti tekutiny a  $p_{kin}$  kinetický tlak, vyvolaný prouděním tekutiny [2].

$$p_{dyn} = s \cdot p_{kin} \text{ [Pa]} \quad (1.3)$$



## 2 Měření průtoku

Proměření průtoku a proteklého množství kapaliny existuje rozmanité množství přístrojů využívající různé fyzikální principy. Výsledek měření průtoku může být udáván v hodnotě hmotnostního průtoku nebo objemového průtoku s tím, že daný průtok lze hodnotit na základě měření střední nebo místní rychlosti proudění média. Snímače používané pro měření průtoku a proteklého množství kapaliny je možné rozdělit do tří skupin na objemové, rychlostní a hmotnostní dle samotné měřicí metody [7].

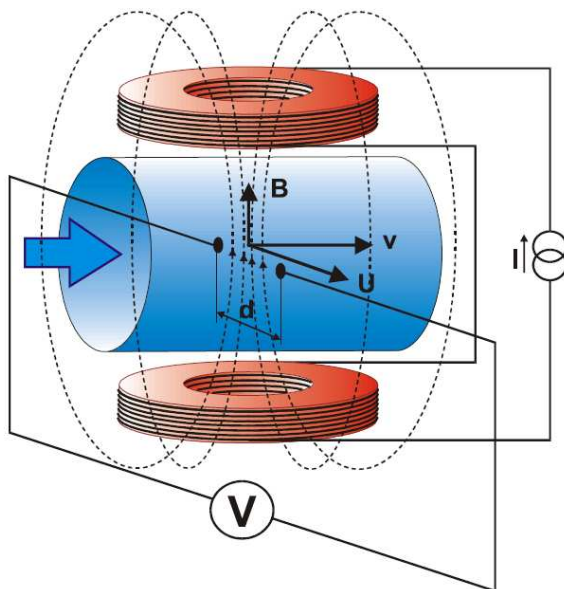
### Indukční průtokoměr

Pro samotné měření průtoku byl v návrhu zvolen indukční průtokoměr. Tento průtokoměr pracuje na rychlostní metodě, kdy se měří rychlost proudící kapaliny a ze znalosti průtočného profilu a průřezu se vypočítává objemový průtok. Je vhodný pro měření elektricky vodivých kapalin při minimální hodnotě Reynoldsova čísla o hodnotě 2 000 [8].

*Indukční průtokoměr je přístroj sloužící k objemovému měření průtoku elektricky vodivých kapalin. Princip měření je založen na Faradayově indukčním zákonu o elektromagnetické indukci (obr 2.1). Snímač se skládá z nemagnetické trubice, která je uvnitř potažena nevodivou výstelkou, měřících elektrod a dvou cívek, generujících elektromagnetické pole. Proudící kapalina tvoří vodič, ve kterém je vlivem magnetického pole indukováno napětí přímo úměrné magnetické indukci, vzdálenosti elektrod a rychlosti proudění.<sup>1)</sup> V případě jednoho směru proudění, kolmého směru magnetické indukce lze indukované napětí vyjádřit jednoduše dle rovnice 2.1.*

$$U_i = B \cdot w \cdot d \quad (2.1)$$

Kde  $U_i$  [V] je naindukované napětí,  $B$  [T] je magnetická indukce,  $w$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] rychlost proudění a  $d$  [m] vzdálenost elektrod.

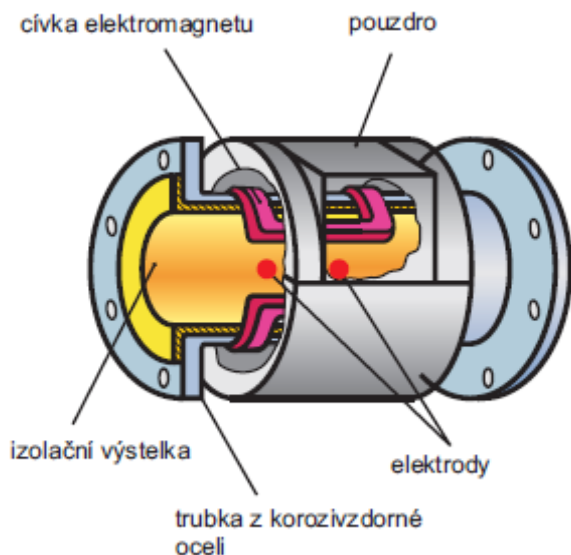


Obr. 2.1 Princip měření indukčního průtokoměru [5]

Protože magnetická indukce a vzdálenost elektrod jsou konstantní, je indukované napětí přímo úměrné rychlosti proudění kapaliny v trubici. Výsledný objemový průtok je pak násobkem rychlosti proudění kapaliny a vnitřního průřezu trubice.<sup>1)</sup> Pro jeden směr rychlosti a konstantní průřez lze psát pro objemový průtok rovnici 2.2,

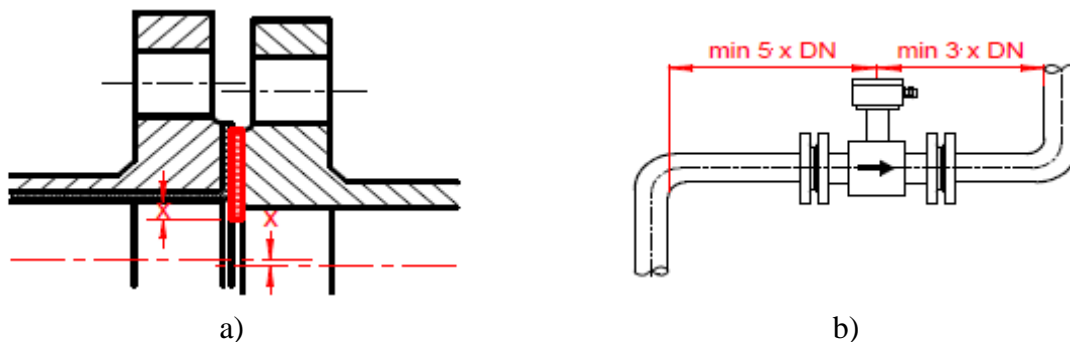
$$\dot{V} = S \cdot w \quad (2.2)$$

kde  $\dot{V} [m^3 \cdot s^{-1}]$  je objemový průtok,  $S [m^2]$  je průřez trubice a  $w [m \cdot s^{-1}]$  rychlost proudění kapaliny.



Obr. 2.2 Řez indukčním průtokoměrem [6]

Pro správnou funkci měření je průtokoměr umístěn ve vodorovné poloze a je připojen přes přírubu k potrubí. Při návrhu bylo dbáno na sestavení celého obvodu tak, aby byly eliminovány vnější chyby. Dle pokynů pro montáž průtokoměru [5], mezi snímačem a navazujícím potrubím nevznikla přechodová hrana, která by jinak způsobovala turbulenci proudění. Tedy vnitřní průměry potrubí byly správně vyoseny a těsnění mezi přírubou a měřidlem nepřesahovalo vnitřní hranu potrubí (obr. 2.3 a). Dále je třeba zajistit dostatečnou uklidňovací délku potrubí jak před snímačem, tak i za ním. Tato byla volena  $8,5 \times DN$ , přičemž minimální vzdálenost před snímačem musí být  $5 \times DN$  a za snímačem  $3 \times DN$  (obr. 2.3 b). Pro zajištění úplného zavodnění průtočného průřezu je průtokoměr umístěn pod úrovní nádrže a čerpadla. Samotné sestavení jednotlivých komponent také vyhovuje z hlediska vzdálenosti průtokového čerpadla před snímačem.



Obr. 2.3 Montáž průtokoměru a) přesahy [5], b) uklidňovací délky [5]

### 3 Tlakové ztráty

Při proudění tekutin dochází neustále k disipaci, tj. k přeměně části kinetické energie tekutiny vlivem tření na teplo. Projevem tohoto procesu je klesání celkového tlaku, a pokud se nemění rychlost proudění i tlaku statického. Z hlediska výpočtového tlakové ztráty v potrubních systémech dělíme na ztráty místní a ztráty třecí.<sup>3)</sup>

Při výpočtech tlakových ztrát se vychází z obecné rovnice Bernoulliho rovnice, která má tvar ve formě tlaků dle rovnice 3.1.

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \rho \cdot \frac{w^2}{2} = \text{konst.} \quad (3.1)$$

Při proudění dokonalé kapaliny je rovnováha sil vyjádřena rovnicí  $\overline{F}_m + \overline{F}_p = \overline{F}_s$ . U skutečné kapaliny se vyskytnou další síly, a to třecí  $\overline{F}_t$ , které jsou způsobeny viskozitou a rovnováha sil se vyjádří následovně:  $\overline{F}_m + \overline{F}_p + \overline{F}_t = \overline{F}_s$ , kde  $\overline{F}_m$  je vnější hmotnostní síla působící na tekutinu,  $\overline{F}_p$  je tlaková síla a  $\overline{F}_s$  je výsledná setrvačná síla. Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu obsahuje další člen, který představuje práci třecích sil. Na jednotku hmotnosti připadá energie  $\int_1^2 \frac{\overline{F}_t}{m} d\overline{s} = \int_1^2 w \Delta \overline{w} d\overline{s} = e_r$ , což je rozptýlená (disipovaná) energie, spotřebovaná na překonání hydraulických odporů mezi dvěma úseky proudové trubice. Tato rozptýlená energie zmenšuje mechanickou energii kapaliny (tlakovou, kinetickou a polohovou) a mění se v teplo. Bernoulliho rovnice pro proudění skutečné kapaliny má tedy tvar dle rovnice 3.2.

$$gh_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} + e_r \quad (3.2)$$

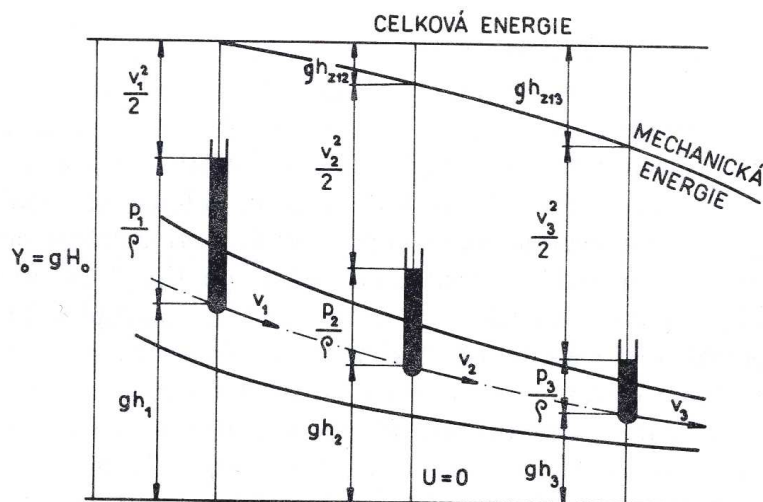
Rozptýlená energie  $e_r$  se může vyjádřit jako násobek kinetické energie  $e_r = \zeta \frac{w^2}{2}$  nebo

tlakovou energií  $e_r = \frac{p_z}{\rho}$ , popřípadě tlakovou výškou  $e_r = gh_z$ . Srovnáním uvedených vztahů se dostane rovnice 3.3.

$$p_z = \rho gh_z = \rho \zeta \frac{w^2}{2} \quad (3.3)$$

Rovnice 3 vyjadřuje hydraulický odpor tlakovým rozdílem  $p_z$ , kterému se říká tlaková ztráta. Podobně veličina  $h_z$  je označena jako ztrátová výška, i když nejde o ztrátu, ale nežádanou přeměnu mechanické energie v tepelnou. Obě veličiny jsou mírou rozptýlené energie. Součinitel  $\zeta$  je ztrátový součinitel a závisí na druhu hydraulického odporu či ztráty. Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu vyjádřená pro průřezy 1 a 2 proudové trubice (obr. 3.1) pomocí ztrátové měrné energie  $e_r = gh_z$  je napsána v rovnici 3.4.

$$Y_0 = gH_0 = gh_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = gh_z + gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} \quad (3.4)$$



Obr. 3.1 Grafické znázornění Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu [9]

Kapalina proudí od průřezu 1 k průřezu 2. ztrátová výška  $h_z$  zahrnuje všechny hydraulické ztráty mezi průřezy 1-2. Odečtením ztrátové energie pro jednotlivé průřezy od konstanty Bernoulliho rovnice  $Y_0$  se určí mechanická energie kapaliny jako součet tlakové, kinetické a polohové energie v uvažovaných průřezích. Rozdíl mezi čarou celkové energie a čarou mechanické energie představuje rozptýlenou energii. V tepelně izolované proudové trubici se veškerá rozptýlená energie jako tepelná předává kapalině, čímž vzrůstá její vnitřní energie a stoupá teplota kapaliny. Člen se ztrátovou výškou v rovnici 3.4 narušuje symetrii této rovnice. Pro správné napsání dané rovnice pro skutečnou kapalinu je třeba přičíst součet všech hydraulických ztrát na úseku mezi průřezy 1-2 pro proudovou trubici ke straně ve směru proudění vzdálenější.<sup>9)</sup>

### 3.1 Hydraulické odpory

Při proudění skutečných tekutin vznikají následkem viskozity hydraulické odpory, tj. síly, které působí proti pohybu částic tekutiny. Hydraulický odpor při proudění vzniká vzájemným třením částic proudící tekutiny (při rozdílných rychlostech) a třením tekutin o stěny zařízení. Rozložení rychlostí je po průřezu nerovnoměrné kdy v jednotlivých vrstvách a na stěnách vznikají tečné síly a napětí do viskozity. Při turbulentním proudění dochází k výměně hybnosti a energie mezi jednotlivými vrstvami, což je spojeno s přídavnými silami, které zvyšují hydraulický odpor. Tyto hydraulické odpory se označují jako třecí odpory. Další druh hydraulického odporu vzniká při odtržení proudu od obtékaných těles. Při změnách velikosti nebo směru (popřípadě obou) rychlosti proudu mohou být setrvačné síly tak velké, že tlakové síly nestačí přitlačit tekutinu na obtékané plochy a dochází k odtržení proudu. Mezi stěnami a okrajovou proudnicí odtrženého proudu vzniká oblast s vířící tekutinou. Její pohyb je spojený s překonáváním hydraulických odporů a potřebná energie se odebírá hlavnímu proudu tekutiny. Tím dochází k rozptylu energie a těmto hydraulickým odporům se říká místní.

Práce třecích sil (tečných napětí od viskozity) při proudění skutečných tekutin způsobuje rozptyl energie, což snižuje mechanickou energii proudící tekutiny. Rozptýlená energie se mění v teplo (zvětší se vnitřní energie tekutiny, popřípadě okolí), což je nevratná změna. Rozptýlená energie se nazývá ztrátová, i když název neodpovídá zákonu o zachování energie a vztahuje se na jednotu hmotnosti, tíhy nebo objemu (rov. 3.4).

*Pod pojem hydraulické odpory se zahrnují při proudění skutečné tekutiny všechny účinky, které způsobují rozptýlení energie tekutiny. Rozptýlená energie se projeví na hydraulických odporech jako tlakový úbytek (vynucené proudění v potrubí), nebo úbytkem kinetické energie (výtok z nádob otvory), anebo snížením polohové energie (proudění v korytech, gravitační potrubí).*

*Hydraulické odpory se dělí na třecí odpory a místní odpory. Třecí odpory jsou charakteristické tím, že závisí na délce potrubí. Ztrátový součinitel třecího odporu  $\zeta$  je přímo úměrný délce potrubí. Místní odpory vznikají v místech, kde se mění velikost rychlosti (změna průtočného průřezu), směr rychlosti (zakřivené potrubí), popřípadě velikost i směr rychlosti (armatury) a dochází přitom k odtržení proudu a vzniku vířivé oblasti. Ztrátový součinitel  $\zeta$  místního odporu závisí na geometrii uvažovaného místa (změny průřezu, zakřivení apod.) a proudění (druh kapaliny, rychlost). Tlaková ztráta  $p_z$  je rozdíl tlaků na délce potrubí (u třecích odporů) nebo rozdíl před místním odporem a za ním. Fyzikálně představuje rozptýlenou energii objemové jednotky proudící tekutiny.<sup>9)</sup>*

### 3.2 Třecí odpory v potrubích

*Velikost třecích odporů v potrubích se vyjadřuje rozptýlenou energií, která závisí na druhu proudění skutečné tekutiny a na geometrii potrubí. Při ustáleném proudění v potrubí je tato energie úměrná jeho délce.<sup>9)</sup> Ztráty třením jsou způsobeny vnitřními silami v proudící vazké tekutině a tečným napětím u tuhé stěny potrubí.<sup>10)</sup>*

Ztrátový součinitel  $\zeta_t$  se vyjádří podle rovnice 3.5, kde  $\lambda$  je součinitel tření,  $l$  délka trubky a  $d$  průměr trubky. Součinitel tření u vodorovného úseku potrubí  $\lambda$  je obecně závislý na druhu proudění (podle  $Re$ ) a poměrné drsnosti potrubí (rov. 3.6)

$$\zeta_t = \lambda \frac{l}{d} \quad (3.5)$$

$$k_r = \frac{k}{d} \quad (3.6)$$

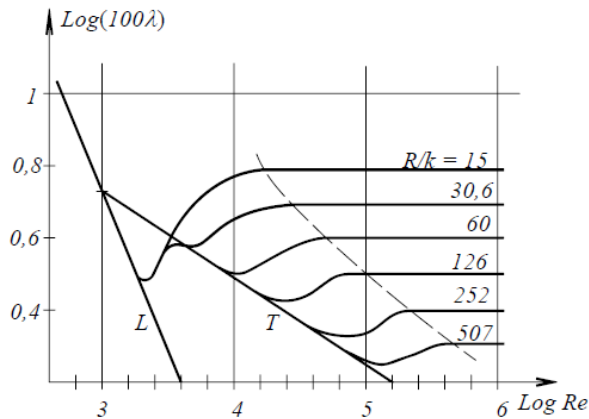
U laminárního proudění lze vypočítat součinitel tření podle rovnice 3.7. Pro turbulentní proudění kapaliny je nutné rozlišit, zda-li je potrubí hydraulicky hladké nebo hydraulicky drsné. V hydraulicky hladkém potrubí s rozsahem  $Re = 2\,300$  až  $8 \cdot 10^4$  je možné použít vzorec 3.8. Zde platí předpoklad, že turbulentní proudění je vyvinuté. Pro  $Re = 10^5$  až  $10^6$  je možné použít rovnici 3.9 [3].

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.7)$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (3.8)$$

$$\lambda = \frac{0,184}{\sqrt[5]{Re}} \quad (3.9)$$

Z turbulentního proudění hydraulicky drsnou trubkou se využívá Nikuradseho diagram (obr. 3.2). Součinitel tření je pak možné vyjádřit pomocí Prandtlovo funkce drsnosti (blíže popsáno v [3]).

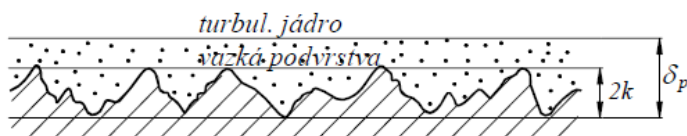


Obr. 3.2 Nikuradseho diagram [3]

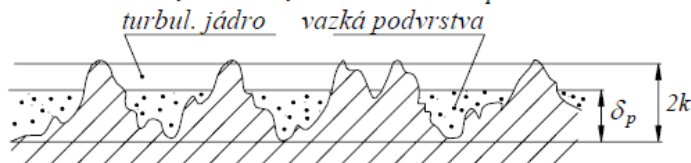
Hydraulickou drsnost potrubí je možné zjistit pomocí tloušťky vazké podvrstvi. Pro hydraulicky hladkou stěnu platí výraz uvedený na obr 3.3, kde je názorné zobrazení střední výšky zdrsnění  $k$  (drsnosti) a tloušťky vazké podvrstvi. Tu je možné spočítat dle rov. 3.10, kde koeficienty  $n$  a  $\beta$  jsou koeficienty dané tabulkou 3.1. Jiné kritérium uvádí [10], kde podmínka hydraulické hladkosti potrubí platí pro podmínku  $\delta_p \geq 5 \cdot \Delta$ , kde  $\Delta$  [mm] je absolutní drsnost potrubí.

$$\delta_p = \left( \frac{0,3164 \cdot \beta}{16} \right)^{\frac{n}{1-n}} \cdot \frac{R}{\text{Re}^{\frac{-0,75-n}{1-n}}} \quad (3.10)$$

**Hydraulicky hladká stěna:  $\delta_p > 2k$**



**Hydraulicky drsná stěna:  $\delta_p < 2k$**

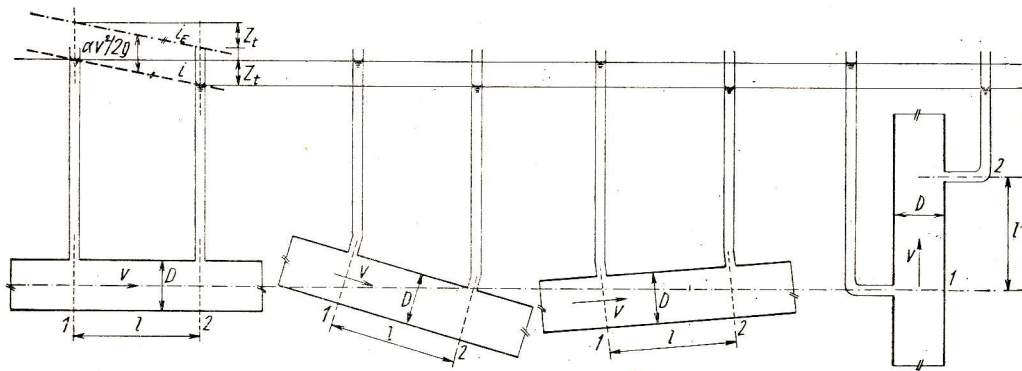


Obr. 3.3 Hydraulické drsnosti potrubí [3]

Tab. 3.1 Koeficienty pro určení vazké podvrstvi [3]

Povrch stěny	drsny	hladký	hladký	hladký	hladký
Re	2 300	45 000	200 000	640 000	2 000 000
n	6	7	8	9	10
$\beta$	0,791	0,817	0,837	0,853	0,866

Na třecí součinitel nemá vliv sklon potrubí. Je lhostejno, zda je potrubí vodorovné, šikmé nebo svislé. Na dané délce se v souladu s Bernoulliho rovnicí naměří vždy stejná ztráta.

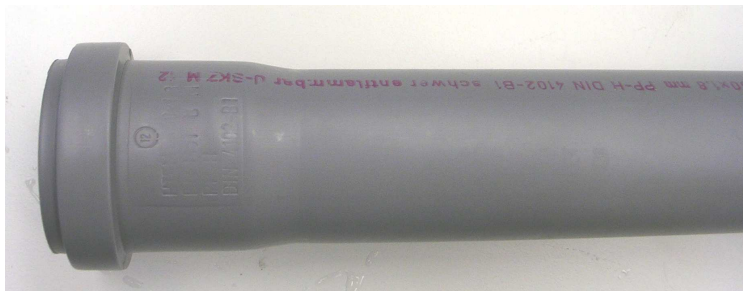


Obr. 3.4 Vliv sklonu trubky na tlakovou ztrátu třením[10].

Tlakovou ztrátu na přímém potrubí je poté možno vyjádřit dle rov. 6.

$$p_z = \rho \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \text{ [Pa]} \quad (3.11)$$

Typická trubka použitá v návrhu je na obr. 3.5. Bližší popis tvaru a vlastností je zpracován v kapitole 4. Každopádně, tyto trubky se spojují zasunutím trubky jedné do hradla trubky jiné. V patřičném hrdle je umístěno těsnění pro zajištění těsnosti spoje.



Obr. 3.5 Rovná trubka části potrubí využitá v návrhu

### 3.3 Místní odpory

V každém potrubí bývají kromě rovných úseků stálého průřezu různá kolena, odbočky, regulační a zavírací orgány (ventil, šoupátko, kohout, klapka), měřící zařízení (clony, dýzy, vodoměry), čističe nebo chladiče. Dále se může měnit průměr potrubí, a to náhle nebo pozvolně. Každá taková část potrubí, u níž se mění vektor rychlosti, tj. velikost, směr nebo velikost a směr rychlosti proudění, vyvolá víření, popřípadě odtržení proudu spojené s rozptylem energie. Energie proudící kapaliny se rozptyluje v místě potrubí, kde dochází ke změně vektoru rychlosti, proto je rozptyl nazván jako místní ztráta. Rozptýlená energie v místních odporech je zpravidla několikrát větší než rozptýlená energie třecími odpory v uvažovaném úseku potrubí. Velikost místních ztrát se vyjadřuje obdobně jako ztráta třením rychlostní výškou a ztrátovým součinitelem nebo ztrátovou měrnou energií. Místní ztrátový součinitel  $\zeta_m$  závisí na druhu místní ztráty, jeho konstrukčních parametrech, drsnosti stěn, tvaru rychlostního profilu a na druhu proudění. Vliv Reynoldsova čísla se projevuje především při malých hodnotách  $Re$ . Při velkých  $Re$  číslech je místní ztrátový součinitel konstantní.

Při změnách průřezů se mění průtočná rychlost a místní ztráty se mohou vyjádřit v závislosti na přítokové nebo výtokové rychlosti (rov. 3.12).<sup>9)</sup>

$$e_z = gh_z = \zeta_1 \frac{w_1^2}{2} = \zeta_2 \frac{w_2^2}{2} \quad (3.12)$$

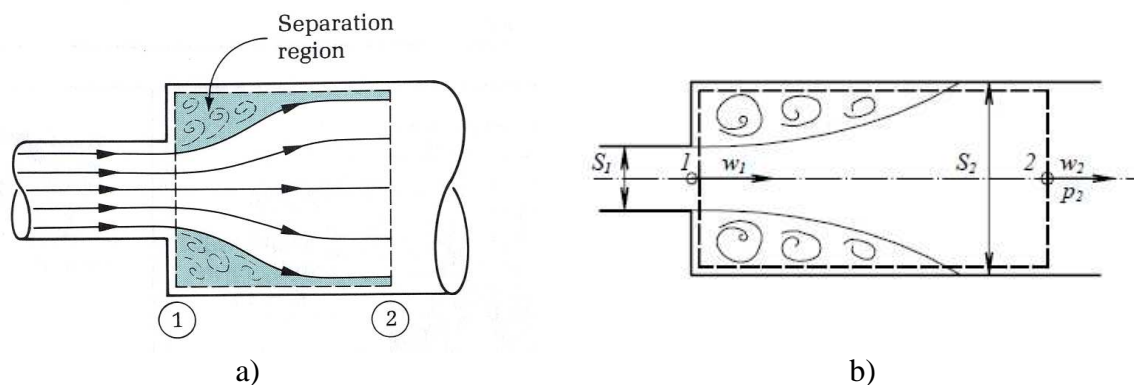
Ztrátové součinitele je možné vzájemně přepočítávat. Pomocí rovnice kontinuity pro nestlačitelné proudění (rov. 3.13) a pro kruhový průřez potrubí je možné ztrátový součinitel vyjádřit podle rovnice 3.14.

$$S_1 w_1 = S_2 w_2 \quad (3.13)$$

$$\zeta_1 = \zeta_2 \left( \frac{w_2}{w_1} \right)^2 = \zeta_2 \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2 = \zeta_2 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (3.14)$$

### 3.3.1 Ztráta náhlým rozšířením průřezu

Při náhlém rozšíření průřezu se odtrhne proud kapaliny od stěny a vytvoří se víry (obr. 3.6 a). Na určité délce rozšířeného potrubí se proud kapaliny rozšíří znovu po celém průřezu. Se změnou rychlosti je spojena změna tlaku. Při rozšíření průřezu klesá střední rychlost, a proto musí stoupnout tlak. Skutečný tlak v rozšířené průřezu  $S_2$  je menší o tlakovou ztrátu. Při proudění skutečné tekutiny v potrubí není rozložení rychlosti po průřezu rovnoměrné, a proto kinetická energie takového proudu je větší, než odpovídá hodnotě zjištěné ze střední rychlosti. Při nerovnoměrném rozdělení rychlostí jsou ztráty při náhlém rozšíření průřezu větší než při rovnoměrném.<sup>9)</sup>



Obr. 3.6 Rozšíření průřezu a) zobrazení proudnic [11], b) kontrolní oblast s rychlostmi [3]

Ztrátový součinitel pro rozšíření průřezu lze odvodit z věty o změně toku hybnosti, základní Bernoulliovy rovnice a rovnice kontinuity. Po zavedení kontrolní plochy (obr. 3.6 b), kde rozšíření proudu na zvětšený průřez proběhne uvnitř kontrolní plochy, a vhodnými matematickými úpravami lze dospět k vyjádření ztrátového součinitele této oblasti. [3] Tento součinitel může být vtažen buď k rychlosti kapaliny vstupující do kontrolní plochy (rov. 3.15), nebo z vystupující rychlosti kapaliny z kontrolní plochy (rov. 3.16). Obě rovnice platí pro potrubí kruhového průřezu se skokovou změnou průřezu.

$$\zeta_r = \left( 1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2 = \left( 1 - \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right)^2 \quad (3.15)$$

$$\zeta_r = \left( \frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2 = \left( \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 - 1 \right)^2 \quad (3.16)$$

Tato ztráta je způsobena víry v rozích mezi odtrženou proudnicí a stěnami potrubí. Při velkém poměru průřezů  $S_2/S_1$  je ztráta větší než vypočtená hodnota, neboť se může rozptýlit celá rychlostní výška.<sup>9)</sup>



Použitá část potrubního systému s rozšířením průtočného průřezu je na obrázku 3.7. Vnitřní průměr zúžené části prvku je 28,4 mm, rozšířené části 36,4 mm.



Obr. 3.7 Charakteristický prvek pro rozšíření a zúžení

Charakter rozšíření průřezu u tohoto prvku se výrazně liší od popsaného výše. Před samotným místem rozšíření je vnitřní průřez mírně zúžen na krátké délce, cca 5-ti mm. Samotný střední průřez je menší než jmenovitý. Dále, zvětšení průřezu probíhá na krátké, cca také 5 mm dlouhé délce. Další rozdíl oproti ideálnímu rozšíření je nesouosost hlavních průřezů. Z těchto důvodů lze předpokládat, že ztrátový součinitel určený dle rovnice 3.15 či rovnice 3.16 je pouze orientační. U takto specifického prvku je možné zjistit ztrátový součinitel pouze měřením.

### 3.3.2 Ztráta náhlým zúžením průřezu

*K této ztrátě dochází v místě náhlého zúžení průřezu, kde se zúžením vyvolá zrychlení kapaliny (obr. 3.8). Proud kapaliny nemůže následkem setrvačnosti sledovat tvar stěn potrubí, a proto se odtrhne a vzniknou vířivé oblasti. Matematické řešení ztráty zúžením vychází ze změny hybnosti kapaliny a volby kontrolní plochy. Ztrátový součinitel je možné opět vyjádřit pomocí vztažení na přítokovou rychlost do kontrolní oblasti  $w_1$  (rov. 3.17) nebo na výstupní rychlost  $w_2$  (rov. 3.18).<sup>9)</sup>*

$$\zeta_z = \left( \frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \frac{S_1}{S_2} \quad (3.17)$$

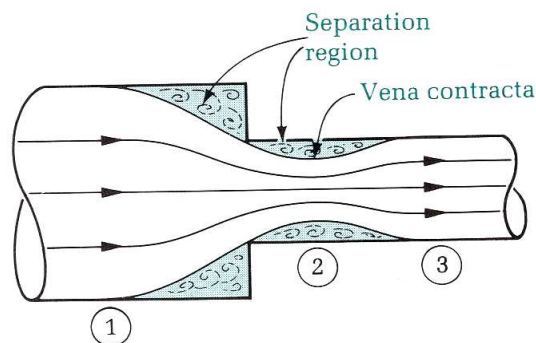
$$\zeta_z = \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right) \quad (3.18)$$

Místní součinitel odporu lze vyjádřit i jinými vzorci, jako například rovnicí 3.19 [10]. Zde vystupuje součinitel zúžení  $\varepsilon$  (rov. 3.20).

$$\zeta_z = \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \quad (3.19)$$

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \frac{S_2}{S_1}} \quad (3.20)$$

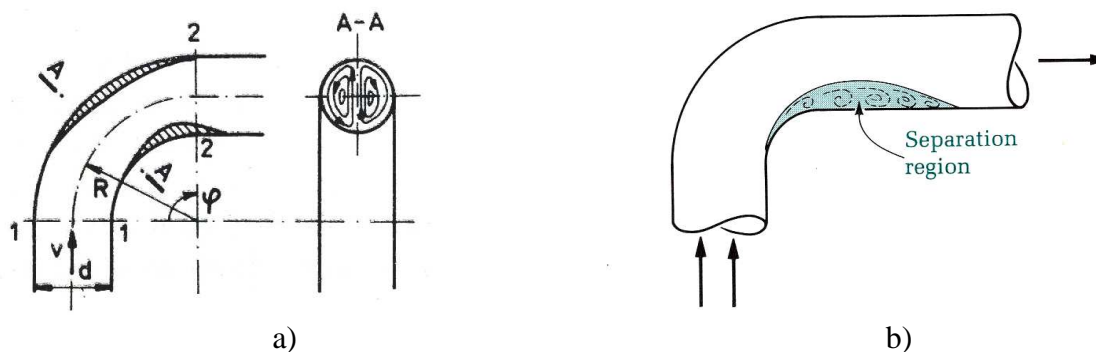
Pro charakteristické zúžení průtočného průřezu byl volen stejný prvek jako pro rozšíření. Zde platí stejná pravidla pro popis tohoto prvku včetně nežádoucích vlivů.



Obr. 3.8 Náhlé zúžení průřezu [11]

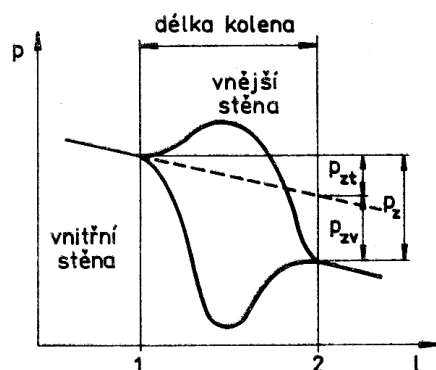
### 3.3.3 Ztráta změnou směru proudění

V každém potrubním systému se vyskytuje prvek, v němž se mění směr rychlosti tekutiny. Tento prvek tvoří zakřivené potrubí, oblouky, kolena nebo kombinace oblouků. V těchto prvcích dochází k rozptylu energie, která se vyjadřuje místní ztrátou změnou směru proudění. U skutečné tekutiny není při průtoku kolenem konstantní rychlost částic (oproti ideální tekutině) po průřezu potrubí. Částice pomalejší brzdí částice rychlejší, přičemž u skutečné kapaliny se částice přemísťují na větší nebo menší poloměr. Vzniká spirálový prostorový pohyb. Součástí tohoto proudění je vířivé proudění v příčném řezu, charakteristické dvěma víry opačného smyslu, tzv. vnější a vnitřní úplav (obr. 3.9 a). Proud na vnitřní hraně kanálu se může odtrhnout, takže vznikají víry i u stěn, například na vnitřní stěně (obr. 3.9 b).<sup>9)</sup>



Obr. 3.9 Proudění v zakřiveném potrubí a) víření kapaliny v příčném řezu [9], b) odtržení proudu na vnitřní hraně [11]

U každého kolena je možné zobrazit jednotlivé ztráty. Na obrázku 3.10 jsou zobrazeny průběhy tlaků na vnitřní a vnější stěně kolena. (čárkovaně je průběh tlaku v přímém potrubí). Je zde také vyznačena tlaková ztráta  $p_z$  a její složky odpovídající třecím ztrátám  $p_{zt}$  a ztrátám vířením  $p_{zv}$  při proudění kapaliny. [9]



Obr. 3.10 Průběh tlakové ztráty v koleni [9]

Ztráta v zakřivených potrubích závisí na tvaru a poloměru zakřivení kolena. Na ztrátový součinitel má také vliv drsnost stěn kolena  $k_s$ ,  $Re$  číslo, rychlostní profil na vstupu do kolena a na výstupu z kolena, tedy na délce rovného potrubí před kolennem, popřípadě za ním. <sup>9)</sup> Existuje nepřeberné množství vzorců pro určení ztrátového součinitele v koleni, které jsou zjištěny empiricky popřípadě odvozeny z naměřených hodnot. Pro analytické výpočty byl použit Weisbachův vzorec, který platí pro čtvrtkruhové koleno (rov. 3.21). Tento součinitel je pak možné přepočítat podle skutečného zakřivení střednice kolene skrze skutečný úhel oblouku (rov. 3.22).

$$\zeta_{90} = 0,131 + 0,163 \cdot \left( \frac{D}{r_s} \right)^{3,5} \quad (3.21)$$

$$\zeta_k = \zeta_{90} \cdot \frac{\delta}{90} \quad (3.22)$$

Použitá kolena (obr. 3.11) mají středový úhel oblouku  $87^\circ$ . Vzhledem ke spojení trubek však lze předpokládat, že dojde k mírné deformaci kolene, a tedy že středový úhel oblouku je  $90^\circ$ . Nicméně, tato kolena obsahují výstupek do vnitřního průtočného průřezu v ose kolene. Tímto dochází k přidavným předem nedefinovatelným ztrátám, které pak nemohou být přesně vyjádřeny pomocí rovnice 3.21. Ve výpočtech v další kapitole bylo využito naměřeného středního poloměru zakřivení, kterýžto pro tato kolena nabývá přibližně hodnoty 20 mm.

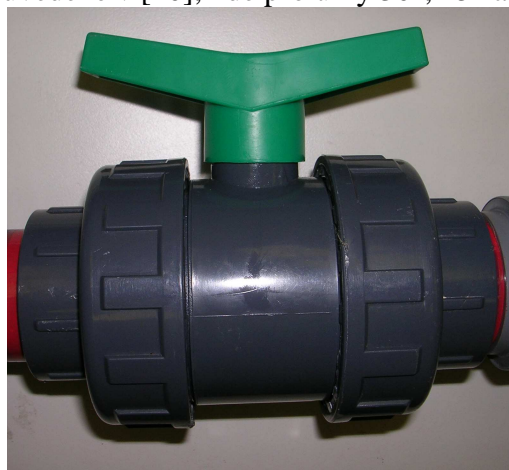


Obr. 3.11 Foto použitých kolien

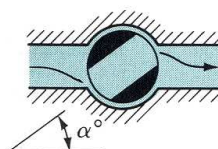
### 3.3.4 Odpory v armaturách

Armatury (ventily, šoupátka, kohouty, a klapky) slouží k uzavření potrubí nebo k regulaci průtoku či tlaku. Při zcela otevřených uzávěrech mají být ztráty co nejmenší. Při plném otevření mají nejmenší odpor šoupátka a kohouty. U ventilů jsou ztráty větší (až 25x) a závisí na zakřivení proudnic ve ventilovém tělese. Hydraulický odpor je způsoben jednak třením, ale hlavně vířením. Deskou šoupátka, ventilu, klapky nebo tělesem kohoutu se zužuje průtočný průřez. Proud kapaliny nesleduje okrajovými proudnicemi přesně změny průřezu a dochází k odtržení proudnic a vzniku vířivých oblastí. Tyto jevy vyvolávají odpor spojený s rozptylem energie. Ztrátový součinitel je zjišťován měřením. Obecně závisí na druhu a konstrukčním provedení uzavírací či regulační armatury, na jejím poměrném otevření a na  $Re$  číslu.<sup>9)</sup>

Jako uzavírací prvek v obvodu byl použit kulový kohout (obr. 3.12 a). U tohoto kohoutu by při plném otevření neměla vznikat téměř žádná ztráta. Při pootočení kohoutu, tedy uzavírání průtočného průřezu se ztrátový součinitel výrazně zvyšuje. Přibližné hodnoty ztrátových součinitelů jsou uvedeny na obrázku 3.12 b pro různá uzavření kohoutu. Zde je ztrátový součinitel značen písmenem  $K$ . Nicméně, pro ztrátový součinitel byly voleny hodnoty uvedené v [10], kde pro úhly  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $60^\circ$  nabývá hodnot 5,5, 31 a 210.



a)



Ball valve

$\alpha^\circ =$	0	10	20			
$K =$	0.05	0.29	1.56			
$\alpha^\circ =$	30	40	50	60	70	80
$K =$	5.47	17.3	25.6	206	485	$\infty$

b)

Obr. 3.12 Kulový kohout a) foto, b) hodnoty ztrátového součinitele [11]

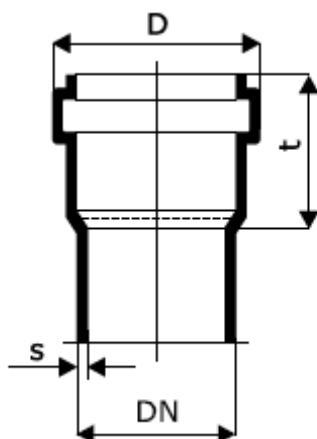
## 4 Návrh sestavy

### 4.1 Potrubní systém

Pro potrubní systém byly zvoleny odpadní trubky a tvarovky z propylenu. Oficiální značení systému je HT-System. Tato odpadní potrubí odolávají vysokým teplotám a jsou vyráběné podle ČSN EN 1451-1. Systém je určen k výstavbě připojovacího, odpadního, větracího a svodného potrubí uvnitř budov. Některé základní technické údaje těchto polypropylenových prvků jsou uvedeny v tabulce 4.1. Základní charakteristické rozměry těchto trubek jsou vyznačeny na obrázku 4.1. Hodnoty těchto rozměrů jsou pro použité trubky uvedeny v tabulce 4.2.

Tab. 4.1 Vybrané technické údaje HT-Systemu [12]

Technické údaje	Symbol	Hodnota a veličina
Třída hořlavosti dle DIN 4102		B2
Hustota	$\rho$	0,95 g/cm <sup>3</sup>
Napětí v ohybu	$\sigma_o$	43 N/mm <sup>2</sup>
Modul pružnosti	E	1 275 N/mm <sup>2</sup>
Tepelná vodivost	$\lambda$	0,22 W/K·m
Délkový koeficient teplotní roztažnosti	$\alpha$	1,2·10 <sup>-4</sup>



Obr. 4.1 Základní rozměry HT-Systemu [12]

Potrubní systém je připevněn ke stojanu s deskou pomocí dvou ocelových konzol. Dále je použito různých podpěr pro zajištění nevysunutí jednotlivých trubek při průtoku kapaliny.

Tab. 4.2 Hodnoty základních rozměrů použitých trubek [12]

DN	s [mm]	D [mm]	t [mm]	kg/m
32	1,8	44	40	0,19
40	1,8	53	55	0,24
50	1,8	63	56	0,31

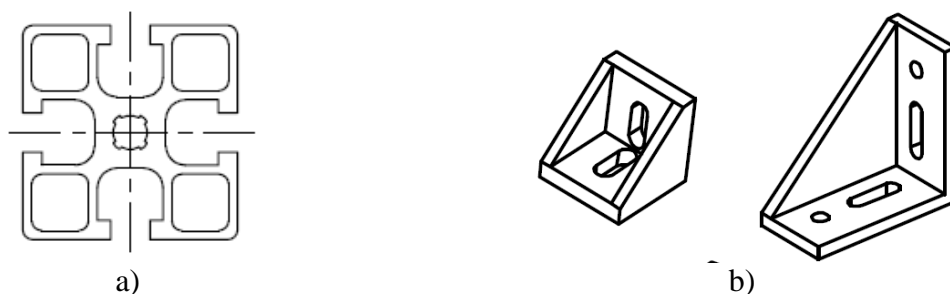
Drsnost vnitřního povrchu potrubí z polypropylenu se podle [12] pohybuje kolem 0,001 mm. Tato hodnota také odpovídá rozsahu drsností pro nové nepotřebované plastové trubky z PVC, PP nebo PE, kdy například v [13] je uveden rozsah absolutních drsností od 0,0015 až do 0,01 mm. Hodnota drsnosti je velmi důležitá pro stanovení hydraulické drsnosti potrubí a třecího součinitele. Pro všechny výpočty byla uvažována hodnota 0,002 mm.

## 4.2 Nádrž

Pro zásobu vody v okruhu byla zvolena plexisklová nádrž o rozměrech 1 000 x 500 x 350 mm. Nádrž je spleaná z jednotlivých desek, které jsou také k sobě přišroubovány z pevnostních důvodů. Na čelní desce je vytvořen otvor, ve kterém je umístěn gumo-ocelový průchod se závitem pro vytékání kapaliny (foto je patrné v přílohách).

## 4.3 Stojany

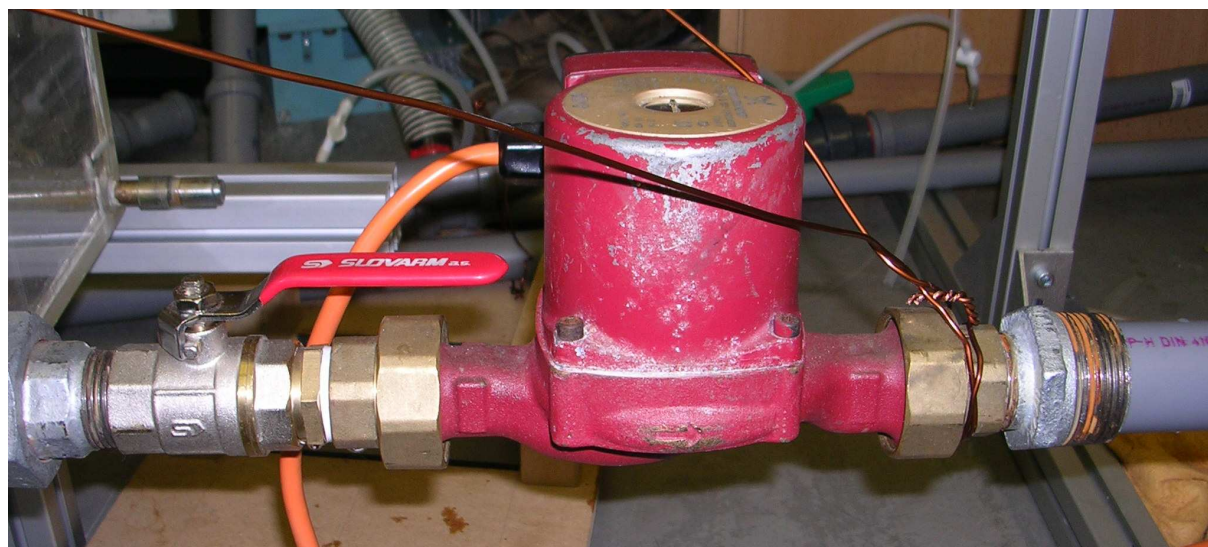
V rámci návrhu byly navrženy dva stojany z hliníkových profilů (obr. 4.2 a). Jeden stojan slouží pro podporu nádrže, druhý pro podporu desky s trubicemi. Každý stojan se skládá z několika dílů, které jsou k sobě připevněny velkými nebo malými úhelníky (obr. 4.2 b) pomocí šroubů DIN 912 a čtvercových matic s jazýčkem. Rozměry hliníkového stojanu pro nádrž jsou 800 x 600 x 600 mm, stojanu pro desku s trubicemi 1 100 x 800 x 1 550 mm. Dřevotřísková deska má rozměry 1 000 x 180 x 800 mm a je připevněna ke stojanu pomocí kolíků, které jsou přilepeny k desce a zasunuty do drážek profilů.



Obr. 4.2 Obrázky použitých profilů a úhelníků a) řez profilem, b) 3D pohled na úhelníky [15]

## 4.4 Redukce

Mezi nádrží a čerpadlem tvoří sestavu systém několika mosazných redukcí a mosazného kohoutu. Kohout slouží pro uzavření přítoku vody do systému potrubí z nádrže. Mezi kohoutem a čerpadlem jsou umístěny mosazné redukce za účelem možného připojení čerpadla do celé sestavy. Totéž platí i pro mosazné a ocelové redukce mezi čerpadlem a potrubním systémem (obr. 4.3).



Obr. 4.3 Systém redukcí před a za čerpadlem

## 4.5 Čerpadlo

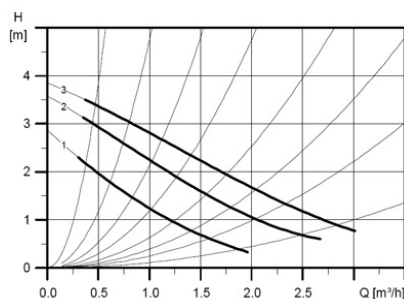
V návrhu bylo využito čerpadlo Grundfos UPS 25-40 B 230V 180mm TUV (obr. 4.4 a). Čerpadlo má rotor zapouzdřený izolační membránou, tj. čerpadlo a motor tvoří kompaktní jednotku bez ucpávky a je opatřeno pouze dvěma těsnicími kroužky. Ložiska jsou mazána čerpanou kapalinou. Pracovní oblast čerpadla je zobrazena v grafu 4.4 b). Důležité parametry jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Tab. 4.3 Vybrané parametry čerpadla [15]

Maximální provozní tlak	10 bar
Potravní přípojka	G 1 1/2
Vzdálenost mezi sacím a výtlačným hrdlem	180 mm
Příkony pro otáčkové stupně 1, 2, 3	25, 35, 45 W
Napájecí frekvence	50 Hz
Jmenovité napětí	1 x 230 V
Proudy pro otáčkové stupně 1, 2, 3	0,12, 0,16, 0,2 A



a)



b)

Obr. 4.4 Čerpadlo UPS 25-40 B a) foto [16], b) pracovní oblast [16]

## 4.6 Schéma okruhu

Zjednodušené schéma celého měřicího okruhu je patrné v příloze 1. V další kapitole nepopsané díly a prvky jsou v příloze 4. Význam jednotlivých symbolů je uveden v téže příloze. Tato topologie odpovídá reálnému umístění jednotlivých úseků i odběrů kapaliny. Pro celkový počet redukcí je provedeno zjednodušení ve schématu, kdy redukce před i za čerpadlem jsou označeny jako soustava redukcí. Jednotlivé úseky se skládají z těchto částí:

- úsek 1            koleno
- úsek 2            koleno, krátká svislá trubka
- úsek 3            dlouhá trubka s průměrem  $d_1$
- úsek 4            koleno, krátká svislá trubka
- úsek 5            tvar U
- úsek 6            koleno, krátká svislá trubka
- úsek 7            zúžení
- úsek 8            dlouhá trubka s průměrem  $d_2$
- úsek 9            rozšíření
- úsek 10          koleno, krátká svislá trubka
- úsek 11          koleno, krátká vodorovná trubka
- úsek 12          kohout

## 5 Analytický výpočet

Všechny níže provedené výpočty vychází z naměřené hodnoty průtoku, jelikož není možné předem spolehlivě zjistit rychlost proudění kapaliny v trubkách. Průtok, a tedy i rychlost proudění, závisí na příkonu čerpadla ( $P$  [W]) a na zaškrvení výstupního kohoutu  $O$  [°] v realizovaném obvodu (tab. 5.1). Všechny tlakové ztráty závisí na kvadrátu rychlosti, proto je nejprve nutné provést reálné měření a ze zjištěných potřebných hodnot zpracovat analytický výpočet. Popis jednotlivých úseků, jejich tlakové ztráty, výpočet rychlostí, místních ztrátových součinitelů a třecích ztrátových součinitelů je zpracováno níže.

Tab. 5.1 Vstupní parametry k výpočtům

$P$ [W]	$O$ [°]	$\dot{V}$ [ $m^3 / s$ ]	$w$ [m/s]
45	30	$0,659 \cdot 10^{-3}$	0,524
35	30	$0,581 \cdot 10^{-3}$	0,558
25	45	$0,341 \cdot 10^{-3}$	0,328

### 5.1 Hydraulická drsnost

absolutní drsnost:  $\Delta=0,002$  mm

tloušťka vazké podvstvy:

$$\delta_p = \left( \frac{0,3164 \cdot \beta}{16} \right)^{\frac{n}{1-n}} \cdot \frac{R}{\text{Re}^{\frac{-0,75 \cdot n}{1-n}}} = \left( \frac{0,3164 \cdot 0,817}{16} \right)^{\frac{7}{1-7}} \cdot \frac{0,0364}{19\,074^{\frac{-0,75 \cdot 7}{1-7}}} =$$

$$= 4,425 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,44 \text{ mm}$$

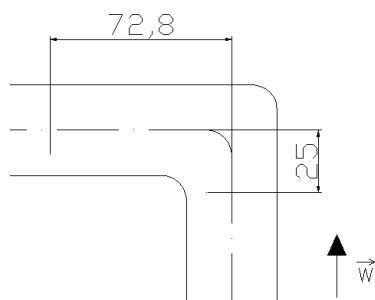
$\delta_p \geq 5 \cdot \Delta$ , a to platí pro všechny Re čísla, tedy pro všechny vyskytující se rychlosti proudění na jednotlivých úsecích.

### 5.2 Tlakové ztráty

První měřený úsek je samotné koleno. Vstupní odběr kapaliny je umístěn 135 mm před výstupní kolmou osovou částí kolena a výstupní 100 mm za vstupní kolmou osovou částí kolena. Vzhledem k nadefinovanému úseku samotného kolena, který je kratší, než-li skutečné rozměry tohoto úseku, zde také dochází ke ztrátě třením před a za kolénem a také přeměně statického tlaku na hydrostatický. Vyšší umístění druhého odběru 2 zapříčiní, že přeměna statického tlaku na hydrostatický nebude stejně veliká jako u odběru 1, bude nižší. Jelikož jsou všechny trubice s měřítky umístěny v jedné rovině, přeměna na hydrostatický tlak se na výšce vodního sloupce neprojeví, je tedy eliminován tento vliv. Všechny tlakové ztráty dle teoretického předpokladu jsou zahrnuty ve výpočtovém vzorci.

Tvar v experimentu použitých kolén téměř vylučuje aplikaci univerzálního či jinak obecných vzorců pro určení místního ztrátového součinitele. Kolena jsou téměř pravouhlá a obsahují vnitřní výstupy do prostoru proudící kapaliny. Dále, samotné spojení mezi kolénem a jiným úsekem není z hlediska tvaru ideální. Vznikají zde prohlubně v profilu, kde vznikají další tlakové ztráty. Velikost těchto ztrát je předem taktéž nezjistitelná a je nutné je zjistit měřením. Závisí na správnosti spojení trubek co do přeného dosednutí. Aby byl tento nepříznivý vliv zachycen ve výpočtech, je jedním z důvodů počítání tlakové ztráty u kolene ještě také třením v krátkém úseku před, popřípadě za kolénem. Jako samotné koleno je tedy brán úsek 25 mm před osou kolene a dvojnásobek vnitřního průměru kolene za osou kolene (obr. 5.1).





Obr. 5.1 Určení vzdáleností pro výpočet samotné ztráty v koleni

$$w_1 = \frac{\dot{V}_1}{S_1} = \frac{0,659 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi \cdot 0,0364^2}{4}} = 0,524 \text{ m/s}$$

$$Re_1 = \frac{w_1 \cdot D_1}{\nu} = \frac{0,524 \cdot 0,0364}{1 \cdot 10^{-6}} = 19\,074$$

$$\lambda_1 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{19\,074}} = 0,0269$$

$$\zeta_k = 0,131 + 0,163 \cdot \left(\frac{D_1}{r_s}\right)^{3,5} = 0,131 + 0,163 \cdot \left(\frac{0,0364}{0,02}\right)^{3,5} = 1,457$$

$$\begin{aligned} \delta p_{1-2} &= \lambda_1 \cdot \frac{l_1 + l_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \zeta_k \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,11 + 0,0282}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} + \\ &+ 1,457 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 14 + 200 = 214 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Přepočet tlakové ztráty na výšku vodního sloupce je zobrazen níže. Tlaková ztráta je tedy přímo úměrná rozdílu výšek vodních hladin v trubcích z příslušných odběrů.

$$\Delta h_{1-2} = \frac{\delta p_{1-2}}{\rho \cdot g} = \frac{214}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,0218 \text{ m} = 21,8 \text{ mm}$$

Druhý úsek tvoří koleno a vertikálně umístěná trubka. Vzhledem k upevnění systému trubek ke stojanu s trubicemi je tato trubka skloněna o úhel cca 30° od svislé osy. Uplatňují se zde opět tlaková ztráta v koleni, třením ve svislé trubce a části vodorovného úseku, a také změna statického tlaku na hydrostatický (opět neměřitelné na výšce vodního sloupce a pro další úseky nezmiňováno).

$$\begin{aligned} \delta p_{2-3} &= \lambda_1 \cdot \frac{l_1 + l_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \zeta_k \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,0522 + 0,635}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} + \\ &+ 1,457 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 70 + 200 = 270 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\Delta h_{2-3} = \frac{\delta p_{2-3}}{\rho \cdot g} = \frac{270}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,0275 \text{ m} = 27,5 \text{ mm}$$

Na dalším úseku dochází pouze ke ztrátě třením. Celý úsek je tvořen jen trubkou o průměru 40 mm, kdy odběry jsou od sebe vzdáleny 1 355 mm. Před vstupním odběrem je volena krátká uklidňovací délka s ohledem na přesnost měření. Ztráty vznikající v tomto krátkém předcházejícím úseku jsou zahrnuty v předešlém úseku.

$$\delta p_{3-4} = \lambda_1 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{1,355}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} = 138 \text{ Pa}$$

$$\Delta h_{3-4} = \frac{\delta p_{3-4}}{\rho \cdot g} = \frac{138}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,0141 \text{ m} = 14,1 \text{ mm}$$

Čtvrtý úsek tvoří koleno a vertikální trubka. Oproti úseku 2 má vertikální trubka delší rozměr a je tedy možné pomoci jí sledovat vliv délky vertikálního potrubí. Dochází zde k místní ztrátě v kolenu a ztrátě třením.

$$\delta p_{4-5} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1 + l_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \zeta_k \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,1 + 0,6372}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} +$$

$$+ 1,457 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 75 + 200 = 275 \text{ Pa}$$

$$\Delta h_{4-5} = \frac{\delta p_{4-5}}{\rho \cdot g} = \frac{275}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,028 \text{ m} = 28 \text{ mm}$$

V pátém úseku jsou spojena dvě kolena tak, aby tvořila prvek ve tvaru písmene U (obrázek v příloze). Oba krajní odběry jsou voleny ve vzdálenosti 120 mm od vodorovné osy kolen. Skrze výpočet zde platí stejné předpoklady pro určení ztráty v kolenu, popřípadě třením před nebo za kolenem. Nicméně, použité trubky, potažmo kolena, neumožňují sestavit hladký tvar U. Je zde vodorovný úsek, který je dlouhý přibližně 100 mm od kolmých os kolen. Toto výrazně ovlivňuje přesnost spočítané tlakové ztráty v daném úseku a nelze použít vzorec pro daný úsek (pouze orientačně, kdy místní ztrátový součinitel je dvojnásobný). Každopádně, tohoto předpokladu je uváženo ve výpočtu [10].

$$\delta p_{5-6} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1 + l_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + 2 \cdot \zeta_k \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,095 + 0,0272}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} +$$

$$+ 2 \cdot 1,457 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 12 + 400 = 412 \text{ Pa}$$

$$\Delta h_{5-6} = \frac{\delta p_{5-6}}{\rho \cdot g} = \frac{412}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,042 \text{ m} = 42 \text{ mm}$$

Úsek 6 je obdobně jako úsek 4 tvořen kolenem a svislým úsekem potrubí a platí zde stejné předpoklady pro vznikající ztráty.

$$\delta p_{6-7} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1 + l_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \zeta_k \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,0122 + 0,525}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} +$$

$$+ 1,457 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 55 + 200 = 255 \text{ Pa}$$

$$\Delta h_{6-7} = \frac{\delta p_{6-7}}{\rho \cdot g} = \frac{255}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,026 \text{ m} = 26 \text{ mm}$$

Sedmý úsek je tvořen zúžením profilu. Před samotným místem zúžení je volen krátký úsek potrubí, který má zajistit dostatečné uklidnění proudění. Odběr kapaliny za zúžením je volen ve vzdálenosti 140 mm od charakteristického místa. Tato vzdálenost by měla opět zajistit dostatečné uklidnění kapaliny. Vzorce použité pro výpočet ztrátového součinitele jsou také pouze orientační. Zúžení v trubce není provedeno v jednom místě, ale na krátkém úseku, který obsahuje mimo jiné výstup stěny potrubí do průtočného průřezu. Jinak řečeno, v místě zúžení je průtočný průřez menší, než jeho jmenovitá hodnota. Dále, umístění vnitřních průměrů není

souosé, tedy menší průměr není ve středu vnitřního průměru. Z toho důvodu je použití níže uvedeného vzorce pro místní ztrátový součinitel také jen orientační. Samotné zúžení vnějších průměrů je 40 mm na 32 mm a tedy vnitřních průměrů 36,4 mm na 28,4 mm.

$$\zeta_z = \left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \cdot \frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{\frac{\pi \cdot 0,0364^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,0284^2}{4}} - 1\right) \cdot \frac{\frac{\pi \cdot 0,0364^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,0284^2}{4}} = 1,056$$

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{S_1}{S_2} = 0,524 \cdot \frac{\frac{\pi \cdot 0,0364^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,0284^2}{4}} = 0,862 \text{ m/s}$$

$$Re_2 = \frac{w_2 \cdot D_2}{\nu} = \frac{0,862 \cdot 0,0284}{1 \cdot 10^{-6}} = 24\,481$$

$$\lambda_2 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_2}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{24\,481}} = 0,0253$$

$$\delta p_{7-8} = \lambda_1 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \lambda_2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} + \zeta_z \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,0636}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} + 0,0253 \cdot \frac{0,0672}{0,0284} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,862^2}{2} + 1,056 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 6 + 22 + 145 = 173 \text{ Pa}$$

$$\Delta h_{7-8} = \frac{\delta p_{7-8}}{\rho \cdot g} = \frac{173}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,0176 \text{ m} = 17,6 \text{ mm}$$

Osmý úsek je podobně jako třetí úsek tvořen pouze vodorovnou trubkou, kde dochází k tlakové ztrátě třením. Úsek je dlouhý 615 mm mezi umístěnými odběry. Vstupní uklidňující délka je zahrnuta v předešlém úseku ve formě tlakové ztráty třením. Výstupní uklidňující délka trubky slouží jako vstupní část pro rozšíření průtočného průřezu potrubí. Vnitřní průměr trubky je 28,4 mm.

$$\delta p_{8-9} = \lambda_2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} = 0,0253 \cdot \frac{0,615}{0,0284} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,862^2}{2} = 204 \text{ Pa}$$

$$\Delta h_{8-9} = \frac{\delta p_{8-9}}{\rho \cdot g} = \frac{204}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,0208 \text{ m} = 20,8 \text{ mm}$$

Úsek číslo 9 tvoří rozšíření vnitřního průtočného průřezu ze 28,4 mm na 36,4 mm. Platí zde stejné předpoklady pro analytický výpočet tlakové ztráty jako pro zúžení průřezu. Jelikož je charakteristický prvek stejný, jako pro zúžení, stanovení ztrátového součinitele je opět jen orientační. Uklidňující délka je dlouhá 100 mm a je volena pouze s ohledem na připojení odběru k předešlému úseku.

$$\zeta_r = \left(1 - \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2\right)^2 = \left(1 - \left(\frac{\frac{\pi \cdot 0,0284^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,0364^2}{4}}\right)^2\right)^2 = 0,153$$

$$\begin{aligned} \delta p_{9-10} &= \lambda_1 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \lambda_2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} + \zeta_r \cdot \rho \cdot \frac{w_2^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,1}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} + \\ &0,0253 \cdot \frac{0,0672}{0,0284} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,862^2}{2} + 0,153 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,862^2}{2} = 10 + 17 + 57 = 84 \text{ Pa} \\ \Delta h_{9-10} &= \frac{\delta p_{9-10}}{\rho \cdot g} = \frac{84}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,009 \text{ m} = 9 \text{ mm} \end{aligned}$$

Další úsek, úsek číslo 10, se skládá z kolene, a svislého potrubí. Platí zde stejné předpoklady jako pro úsek 2.

$$\begin{aligned} \delta p_{10-11} &= \lambda \cdot \frac{l_1 + l_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \zeta_k \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,06 + 0,2572}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} + \\ &+ 1,457 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 32 + 200 = 232 \text{ Pa} \\ \Delta h_{10-11} &= \frac{\delta p_{10-11}}{\rho \cdot g} = \frac{232}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,0236 \text{ m} = 23,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

Úsek číslo 11 je charakterizován ztrátou v koleni a třením ve vodorovně umístěné trubce. Jelikož je vstupní odběr umístěn jen 130 mm před kolmou osou kolene, je zde zanedbatelný vliv výšky odběru. Jinak řečeno, lze zde pozorovat samostatně ztrátu třením a ztrátu koleni s prvním úsekem.

$$\begin{aligned} \delta p_{11-12} &= \lambda_1 \cdot \frac{l_1 + l_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \zeta_k \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,105 + 0,4022}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} + \\ &+ 1,457 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 51 + 200 = 251 \text{ Pa} \\ \Delta h_{11-12} &= \frac{\delta p_{11-12}}{\rho \cdot g} = \frac{251}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,0256 \text{ m} = 25,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

Poslední úsek je tvořen uzavíracím kohoutem. Před tělem kohoutu je volena uklidňující délka potrubí o délce 110 mm. Za tělem kohoutu je umístěn odběr ve vzdálenosti 90 mm. Výpočet ztrátového součinitele je taktéž pouze orientační vzhledem k vnitřním nerovnostem průtočného průřezu. Pro plně otevřený kohout může nabývat hodnota místního ztrátového součinitele nula až jedna. Výpočet ztrátového součinitele je proveden vždy pro nastavené otevření kohoutu. Pro největší příkon čerpadla je toto uzavření cca 30° a ztrátový součinitel nabývá hodnoty 5,5.

$$\begin{aligned} \delta p_{12-13} &= \lambda_1 \cdot \frac{l_1 + l_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} + \zeta_{koh} \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = 0,0269 \cdot \frac{0,11 + 0,09}{0,0364} \cdot \frac{1\,000 \cdot 0,524^2}{2} + \\ &+ 5,5 \cdot 1\,000 \cdot \frac{0,524^2}{2} = 20 + 755 = 775 \text{ Pa} \\ \Delta h_{12-13} &= \frac{\delta p_{12-13}}{\rho \cdot g} = \frac{775}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,077 \text{ m} = 77 \text{ mm} \end{aligned}$$

Obdobně jako uvedené výpočty pro nejvyšší příkon čerpadla lze provést výpočty i pro další příkony. Nicméně, tyto výpočty se liší pouze v číslech, nikoliv vzorcích a tedy nejsou zde podrobně vypracovány, pouze uvedeny v tabulkách 5.2 a 5.3. Rozdíly výšek vodních sloupců jsou zobrazeny v tabulce 5.4 pro všechny příkony čerpadla.

Tab. 5.2 Výpočtové veličiny

	$w_1$ [m/s]	$w_2$ [m/s]	$Re_1$ [-]	$Re_2$ [-]	$\lambda_1$ [-]	$\lambda_2$ [-]
P=45 W	0,524	0,672	19 074	24 481	0,0269	0,0253
P=35 W	0,558	0,917	20 311	33 379	0,0265	0,0234
P=25 W	0,328	0,539	11 939	19 620	0,0303	0,0267

Tab. 5.3 Vypočtené tlakové ztráty na jednotlivých úsecích [Pa]

	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13
P=45 W	214	270	138	275	412	255	173	204	84	232	251	775
P=35 W	243	305	154	311	468	288	195	227	98	263	284	879
P=25 W	84	109	61	111	161	102	69	84	35	92	101	1 677

Tab. 5.4 Vypočtené rozdíly výšek hladin v trubicích na jednotlivých úsecích [mm]

	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13
P=45 W	21,8	27,5	14,1	28	42	26	17,6	20,8	9	23,6	25,6	77
P=35 W	24,8	31,1	15,7	31,7	47,7	29,4	19,9	23,1	10	26,8	29	89,6
P=25 W	8,6	11,1	6,2	11,3	16,4	10,4	7	8,6	4,6	9,4	10,3	170,9

## 6 Naměřené hodnoty

V následujících tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty výšek vodních sloupců v jednotlivých trubicích a z nich dopočtené tlakové ztráty na jednotlivých úsecích. Pro grafické zobrazení tlakové ztráty je vhodné vyjádřit změnu tlaku na jednotlivých úsecích pomocí bodového diagramu. I když nejsou všechny naměřené závislosti porovnatelné, jsou uvedeny v grafu 6.1.

Tab. 6.1 Výšky hladin vody v trubicích a rozdíly tlaků  $\dot{V} = 0,659 \text{ l/s}$ ,  $P = 45 \text{ W}$

číslo odběru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
výška vodního sloupce $h$ [mm]	770	740	710	690	660	610	575	525	485	505	480	455	---
rozdíl výšek $\Delta h$ [mm]	20		20		40		50		20		25		---
změna tlaku $\delta p$ [Pa]	196		196		392		491		196		245		---
	---	294		294		343		392		245		---	

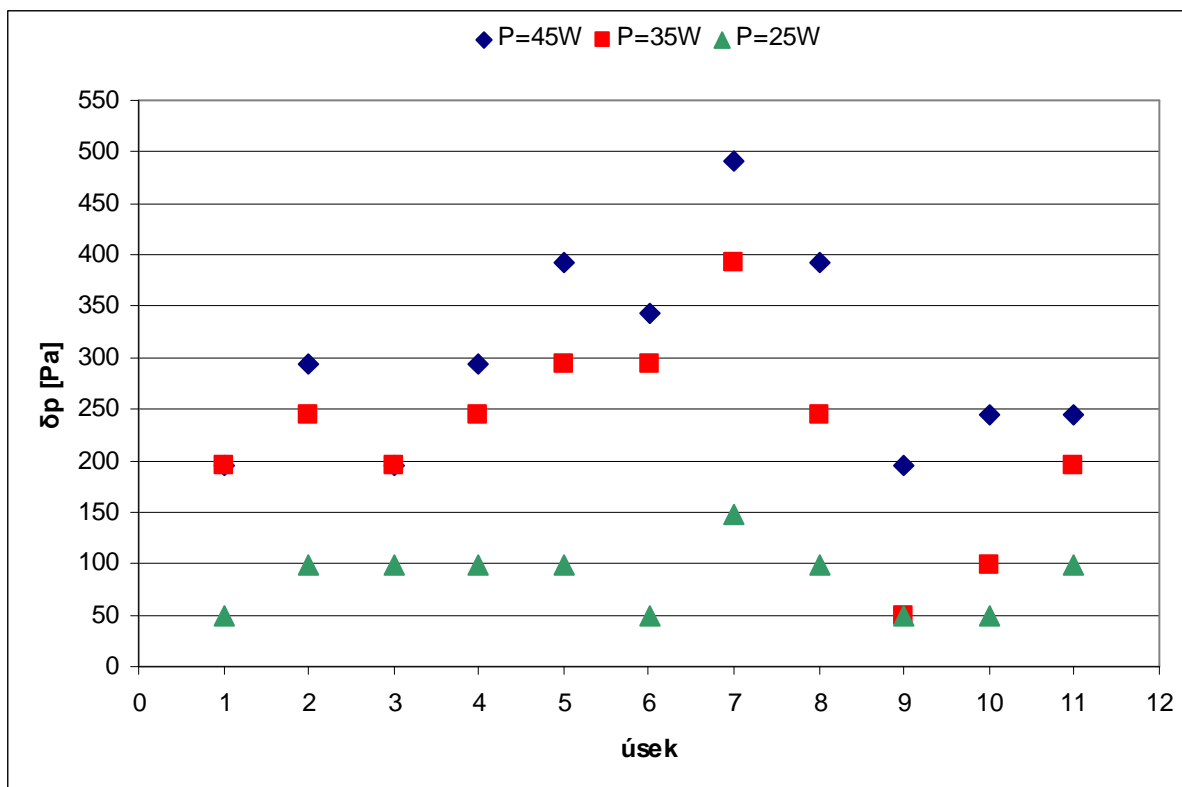
Tab. 6.2 Výšky hladin vody v trubicích a rozdíly tlaků  $\dot{V} = 0,581 \text{ l/s}$ ,  $P = 35 \text{ W}$

číslo odběru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
výška vodního sloupce $h$ [mm]	490	470	445	425	400	370	340	300	275	280	270	250	---
rozdíl výšek $\Delta h$ [mm]	20		20		30		40		5		20		---
změna tlaku $\delta p$ [Pa]	196		196		294		392		49		196		---
	---	245		245		294		245		98		---	

Tab. 6.3 Výšky hladin vody v trubicích a rozdíly tlaků  $\dot{V} = 0,341 \text{ l/s}$ ,  $P = 25 \text{ W}$

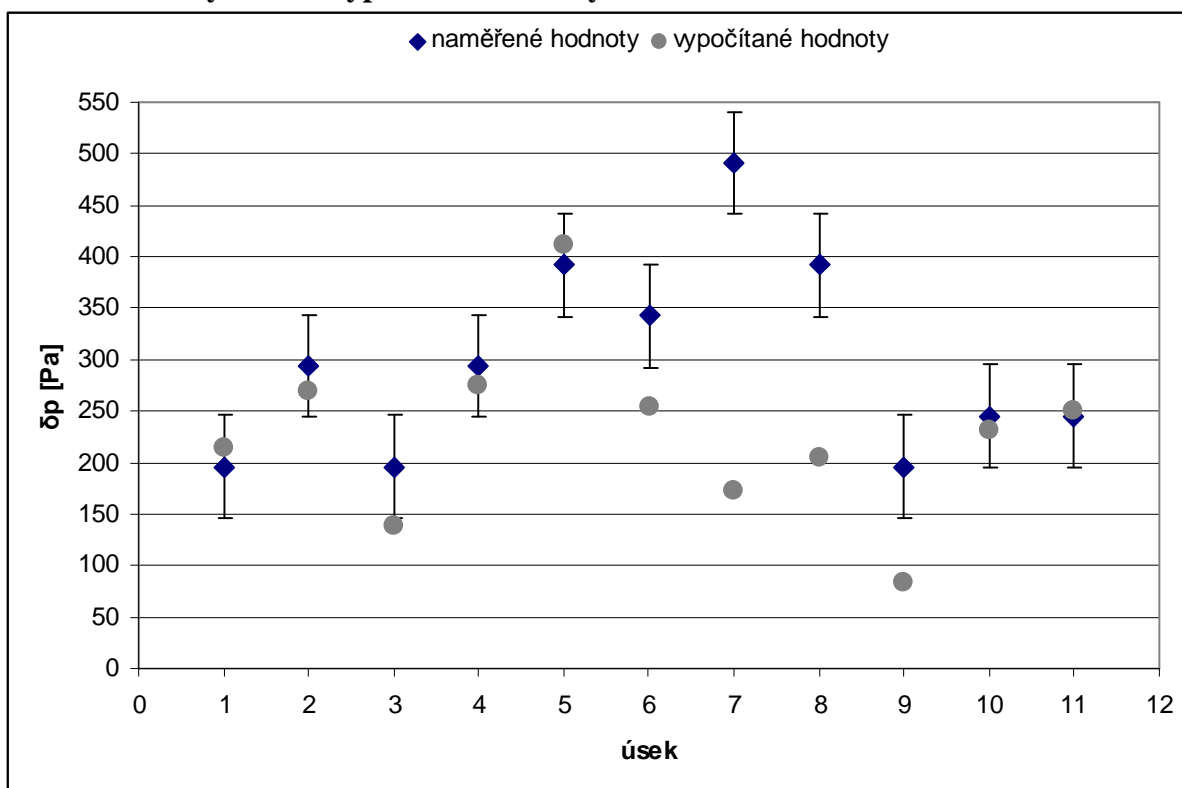
číslo odběru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
výška vodního sloupce $h$ [mm]	630	625	615	605	595	585	580	565	555	560	555	545	---
rozdíl výšek $\Delta h$ [mm]	5		10		10		15		5		10		---
změna tlaku $\delta p$ [Pa]	49		98		98		147		49		98		---
	---	98		98		49		98		49		---	

Při aktivním režimu, když protékala voda potrubím a bylo prováděno měření, docházelo ke kolísání výšky vodního sloupce. Tato změna byla přibližně 8 mm. Jelikož není možné odečíst výšku sloupce v jeden okamžik, je zapotřebí zahrnout tuto chybu do naměřených hodnot. Dále, všechny odečítané hodnoty byly zaokrouhlovány na 5 mm s ohledem na přesnost samotného měření. V grafech, kde je prováděno porovnání vypočtených a naměřených hodnot jsou zobrazeny také chybové úsečky pro změřené hodnoty, které mají vytyčovat pásmo skutečné tlakové ztráty. Pásmo se pohybuje v okolí výsledné hodnoty  $\pm 50 \text{ Pa}$  ( $\approx 5 \text{ mm}$ ). Během měření nedostoupila voda v odběru číslo 13 do výšky zaručující její přesné změřením. Při prvních dvou variantách byla tato výška stěží 100 mm nad mosazný odběr, při třetí variantě nedostoupila voda ani do odběrové hadice. Z těchto důvodů nejsou hodnoty posledního úseku vyneseny v grafech, kde jsou porovnávány analytické výpočty a naměřené hodnoty.

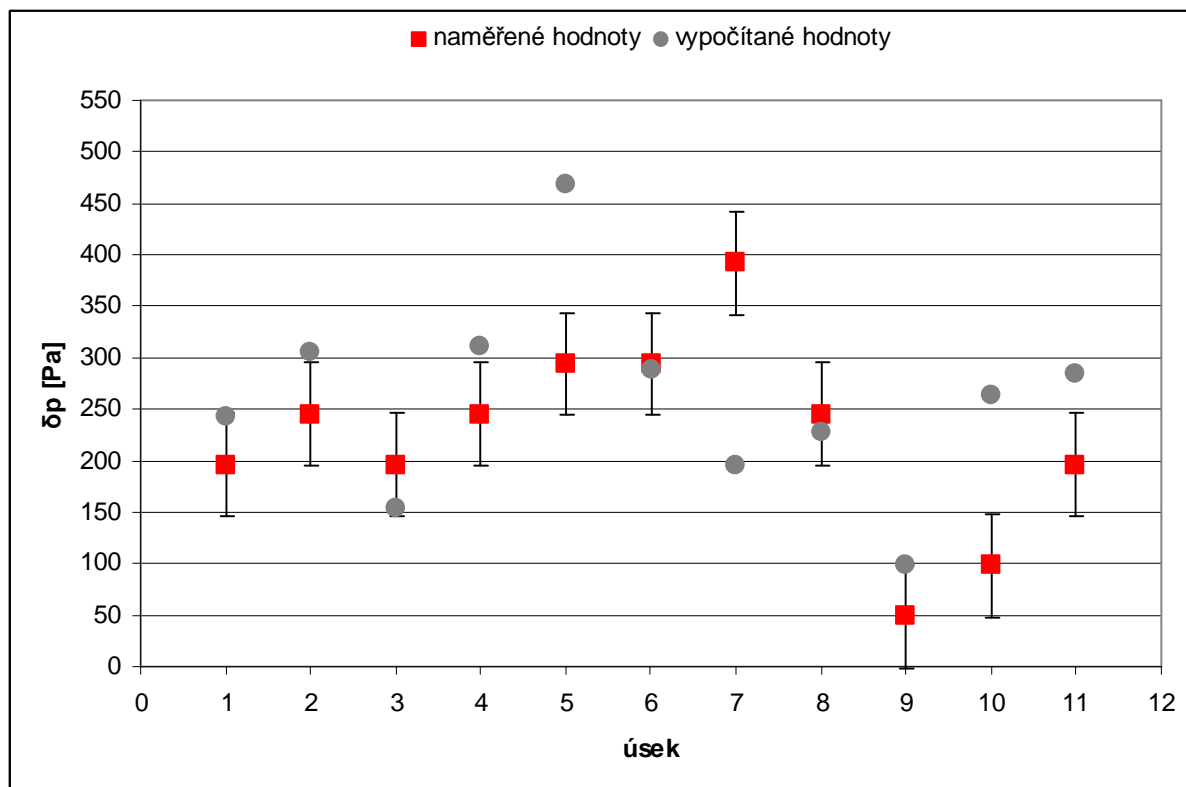


Graf. 6.1 Hodnoty naměřených tlakových ztrát v jednotlivých úsecích

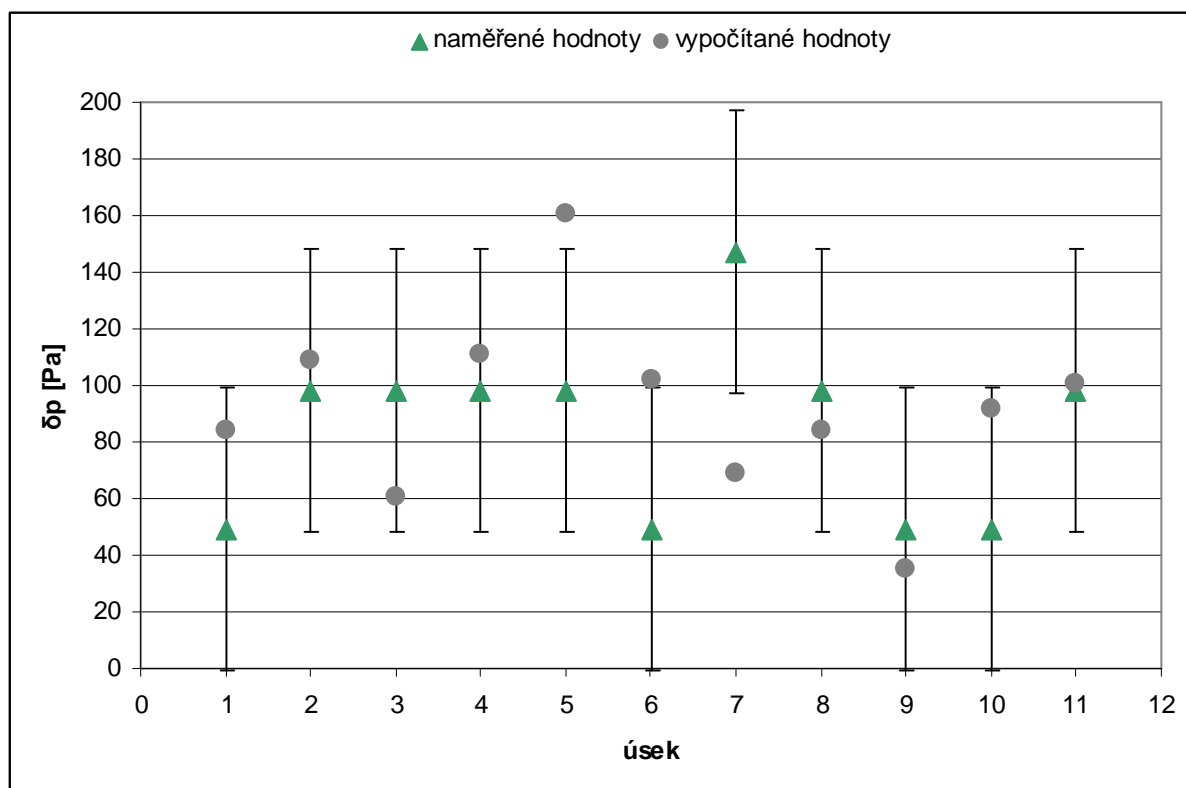
### Porovnání analytického výpočtu s naměřenými hodnotami



Graf. 6.2 Rozdíly mezi naměřenými a vypočítanými tlakovými ztrátami na jednotlivých úsecích pro P = 45 W



Graf. 6.3 Rozdíly mezi naměřenými a vypočítanými tlakovými ztrátami na jednotlivých úsecích pro P = 35 W



Graf. 6.4 Rozdíly mezi naměřenými a vypočítanými tlakovými ztrátami na jednotlivých úsecích pro P = 25 W



Při porovnání naměřených hodnot z grafu 6.1 je patrné, že se zvyšujícím se průtokem se také zvyšuje tlaková ztráta na jednotlivých úsecích. Je to způsobeno tím, že čím více vody protéká přes potrubní systém, tím je její rychlost větší a jelikož tlakové ztráty závisí na kvadrátu rychlosti proudění, zákonitě musí být tlaková ztráta vyšší.

Při porovnání naměřených hodnot s vypočítanými v grafu 6.2 vychází většina výsledků v rámci zvolené tolerance. U úseků 6 a 9 je možné se domnívat, že rozdíl mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami je způsoben špatným dosednutím jednotlivých potrubních dílů. Vzhledem k přibližně stejným rovným úsekům 6 a 10 by naměřená tlaková ztráta měla být podobná. Na úsecích se zúžením a rozšířením průtočného průřezu hodnoty nesouhlasí. Vzhledem dříve uvedeným rozdílnostem charakteristické změny ideálního a skutečného průtočného průřezu je možné říci, že rozdíl mezi hodnotami je způsoben právě těmito vlivy. Každopádně, podle [17] je nutné při výpočtech uvažovat s možnou tolerancí  $\pm 50\%$  ztrátového součinitele o použité hodnoty. V tomto případě jsou naměřené výsledky a vypočítané vzájemně odpovídající. V ostatních úsecích, kde je umístěno koleno, popřípadě koleno s rovnou trubkou, naměřené hodnoty odpovídají vypočítaným co do velikosti jen s nepatrnými rozdíly. U kolen je podle [17] třeba počítat s  $\pm 35\%$  změnou ztrátového součinitele, kterou při daných podmínkách nemá smysl uvažovat. Na úseku 8 vychází naměřená tlaková ztráta menší než vypočtená hodnota. Toto může být dáno špatně určeným součinitelem tření.

U grafu 6.3 jsou rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami rozdílnější. Na úsecích s koleny jsou chyby dány nejspíše výpočtovým vzorcem. Použitý vzorec pro výpočet ztrátového součinitele nebere v úvahu změnu rychlosti proudění. Oproti předcházejícímu, naměřená tlaková ztráta na úseku s rozšířením průtočného průřezu odpovídá analyticky zjištěné hodnotě. Ve výpočtu použité vzorce berou v úvahu pouze změnu průtočného průřezu. Na posledním grafu 6.4. si vzájemně odpovídají téměř všechny naměřené a vypočítané hodnoty s uvažováním tolerančního pásma. Výraznější rozdíly jsou na úseku s U prvkem a na úseku se zúžením.

Jak je vidět z předchozího, úvaha o samotném ztrátovém součiniteli v koleni (volba vzdáleností před a za kolmou osou částí kolene) neměla zásadní vliv na přesnost výpočtu. Každopádně, některé rozdíly mezi naměřenými a spočtenými hodnotami mohou být způsobeny chybou ve výpočtech a jak bylo uvedeno dříve, samotnou přesností odečtů výšek hladin vodních sloupců v trubicích.

Pro poslední úsek, který je tvořen kulovým kohoutem, není možné porovnávat analytické výpočty měřením. Výška vodního sloupce v hadici byla asi 100 mm nad mosazný odběr. S uvažováním, že trubka byla vzdálena cca 500 mm od nulové hodnoty měřítka, rozdíl výšek mezi dvanáctým a třináctým odběrem činil přibližně 955 mm pro příkon čerpadla 45 W, což odpovídá tlakové ztrátě přibližně 9 400 Pa. Vypočítaná tlaková ztráta je 770 Pa, tedy velmi výrazný rozdíl (změna 1 220 %). I kdyby bylo možné přesně zjistit úhel otočení kohoutu (při měření cca 30°), pro ztrátové součinitele z použité literatury by spočítaná tlaková ztráta neodpovídala naměřeným hodnotám v požadovaných řádech. Na druhou stranu je možné, že umístění odběru ve vzdálenosti 9 mm za kohout je nevhodné.

## 7 Návod na používání laboratorního pracoviště

### 7.1 Teoretický úvod

Při proudění jakékoliv kapaliny dochází neustále k přeměně části její kinetické energie vlivem tření na teplo. Ke tření dochází mezi jednotlivými vrstvami kapaliny a také podél stěn, ve kterých kapalina proudí, vlivem drsnosti. Projevem tohoto procesu je klesání celkového tlaku, a pokud se nemění rychlost proudění kapaliny, tak i tlaku statického. Z výpočtového hlediska se tlakové ztráty v potrubních systémech dělíme na ztráty místní a ztráty třecí. V potrubních systémech se nachází různé prvky, jako krátké či dlouhé rovné úseky, kolena, odbočky, armatury, čističe, chladiče, T-kusy, zúžení a rozšíření průřezu apod. V těchto místech dochází ke změnám velikosti a směru rychlosti proudění, které vedou k víření kapaliny či odtržení proudu od stěn, kteréžto vedou k rozptylu energie.

### 7.2 Popis obvodu

Samotný zkušební obvod se skládá z kolen 90°, rovných krátkých a dlouhých úseků, kdy dlouhé úseky jsou dvojího průtočného průřezu, prvku pro zúžení, rozšíření průtočného průřezu a kohoutu. Příslušenství tvoří nádrž, čerpadlo, průtokoměr, soustava redukcí pro propojení nádrže s čerpadlem a čerpadla s průtokoměrem, dále hadice zajišťující vytékání kapaliny zpět do nádrže. Měřicí obvod je složen hadic, kohoutů, trubic a měřitek. Nedílnou součástí jsou stojany a deska sloužící pro připevnění měřidel. Schéma obvodu a reálný pohled na celou sestavu jsou patrné na přiložených obrázcích (obr. 1.1 – příloha č.1; obr. 3.2 – příloha č.3).

### 7.3 Popis důležitých použitých prvků

Nádrž (N)	Materiál: plexisklo objem: 0,175 m <sup>3</sup>
Čerpadlo (OČ)	Cirkulační čerpadlo firmy Grundfos Typ: UPS 25-40 B 230V 180mm TUV Příkony: 25, 35 a 45 W Max. provozní tlak 10 bar Výtlačná výška: 3 m
Průtokoměr (IP)	Indukční firmy FLOMAG Typ: FLOMAG 3000
Potrubí (T2)	Materiál: polypropylen Průměry: d40/d36,4 mm
Potrubí (T2)	Materiál: polypropylen Průměry: d32/d28,4 mm
Koleno 90° (KO2)	Materiál: polypropylen Průměry: d40/d36,4 mm
Redukce zúžení/rozšíření (R12)	Materiál: polypropylen Průměry: d40/d32 mm
Kohout (K)	Materiál: Polyetylén Vnitřní průměr: 40 mm
Trubice	Materiál: sklo Průměr: 100 mm Délka: 1 500 mm

## 7.4 Postup měření a zpracované výpočty

- 1) Seznamte se s jednotlivými prvky obvodu a sestavte ho dle schématu zapojení (Všechny potrubní díly jsou označeny písmeny).
- 2) Připojte všechny odběry přes hadičky k redukcím na stojanu.
- 3) Otevřete kohout od nádrže, v případě netěsnosti potrubí v okolí průtokoměru zajistěte těsnost obvodu.
- 4) Připojte čerpadlo k napájecímu napětí (V případě neprotlačení kapaliny přes okruh rozpojte obvod ve vhodném místě a v okamžiku průtoku kapaliny opět spojte).
- 5) Zavřete výstupní kohout tak, aby vystoupala kapalina v trubicích do výšky, která je měřitelná na desce (Pokud je zaškrcení kohoutu nežádoucí, posuňte desku s trubicemi níže).
- 6) Postupně odečítejte výšky hladin vodních sloupců v trubicích (Jestliže bude při měření posouváno deskou, změřte zároveň výšku desky na zemi, tedy nulové hodnoty měřítka). Odečítejte také hodnoty průtoku kapaliny zobrazeného na displeji indukčního průtokoměru.
- 7) Opakujte měření pro různé příkony čerpadla (otáčky), popřípadě také pro různá zaškrcení výstupního kohoutu.
- 8) Naměřené údaje doplňte do tabulky 7.1 a 7.2 a proveďte dopočet dalších veličin dle níže uvedeného postupu.

Tab. 7.1 Naměřené a dopočtené hodnoty pro P = 45W

O [°]	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /s]	w <sub>1</sub> [m/s]	w <sub>2</sub> [m/s]	Re <sub>1</sub> [-]	Re <sub>2</sub> [-]	λ <sub>1</sub> [-]	λ <sub>2</sub> [-]
...							

Tab. 7.2 Naměřené tlakové ztráty

číslo odběru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
výška vodního sloupce h [mm]													
rozdíl výšek Δh [mm]													
tlaková ztráta δp [Pa]													

- 9) Proveďte výpočet rychlosti proudění kapaliny pro potrubí o průměru 36,4 mm.

$$w_1 = \frac{\dot{V}}{S_1} \text{ [m/s]}$$

- 10) Z rovnice kontinuity pro nestlačitelné proudění dopočítejte rychlost proudění kapaliny v potrubí o vnitřním průměru 28,4 mm.

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{S_1}{S_2} \text{ [m/s]}$$

- 11) Dopočítejte Reynoldsova čísla a součinitele tření pro ztrátu třením pro oba vnitřní průměry potrubí. Kinematická viskozita nabývá hodnoty 1·10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s.

$$\text{Re} = \frac{w \cdot D}{\nu}$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}$$

12) Proveďte výpočet tlakových ztrát na jednotlivých úsecích.

$$\delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h [Pa]$$

13) Spočítejte statický, dynamický a celkový tlak v potrubí na jednotlivých úsecích, kde  $h_{vsl}$  je výška vodního sloupce zjištěná na stupnici měřítka,  $h_{mnz}$  je výška nulové hodnoty měřítka nad zemí a  $h_{onz}$  vzdálenost odběru od země.

$$p_{stat} = \rho \cdot g \cdot h_{cel} = \rho \cdot g \cdot (h_{vsl} + h_{mnz} - h_{onz}) [Pa]$$

$$p_{dyn} = \frac{\rho \cdot w^2}{2} [Pa]$$

$$p_{cel} = p_{stat} + p_{dyn} [Pa]$$

## 7.5 Vyhodnocení měření

Z naměřených a spočítaných hodnot vytvořte tyto závislosti:

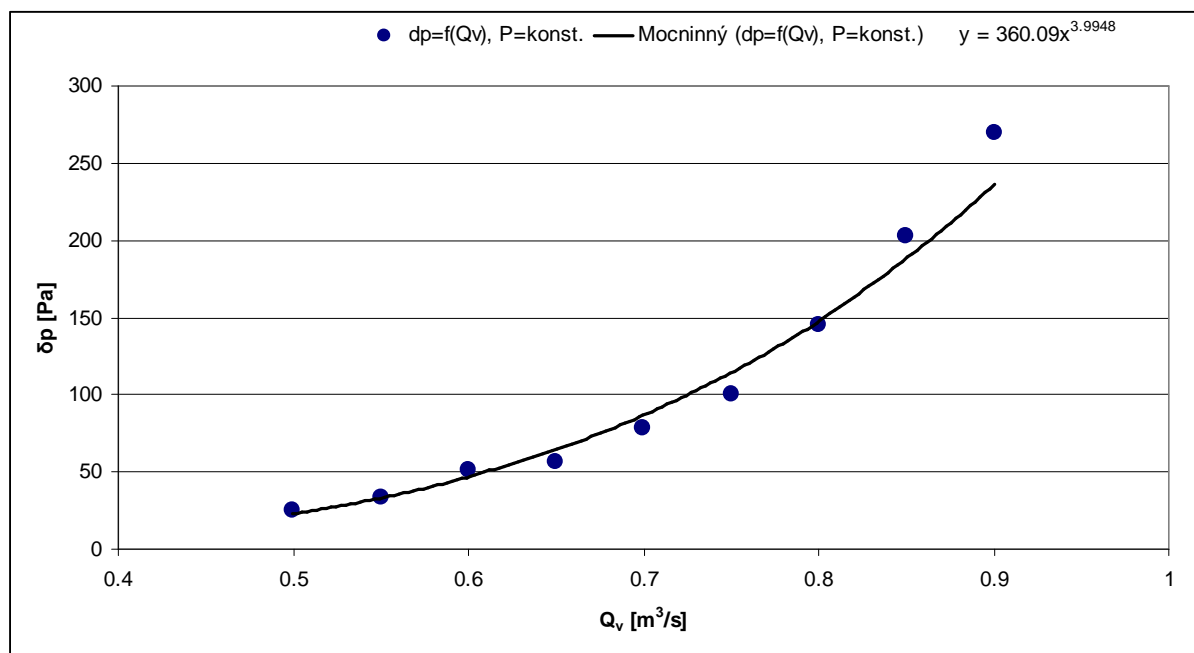
$\delta p = f(\dot{V})$  při  $P = konst.$ ,  $O \neq konst.$ ;

$\lambda = f(Re)$  při  $P = konst.$ ,  $O \neq konst.$ ;

$p_{stat} = f(Re)$  při  $P = konst.$ ,  $O \neq konst.$ ;

$p_{cel} = f(P)$  při  $O = konst.$ ;

Názornou závislost  $\delta p = f(\dot{V})$  při  $P = konst.$ ,  $O \neq konst.$  poskytuje následující graf 7.1.



Graf 7.1 Zobrazení tlakové ztráty v závislosti na průtoku při konstantních otáčkách čerpadla a různém zaškrcení kohoutu.

## 8 Závěr

V rámci této bakalářské práce bylo navrženo laboratorní pracoviště pro měření místních a třecích tlakových ztrát na vodní trati. Bylo navrženo celkem dvanáct měřících úseků. Těmito úseky jsou koleno, dlouhé trubky o dvou různých vnitřních průměrech, zúžení, rozšíření, U-tvar, kohout a několik krátkých úseků koleny. Dále byl proveden návrh dvou stojanů, jednoho pro nádrž na vodu a druhého pro uchycení měřidel, a také návod na používání tohoto pracoviště. K navrženému okruhu byl proveden také analytický výpočet tlakových ztrát a jejich porovnání s naměřenými hodnotami.

Samotný návrh zohledňoval několik hledisek, kterými byly cenová dostupnost všech dílů, schopnost měnit topologii obvodu a jednoduchá sestavitelnost. Z těchto důvodů byly pro potrubní systém zvoleny odpadní trubky z polypropylenu, které se spojují pouhým zasouváním. Pro zajištění průtoku vody, měření průtoku a zásobárnu vody byla zvolena zařízení, která byla dostupná v laboratořích. Typ potrubního systému umožňuje nejen jednoduché demontování, ale také i případnou změnu měřících úseků. Je také možné vytvářet různá seskupení trubek a tvořit nové, blíže nesespecifikovatelné prvky potrubních systémů (S-tvary, Z-tvary apod.). Technologie měření tlaku poskytuje možnost kombinovat měření několika úseků v rámci jedné tlakové ztráty, a také měření pouze jednoho či několika málo úseků při kompletní sestavě.

Po srovnání naměřených a vypočtených hodnot lze konstatovat, že pro většinu úseků si hodnoty vzájemně odpovídají. Na několika úsecích jsou však hodnoty velmi rozdílné či vůbec neporovnatelné. Toto je dáno použitými výpočtovými vzorci, které odpovídají prvkům s určitými tvary čerpané z dostupné literatury. Skutečné tvarové prvky v okruhu jsou odlišné, a tedy zjistit výpočtem na nich tlakovou ztrátu nemožné. V tomto případě je experimentální měření jediná možnost pro zjištění, jak se daný prvek v potrubním systému chová. Některé odlišnosti mohou být způsobeny nepřesným zasunutím jednotlivých trubek, popřípadě špatně vytvořených připevnění odběrů do stěn potrubí. Výrazný rozdíl přináší tlaková ztráta na výstupním kohoutu, kde použití výpočtových vzorců je naprosto nevyhovující. Samotné zjištění tlakové ztráty pro daný kohout při částečném uzavření je možné jen experimentálně.

Vytvořené pracoviště symbolizuje skutečné potrubní systémy a jevy, které se v nich vyskytují. Dává jasný názor, jak se takový potrubní systém chová při proudění kapaliny, na jakých částech vznikají tlakové ztráty a jak jsou velké. Toto přináší nesporné výhody při návrhu reálné aplikace, kdy na laboratorním pracovišti je možné předem zjistit skutečné vlastnosti systému a tím eliminovat případné potíže při reálném použití.

Jako návrh pro další pokračování práce na laboratorním pracovišti navrhuji rozšíření okruhu. Další měřící úseky by mohly být sestaveny z kolen  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $67^\circ$ , nebo poskládaných trubek tak, aby tvořily například S-tvary. Je také možné provést optimalizaci umístění odběrů, tedy provést vhodné zkrácení trubek tak, aby odběry od volných zasouvacích konců byly shodně vzdáleny a umožňovaly přesnější porovnání. Dále také zajistit optimální zarovnání konců zkracovaných trubek a zkosení jejich hran. Vzhledem k předpokladu, že celý systém je univerzální z pohledu sestavení úseků, nebyl proveden návrh stojanu pro uchycení trubek. Proto je dále možné navrhnout samostatný stojan pro potrubní systém.

## Použitá literatura

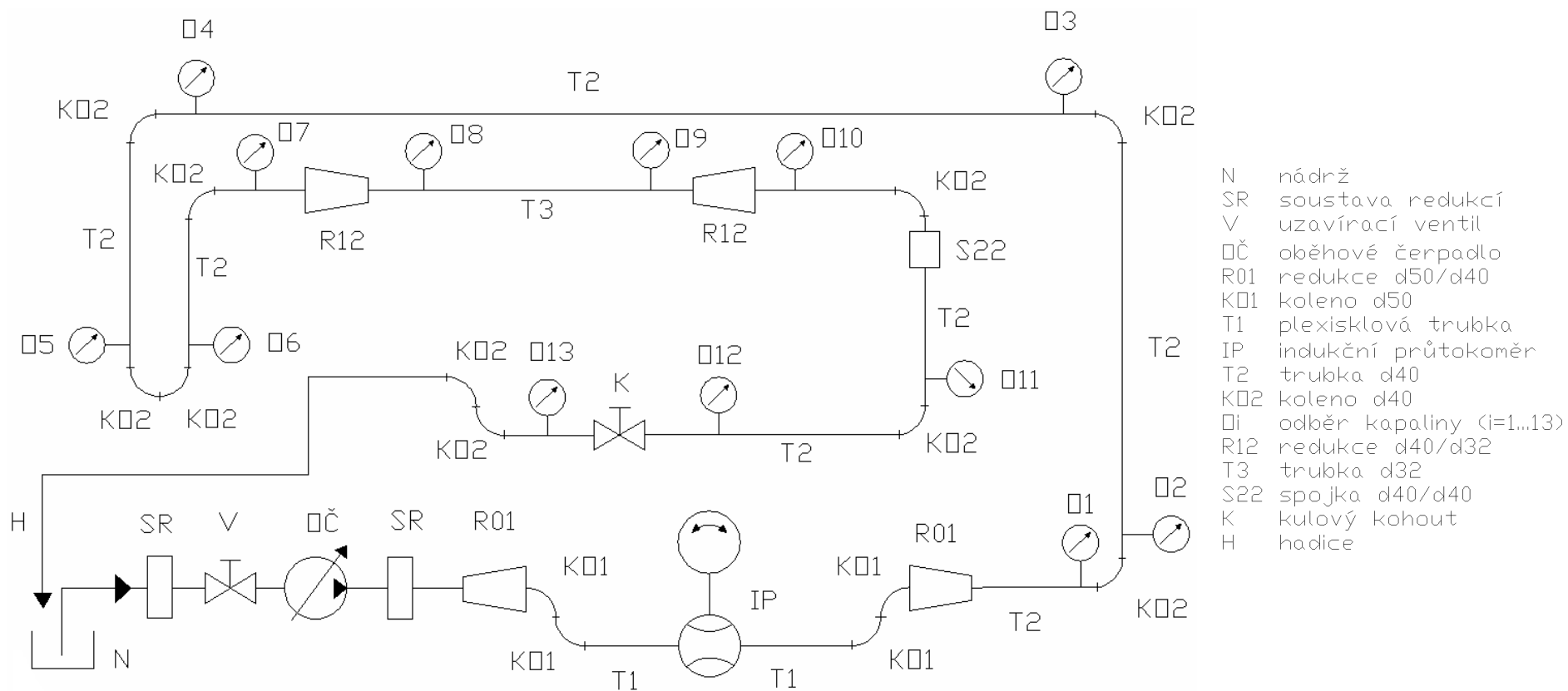
- [1] BEJČEK, L., VACULÍK, J. Snímače tlaku – přehled trhu. *Automa* [online]. 2006, ročník 49, číslo 1. Dostupné z: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=1025>
- [2] KADLEC, K. Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 1). *Automa* [online]. 2007, ročník 50, číslo 2. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=33887](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33887)
- [3] LINHART, J. *Mechanika tekutin I*. ZČU. Plzeň 2009
- [4] BENEDICT, R.,P. *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*. Second edition. John Wiley and Sons, Inc. Toronto 1977
- [5] Elektronické podklady výrobce zařízení. *Flomag* [online]. Dostupné z: [http://flomag.cz/data/files/Manual%20Flomag3000%20CZ\\_27\\_cz.pdf](http://flomag.cz/data/files/Manual%20Flomag3000%20CZ_27_cz.pdf)
- [6] KADLEC, K. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 2). [online]. Dostupné z: [http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT\\_INaRP/A11\\_2006s24.pdf](http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/A11_2006s24.pdf)
- [7] KADLEC, K. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1). [online]. Dostupné z: [http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT\\_INaRP/A10\\_2006s05.pdf](http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/A10_2006s05.pdf)
- [8] ĎAĎO, S. a kol. *Měření průtoku a výšky hladiny*. BEN. Praha 2005
- [9] NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. SNTL. Praha 1987
- [10] KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. *Hydraulika*. SNTL. Praha 1983
- [11] JANNA, W.,S. *Introduction to Fluid Mechanics*. The University of Memphis. Memphis 2002
- [12] Elektronické podklady k odpadnímu potrubí. *OSMA* [online]. Dostupné z: [http://www.kanalizacezplastu.cz/filesystem/OSMA\\_katalog\\_HT.pdf](http://www.kanalizacezplastu.cz/filesystem/OSMA_katalog_HT.pdf)
- [13] JANALÍK, J., ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. [online]. VŠB-TU Ostrava. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-Mechanikatekutin.pdf>
- [14] Elektronický katalog laboratorních pomůcek. *Labor-Komplet s.r.o.* [online]. Dostupné z: <http://www.laboratorni-potreby.cz/>
- [15] Elektronické katalogy hliníkových profilů a příslušenství. *ALUTEK K&K* [online]. Dostupné z: <http://www.aluteckk.cz/katalog/katalog.php>
- [16] Elektronický katalog čerpadel Grundfos. *Pumpa a.s.* [online]. Dostupné z: [http://obchod.pumpa.cz/scripts/podrobnosti.php?IDZ=178&track\\_mod=topx](http://obchod.pumpa.cz/scripts/podrobnosti.php?IDZ=178&track_mod=topx)
- [17] *Hydraulic institute engineering data book*. Hydraulic institute. Cleveland 1990
- [18] KOZUBKOVÁ, M. a kol. *Mechanika tekutin – návody pro laboratorní měření*. [online]. VŠB-TU Ostrava 2007. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/navod.pdf>

## Seznam příloh

- |              |   |
|--------------|---|
| Příloha č. 1 | Schéma navrženého okruhu                    |
| Příloha č. 2 | Kusovník použitých dílů                     |
| Příloha č. 3 | Fotografie navrženého okruhu                |
| Příloha č. 4 | Fotografie dalších použitých dílů v sestavě |

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **Schéma navrženého okruhu**



Obr. 1.1 Schéma navrženého okruhu s popisky jednotlivých dílů



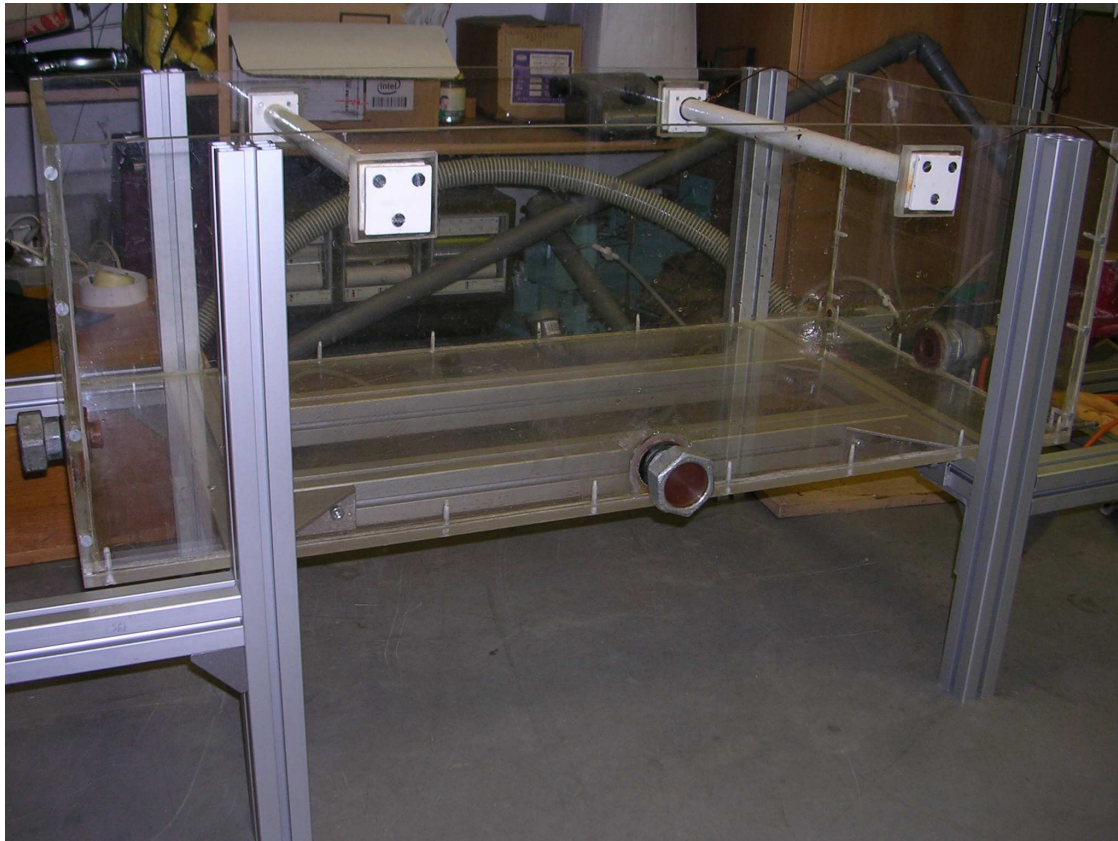
## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Kusovník použitých dílů**

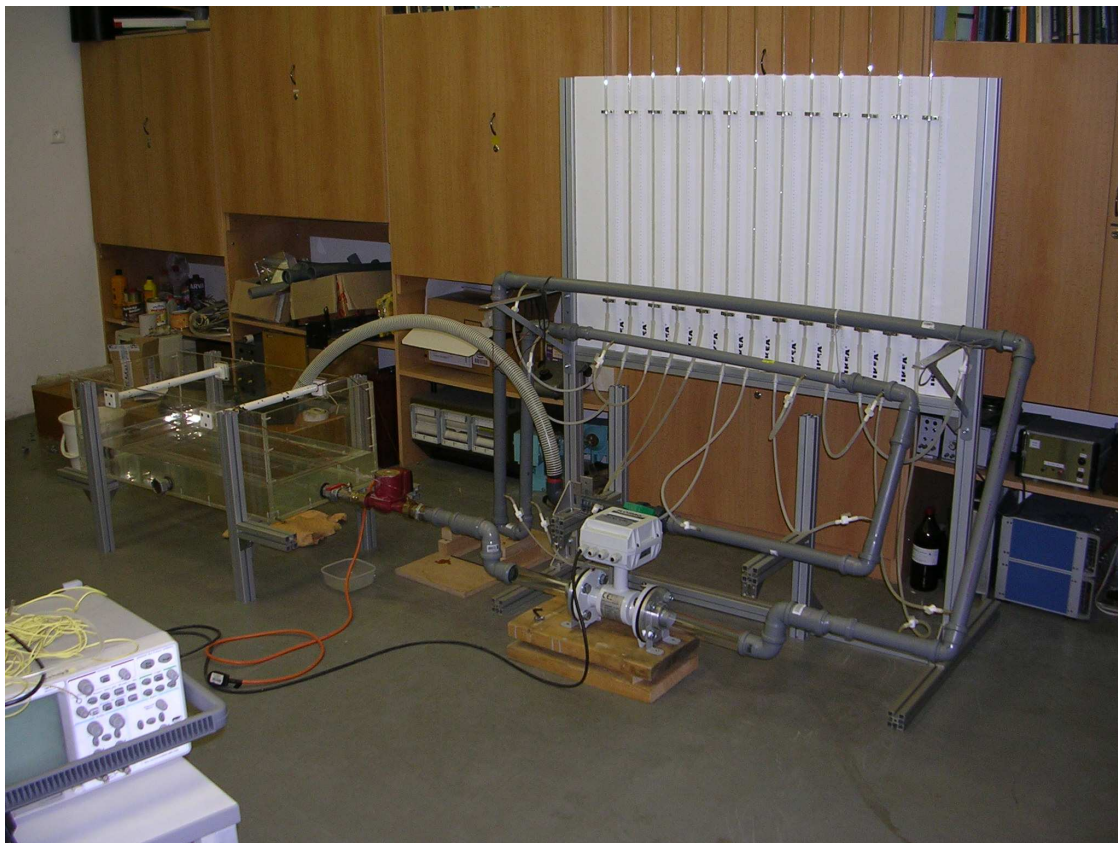
40	Konzola	Ocel		2
39	Podpěra	Plexisklo		26
38	Výstelka	Guma		26
37	Metr	Papír		13
36	Matice k přírubě	Ocel		8
35	Podložka k přírubě	Ocel		8
34	Šroub k přírubě M18x25	Ocel		8
33	Kolík	Ocel		6
32	Matice čtvercová	Ocel		72
31	Šroub M8x20 DIN 912	Ocel		72
30	Plechový úchyt	Hliník		26
29	Vrut	Ocel		52
28	Úhelník malý	Hliník		12
27	Úhelník velký	Hliník		12
26	Profil	Hliník		18 (10,88 m)
25	Těsnění k průtokoměru	Guma		2
24	Příruba	Hliník		2
23	Deska	Dřevotříska		1
22	Trubice	Sklo		13
21	Hadice	Silikon		10 (m)
20	Redukce	Polypropylen		13
19	Uzávěr	Polypropylen		13
18	Redukce	Polypropylen		13
17	Hadice 3/7; 4/8; 6/10	Silikon		10 (m)
16	Hadice	PVC	H	1 (m)
15	Kulový kohout	Polyetylén	K	1
14	Spojka 40/40	Polypropylen	S22	1
13	Trubka DN 32	Polypropylen	T3	1
12	Redukce 40/32	Polypropylen	R12	2
11	Koleno DN 40	Polypropylen	KO2	9
10	Odběrový člen	Mosaz	O1..13	13
9	Redukce 50/40	Polypropylen	R01	2
8	Trubka s hrdlem DN 40	Polypropylen	T2	10
7	Indukční průtokoměr		IP	1
6	Trubka DN 50	Plexisklo	T1	2
5	Koleno DN 50	Polypropylen	KO1	4
4	Oběhové čerpadlo		OČ	1
3	Mosazný ventil	Mosaz	V	1
2	Soustava redukcí	Mosaz	SR	7
1	Nádrž na vodu	Plexisklo	N	1
<b>Pozice</b>	<b>Název</b>	<b>Materiál</b>	<b>Značka</b>	<b>Počet kusů (metrů)</b>

## **PŘÍLOHA č. 3**

**Fotografie navrženého okruhu**



Obr. 3.1 Fotografie plexisklové nádrže a stojanu pro nádrž



Obr. 3.2 Pohled na stojan pro desku v rámci celé sestavy



Obr. 3.3 Pohled na celý potrubní systém



Obr. 3.4 Pohled na výšky vodních sloupců v trubicích při měření s vyznačením hladin

## **PŘÍLOHA č. 4**

**Fotografie dalších použitých dílů v sestavě**



Obr. 4.1 Spojka



Obr. 4.2 Část sestavy představující úsek ve tvaru písmene U





