



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní  
Ústav energetiky**

**Zkušební trasa pro měření charakteristik oběhového čerpadla  
Pipe test equipment for measurement of circulation pump  
characteritics**

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetika

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Melichar, CSc.

**Bc. Michal Jašek**

---

**Praha 2016**

## **Prohlášení**

Tímto prohlašuji, že jsem zadanou práci vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Ing. Jana Melichara, CSc. a veškeré použité zdroje jsou uvedeny v seznamu zdrojů.

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

V Praze dne:.....

Podpis.....

# Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Michal Jašek
<b>Název DP:</b>	Zkušební trasa pro měření charakteristik oběhového čerpadla
<b>Anglický název:</b>	Pipe test equipment for measurement of circulation pump characteristics
<b>Akademický rok:</b>	2015/2016
<b>Ústav/Odbor:</b>	Energetika
<b>Vedoucí DP:</b>	prof. Ing. Jan Melichar, CSc.
<b>Konzultant:</b>	Ing. Pavel Mosler
<b>Oponent:</b>	prof. Ing. Jan Bláha, DrSc.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 44 Počet obrázků: 16 Počet tabulek: 7 Počet příloh: 7
<b>Klíčová slova:</b>	Zkušební trasa, třecí ztráta, místní ztráta, charakteristika potrubí a čerpadla, provozní bod, laboratorní úloha
<b>Keyword:</b>	Pipe test equipment, friction loss, pressure loss, pipe and pump characteristics, operating point, laboratory exercise
<b>Anotace:</b>	Tato práce se zabývá návrhem zkušební trasy pro měření charakteristik oběhového čerpadla v rámci úlohy pro studenty a jejím odzkoušením a výpočtem provozního bodu.
<b>Abstract:</b>	This thesis deals with design of pipe test equipment for measurement of circulation pump characteristics in a task of laboratory exercise for students. The pipe test equipment will be also tested and it will be counted the operating point.

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, panu prof. Ing. Janu Melicharovi, CSc. za cenné rady a připomínky během vypracovávání této práce. A také za velkou trpělivost, kterou se mnou měl.

Dále bych rád tímto poděkoval panu Pavlu Linkovi za velkou pomoc při stavbě měřicí trasy, zástupcům firmy BHV senzory, s. r. o, panu Ing. Petru Hejlovi a panu Ing. Janu Vaculíkovi, za poskytnutí vyhodnocovacího softwaru a ocejchování diferenčního snímače a také panu Ing. Ondřeji Burianovi za pomoc při řešení problémů s měřicími přístroji.

# Obsah

Obsah.....	2
Použité značení.....	7
1 Úvod.....	9
2 Návrh.....	10
2.1 Návrhový výpočet.....	10
3 Výpočet ztrátové měrné energie potrubí.....	13
3.1 Třecí ztráty.....	13
3.1.1 Porovnání výpočtu měrné energie v závislosti na součinitelích třecích ztrát $\lambda$ dle různých autorů.....	14
3.2 Ztráty místní.....	16
3.2.1 Součinitele místních hydraulických ztrát $\zeta_i$ .....	16
4 Charakteristika potrubí.....	19
4.1 Výpočet charakteristiky potrubí.....	19
5 Charakteristika čerpadla.....	21
6 Provozní bod systému.....	23
7 Realizace měřicí trasy.....	24
7.1 Použité přístroje.....	27
8 Ověření výpočtu.....	28
8.1 Naměřené hodnoty.....	28
8.2 Výpočet hodnot měrné energie a průtoku.....	29
9 Aktuální stav.....	32
9.1 Diferenční manometr.....	32
9.2 Průtokoměr.....	32
9.3 Software.....	33
9.4 Souhrn.....	34
10 Návrh metodiky měření.....	35
10.1 Nastavení vyhodnocovacího programu.....	37
10.3 Výpočet charakteristiky.....	40
10.4 Výpočet účinnosti.....	41
11 Závěr.....	42
12 Zdroje.....	43
13 Přílohy.....	44

Použité značení

<b>Značka</b>	<b>Význam</b>	<b>Jednotka</b>
$D$	vnější průměr	m
DN	jmenovitá světlost	-
$H$	výška	m
$P$	příkon, výkon	W
$Q$	průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$R$	poloměr zakřivení osy potrubí	m
$Re$	Reynoldsovo číslo	-
$S$	plocha	$\text{m}^2$
$V$	objem	$\text{m}^3$
$Y$	měrná energie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
$a$	šířka	m
$b$	hloubka	m
$c$	střední rychlost proudění	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$d$	vnitřní průměr	m
$g$	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$k$	drsnost potrubí	m
$l$	délka	m
$n$	otáčky	$\text{min}^{-1}$
$p$	tlak	Pa, bar
$\Delta p$	tlaková ztráta	Pa, bar
$t$	čas	s
$x$	souřadnice	-
$y$	souřadnice	-
	svislá vzdálenost	m
$\zeta$	korekční součinitel kin. měrné energie kapaliny	-
	součinitel místních hydraulických ztrát	-
$\eta$	účinnost	-
$\lambda$	součinitel třecích ztrát v daném přímém potrubí	-
$\nu$	kinematická viskozita	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\rho$	měrná hmotnost	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

## **Index Význam**

53	potrubí s vnitřním průměrem $d = 53,6$ mm
67	potrubí s vnitřním průměrem $d = 67$ mm
b	boční
č	čerpadlo
elm	elektromotor
h	hydraulický
k	koleno
kk	kulový kohout
m	místní
max	maximální
min	minimální
n	nádrž, otáčky
p	potrubí
p	přímý
s	sání, soustava
st	statický
střed	střední
t	třecí
t53-36	T-kus o vnitřních rozměrech 53,6 mm a 36 mm
t53-53	T-kus o vnitřních rozměrech 53,6 mm
t67-67	T-kus o vnitřních rozměrech 67 mm a 67 mm
v	výtlač
vn	vtok do nádrže
vp	vtok do potrubí
z	ztráta/ztrátová

# 1 Úvod

Čerpací technika má v dnešní době jistě své nezastupitelné místo. V moderním světě se s ní setkáváme denně, ať už přímo např. v průmyslu nebo ve stavebnictví anebo pak ve většině případů nepřímo např. v čističkách odpadních vod nebo při dopravě pitné vody.

Na trhu existuje velmi široké spektrum výrobků (čerpadel) a výrobci se pochopitelně snaží o to, aby zaujali právě svými výrobky. Nové produkty jsou pak měřeny na zkušebnách a společně s výsledky měření, v podobě charakteristik  $Y-Q$  a  $P-Q$ , jsou dodávány koncovým zákazníkům. Právě charakteristiky rozhodují o vhodnosti použití konkrétního čerpadla pro určitou aplikaci. V ojedinělých případech se mohou vyskytovat výrobci, kteří charakteristiky čerpadel záměrně upraví tak, aby „zlepšili“ jejich parametry. A zákazník na to přijde až poté, co zapojené čerpadlo nedosahuje udávaných hodnot. Proto je dobré na tuto okolnost brát zřetel.

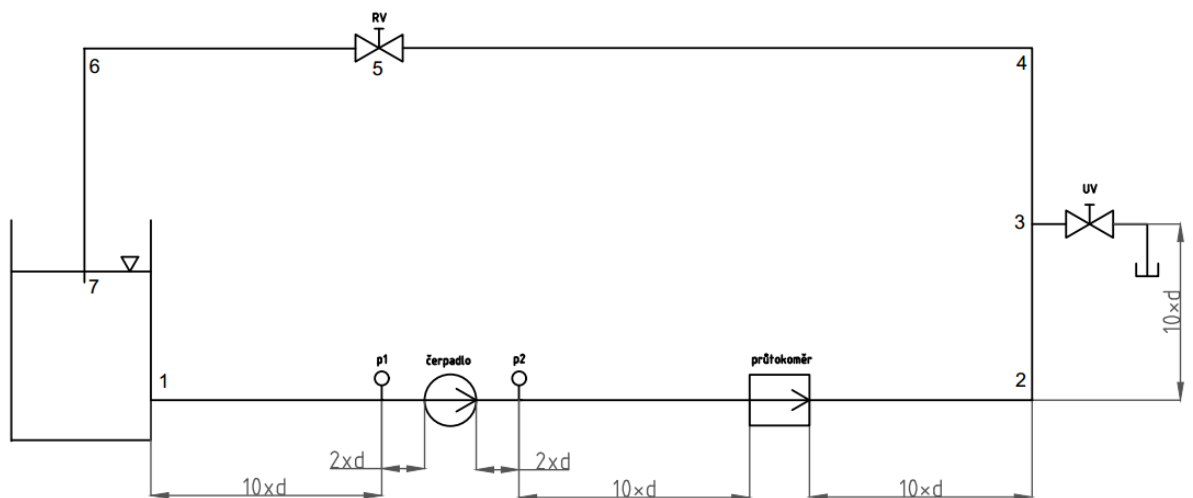
Technicky vzdělaní studenti by měli být srozuměni s danou problematikou a měli by mít možnost se seznámit se způsobem měření v rámci laboratorní úlohy. Tímto problémem se právě zabývá tato diplomová práce.

Náplní této práce je navržení a sestavení měřicí trasy pro ověření charakteristiky  $Y-Q$  oběhového čerpadla Wilo TOP S65/13. Současně bude trasa odzkoušena a bude částečně ověřena charakteristika  $Y-Q$  dodaná výrobcem čerpadla. Výpočtem bude také zjištěn provozní bod systému s odhadovaným průtokem kolem  $10 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ . Trasa bude realizována v halových laboratořích ČVUT Fakulty strojní v Dejvicích. Realizace trasy musí být co nejlevnější vzhledem k omezenosti finančních zdrojů a musí také respektovat prostorovou omezenost halových laboratoří.



## 2 Návrh

Cílem je navrhnout jednoduchou zkušební trasu pro měření charakteristik  $Y-Q$  oběhového čerpadla. Trasa by měla být osazena jedním čerpadlem, průtokoměrem, regulační armaturou a dvěma odběry tlaku. Pro ověření průtoku objemovou metodou, bude na trase umístěné odběrové místo s uzavírací armaturou. Bude se jednat o oběhovou trasu, voda bude čerpána z nádrže a opět do ní vrácena. Návrh zkušební trasy je uveden na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Návrhové schéma měřicí trasy

### 2.1 Návrhový výpočet

Tento výpočet slouží k vytvoření představy o průtokových a energetických možnostech soustavy čerpadlo - potrubí. Výpočet je proveden pro vnitřní průměr potrubí  $d = 67 \text{ mm}$  tak, aby rozměrově odpovídal čerpadlu. Umístění zařízení je zvoleno tak, aby došlo k ustálení proudu a nedocházelo k vzájemnému ovlivňování měřicích zařízení. Návrhově byly také zvoleny hodnoty součinitelů místních ztrát, dle [1], které jsou uvedeny v tab. 2.1. Hodnoty součinitelů místních ztrát budou upřesněny v kapitole 3.2.1 *Součinitele místních ztrát*  $\zeta$ , podle [3]. Teorie k výpočtu bude objasněna v následující kapitole, proto je zde uveden pouze výpočet bez jakéhokoliv vysvětlení. Celkové vypočtené hodnoty pak shrnuje tab. 2.2. Vzorový výpočet je proveden pro průtok  $Q = 0,0014 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Tab. 2.1 Návrhové součinitele místních ztrát

Pozice dle obr 2.1	Místní ztráta	Značení	Jednotka	Velikost
1	Vtok do potrubí	$\zeta_{vp}$	[-]	0,5
7	Vtok do nádrže	$\zeta_{vn}$	[-]	1
2, 4, 6	Koleno 67 mm	$\zeta_{k67}$	[-]	0,4
3	T-kus 67-67 mm	$\zeta_{t67-67}$	[-]	0
5	Kulový kohout - plně otevřený	$\zeta_{kk}$	[-]	0

Výpočet rychlosti

$$c_{67} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{67}^2} = \frac{4 \cdot 0,0014}{\pi \cdot 0,067^2} = 0,3939 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet Reynoldsova čísla

$$Re_{67} = \frac{c_{67} \cdot d_{67}}{\nu} = \frac{0,3939 \cdot 0,067}{1,10 \cdot 10^{-6}} = 26\,394$$

Výpočet součinitele třecích ztrát podle Advaniho

$$\lambda_{67} = 0,0032 + 0,221 \cdot Re_{67}^{-0,237} = 0,0032 + 0,221 \cdot 26\,394^{-0,237} = 0,0230$$

Výpočet měrné energie potrubí

$$Y_p = Y_z = \sum_i^n \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot \frac{c_i^2}{2} + \sum_j^m \zeta_{mj} \cdot \frac{c_j^2}{2}$$

$$Y_p = \lambda_{67} \cdot \frac{l_{67}}{d_{67}} \cdot \frac{c_{67}^2}{2} + (\zeta_{vp} + 3 \cdot \zeta_{k67} + \zeta_{t67-67} + \zeta_{vn}) \cdot \frac{c_{67}^2}{2}$$

$$Y_p = 0,0230 \cdot \frac{7,51}{0,067} \cdot \frac{0,3939^2}{2} + (0,5 + 3 \cdot 0,4 + 0 + 1) \cdot \frac{0,3939^2}{2} = 0,4095 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

## Výpočet měrné energie čerpadla

Z charakteristik čerpadla získaných od výrobce je možné přibližně získat rovnici pro výpočet měrné energie. Vynesená charakteristika  $Y-Q$  čerpadla platí pro maximální otáčky  $n_{max} 2800 \text{ min}^{-1}$ .

$$Y_{\check{c}, n \text{ max}} = -3 \cdot 10^7 \cdot Q^3 + 90042 \cdot Q^2 - 3708,5 \cdot Q + 128,17$$

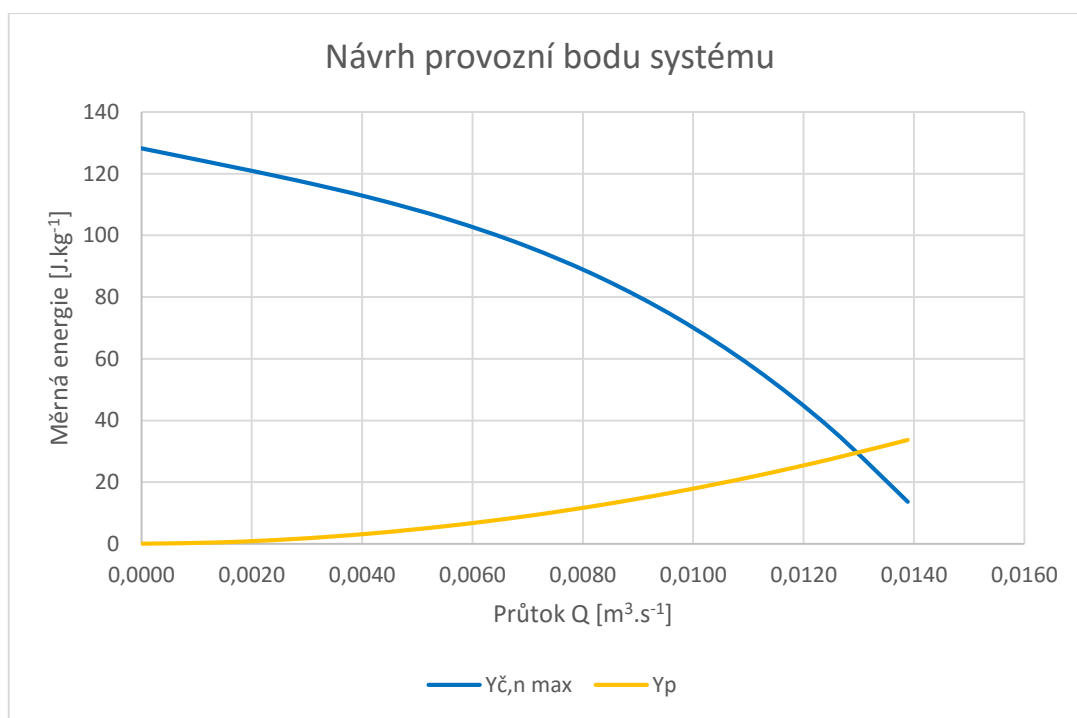
$$Y_{\check{c}, n \text{ max}} = -3 \cdot 10^7 \cdot 0,0014^3 + 90042 \cdot 0,0014^2 - 3708,5 \cdot 0,0014 + 128,17$$

$$Y_{\check{c}, n \text{ max}} = 123,11 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tab. 2.2 Vypočtené hodnoty měrných energií potrubí a čerpadla pro návrhové zapojení

$Q$	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$Q$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	0,0000	0,0014	0,0028	0,0042	0,0056	0,0069	0,0083	0,0097	0,0111	0,0125	0,0139
$c_{67}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	0,0000	0,3939	0,7879	1,1818	1,5758	1,9697	2,3636	2,7576	3,1515	3,5454	3,9394
$Re_{67}$	$[-]$	0	26 394	52 788	79 182	105 575	131 969	158 363	184 757	211 151	237 545	263 939
$\lambda_{67}$	$[-]$	0,0000	0,0230	0,0200	0,0185	0,0174	0,0167	0,0161	0,0157	0,0153	0,0150	0,0147
$Y_p$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	0,0000	0,4095	1,5336	3,3301	5,7803	8,8722	12,5970	16,9480	21,9197	27,5077	33,7079
$Y_{\check{c}, n \text{ max}}$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	128,17	123,11	117,92	112,11	105,20	96,71	86,16	73,06	56,93	37,29	13,65

Grafická závislost je znázorněna na obr. 2.2. Je patrné, že návrhový provozní bod systému vychází pro měrnou energii  $Y \doteq 30 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  a tomu odpovídající průtok  $Q \doteq 0,013 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 2.2 Návrhový bod systému

# 3 Výpočet ztrátové měrné energie potrubí

Zpracováno podle [2]

Důležitým ukazatelem potrubí je ztrátová měrná energie  $Y_z$ . Jedná se o energii, která se během průchodu potrubím změní na jinou formu energie např. tepelnou. Tuto energii neumíme v daném systému využít, a proto jí označujeme za ztrátovou. Ztrátová měrná energie se skládá ze dvou částí. První složkou jsou délkové (třecí) ztráty  $Y_{zt}$ . Tato složka určuje ztráty vzniklé v rovných (přímých) částech potrubí. Druhou složkou jsou ztráty vzniklé geometrií potrubí tj. změnou směru proudění nebo změnou průřezového průřezu. Označujeme ji jako ztrátu místní  $Y_{zm}$ .

## 3.1 Třecí ztráty

Mechanismem třecích ztrát je interakce částic kapaliny a částic tvořící stěnu potrubí a také různá rychlost částic kapaliny ve vzdálenosti od stěny potrubí. Velikost třecích ztrát ovlivňují vlastnosti proudící kapaliny, délka potrubí, vnitřní průměr a drsnost potrubí. Nejběžnějším výpočtovým vztahem je Darcy-Weisbachův vztah (3.1):

$$Y_{zt} = \zeta_t \cdot \frac{c^2}{2} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}], \quad (3.1)$$

kde:

$\zeta_t$ - korekční součinitel kinetické měrné energie kapaliny	[-]
$\lambda$ - součinitel třecích (délkových) ztrát v daném přímém potrubí	[-]
$d$ - vnitřní průměr daného přímého potrubí	[m]
$l$ - délka daného přímého potrubí	[m]
$c$ - střední rychlost proudění pro daný průřez	[m.s <sup>-1</sup> ]

Součinitel třecích ztrát  $\lambda$  je funkcí poměrné drsnosti  $k$ , vnitřního průměru  $d$  a Reynoldsovým číslem  $Re$ , které rozhoduje o typu proudění - laminárním nebo turbulentním. Součinitel lze získat několika způsoby a to experimentem, odečtením z Moodyho diagramu pro dané závislosti, z nomogramu nebo vypočtením jednou z mnoha empirických rovnic.

### 3.1.1 Porovnání výpočtu měrné energie v závislosti na součinitelích třecích ztrát $\lambda$ dle různých autorů

Bylo vybráno několik empirických rovnic pro výpočet součinitele třecích ztrát  $\lambda$  dle různých autorů pro hydraulicky hladké potrubí. Cílem je určit nejvhodnější empirickou rovnici pro výpočet součinitele  $\lambda$  pro potrubí z PVC, které lze považovat za hydraulicky hladké. Rovnice a oblasti použití dle Reynoldsových čísel jsou převzaty z [3].

Výpočet součinitele třecích ztrát podle Advaniho:

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237} [-] \quad (3.2)$$

Udávané rozsahy platnosti vztahu (3.2) jsou podle Nikuradse  $20\,000 < Re < 80\,000$  a podle Advaniho  $Re \geq 60\,000$ .

Výpočet součinitele třecích ztrát podle Blasia:

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} [-] \quad (3.3)$$

Rozsah platnosti vztahu (3.3) udává Blasius  $2\,300 < Re \leq 80\,000$  a Advani  $4\,000 \leq Re \leq 200\,000$ .

Výpočet součinitele třecích ztrát podle Herrmanna:

$$\lambda = 0,0054 + 0,395 \cdot Re^{-0,3} [-] \quad (3.4)$$

Herrmann udává rozsah použití vztahu (3.4)  $10\,000 \leq Re \leq 100\,000\,000$ .

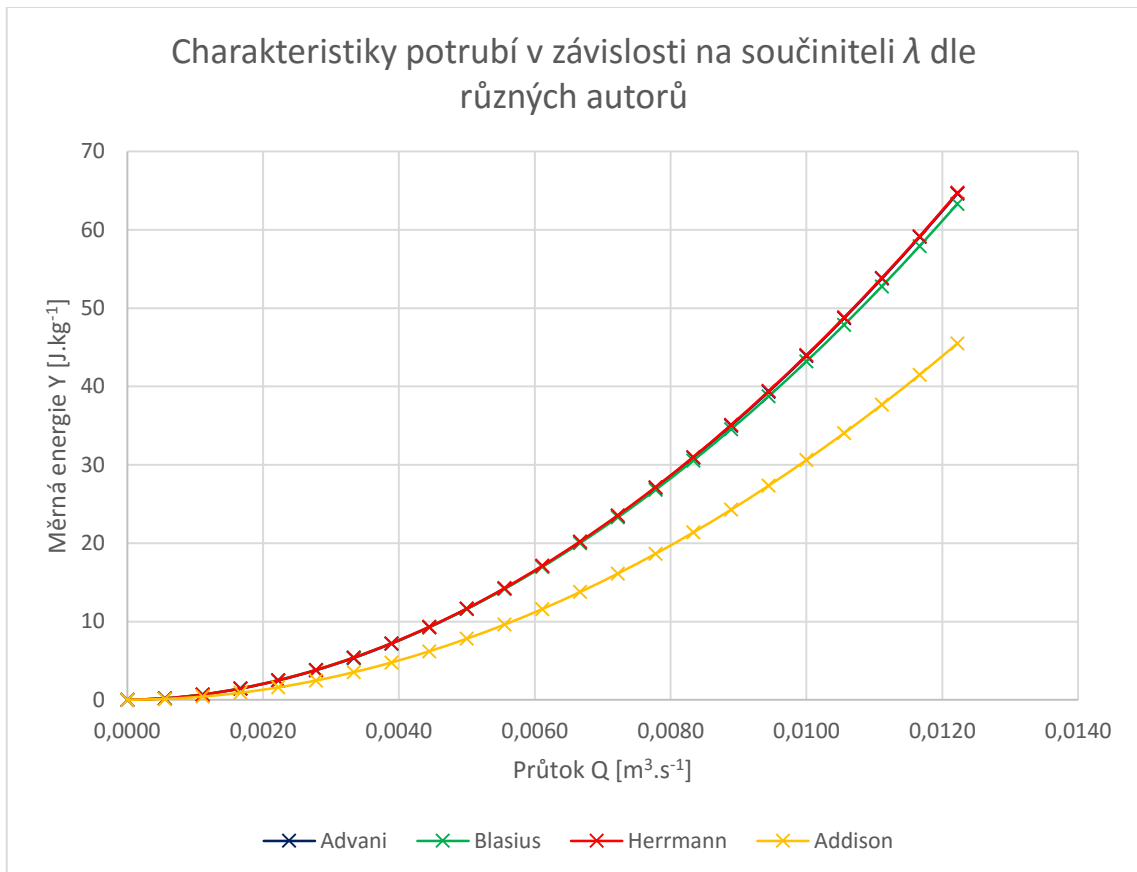
Výpočet součinitele třecích ztrát podle Addisona:

$$\lambda = 0,0008 + 0,055 \cdot Re^{-0,237} [-] \quad (3.5)$$

Rozsah využití vztahu (3.5) podle Addisona  $3\,000 \leq Re \leq 30\,000\,000$ .

Na Fakultě strojní ČVUT proběhl experiment, který se zabýval místní energetickou ztrátou spoje plastového potrubí zhotoveného svařováním na tupo. Experimentálně získané hodnoty tlakových rozdílů byly porovnány s tlakovými rozdíly vypočtenými podle vztahu, do kterého byl za součinitel třecích ztrát  $\lambda$  dosazen vztah dle Blasia (3.3) [4], [5].

Pro zvolení vhodného výpočtu součinitele třecích ztrát  $\lambda$  byly vypočteny charakteristiky  $Y-Q$  potrubí pro součinitele  $\lambda$  dle různých autorů. Jak již bylo ověřeno v [4], [5] je výpočet podle vztahu (3.3) dostatečně přesný. Jak je uvedeno na obr. 3.1, výpočty charakteristik  $Y-Q$  potrubí pro součinitele  $\lambda$  dle různých autorů vychází téměř identicky pro výpočty, dle vztahů (3.2), (3.3) a (3.4). Je tedy možné volit jeden z těchto tří vztahů. Výpočet dle (3.5) bude nejvíce zatížen chybou. Celkové výpočty jsou v příloze 2



Obr. 3.1. Charakteristiky potrubí v závislosti na součiniteli  $\lambda$  dle různých autorů

Pro další výpočty, které budou zahrnovat součinitel třecích ztrát  $\lambda$ , bude zvolen vztah (3.2), neboť platí i pro vysoká Reynoldsova čísla.

## 3.2 Ztráty místní

Zpracováno podle [2]

Vznik místní ztráty je dán vznikem víru v kapalině, který se vytvoří po průchodu místním odporem. Těmito odpory jsou části potrubí nebo armatury, ve kterých se mění průřez nebo směr proudění. Vyhodnocování těchto ztrát je vzhledem k vírové povaze proudění velmi složité. Hodnota měrné kinetické energie se proto koriguje součinitelem místních hydraulických ztrát  $\zeta_m$ , který se získá experimentálně. Určení místních ztrát je podle vztahu (3.6)

$$Y_{zm} = \zeta_m \cdot \frac{c^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}], \quad (3.6)$$

kde:

$$\begin{aligned} \zeta_m & - \text{součinitel místních hydraulických ztrát} && [-] \\ c & - \text{střední rychlost proudění pro daný průřez} && [m \cdot s^{-1}] \end{aligned}$$

Celkový vztah (3.3) ztrátové měrné energie je součet ztrát třecích a místních.

$$Y_z = Y_{zt} + Y_{zm} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2} + \zeta_m \cdot \frac{c^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (3.7)$$

### 3.2.1 Součinitele místních hydraulických ztrát $\zeta_i$

Zpracováno dle [3]

Součinitel místní ztráty pro vtok do potrubí je odečten z digramu závislosti součinitele místních ztrát na poměru průřezů potrubí a nádrže v závislosti na poměrném vysunutí vtokového otvoru. Protože průřez  $S_n$  nádrže je několikanásobně větší než průřez  $S_{vp}$  vtokového potrubí a šířku vtokového vysunutí do nádrže vzhledem k velikosti lze zanedbat, bude součinitel místní ztráty pro vtok do potrubí  $\zeta_{vp} = 0,5$ .

$$\frac{S_{vp}}{S_n} = \frac{\pi d_{vp}^2}{4 a_n \cdot b_n} \doteq \frac{\pi \cdot 0,075^2}{4 \cdot 1 \cdot 1} = 0,0044 \rightarrow 0$$

Součinitel místní ztráty pro vtok do nádrže je vypočten ze vztahu (3.8) pro náhlé rozšíření proudu:

$$\zeta_{vn} = \left(1 - \frac{S_p}{S_n}\right)^2 [-], \quad (3.8)$$

kde:

$S_p$  - průřez potrubí [m]

$S_n$  - průřez nádrže [m]

$$\zeta_{vn} = \left(1 - \frac{S_p}{S_n}\right)^2 = \left(1 - \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot a \cdot b}\right)^2 = \left(1 - \frac{\pi \cdot 0,0536^2}{4 \cdot 0,995 \cdot 1,2}\right)^2 = 0,996 \doteq 1$$

Součinitel místní ztráty pro kolena je vypočten na základě empirického vztahu (3.9):

$$\zeta_k = \left(\frac{d}{2 \cdot R} + \frac{k \cdot \pi}{d} \cdot \frac{2 \cdot R}{d}\right) \cdot \frac{\delta}{90} [-], \quad (3.9)$$

kde:

$d$  - průměr kolena [m]

$R$  - poloměr zakřivení osy potrubí [m]

$k$  - drsnost potrubí [m]

$\frac{k}{d}$  - relativní drsnost,  $\frac{k}{d} \doteq 0,005$ , dle [3] [-]

$\delta$  - úhel [°]

$$\zeta_{k67} = \left(\frac{d}{2 \cdot R} + \frac{k \cdot \pi}{d} \cdot \frac{2 \cdot R}{d}\right) \cdot \frac{\delta}{90} = \left(\frac{0,075}{2 \cdot 0,083} + 0,005 \cdot \pi \cdot \frac{2 \cdot 0,083}{0,075}\right) \cdot \frac{90}{90} = 0,487$$

$$\zeta_{k53} = \left(\frac{d}{2 \cdot R} + \frac{k \cdot \pi}{d} \cdot \frac{2 \cdot R}{d}\right) \cdot \frac{\delta}{90} = \left(\frac{0,063}{2 \cdot 0,0705} + 0,005 \cdot \pi \cdot \frac{2 \cdot 0,0705}{0,063}\right) \cdot \frac{90}{90} = 0,482$$

Součinitel místní ztráty pro T-kusy je odečten z digramu závislosti součinitele místních ztrát na poměru průtoků v hlavní (přímé) a boční větvi  $\frac{Q_b}{Q}$ , kde  $Q = Q_p + Q_b$ . Na trase nemají T-kusy přímé využití, proto je boční větev uzavřena a tedy průtok  $Q_b = 0$ . Výsledný ztrátový součinitel pro T-kus 53-36 mm je tedy  $\zeta_{t53-36} = 0,2$  a pro T-kus 53-53 mm  $\zeta_{t53-53} = 0,05$ .

Součinitel místní ztráty pro plně otevřený kulový kohout  $\zeta_{kk} = 0$ .



Dalšími místními odpory jsou např. přechody mezi jednotlivými trubkami, průtokoměrem nebo čerpadlem, ve kterých vznikají ztráty vlivem přechodové hrany. Tyto ztráty nelze přesně vyjádřit, proto budou zanedbány. Celkový přehled součinitelů místních ztrát je uveden v tab. 3.1. Pozice jednotlivých místních odporů jsou zobrazeny na obr. 3.2 v příloze 3.

Tab. 3.1 Součinitele místních ztrát

Místní ztráta	Značení	Jednotka	Velikost	Pozice místního odporu dle přílohy 3
Vtok do potrubí	$\zeta_{vp}$	[-]	0,5	1
Vtok do nádrže	$\zeta_{vn}$	[-]	1	2
Koleno 67 mm	$\zeta_{k67}$	[-]	0,487	3
Koleno 53 mm	$\zeta_{k53}$	[-]	0,482	6
T-kus 53-36 mm	$\zeta_{t53-36}$	[-]	0,2	4
T-kus 53-53 mm	$\zeta_{t53-53}$	[-]	0,05	5
Kulový kohout - plně otevřený	$\zeta_{kk}$	[-]	0	7

## 4 Charakteristika potrubí

Charakteristika potrubí vyjadřuje grafickou závislost měrné energie potrubí na průtoku kapaliny potrubím  $Y_p = f(Q)$ . Výpočet měrné energie potrubí na průtoku je definován vztahem (4.1) [2]:

$$Y_p = Y_{st} + Y_z = \sum \left( \frac{p'' - p'}{\rho} + g \cdot H \right) + \sum \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2} + \sum \zeta_{m_j} \cdot \frac{c^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}], \quad (4.1)$$

kde  $Y_{st}$  je statická složka měrné energie potrubí a pro tento případ řešení trasy je  $Y_{st} = 0$ .

### 4.1 Výpočet charakteristiky potrubí

Měřicí trasa je sestavena z potrubí o dvou různých průměrech ( $d = 67 \text{ mm}$  a  $d = 53,6 \text{ mm}$ ) řazených za sebou. V potrubí tedy bude konstantní průtok  $Q$ . Vzorový výpočet je proveden pro  $Q \doteq 0,0006 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Veškeré vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze 2

Výpočet rychlosti  $c$  v potrubí pro zvolený průtok vychází z rovnice kontinuity (4.2.1) pro  $\rho = \text{konst.}$

$$Q = S \cdot c \quad [m^3 \cdot s^{-1}], \quad (4.2.1)$$

kde:

$S$ - plocha	[m <sup>2</sup> ]
$c$ - střední rychlost proudění pro daný průřez	[m.s <sup>-1</sup> ]

$$Q = S \cdot c \Rightarrow c = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4.2.2)$$

$$c_{67} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{67}^2} = \frac{4 \cdot 0,0006}{\pi \cdot 0,067^2} = 0,1576 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$c_{53} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{53}^2} = \frac{4 \cdot 0,0006}{\pi \cdot 0,0536^2} = 0,2462 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet Reynoldsova čísla je dán vztahem (4.3):

$$Re_{67} = \frac{c_{67} \cdot d_{67}}{\nu} [-], \quad (4.3)$$

kde:

$$\nu - \text{kinematická viskozita} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

*Pozn. Kinematická viskozita je obecně závislá na teplotě a tlaku. Při výpočtu Reynoldsova čísla bude uvažována jako konstanta. Pro vodu se uvažuje  $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .*

$$Re_{67} = \frac{c_{67} \cdot d_{67}}{\nu} = \frac{0,1576 \cdot 0,067}{1 \cdot 10^{-6}} = 10\,558$$

$$Re_{53} = \frac{c_{53} \cdot d_{53}}{\nu} = \frac{0,2462 \cdot 0,0536}{1 \cdot 10^{-6}} = 13\,197$$

Výpočet součinitele třecích ztrát podle Advaniho

$$\lambda_{67} = 0,0032 + 0,221 \cdot Re_{67}^{-0,237} = 0,0032 + 0,221 \cdot 10558^{-0,237} = 0,0278$$

$$\lambda_{53} = 0,0032 + 0,221 \cdot Re_{53}^{-0,237} = 0,0032 + 0,221 \cdot 13197^{-0,237} = 0,0265$$

Výpočet měrné energie potrubí

$$Y_p = Y_z = \sum_i^n \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot \frac{c_i^2}{2} + \sum_j^m \zeta_{mj} \cdot \frac{c_j^2}{2}$$

$$Y_p = \lambda_{67} \cdot \frac{l_{67}}{d_{67}} \cdot \frac{c_{67}^2}{2} + \lambda_{53} \cdot \frac{l_{53}}{d_{53}} \cdot \frac{c_{53}^2}{2} + (\zeta_{vp} + \zeta_{k67}) \cdot \frac{c_{67}^2}{2} +$$

$$+ (\zeta_{t53-36} + 2 \cdot \zeta_{t53-53} + 2 \cdot \zeta_{k53} + \zeta_{vn}) \cdot \frac{c_{53}^2}{2}$$

$$Y_p = 0,0278 \cdot \frac{2,57}{0,067} \cdot \frac{0,1576^2}{2} + 0,0265 \cdot \frac{5,583}{0,0536} \cdot \frac{0,2462^2}{2} +$$

$$+ (0,5 + 0,487) \cdot \frac{0,1576^2}{2} + (0,2 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,482 + 1) \cdot \frac{0,2462^2}{2}$$

$$Y_p = 0,1779 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

## 5 Charakteristika čerpadla

Charakteristiky čerpadla jsou volně ke stažení ze stránek výrobce [10], viz příloha 4. Z charakteristik čerpadla získaných od výrobce je možné přibližně získat rovnice pro výpočet měrné energie, které byly získány na základě odečtených hodnot, viz tab. 5.1. Z těchto hodnot je sestaven bodový graf, ze kterého lze pomocí „spojnice trendů“ získat přibližně právě tyto rovnice, viz obr. 5.1. Vzorový výpočet je ukázán pro průtok  $Q_{\check{c}} \doteq 0,0014 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a při výpočtu rychlosti je uvažován vnitřní průměr čerpadla  $d_{\check{c}} = 0,069 \text{ m}$ .

Čerpadlo umožňuje za klidu, resp. za vypnutého stavu, změnu otáček. Označení otáček je stejné jako je označení charakteristik  $Y-Q$  čerpadla podle výrobce. Maximální otáčky označují otáčky  $n_{max} = 2800 \text{ min}^{-1}$ , střední otáčky mají hodnotu  $n_{střed} = 2550 \text{ min}^{-1}$  a minimální otáčky platí pro otáčky  $n_{min} = 2250 \text{ min}^{-1}$ .

Vzorový výpočet

Pro maximální otáčky ( $n_{max} = 2800 \text{ min}^{-1}$ ):

$$Y_{\check{c}, n_{max}} = -3 \cdot 10^7 \cdot Q^3 + 90042 \cdot Q^2 - 3708,5 \cdot Q + 128,17 \quad (5.1)$$

$$Y_{\check{c}, n_{max}} = -3 \cdot 10^7 \cdot 0,0014^3 + 90042 \cdot 0,0014^2 - 3708,5 \cdot 0,0014 + 128,17$$

$$Y_{\check{c}, n_{max}} = 123,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Pro střední otáčky ( $n_{střed} = 2550 \text{ min}^{-1}$ ):

$$Y_{\check{c}, n_{střed}} = -2 \cdot 10^7 \cdot Q^3 - 6909,1 \cdot Q^2 - 4740,5 \cdot Q + 114,28 \quad (5.2)$$

$$Y_{\check{c}, n_{střed}} = -2 \cdot 10^7 \cdot 0,0014^3 - 6909,1 \cdot 0,0014^2 - 4740,5 \cdot 0,0014 + 114,28$$

$$Y_{\check{c}, n_{střed}} = 107,52 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Pro minimální otáčky ( $n_{min} = 2250 \text{ min}^{-1}$ ):

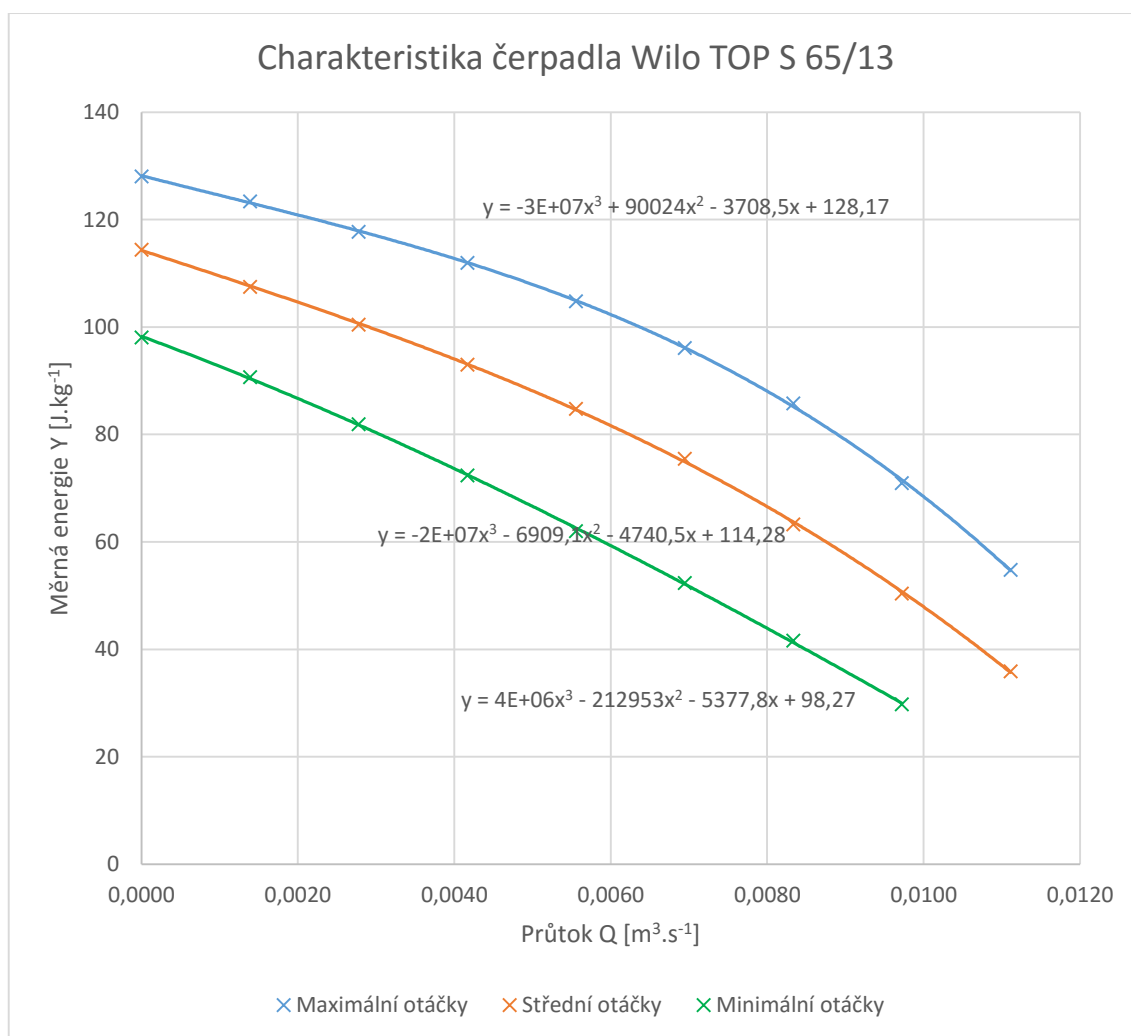
$$Y_{\check{c}, n_{min}} = 4 \cdot 10^6 \cdot Q^3 - 212953 \cdot Q^2 - 5377,8 \cdot Q + 98,27 \quad (5.3)$$

$$Y_{\check{c}, n_{min}} = 4 \cdot 10^6 \cdot 0,0014^3 - 212953 \cdot 0,0014^2 - 5377,8 \cdot 0,0014 + 98,27$$

$$Y_{\check{c}, n_{min}} = 90,66 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tab. 5.1 Hodnoty měrné energie čerpadla

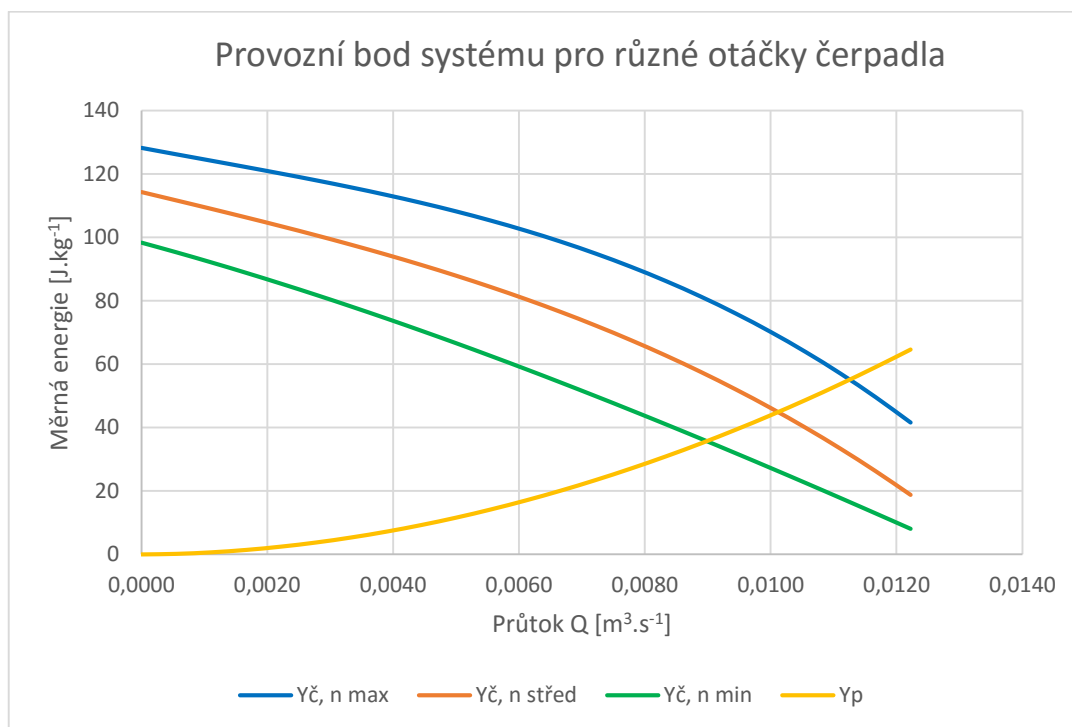
Veličina	Jednotka										
$Q_{\varepsilon}$	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$Q_{\varepsilon}$	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	0,0000	0,0014	0,0028	0,0042	0,0056	0,0069	0,0083	0,0097	0,0111	0,0125
$c_{\varepsilon}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	0,0000	0,3714	0,7429	1,1143	1,4857	1,8572	2,2286	2,6000	2,9715	3,3429
<b>Maximální otáčky (n = 2800 min<sup>-1</sup>)</b>											
$H$	[m]	13,06	12,58	12,00	11,41	10,69	9,80	8,75	7,23	5,59	3,66
$Y$	[J.kg <sup>-1</sup> ]	128,07	123,40	117,72	111,94	104,83	96,10	85,81	70,95	54,83	35,93
<b>Střední otáčky (n = 2550 min<sup>-1</sup>)</b>											
$H$	[m]	11,66	10,96	10,24	9,48	8,64	7,70	6,45	5,14	3,66	2,00
$Y$	[J.kg <sup>-1</sup> ]	114,41	107,52	100,47	93,02	84,78	75,49	63,30	50,43	35,93	19,62
<b>Minimální otáčky (n = 2250 min<sup>-1</sup>)</b>											
$H$	[m]	10,00	9,24	8,35	7,38	6,33	5,34	4,25	3,03	1,844	-
$Y$	[J.kg <sup>-1</sup> ]	98,10	90,66	81,95	72,39	62,06	52,36	41,67	29,76	18,09	-



Obr. 5.1 Závislosti měrné energie na průtoku čerpadla Wilo TOP S 65/13 pro různé otáčky

## 6 Provozní bod systému

Provozní bod systému dostaneme po vynesení charakteristik  $Y-Q$  čerpadla a potrubí do společného grafu, viz obr. 6.1. Provozní bod je společným bodem charakteristiky čerpadla a charakteristiky potrubí. Platí zde tedy rovnost  $Y_{\check{c}} = Y_p$  [2]. Souhrn výpočtů je uveden v příloze 2.



Obr. 6.1 Návrh provozního bodu systému pro různé otáčky čerpadla

Z této charakteristiky vyplývá, že provozní bod pro maximální otáčky čerpadla je pro měrnou energii  $Y \doteq 55,11 \text{ J.kg}^{-1}$  a tomu odpovídající průtok  $Q \doteq 0,0113 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , dále pro střední otáčky je pro měrnou energii  $Y \doteq 44,90 \text{ J.kg}^{-1}$  a tomu odpovídající průtok  $Q \doteq 0,0101 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  a pro minimální otáčky je pro měrnou energii  $Y \doteq 35,70 \text{ J.kg}^{-1}$  a tomu odpovídající průtok  $Q \doteq 0,0090 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .

Hranice laminárního proudění je obecně udávána pro  $Re = 2320$ . Vzhledem k průměru potrubí a k němu vztahným rychlostí ( $c_{53} = 0 \div 5,5 \text{ m.s}^{-1}$  - pro průměr potrubí  $d = 53,6 \text{ mm}$  a  $c_{67} = 0 \div 3,5 \text{ m.s}^{-1}$  - pro průměr potrubí  $d = 67 \text{ mm}$ ) bude tato hranice laminárního proudění překročena přibližně při rychlosti  $c_{53} = 0,045 \text{ m.s}^{-1}$ , resp.  $c_{67} = 0,036 \text{ m.s}^{-1}$ . Těmto rychlostem odpovídá průtok  $Q_{53} = 0,35 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  a  $Q_{67} = 0,45 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . Je zřejmé, že rychlosti jsou velice malé, proto je zobrazení laminární oblasti v obr. 6.1 zanedbáno a dále již nebude uvažována.

## 7 Realizace měřicí trasy

Kvůli omezeným finančním prostředkům bylo nutné, aby materiál pro stavbu tratě byl co nejlevnější. Proto bylo zapotřebí nejprve nalézt materiál z předchozích experimentů, vyhodnotit chybějící materiál a určit, jaké prvky je potřeba dokoupit. V laboratořích Mechaniky tekutin byl právě takovýto vhodný materiál nalezen. Konkrétně se jednalo o kusy potrubí z transparentního (průhledného) PVC, armatury a především oběhové čerpadlo a průtokoměr s vhodnou dimenzí pro dané potrubí.

Bylo rozhodnuto, že měřicí trasa bude umístěna v halových laboratořích, konkrétně v laboratoři „kompresorů“ H2-55a u zadní vrátnice. Výběr místa v laboratoři (již s připravenou nádrží) je uveden a obr. 7.1. Vzhledem k omezenému místu v laboratoři nemůže být trasa moc dlouhá. Nalezené kusy potrubí se skládají (kombinovaně) z potrubí o  $D = 75\text{mm}$  a  $D = 63\text{mm}$ . Potrubí o rozměrech  $D = 75\text{mm}$  je kompletní a stačí k němu pouze připojit čerpadlo. Tato část potrubí, společně s nádrží, definuje délku celé trasy. Zároveň určuje, jestli bude možné použít vybrané místo v laboratoři. Trasa má na délku asi 4 m, takže v laboratoři bude mít dostatečnou rezervu asi 35 cm od stěny a asi 17 cm od horkovzdušného topení, což po odstínění bude stačit.



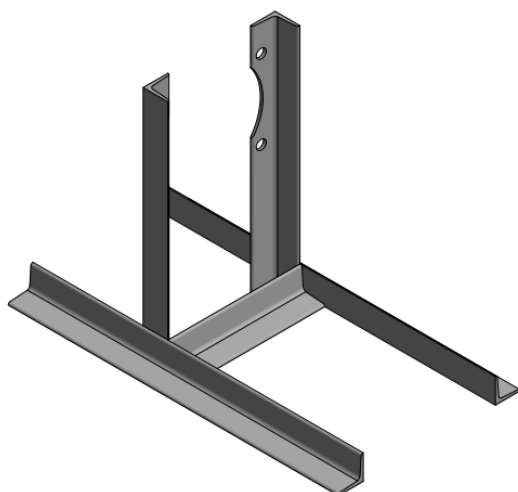
Obr. 7.1 Vybrané místo v laboratoři pro realizaci trasy, zde již s připravenou nádrží

Na základě předchozích pozitivních zkušeností je materiál vybrán u firmy KOWA, s.r.o. V příloze 5 je specifikovaný materiál, který bude zakoupen pro dostavbu celé trasy. Na dostavbu celé trasy není potřeba velkého množství materiálu. Největší položku tvoří hlavně potrubí. Bude proto zakoupena trubka netransparentní, tmavě šedá. Tato varianta plně dostačuje a je výrazně levnější než trubka z transparentního materiálu. Dále bude zakoupen materiál potřebný pro napojování potrubí. Pro rozebíratelné spoje budou zakoupeny příruby, přírubové kroužky a spojovací materiál a pro nerozebíratelné, pevné, spoje pak objímky a lepidlo. Celkové náklady na stavbu celé trasy shrnuje tab. 7.1.

Tab. 7.1 Celkové náklady

<b>Položka</b>	<b>Cena</b>
Cena za materiál	2 104,19 Kč
Doprava	250,00 Kč
Spojovací materiál	540,00 Kč
<b>Celkem</b>	<b>2 894,19 Kč</b>

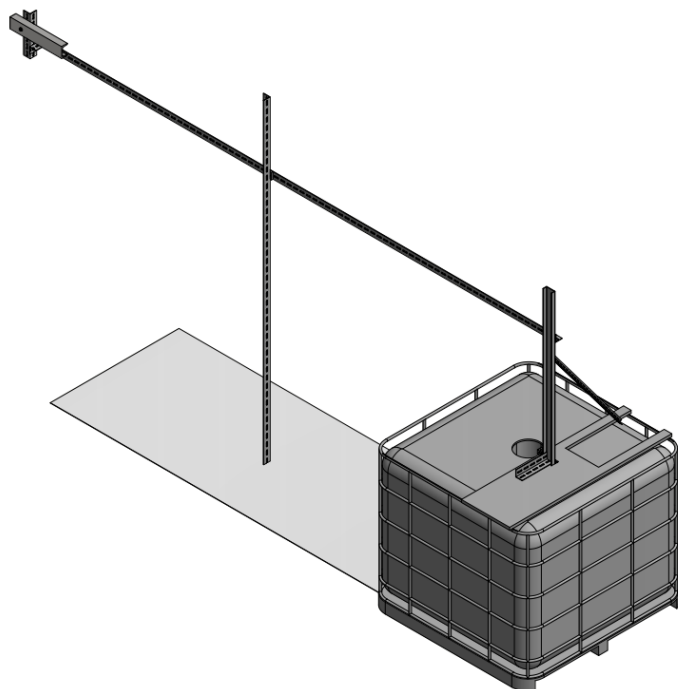
Další materiál, hlavně na stavbu konstrukce pro trasu, byl použit ze „zásob“ dílny. Výtokovou část potrubí nelze z konstrukčních důvodů nádrže umístit přímo na zem. Na této části trasy je také umístěné oběhové čerpadlo, které má největší podíl na hmotnosti celé „dolní“ části trasy. Byla proto sestavena konzole přímo na míru danému čerpadlu tak, aby mohla nést celou hmotnost čerpadla a potrubí s vodou, viz obr. 7.2. Konzole je vyrobena z několika kusů rovnoramenného L - profilu o rozměrech 50 x 4, které jsou k sobě přivařeny.



Obr. 7.2 Konzole pro čerpadlo



Pro uchycení „horního“ dílu trasy byla vytvořena samostatná konstrukce, která byla upevněna k nádrži a ke kotevní tyči ve stěně. Základem je ocelová deska připevněná na výztužnou klec nádrže. Kolmo k desce je připevněna stojná tyč (U - profil), ke které je upevněna hlavní nosná konstrukce, L - profilová tyč. Na tuto konstrukci je uchycena, pomocí objímek, celá „horní“ část trasy. Kvůli zamezení průhybům konstrukce je celá sestava ještě podepřena další L - profilovou tyčí. Celková konstrukce je uvedena na obr. 7.3. Kompletně postavená trasa a její umístění v laboratoři je uvedena na obr. 7.4.



Obr. 7.3 Nosná konstrukce trasy

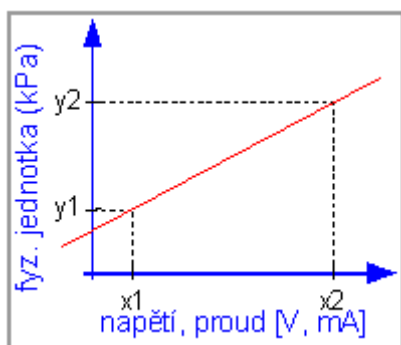


Obr. 7.4 Kompletně postavená měřicí trasa

## 7.1 Použité přístroje

Na trasu budou umístěny přístroje, které byly použity v minulosti na různých projektech, a nyní již pro ně není využití. Pro čerpání vody bude použito oběhové čerpadlo Wilo TOP S65/13. Dále budou na trasu umístěny měřicí přístroje. Prvním z přístrojů je magneticko-indukční průtokoměr MQI 99 DN 50 od firmy Ela Brno. Průtokoměr je z konstrukčních důvodů umístěn na „horní“ část trasy v horizontální poloze. Toto umístění není doporučeno výrobcem, protože zde může docházet k tvorbě vzduchem plněného prostoru a průtokoměr by neměřil správně. Vzhledem k zavedení výtlačného potrubí pod vodní hladinu se nepředpokládá velké zavzdušnění a případně vzniklé bubliny budou odstraněny při spuštění čerpadla, tedy za provozu. Dalším přístrojem je diferenční manometr od firmy ZPA Nová Paka, a.s., který bude měřit tlakovou diferencí před a za čerpadlem. Současně budou připojeny k diferenčnímu manometru dva standardní manometry, které budou sloužit hlavně pro zobrazení změny tlaku. Průtokoměr a diferenční manometr budou zapojeny do A/D převodníku UDAQ 1208 od firmy TEDIA, s.r.o. Vyhodnocení naměřených dat se pak bude provádět v programu *Měřicí ústředna k UDAQ-1208*. Program společně s driversy pro instalaci a s návodem na instalaci a obsluhu poskytla firma BHV senzory, s.r.o.

Program byl nastaven tak, aby výstupní napětí přímo odpovídalo tlakové diferencii  $\Delta p$  v barech. Na diferenčním manometru byly pomocí přístroje na vytvoření požadovaného tlaku nastaveny referenční hodnoty tlaku, pro které byly získány odpovídající hodnoty napětí (konstanty) a podle lineární závislosti, která je v programu v záložce *Konfigurace*  $\rightarrow$  *Konfigurace*, viz obr. 7.5, byly do programu vloženy tyto konstanty:  $x_1 = 1,84$ ,  $y_1 = 0$ ,  $x_2 = 4,75$  a  $y_2 = 1,5$ .



Obr. 7.5 Lineární závislost měřené fyzikální jednotky na napětí (příp. proudu).

## 8 Ověření výpočtu

### 8.1 Naměřené hodnoty

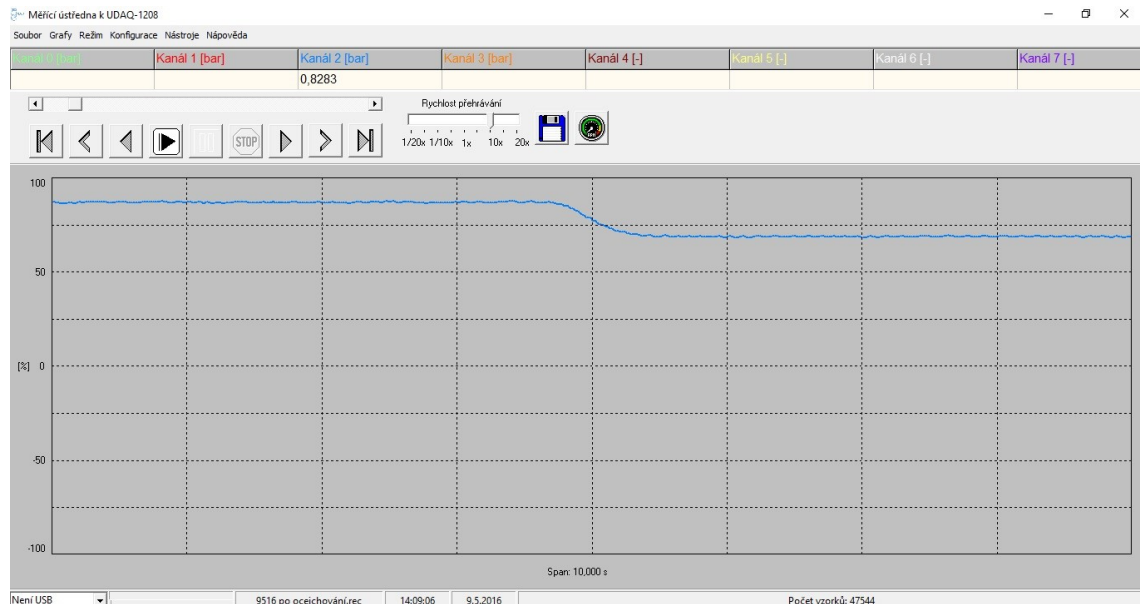
V rámci ověření charakteristiky  $Y-Q$  čerpadla pro konstantní otáčky  $n_{max} = 2800 \text{ min}^{-1}$  byla naměřena data, která udává tab. 8.1, jejich grafické znázornění pak obr. 8.1. Z důvodu nesprávně pracujícího průtokoměru (viz kapitola 9.4 *Průtokoměr*) byly hodnoty průtoku naměřeny objemovou metodou pomocí ocejchované odběrové nádoby a stopek. Hodnoty tlaku byly vyhodnocovány softwarově. Na obr. 8.2 je uvedena ukázka průběhu měření ve vyhodnocovacím programu. Program v současnosti neumožňuje filtrovat vstupní data, zaznamenává tak celé pásmo hodnot. Proto je nutné naměřená data aritmeticky zprůměrovat.

Tab. 8.1 Naměřená data objemovou metodou

Číslo měření	Čas $t$	Tlak před čerpadlem $p_s$	Tlak před čerpadlem $p_s$	Tlak za čerpadlem $p_v$	Tlak za čerpadlem $p_v$	Rozdíl tlaků $\Delta p$	Tlak. rozdíl z diferenčního manometru $\Delta p_{dm}$	Objem $V$	Objem $V$
Jednotka	[s]	[kPa]	[Pa]	[kg.cm <sup>-2</sup> ]	[Pa]	[Pa]	[bar]	[l]	[m <sup>3</sup> ]
1	4,70	0,50	500	0,850	83 385	82 885	0,82464	41,5	0,0415
2	5,37	0,50	500	0,850	83 385	82 885	0,82614	42,5	0,0425
3	4,78	0,50	500	0,850	83 385	82 885	0,82514	39,5	0,0395
4	6,08	2,30	2 300	1,000	98 100	95 800	0,95583	41,2	0,0412
5	5,76	2,30	2 300	1,000	98 100	95 800	0,95259	40,0	0,0400
6	5,85	2,10	2 100	0,990	97 119	95 019	0,94443	39,8	0,0398
7	12,33	3,75	3 750	1,200	117 720	113 970	1,14329	42,0	0,0420
8	12,52	3,75	3 750	1,200	117 720	113 970	1,14306	43,5	0,0435
9	12,93	3,60	3 600	1,150	112 815	109 215	1,13878	45,5	0,0455
10	3,85	0,00	0	0,685	67 199	67 199	0,66838	35,0	0,0350
11	3,58	0,00	0	0,695	68 180	68 180	0,67214	34,0	0,0340
12	3,69	0,00	0	0,695	68 180	68 180	0,67753	34,5	0,0345
13	4,18	0,00	0	0,695	68 180	68 180	0,67002	40,0	0,0400
14	0,00	4,50	4 500	1,350	132 435	127 935	1,29414	0,0	0,0000
15	0,00	4,50	4 500	1,350	132 435	127 935	1,29390	0,0	0,0000
16	0,00	4,50	4 500	1,360	133 416	128 916	1,29373	0,0	0,0000

Pozn.: Převodní vztah mezi  $\text{kg.cm}^{-2}$  (jednotka technické atmosféry, jiné označení pro  $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) a pascalem je následující:  $1 \text{ kg.cm}^{-2} = 98066,5 \text{ Pa} \doteq 98100 \text{ Pa}$  [7]

Tabulka zahrnuje i hodnoty ze standardních manometrů. Jak vyplývá z tabulky, tyto hodnoty se liší o stovky, maximálně však o jednotky tisíců pascalů oproti hodnotám naměřených diferenčním manometrem. Poskytují proto vcelku věrohodně informace o správnosti měření diferenčního manometru. Tyto rozdíly tlaků mohou být způsobeny tím, že manometry nebyly dlouho používány a nejsou ani ocejchovány.



Obr. 8.2 Průběh měření

## 8.2 Výpočet hodnot měrné energie a průtoku

Vzorový výpočet je proveden pro první měření. Souhrnné výsledky jsou pak uvedeny v tab. 8.2.

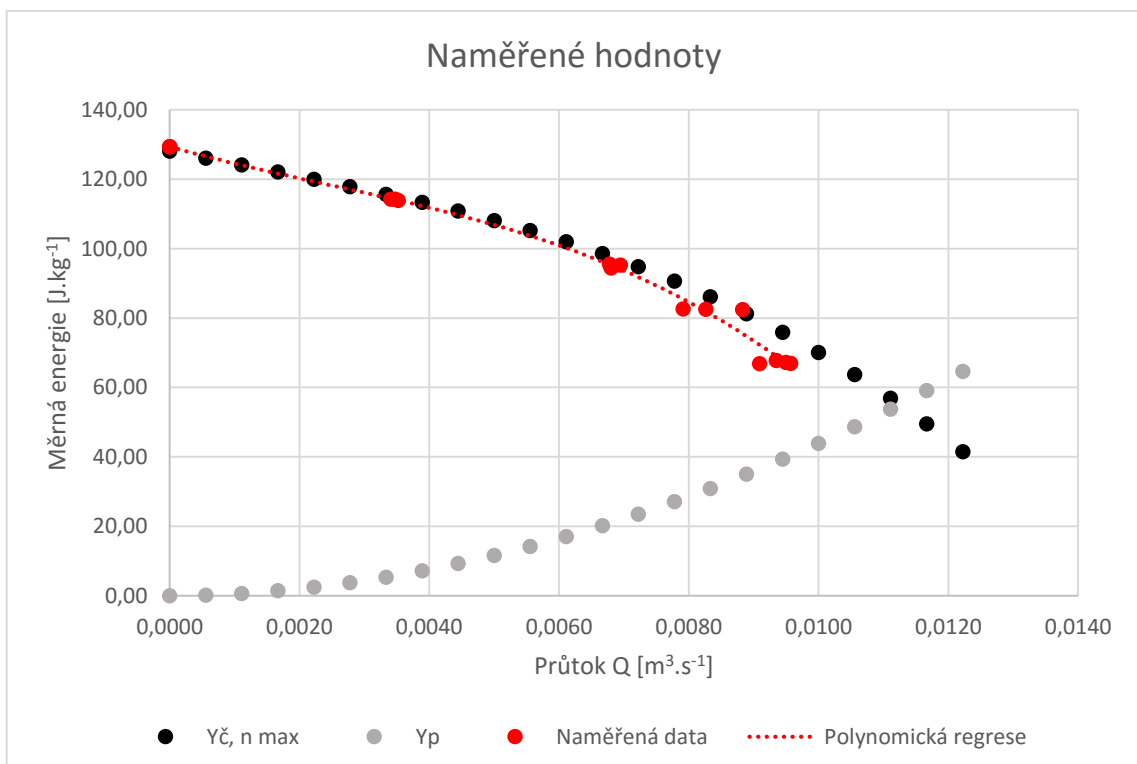
$$Y_c = \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{0,8246 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^3} = 0,8246 \cdot 10^2 = 82,464 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,0415}{4,70} = 0,00883 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Hodnoty měrné energie čerpadla  $Y_c$  a průtok  $Q$  jsou ověřovány pro konstantní otáčky  $n = 2800 \text{ min}^{-1}$ . Naměřené hodnoty jsou vyneseny do grafu společně s charakteristikou čerpadla  $Y-Q$  poskytnutou výrobcem a s vypočtenou charakteristikou potrubí. Výsledek je uveden na obr. 8.3.

Tab. 8.2 Výsledky měření

Číslo měření	Průtok $Q$	Měrná energie $Y_{\xi}$
Jednotka	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
1	0,00883	82,464
2	0,00791	82,614
3	0,00826	82,514
4	0,00678	95,583
5	0,00694	95,259
6	0,00680	94,443
7	0,00341	114,329
8	0,00347	114,306
9	0,00352	113,878
10	0,00909	66,838
11	0,00950	67,214
12	0,00935	67,753
13	0,00957	67,002
14	0,00000	129,414
15	0,00000	129,390
16	0,00000	129,373



Obr. 8.3 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami dodanými výrobcem čerpadla

Ze závislosti  $Y-Q$  plyne, že naměřené hodnoty se téměř shodují s hodnotami, které udává výrobce. Jak je patrné, s narůstajícím průtokem ale dochází k odchylování naměřených hodnot od hodnot dodaných výrobcem. Při maximálním průtoku je odklon největší a není dosaženo teoretického (spočítaného) provozního bodu systému pro zvolené otáčky čerpadla. Skutečná charakteristika  $Y-Q$  potrubí bude mít větší strmost oproti vypočtené charakteristice, provozní bod se posunul po charakteristice  $Y-Q$  čerpadla více vlevo. Výsledný reálný průtok bude nižší. Provozní bod nyní dosahuje hodnoty měrné energie  $Y \doteq 68 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  a tomu odpovídajícímu průtoku  $Q \doteq 0,009 \text{ m}^3$ . Odchýlení může být způsobeno tím, že ztráty v místních odporech jsou počítány jednotlivě a nepředpokládá se jejich vzájemné ovlivňování. Tento předpoklad se zřejmě nepotvrdil. Je možné, že hodnoty součinitelů místních odporů budou mít větší hodnoty než ty, které byly určeny z [3]. Jak již bylo dříve zmíněno, jsou také zanedbány ztráty v přechodech mezi prvky. Celkově lze tedy říci, že disipace energie je větší než, jak bylo spočítáno. Na pokrytí těchto ztrát a následného dosažení teoretického provozního bodu by bylo zapotřebí dodat kapalině více hydraulické energie.

## 9 Aktuální stav

Samotná stavba trasy proběhla vcelku bezproblémově. Při pokusech o odzkoušení trasy a naměření hodnot pro ověření charakteristiky  $Y-Q$  se vyskytlo hned několik problémů. Některé byly pouze dočasné, podařilo se je odstranit, některé se nepodařilo vyřešit a trvají do současnosti (stav k odevzdání diplomové práce). Ty pak téměř znemožňují pohodlné měření na trase. Proto současný stav prozatím nedovoluje jednoduché použití realizované trasy v rámci výuky studentů.

### 9.1 Diferenční manometr

Prvním problémem se vyskytl při zapojení manometru do převodníku UDAQ 1208. Manometr ukazoval pouze spodní, nulovou, hranici a horní hranici, která byla nastavena na 5V a neodpovídala realitě. Manometr nereagoval ani na změny průtoku, vyvolané přivíráním kulového kohoutu. Manometr reagoval pouze na zapnutí, resp. vypnutí čerpadla.

Nejprve bylo zapotřebí ověřit správnost zapojení elektrické skříně a funkčnost převodníku. Manometr byl proto připojen na externí zdroj a multimetr. Byly zjištěny stejné hodnoty jako při zapojení do převodníku a PC. Chyba v zapojení elektrické skříně byla vyloučena a převodník také fungoval správně.

Po připojení komunikátoru k manometru bylo zjištěno, že problém je v nastaveném rozsahu manometru. Před nastavením vhodného rozsahu bylo zapotřebí demontovat kryt manometru a manometr pomocí tlačítka přenastavit do polohy „odemčeno“.

Manometr bylo ještě nutné ocejchovat, tak aby ukazoval přímo diferenci tlaku v barech. Ocejchování provedl zástupce firmy BHV senzory, s.r.o (viz kap. 7.1 *Použité přístroje*).

### 9.2 Průtokoměr

Na trase je zapojen magneticko-indukční průtokoměr MQI 99 DN 50 od firmy Ela Brno. Průtokoměr byl rovněž jako diferenční manometr zapojen do převodníku a hodnoty průtoků také měly být zobrazeny ve vyhodnocovacím programu. Při pokusech o naměření průtoku se nedařilo získat žádné hodnoty z průtokoměru. Byl proto odpojen a probíhalo měření funkčnosti pomocí multimetru přímo na řídicí jednotce, která je nedílnou součástí průtokoměru. Multimetr ukazoval víceméně nesmyslné hodnoty, ať už bylo měřeno

napětí, proud nebo frekvence. Po konzultacích s vedoucím diplomové práce a zástupcem firmy BHV senzory bylo zjištěno, že řídicí jednotka by měla obsahovat, a také v minulosti obsahovala, ovládací panel s displejem. Tuto součást s největší pravděpodobností někdo vymontoval a aplikoval někde jinde, aniž by to komukoli oznámil.

Z předchozích měření na fakultě je k dispozici ještě jeden průtokoměr stejného typu od stejné firmy, ale jiné dimenze. Ovládací panel z tohoto průtokoměru byl vyjmut a zapojen do řídicí jednotky průtokoměru zapojeného na trase. Panel se podařilo zprovoznit, nicméně tu stále bylo několik problémů.

Panel na řídicí jednotce sice zobrazoval průtoky, ale tyto průtoky byly zcela mimo rozsah daného systému, tudíž nereálné. Ruční nastavení řídicí jednotky připadalo v úvahu, ale jednotka byla zaheslovaná a heslo nebylo k dispozici. Naštěstí se podařilo nalézt návod a jednotku odemknout. Byl nastaven odpovídající průtok, nicméně ani po tomto nastavení neukazovala jednotka správný průtok. Vždy po nastavení rozsahu průtoku, od hranice průtoku  $10 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ , pro maximální průtok tratí byla vždy zobrazena dvojnásobná hodnota horní hranice nastaveného rozsahu průtoku a v případě nulového průtoku byla zobrazena nulová, tedy správná hodnota. Dále přístroj nereagoval na mírné uzavření průtoku, reakce byla pozorována až při velkém škrcení, tedy při malých průtocích. Při nastavení hranice průtoku pod  $10 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$  už průtokoměr nebyl schopen zřejmě nic detekovat a řídicí jednotka ukazovala za všech provozních stavů pouze nulový průtok. Ze zmíněného vyplývá, že soustava průtokoměr, řídicí jednotka a také ovládací panel řídicí jednotky jsou spolu provázané a nelze je tedy náhodně zaměňovat bez softwarového zásahu výrobcem.

Problém s průtokoměrem se nepodařilo odstranit, proto v současnosti není použití průtokoměru možné a pro měření průtoku se musí použít jiný způsob, např. objemová metoda.

### 9.3 Software

Vyhodnocovací program je nastaven a funguje. Nicméně je zde několik drobností, které by mohly být ještě dořešeny. Jak již bylo zmíněno, program nedokáže filtrovat vstupní data, zaznamenává tudíž pásmo hodnot. Získané hodnoty je proto zapotřebí zprůměrovat, což může prodloužit zpracování dat. Dále není dořešeno zobrazování hodnot grafem. Průběh hodnot je zobrazován celkem věrohodně, ale rozsah stupnice v procentech neodpovídá procentuálnímu přepočtu měřených hodnot. Posledním nedořešeným bodem zůstává samotné vyhodnocení dat. Po připojení průtokoměru má být



program schopen zobrazovat grafickou závislost jedné veličiny na druhé, v tomto případě tlaku, příp. měrné energie, na průtoku. Tato funkce nebyla dosud vyzkoušena z důvodu nefunkčního průtokoměru. Druhá veličina by měla být oceňována obdobně, jako tomu bylo u hodnot tlaku. (viz kap. 7.1 *Použité přístroje*).

## 9.4 Souhrn

Současný stav dovoluje bezproblémově měřit a vyhodnocovat tlak a je tedy možný výpočet měrné energie čerpadla. Z důvodu nezprovoznění průtokoměru nelze měřit průtok průtokoměrem a hodnoty nelze vyhodnotit softwarově. Momentálně lze měřit průtok pouze objemovou metodou.

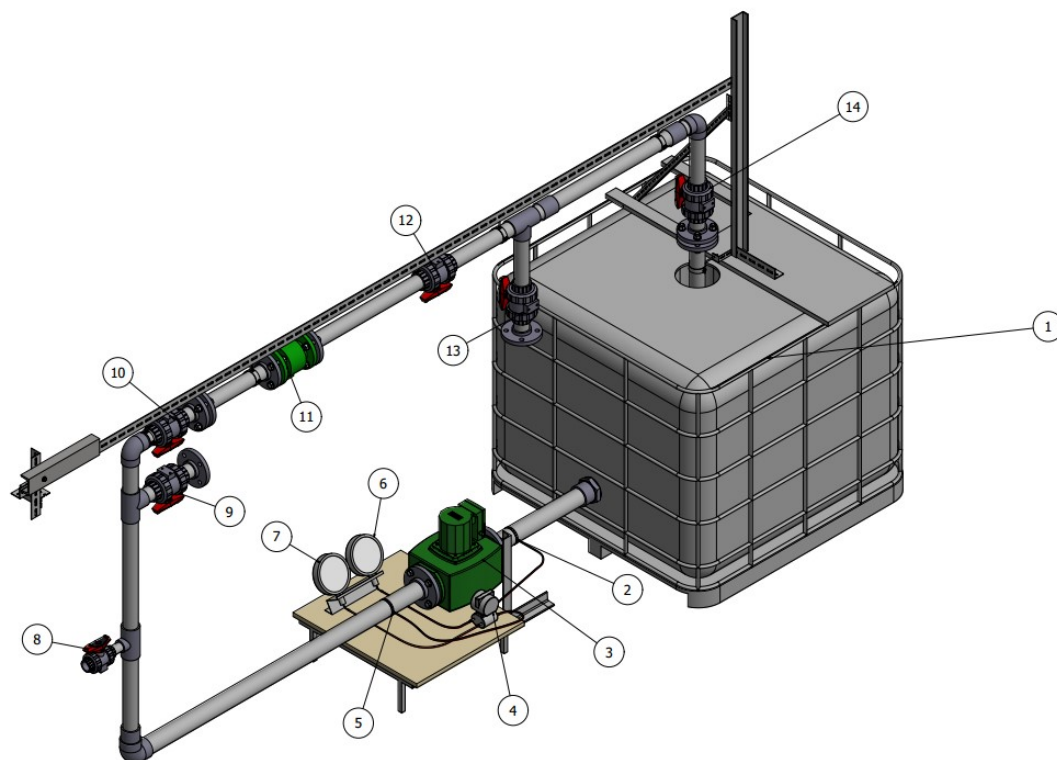
Návrhů na řešení problému existuje hned několik. Prvním řešením může být odborný servis průtokoměru přímo u výrobce, v Ela Brno. Na základě e-mailové komunikace se zástupcem firmy Ela, viz příloha 6, bylo zjištěno, že případný servis by vyšel na 7 500 Kč bez DPH a bez dopravy. Cena by zahrnovala i kalibraci celé soustavy. Další možností je zakoupení zcela nového zařízení, které by vyšlo i s kalibrací na 30 750 Kč bez DPH. Obě tato řešení momentálně nepřipadají v úvahu vzhledem omezenému rozpočtu na realizaci této trasy.

Dalším možným řešením by mohlo být zvětšení odběrové nádoby a tím pádem by také došlo k prodloužení odběrových časů, ale vzhledem k umístění odběru by muselo dojít k vyvedení odběru mimo osu trasy tak, aby odběrová nádoba stála na zemi a ne jako nyní na stole. Společně s tím by muselo dojít téměř k celému zaplnění nádrže vodou, popř. také k prodloužení výstupního potrubí, aby nedošlo k přisávání vzduchu do čerpadla.

Trasu by také bylo možné osadit úplně jiným měřičem průtoku. Jednou z možností pro tento případ je využití clony. Použitím clony by mohl být využit diferenční manometr, který je k dispozici. Clony jsou vhodné pro osazení potrubí od dimenze DN 50, což trasa v místě možného osazení clonou splňuje. Při těchto rozměrech již není zapotřebí při výpočtech používat korekční součinitele [3] a výpočet se provádí dle normy. Samotný návrh clony může být realizovaný podle [3] nebo podle příslušné normy [8]. Při návrhu se také musí zvážit vhodnost umístění clony tak, aby nebyla ovlivněna místními odpory, kterých je na trase poměrně dost.

## 10 Návrh metodiky měření

Tato část slouží jako návod na vypracování laboratorní úlohy „Měření charakteristiky čerpadla“. Vzorový dokument pro vypracování úlohy bude přiložen v příloze 7. V této kapitole je uveden popis trasy, který je uveden na obr. 10.1 a popis vypracování laboratorní úlohy.



Obr. 10.1 Schéma trasy s popisem

Pozice	Popis
1	Nádrž s vodou
2	Tlakový odběr před sáním čerpadla
3	Oběhové čerpadlo Wilo TOP SD 65/13
4	Diferenční manometr
5	Tlakový odběr za výtlakem čerpadla
6	Manometr - před sáním čerpadla
7	Manometr - za výtlakem čerpadla
8	Kulový kohout č. 1 - poloha <b>UZAVŘENO</b>
9	Kulový kohout č. 2 - poloha <b>UZAVŘENO</b>
10	Kulový kohout č. 3
11	Magneticko-indukční průtokoměr MQI 99 - Ela Brno
12	Kulový kohout č. 4
13	Kulový kohout č. 5 - poloha <b>UZAVŘENO</b>
14	Kulový kohout č. 6

Před každým měřením je nejprve nutné zkontrolovat obsah vody v nádrži. Vody může být v nádrži málo a mohlo by dojít k přísávání vzduchu do čerpadla, nebo může být nádrž prázdná a pak by čerpadlo běželo tzv. „naprázdno“. Oba jevy jsou pro čerpadlo nevhodné a mohlo by dojít při těchto stavech až k poškození stroje. Nutná je i kontrola polohy kulových kohoutů č. 1, 2 a 5 (na pozicích 8, 9 a 13, dle obr. 10.1), aby nedošlo k vytopení laboratoře, zároveň by mohlo dojít k odčerpání veškeré vody z nádrže a tím také k problému, který je zmíněn výše. Proto tyto kulové kohouty musí být **VŽDY UZAVŘENY!** Výjimku tvoří pouze kohout č. 5, který slouží k odběru vody při měření průtoku objemovou metodou. Musí být ale zajištěna odběrová nádoba. V ostatních případech musí být také uzavřen.

Po ověření je možné spustit vyhodnocovací program. Vyhodnocení hodnot napětí a elektrického proudu probíhá v programu *Měřicí ústředna k UDAQ-1208*. Program je primárně určen pro používání v prostředí operačního systému Microsoft Windows 10. Podle informací výrobce by měl program fungovat i v prostředích operačních systémů Microsoft Windows 7 a 8 (popř. 8.1). Nastavení programu bude popsáno dále. Po nastavení programu lze spustit čerpadlo a průtokoměr (obě zařízení musí být zapojena do elektrické sítě). Spuštění probíhá tlačítkem na „stojanu“, který se nachází hned vedle nádrže s vodou, viz obr. 10.2. Protože na trase je několik „slepých“ odboček, ve kterých mohou vznikat prostory zaplněné vzduchem, je vhodné s měřením několik sekund počkat, než dojde k úplnému odstranění vzduchu z potrubí.



Obr. 10.2 Umístění tlačítka pro zapnutí a vypnutí čerpadla

Měření probíhá v celém rozsahu výkonu čerpadla a vyhodnocována bude pouze jedna charakteristika  $Y-Q$  čerpadla pro konstantní otáčky  $n_{max}=2800 \text{ min}^{-1}$ . Vlastní měření probíhá odečtením jednotlivých bodů charakteristiky  $Y-Q$ , které jsou získány nastavováním (škrcením) průtoku. Regulace průtoku probíhá pomocí kulového kohoutu. Doporučuje se k tomuto účelu využívat pouze jeden z kohoutů č. 4 nebo 6 (na pozici 12 a 14, dle obr. 10.1). Hodnoty jednotlivých bodů získáme z vyhodnocovacího softwaru. Je potřeba alespoň deset různých měření (bodů) pro sestavení odpovídajícího průběhu charakteristiky  $Y-Q$  čerpadla. Pro kontrolu při měření nebo pro ověření výsledků lze odečítat hodnoty tlaku přímo na připojených standardních manometrech. Tyto manometry slouží především k informativním účelům. Je možné také provést kontrolu měření průtoku pomocí výpustného potrubí, tzv. objemovou metodou. Nejprve je nastaven požadovaný průtok pomocí kohoutu č. 4, kohout č. 5 musí být uzavřený. Je-li nastaven průtok, uzavře se kohout č. 6. Za předpokladu umístěné odběrové nádoby pod výtokem, může dojít k otevření kohoutu č. 5 a tedy k měření. Nádoba musí být dostatečně velká, aby byla schopná zachytit daný průtok. Po dobu odběru měříme čas. Naměřený objem vody  $V$  podělíme časem  $t$  a získáme tak průtok  $Q$ , který je uveden vztahem (10.1):

$$Q = \frac{V}{t} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10.1)$$

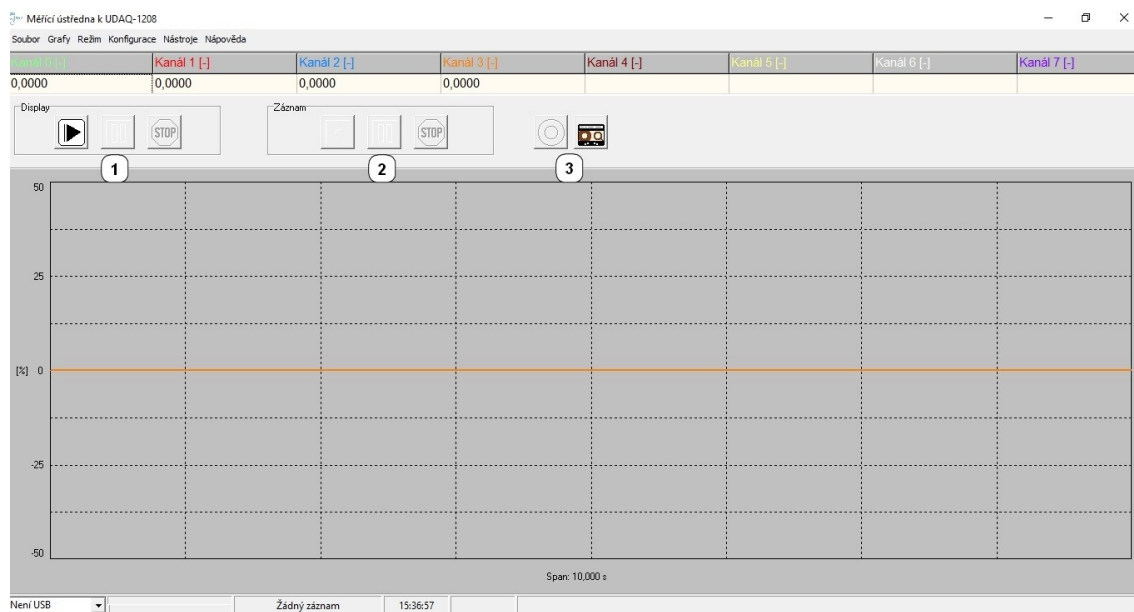
Po naměření objemu se opět uzavře kohout č. 5 a otevře se kohout č. 6. Kohout č. 5 musí být, pro účely měření, otevřen a uzavřen v co nejkratším čase, aby zůstal dodržený nastavený průtok. Tím může vzniknout hydrodynamický ráz a docházet tak k „trhnutí“ potrubí. Nicméně potrubí by tento stav mělo vydržet. Po naměření průtoku se do odběrové nádoby zavede hadička, která přečerpá vodu zpět do „hlavní“ nádrže s vodou.

Po skončení měření se uloží získaná data ze softwaru a vypne se elektrický přívod pro čerpadlo a průtokoměr.

## 10.1 Nastavení vyhodnocovacího programu

Výstupní signály z měřidel jsou převáděny A/D převodníkem a zpracovány programem *Měřicí ústředna k UDAQ-1208* (dále jen „program“), který rovněž umožňuje ukládání naměřených dat do souboru. Předpokladem pro správné spuštění programu je jeho nainstalování. Návod na instalaci, který poskytla firma BHV senzory, s.r.o., bude přiložen na CD.

Před spuštěním programu je potřeba připojit převodník (modul UDAQ-1208) k PC pomocí USB kabelu, jinak by ho program nenašel. Připojení převodníku se zobrazuje v levém dolním okraji, viz obr. 10.3. Program umožňuje práci ve dvou režimech - měření a prohlížení. Při spuštění programu je automaticky nastaven režim měření. Prostředí programu pro režim měření, je ukázáno na obr. 10.3. V tomto dialogovém okně jsou tři ovládací panely s tlačítky. Panel „Display“ (1) slouží pro ovládání zobrazení naměřených hodnot. Hodnoty jsou zobrazovány číselně a graficky (grafem). Panelem „Záznam“ (2) je umožněno pořizovat záznam do souboru. Oba panely mají tlačítka *Start*, *Stop* a *Pauza*, jejich použití je intuitivní a není třeba je zde dále popisovat. Panel „3“ obsahuje tlačítka pro přečtení jednorázového stavu na vstupech převodníku a tlačítko na přepínání mezi režimy měření a prohlížení. (Při přepnutí do režimu prohlížení za probíhajícího měření dojde k zastavení měření i záznamu.)



Obr. 10.3 Prostředí programu pro režim měření

Dříve než je zahájeno měření je nutné soubor uložit - příkaz *Soubor* → *Nový záznam*. Po uložení je možné v panelu „Display“ spustit měření tlačítkem „Spustit zobrazení“. Pro ukládání záznamu do souboru je ještě potřeba spustit záznam na panelu „Záznam“ tlačítkem „Spustit nahrávání do souboru“. Případně lze spustit tímto tlačítkem celý proces. Ukládání dat do souboru lze přerušovat tlačítkem *Pauza*, následné opětovné spuštění záznamu bude pokračovat do již vytvořeného souboru a data nebudou přepisována. Před začátkem měření je dobré nastavit v kartě *Konfigurace* → *Konfigurace*, vpravo dole („*Omezení počtu ukládaných vzorků*“),

dostatečné množství uložených vzorků, aby nedošlo během měření k náhlému zastavení měření. Ukončení ukládání dat do souboru se děje zastavením záznamu a ukončením celého programu. Je vhodné před ukončením programu ještě zkontrolovat vytvoření souboru *rec* a zda obsahuje naměřená data.

Soubor se záznamem se ukládá s příponou *rec* a lze ho otevřít pomocí programu „Poznámkový blok“. V tomto textovém souboru je v každém řádku uloženo jedno odměření ze všech analogových vstupů včetně data a času pořízení a vzorkovací frekvence. Soubor lze také importovat do Excelu. Společně se záznamem se uloží soubor ve formátu *ini*, ve kterém je uložena konfigurace příslušného měření. Není proto doporučeno tento soubor mazat, neboť by mohlo dojít k nesprávnému čtení již naměřených dat. Při prohlížení záznamu je nutné nejprve načíst soubor s příponou *ini* v kartě *Konfigurace* → *Načíst ini* a až poté soubor s příponou *rec* tlačítkem *Prohlížení záznamu*. Prostředí prohlížení záznamu je podobné režimu měření.

### 10.3 Výpočet charakteristiky

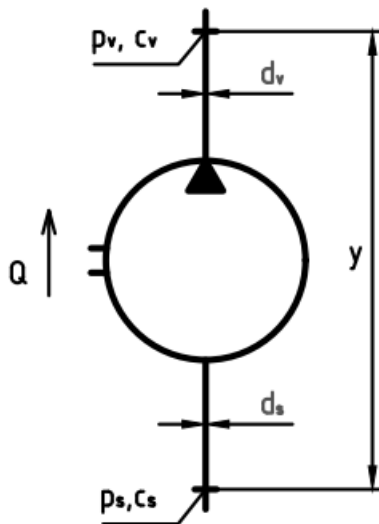
Cílem úlohy je ověření charakteristik  $Y-Q$  oběhového čerpadla, které jsou volně ke stažení na webových stránkách výrobce, viz příloha 4. Měrná energie čerpadla je spočtena podle rovnice (10.2) [9] a jednotlivé veličiny jsou na obr. 10.4.

$$Y_{\xi} = \frac{p_v - p_s}{\rho} + \frac{c_v^2 - c_s^2}{2} + g \cdot y \quad [J \cdot kg^{-1}], \quad (10.2)$$

kde:

$p$ - průměrný statický tlak	[Pa]
$\rho$ - měrná hmotnost kapaliny	[kg. m <sup>-3</sup> ]
$g$ - tíhové zrychlení	[m. s <sup>-1</sup> ]
$y$ - svislá vzdálenost vztažných míst (sání, výtlak)	[m]

indexy  $v$  a  $s$  označují výtlak a sání čerpadla



Obr. 10.4 Schématická značka čerpadla s příslušnými veličinami

V tomto případě, vzhledem k horizontálnímu umístění čerpadla, dojde ke zjednodušení výpočtu. Rychlost na sání je stejná jako rychlost na výtlaku a svislá vzdálenost vztažných míst bude nulová. Dojde ke zjednodušení rovnice (10.2) na rovnici (10.2.1):

$$Y_{\xi} = \frac{p_v - p_s}{\rho} = \frac{\Delta p}{\rho} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (10.2.1)$$

Měrná hmotnost  $\rho$  vody obecně závisí na teplotě a na tlaku [2]. V tomto případě se nejedná o přesné měření, proto se měrná hmotnost uvažuje jako nezávislá konstanta  $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Rozdíl tlaku  $\Delta p$  je měřen diferenčním manometrem, který měří tlak před a za čerpadlem a je přímo vyhodnocen již zmíněným programem. Orientačně může být měřen tlak také pomocí zapojených manometrů. Průtok  $Q$  je měřen pomocí magneticko-indukčního průtokoměru MQI 99 Ela Brno DN 50 (v případě funkčnosti - problémy popisuje kapitola 9.4 *Průtokoměr*) nebo objemovou metodou pomocí ocejchované nádoby na odběr vody a měřidlem času.

## 10.4 Výpočet účinnosti

Součástí měření je také vyhodnocení účinnosti čerpadla. Tyto hodnoty výrobce na svých webových stránkách neuvádí a není možné je tedy ověřit. Hodnotu účinnosti lze tak určit pouze měřením. Většina oběhových čerpadel je monoblokového provedení společně s elektromotorem. V tomto případě nelze určit zvlášť účinnost čerpadla a elektromotoru. Lze určit pouze celkovou účinnost celé soustavy. Výpočet účinnosti soustavy je dle vztahu (10.3) [9] :

$$\eta_s = \frac{P_h}{P_{elm}} = \frac{Q \cdot \rho \cdot Y_\xi}{P_{elm}} [-], \quad (10.3)$$

kde:

$P_h$ - hydraulický výkon čerpadla	[W]
$P_{elm}$ - elektrický příkon elektromotoru	[W]
$Q$ - průtok na výtlaku	[m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$Y_\xi$ - měrná energie čerpadla	[J · kg <sup>-1</sup> ]

Příkon čerpadla  $P_\xi$  je vždy větší než výkon  $P_h$ . Příkon musí totiž krýt vzniklé ztráty. Jedná se o hydraulické ztráty mezi sáním a výtlakem a také mechanické ztráty způsobené třením rotoru o kapalinu, třením v ložiskách a úniky kapaliny netěsnostmi [9]. Z důvodů monoblokového provedení nelze měřit příkon čerpadla  $P_\xi$ . V tomto provedení je čerpadlo a elektromotor na stejné hřídeli. Lze měřit pouze odběr z elektrické sítě, energii spotřebovanou spotřebičem, čemuž odpovídá příkon elektromotoru  $P_{elm}$ , který je měřen pomocí wattmetru.



# 11 Závěr

Byla navržena a následně v halových laboratořích realizována měřicí trasa pro měření charakteristik oběhového čerpadla, včetně osazení měřicími přístroji. Pro měření tlaku byl použit diferenční manometr a výstupní hodnoty byly zpracovávány softwarově. Průtok měl být měřen pomocí magneticko-indukčního průtokoměru, ale při měřeních charakteristiky  $Y-Q$  čerpadla bylo zjištěno, že průtokoměr nefunguje tak, jak má. Nebylo možné ho použít pro měření průtoku. Případný servis výrobce vyčíslil na 7 500 Kč bez DPH, což je nyní nereálné z důvodu omezeného rozpočtu na stavbu trasy.

Charakteristika  $Y-Q$  čerpadla byla nakonec ověřena v kombinaci se softwarově vyhodnoceným tlakem a ručně měřeným průtokem, tzv. objemovou metodou. Porovnáním naměřené charakteristiky  $Y-Q$  čerpadla (pro maximální otáčky) s charakteristikou udávanou výrobcem, byla zjištěna velice dobrá shoda v oblastech průtoků  $Q = (0 \div 0,007) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . V oblastech pro  $Q > 0,007 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  již docházelo k odklonu naměřených hodnot od hodnot dodaných výrobcem. Provozní bod zde odpovídal měrné energii  $Y \doteq 68 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  a tomu odpovídajícímu průtoku  $Q \doteq 0,009 \text{ m}^3$ . Tento průtok je zároveň průtokem maximální. Současně byl vypočten teoretický provozní bod systému. Provozní bod pro maximální otáčky čerpadla odpovídal měrné energii  $Y \doteq 55 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  a tomu odpovídajícímu průtoku  $Q \doteq 0,011 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Rozdíl teoretického a naměřeného průtoku  $\Delta Q \doteq 0,002 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Rozdíl průtoků je zřejmě dán vzájemným ovlivňováním jednotlivých místních odporů a také zanedbáním ztrát v přechodech mezi jednotlivými prvky.

Rovněž byla vypracována metodika měření v rámci laboratorní úlohy pro studenty. Z důvodu nesprávně fungujícího průtokoměru, je měření zatím pro studenty nepohodlné a proto se nedoporučuje toto měření provádět.

Řešením problému může být odeslání průtokoměru k výrobcem na servis nebo například návrh vhodné clony a její umístění na trasu místo průtokoměru.

## 12 Zdroje

- [1] Proudění\_Ztráty\_proudění\_měření průtoku. *Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: [http://uzpet.af.mendelu.cz/wcd/w-af-uzpet/soubory-ke-stazeni/proudeni\\_ztraty\\_mereni\\_prutoku.pdf](http://uzpet.af.mendelu.cz/wcd/w-af-uzpet/soubory-ke-stazeni/proudeni_ztraty_mereni_prutoku.pdf)
- [2] MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. 1. vydání. Praha: Česká technika, 2012. ISBN 978-80-01-05056-9.
- [3] KOLÁŘ, Václav a Stanislav VINOPAL. *Hydraulika průmyslových armatur: (příručka praktických výpočtů)*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [4] Melichar, J., Háková, J., Veselský, J., Michlík, L.: Místní energetická ztráta spoje plastového potrubí, spojovaného svařováním na tupo. In: Vytápění, větrání, instalace. 2006, roč. 15, č. 1, s. 15-18. ISSN 1210-1389.
- [5] Melichar, J., Veselský, J.: Místní energetická ztráta spoje polypropylénového a polyetylénového potrubí, zhotoveného svařováním na tupo. In: Vytápění, větrání, instalace. 2009, roč. 18, č. 1, s. 4 - 8. ISSN 1210-1389.
- [6.1] Trubka (Potrubní rozvody). In: *Kowa spol. s r.o.*, [online]. © 2011 [cit. 2015- 10- 22]. Dostupné z: <http://www.kowa.cz/potrubni-rozvody/pvc-u/trubky/sortiment-trubek-pvc-u>
- [6.2] Objímka MA1-nákres. In: *Kowa spol. s r.o.*, [online]. © 2011 [cit. 2015- 10- 22]. Dostupné z: <http://www.kowa.cz/potrubni-rozvody/pvc-u/tvarovky/objimky>
- [6.3] Příruba FL1-nákres. In: *Kowa spol. s r.o.*, [online]. © 2011 [cit. 2015- 10- 22]. Dostupné z: <http://www.kowa.cz/potrubni-rozvody/pvc-u/tvarovky/priruby>
- [6.4] Lemový nákrůžek QR1-nákres. In: *Kowa spol. s r.o.*, [online]. © 2011 [cit. 2015- 10- 22]. Dostupné z: <http://www.kowa.cz/potrubni-rozvody/pvc-u/tvarovky/lemove-nakruzky>
- [6.5] Lepidlo Tangit na PVC-U - 1 Kg. In: *Kowa spol. s r.o.*, [online]. © 2011 [cit. 2015- 10- 22]. Dostupné z: <http://www.kowa.cz/potrubni-rozvody/pvc-u/lepidla-a-cistice>
- [7] KAPLER, Ivan. *Míry, jednotky, veličiny*. Ostrava: Repronis, 2000. ISBN 80-861-2243-3.
- [8] ČSN EN ISO 5167-2. *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 2: Clony*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [9] MELICHAR, Jan. *Hydraulické a pneumatické stroje: část čerpadla*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04383-7.
- [10] *Pump sales direct* [online]. [cit. 2016-06-09]. Dostupné z: <http://www.pumpsalesdirect.co.uk/media/wysiwyg/datasheets/top%20s%2065-13%203ph.pdf>

## **13 Přílohy**

Příloha 1 Výkresová dokumentace

Příloha 2 Tabulky s hodnotami pro výpočet měrné energie

Příloha 3 Umístění místních odporů

Příloha 4 Charakteristika čerpadla

Příloha 5 Seznam nakupovaného materiálu

Příloha 6 Emailová komunikace s Ela Brno

Příloha 7 Laboratorní úloha