

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

12112 – ÚSTAV MECHANIKY TEKUTIN A TERMODYNAMIKY

Vodní cirkulační trať

Water circulation tunnel

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015/2016

Autor: Bc. Jiří Gemperle

Vedoucí práce: Ing. Jan Čížek, Ph.D.

Studijní program: navazující magisterský – Strojní inženýrství

Obor: Aplikovaná mechanika



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**

**Technická 4, 166 07 Praha 6 Akademický rok: 2015/2016**

---

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

pro: **Bc. Jiří Gemperle**

program: **Strojní inženýrství**

obor: **Aplikovaná mechanika**

název česky: **Vodní cirkulační trať**

název anglicky: **Water circulation tunnel**

### **Zásady pro vypracování:**

- 1) Na základě podkladů z dostupné odborné literatury vytvořte ideový návrh cirkulační vodní trati určené pro testování a kalibraci měřidel vyvíjených na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky.
- 2) Na základě bodu 1 cirkulační vodní trať navrhnete. Trať musí být dostatečně variabilní tak, aby umožňovala jak testování měřidel o rozměrech alespoň 300 mm x 10 mm, tak také nově vyvinutý průtokoměr kruhového průřezu o průtočném průměru 250 mm. Požadovaná rychlost v měřicím prostoru je 6m/s, v kruhovém měřicím prostoru pak 1,5 m/s.
- 3) Vypracujte potřebnou výkresovou dokumentaci tak, aby podle ní bylo možné trať v prostorách Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky realizovat.
- 4) Na vybudované trati proveďte sérii základních ověřovacích experimentů potvrzujících korektnost postupů použitých při jejím návrhu.

Rozsah průvodní zprávy: 50 stran textu včetně obrázků

Rozsah grafických prací: 10 stran diagramů, výkresů a obrázků

Seznam doporučené literatury: dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Čížek, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 25. 4. 2016

Datum odevzdání diplomové práce: 26. 8. 2016

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

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

V Praze dne 25. 4. 2016

## Anotační list

Jméno autora:	Bc. Jiří Gemperle
Název práce:	Vodní cirkulační trať
Anglický název:	Water circulation tunnel
Rozsah práce:	počet stran: 50 počet stran příloh: 10
Akademický rok:	2015/20166
Ústav:	12112 Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Studijní program:	navazující magisterský – Strojní inženýrství
Vedoucí:	Ing. Jan Čížek, Ph.D.
Anotace:	Diplomová práce pojednává o návrhu, konstrukci a výrobě vodní cirkulační tratě, která má být použita pro testování a kalibraci podvodních elektronických měřidel vytvořených na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky.
Annotation:	Diploma thesis discuss about design, construction and manufacture of water circulation tunnel to be used for testing and calibration underwater electronic measuring instruments developed at the Institute of Fluid Mechanics and Thermodynamics.
Klíčová slova:	vodní cirkulační trať, uklidňovací komora, axiální kolenové čerpadlo, indukční průtokoměr, PVC - U potrubí, symetrický spirální difuzor, zúžení kanálu, síta
Keywords:	water circulation tunnel, plenum chamber, knee-axial pump, flowmeter, PVC - U pipes, symmetric spiral diffuser, contraction the channel, screens

## **Abstrakt**

### **Vodní cirkulační trať**

Diplomová práce se věnuje návrhu a konstrukci vodní cirkulační tratě pro testování a kalibraci měřidel vyvíjených na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky, Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze. Návrh se skládá z rešerše o hydrodynamických tratích, následného vytvoření ideového návrhu tunelu podle informací získaných z podkladů a splňující požadavky zadání, navržení konstrukce jednotlivých komponent za použití analytických hydrodynamických výpočtů a tvorby výkresové dokumentace pro výstavbu. Na základě výkresové dokumentace autor vodní cirkulační trať vybudoval a sérií měření ověřil splnění zadání a správnost hydrodynamických výpočtů použitých při návrhu.

### **Water circulation tunnel**

The thesis deals with design and construction of water circulation tunnel for testing and calibration of measuring instruments developed at the Institute of Fluid Mechanics and Thermodynamics, Faculty of Engineering, Czech Technical University in Prague. The thesis consists of state of the art of the hydrodynamic tunnels in literature; the subsequent creation of the ideal design meeting the stated requirements, proposing of individual structural components using analytical hydrodynamic calculations and creation of drawings of the structure. Based on drawings, author has built the water circulation tunnel and verified the fulfilment of the assignment and the accuracy of hydrodynamic calculations by a series of measurements.

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu panu Ing. Janu Čížkovi, Ph.D. a panu Ing. Vítku Štorchovi za pomoc a rady, které mi poskytovali v průběhu psaní této práce.

## **Prohlášení o autorství**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, a že jsem veškeré použité informační zdroje uvedl v příloženém seznamu.

V Praze 26. srpna 2014

.....

podpis

## Obsah

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	III
Anotační list.....	V
Abstrakt.....	VI
Poděkování.....	VII
Prohlášení o autorství.....	VIII
Obsah .....	IX
Použité symboly.....	XII
1. Úvod.....	1
2. Rešerše .....	2
2.1 Používané koncepce .....	3
2.1.1 Klasický cirkulační tunel .....	4
2.1.2 „Kytarové“ tratě od firmy Rolling Hills Research Corporation .....	7
2.1.3 Vertikální vodní tunel .....	10
3. Ideový návrh .....	12
4. Návrhové výpočty.....	15
4.1 Výpočet místních ztrát .....	15
4.1.1 Ztráta v kolenech .....	15
4.1.2 Ztráta v T-tvarovce .....	15
4.1.3 Ztráty v uklidňovací komoře.....	16
4.1.4 Ztráty na výstupu z měřícího prostoru.....	17
4.2 Výpočet třecích ztrát .....	17
4.2.1 Třecí ztráty v dýzách.....	17
4.3 Výsledky výpočtu.....	18



5.	Návrh, konstrukce a realizace vodní tratě.....	21
5.1	Čerpadlo .....	21
5.1.1	Renovace čerpadla .....	23
5.2	Uklidňovací komora.....	23
5.2.1	Vypouštěcí koš.....	24
5.2.2	Začátek uklidňovací komory .....	25
5.2.3	Komín .....	28
5.2.4	Síta .....	29
5.2.5	Primární kontrakce.....	30
5.3	Větší obdélníkový měřicí prostor.....	31
5.4	Menší obdélníkový měřicí prostor .....	31
5.4.1	Sekundární kontrakce .....	31
5.5	Dvojitý spirální difuzor .....	34
5.6	Potrubí.....	36
5.7	Měření rychlosti, průtokoměr.....	37
5.8	Kruhový měřicí prostor .....	40
5.9	Podpůrný rám.....	40
5.10	Závěr kapitoly návrh, konstrukce a realizace vodní tratě.....	40
6.	Ověřovací experimenty .....	42
6.1	Měření průtoků.....	42
6.2	Měření rozdílu statických tlaků a výpočet tlakových ztrát .....	45
6.3	Zhodnocení výsledků měření .....	49
7.	Závěr .....	52
	Seznam použité literatury .....	54

Příloha A .....	i
Příloha B – Návod k použití .....	iii
Napuštění a odvzdušnění .....	iii
Ovládání rychlosti cirkulace .....	iv
Vypuštění .....	v
Příloha C – Výkresová dokumentace.....	vi

## Použité symboly

$\eta$	$[N \cdot s/m^2]$	dynamická viskozita
$v$	$[m/s]$	rychlost ve směru proudu
$\tau$	$[N/mm^2]$	tečné napětí
$\nu$	$[m^2/s]$	kinematická viskozita
$\rho$	$[kg/m^3]$	hustota
$Ma$	[ 1 ]	Machovo číslo
$a$	$[m/s]$	rychlost zvuku
$\kappa$	[ 1 ]	Poissonův poměr
$r$	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$	měrná plynová konstanta
$T$	$[K]$	termodynamická teplota
$Re$	[ 1 ]	Reynoldsovo číslo
$Re_m$	[ 1 ]	Reynoldsovo číslo modelu
$l$	$[m]$	charakteristický rozměr
$v_m$	$[m/s]$	rychlost ve směru proudu na modelu
$l_m$	$[m]$	charakteristický rozměr modelu
$\nu_m$	$[m^2/s]$	kinematická viskozita média proudícího kolem modelu
$p_z$	$[Pa]$	místní tlaková ztráta
$p_{zc}$	$[Pa]$	celková tlaková ztráta
$p_{zvc}$	$[Pa]$	celková tlaková ztráta vypočtená
$p_{zdif}$	$[Pa]$	tlaková ztráta symetrického spirálního difuzoru
$p_{zv dif}$	$[Pa]$	vypočtená tlaková ztráta sym. spirálního difuzoru
$p_{zvz}$	$[Pa]$	vypočtená tlaková ztráta tratě bez sym. spi. Difuzoru
$p_{zz}$	$[Pa]$	tlaková ztráta tratě bez sym. spi. difuzoru
$\zeta$	[ 1 ]	součinitel místních hydraulických ztrát
$\Psi$	[ 1 ]	proudová funkce
$\Phi$	[ 1 ]	potenciál rychlosti
$Q$	$[m^3/s]$	objemový průtok
$Q_h$	$[m^3/h]$	objemový průtok
$Q_{h1}$	$[m^3/h]$	objemový průtok při prvním měření
$Q_{h2}$	$[m^3/h]$	objemový průtok při druhém měření

$Q_1$	$[m^3/s]$	objemový průtok při prvním měření
$Q_2$	$[m^3/s]$	objemový průtok při druhém měření
$Q_p$	$[m^3/s]$	průměrný objemový průtok
$Q_v$	$[m^3/s]$	vypočtený objemový průtok
$S$	$[m^2]$	plocha průřezu
$S_p$	$[m^2]$	plocha průřezu průtokoměru
$v_p$	$[m/s]$	rychlost v potrubí
$d$	$[m]$	hydraulický průměr
$d_p$	$[m]$	hydraulický průměr průtokoměru
$B$	$[T]$	hustota magnetického toku (magnetická indukce)
$U$	$[V]$	indukované napětí
$S_{mp}$	$[m^2]$	plocha průřezu menšího obd. měřicího prostoru
$S_{mp1}$	$[m^2]$	plocha průřezu většího obd. měřicího prostoru
$S_{mk}$	$[m^2]$	plocha průřezu kruhového měřicího prostoru
$v_{mp2}$	$[m/s]$	rychlost v menším obd. měřicím prostoru
$v_{mp1}$	$[m/s]$	rychlost ve větším obd. měřicím prostoru
$v_{mk}$	$[m/s]$	rychlost v kruhovém měřicím prostoru
$n$	$[ot/min]$	otáčky
$k_{Sv}$	$[1]$	součinitel volné plochy děrovaného plechu
$d_{DN200}$	$[m]$	průměr potrubí DN200
$d_{DN280}$	$[m]$	průměr potrubí DN280
$S_{Kv}$	$[m^2]$	volná plocha výpustního koše
$S_{DN200}$	$[m^2]$	průřez potrubí DN200
$k_K$	$[1]$	poměr volné plochy
$\Psi_1$	$[1]$	proudová funkce paralelního proudu
$\Psi_2$	$[1]$	proudová funkce zřídla
$\Psi_3$	$[1]$	proudová funkce potenciálního víru
$r$	$[m]$	poloměr
$\varphi$	$[rad]$	úhel
$q$	$[m^3/s]$	vydatnost zřídla
$x$	$[mm]$	souřadnice
$y$	$[mm]$	souřadnice

$z$	[ $mm$ ]	souřadnice
$L$	[ $mm$ ]	délka zúžení
$\alpha$	[ $^\circ$ ]	úhel zúžení
$k$	[ $mm$ ]	délkový parametr zúžení
$D_1$	[ $mm$ ]	šířka před primárním zúžením
$D_2$	[ $mm$ ]	šířka za primárním zúžením
$D_3$	[ $mm$ ]	šířka před sekundárním zúžením
$D_4$	[ $mm$ ]	šířka za sekundárním zúžením
$p_{smp}$	[ $Pa$ ]	statický tlak v menším měřicím prostoru
$k_{mp}$	[ 1 ]	koef. bezpečnosti zatížení menšího měřicího prostoru
$b$	[ $mm$ ]	šíře poloviny vstupního kanálu do spirálního difuzoru
$r_0$	[ $mm$ ]	poloměr výstupního potrubí ze spirálního difuzoru
$\Gamma$	[ $m^2/s$ ]	cirkulace
$\lambda$	[ 1 ]	součinitel třecích ztrát
$\xi$	[ 1 ]	součinitel talkových ztrát
$f$	[ 1 ]	součinitel drsnosti
$C$	[ 1 ]	konstanta
$d_v$	[ $mm$ ]	průměr drátu síta
$\beta$	[ 1 ]	součinitel volné plochy síta
$\Delta p_{sc}$	[ $Pa$ ]	rozdíl statických tlaků před a za čerpadlem
$\Delta p_{sdif}$	[ $Pa$ ]	rozdíl statických tlaků před a za sym. spir. difuzorem

# 1. Úvod

V rámci aktivit odborné skupiny „Měřicí technika“ působící dlouhodobě na Ústavu Mechaniky tekutin a termodynamiky, Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze vznikla v minulých letech potřeba experimentálního stanoviště umožňujícího testovat měřicí techniku, která je touto skupinou vyvíjena, ve vodní lázni. Zmiňovaná měřicí technika je vyvíjena převážně ve spolupráci se společností Mavel a.s. v rámci jednoho z grantových projektů řešených ve spolupráci obou pracovišť. Hlavním úkolem předkládané diplomové práce proto bylo zmiňované experimentální zařízení navrhnout, vyrobit, zprovoznit a otestovat alespoň některé jeho základní parametry.

Obecné cíle této práce jsou:

- Z veřejných zdrojů a publikací získat co nejvíce informací o hydrodynamických cirkulárních tunelech.
- Podle získaných informací zvolit nejvhodnější koncepci pro realizaci v laboratořích.
- Zpracovat návrh konstrukce všech komponent. Návrh podpořit výpočty.
- Vytvořit výkresovou dokumentaci, podle které by bylo možné trať vybudovat.
- Zařídít výrobu všech částí trati, a sestavit z nich na předem určeném místě v laboratořích, fungující vodní cirkulační trať.
- Provést sérii základních měření, ověřujících splnění zadaných parametrů a správnost návrhových výpočtů.

## 2. Rešerše

Aerodynamické a hydrodynamické tunely jsou používány ke zkoumání vlastností těles při obtékání kapalinou. Jsou využívány především v mnoha odvětvích průmyslu od stavebnictví, až po dopravní průmysl, kde se testují modely automobilů, vlaků a letadel. Jak již bylo naznačeno, pro velkou část měření se používají zmenšené modely, protože výroba měřicí tratě, do kterého by se vešlo například celé dopravní letadlo, by byla nesmírně nákladná a náklady na provoz by byly také velmi vysoké. Ovšem aby bylo možné podle pozorování proudění detailně zmenšeného modelu usuzovat něco o vlastnostech proudění okolo skutečného zařízení, je nutné, aby si proudění byla „podobná“.

V mechanice tekutin se využívají takzvaná podobnostní čísla. Dva systémy jsou si v souvislosti s některými jevy podobné, pouze pokud mají příslušná podobnostní čísla stejnou hodnotu [2]. Obecně není možné dosáhnout schody všech podobnostních čísel při modelování nějakého reálného jevu, proto se podmínky modelování nastaví tak, aby bylo dosaženo schody jednoho nebo více čísel, které mají největší vliv na zkoumaný jev. Například při zkoumání nadzvukových rychlostí je třeba počítat s Machovým číslem  $Ma$

$$Ma = \frac{v}{a} \quad (2.1)$$

kde  $v$  je rychlost proudu a  $a$  je rychlost zvuku v daném místě (2.2), pro kterou platí

$$a = \sqrt{\kappa r T} \quad (2.2)$$

$\kappa$  je Poissonův poměr, pro ideální dvouatomový plyn (vzduch)  $\kappa = 1,44$ ,  $r$  je měrná plynová konstanta  $r = 287 \frac{J}{kg K}$  a  $T$  je termodynamická teplota [3].

Při podzvukových rychlostech je důležité dodržení Reynoldsova čísla (2.3)  $Re$ , které představuje poměr setrvačných a třecích sil.

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (2.3)$$

kde  $l$  je charakteristický rozměr a  $\nu$  je kinematická viskozita.

Pokud má být Reynoldsovo číslo stejné (2.4) pro model  $Re_m$  a skutečné zařízení  $Re$ , za použití stejného media, dostaneme výraz (2.5), ze kterého plyne, že zmenšujícímu se charakteristickému rozměru musí odpovídat náležitě zvýšení rychlosti. To u malých rychlostí nevádí, ale pokud je Machovo číslo rovno 0,8, zvyšováním rychlosti u modelu se začne projevovat stlačitelnost tekutiny [4]. Z tohoto důvodu se u některých tunelů mění vlastnosti proudícího media (2.6), například snižováním teploty docílíme snížení viskozity a tedy zvýšení Reynoldsova čísla. Způsob používaný v kryogenních tunelech spočívá v ochlazování proudícího vzduchu vstříkáváním tekutého dusíku. Pořizovací náklady a náklady na provoz jsou ovšem značné.

$$Re_m = Re = konst. \quad (2.4)$$

$$\frac{v_m \cdot l_m}{\nu} = \frac{v \cdot l}{\nu} ; \nu = konst. \rightarrow v_m = \frac{v \cdot l}{l_m} \quad (2.5)$$

$$\frac{v_m \cdot l_m}{\nu_m} = \frac{v \cdot l}{\nu} ; \rightarrow v_m = \frac{v \cdot l \cdot \nu_m}{l_m \cdot \nu} \quad (2.6)$$

Další možností je úplná změna proudící kapaliny, například místo vzduchu použít vodu, jejíž kinematická viskozita je při stejné teplotě o řád menší než vzduchu. Při měření v hydrodynamickém tunelu tedy postačují rychlosti o řád menší. I když tato varianta vypadá příznivě, má i svá úskalí. Celá trať musí být bezpodmínečně vodotěsná. Všechny části musejí být chráněny proti korozi podstatně více nežli části aerodynamických tunelů. Samotná konstrukce musí být masivnější a pevnější, kvůli hmotnosti samotné vody v naplněné trati. Významnou složkou statického zatížení je také hydrostatický tlak. I dynamické silové účinky jsou větší, nežli při proudění vzduchu.

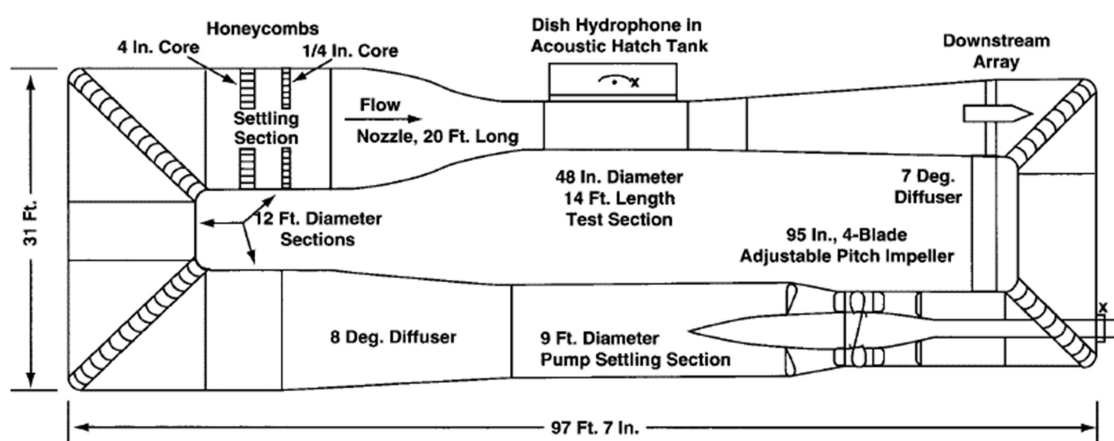
## 2.1 Používané koncepce

V následující podkapitole budou popsány různé konstrukce již postavených vodních cirkulačních tratí a jejich vlastností.



### 2.1.1 Klasický cirkulační tunel

V USA zkonstruovali po druhé světové válce velký vertikální vodní cirkulační tunel [5], který je na Obr. 2. Na Obr. 1 je vidět řez tratí s popsáním uspořádáním. Myšlenka na postavení takového tunelu vznikla u amerického námořnictva již v roce 1943, ale teprve až v roce 1945, kdy se přesunul vývoj torpéd z Harvardských laboratoří do Penn State, bylo jasné, že takové zařízení bude potřeba co nejdříve. Námořnictvo kladlo velký důraz na možnost testování hydrodynamických zařízení vybavených lodními šrouby. V červenci 1945 začala v Penn State formální studie konstrukce tunelu, ve kterém by bylo možné zkoumat funkci vrtulí za tělem torpéda. V říjnu 1946 námořnictvo vyčlenilo 1,5 milionu dolarů na výstavbu. Při konstrukci pláště tunelu byl kladen důraz na dva cíle - účinnost a masivní konstrukci pro tlumení vibrací.

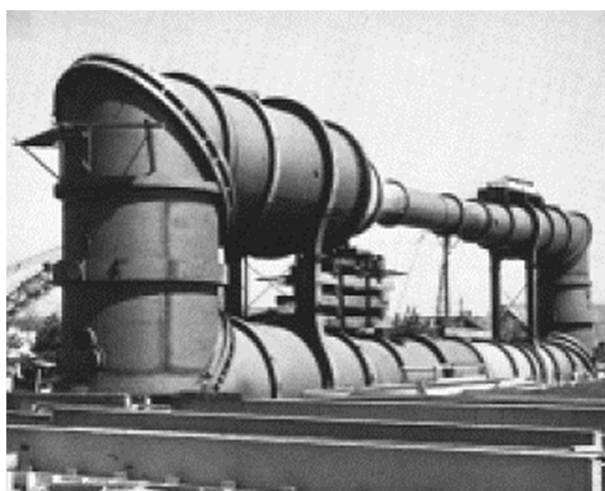


Obr. 1 - Schéma velkého cirkulačního tunelu, převzato z [5]

Před zahájením výstavby vodního tunelu návrhářský tým porovnával vlastnosti existujících tunelů, přezkoumával informace o proudění v komponentách tunelu a analyzoval toto proudění s cílem vylepšit analytické řešení daného problému. Tým konstruktérů zkoumal model vodního tunelu v laboratořích Penn State Hydraulics. Experiment podporoval rozvoj racionálních metod analýzy proudění v komponentách tunelu. Pomocí tohoto modelu byly experimentálně stanoveny vzájemné vztahy mezi jednotlivými částmi tunelu.

Na adresu tohoto omezení bylo nutné navrhnout komponenty tunelu tak, aby ztráty při proudění byly minimalizovány. Studie se zaměřily na hydrodynamicky kritické úseky,

jako jsou kruhová zúžení, měřicí prostor, přechodové úseky, difuzory a kolena. Tým zejména experimentoval s difuzory a koleny. Práce na zúženích a přechodových úsecích byla více analytická. Části se zakřivenými obrysy předcházející a následující měřicí prostor byly nejvíce náchylné ke kavitacím nebo odtržením proudu. Také nebyla žádoucí zcela jednotná plocha potrubí, aby nebyly příliš velké třecí ztráty. Největší ztráta energie celé trati je v měřicím prostoru, kde voda dosahuje nejvyšší rychlosti. Jednou z nejdůležitějších otázek bylo, jak se bude vyvíjet proudění podél stěny při vysokých Reynoldsových číslech. Voda proudí podél stěny, její tření zpomaluje tok v blízkosti povrchu a vytváří se mezní vrstva. Po odtržení mezní vrstvy tato turbulentní oblast průtokového pole vytlačuje vodu od stěny a způsobuje energetické ztráty. K odtržení dochází také v difuzoru, v němž se plocha průřezu zvětšuje příliš rychle. Okrajové vrstvy nemohou sledovat stěny, oddělí se a způsobí větší ztrátu.



**Obr. 2 - Foto velké cirkulační trati, převzato z [5]**

Materiály byly zvoleny s ohledem na návrh masivní konstrukce a na náklady spojené s výrobou velmi přesných průtočných dílů. Hlavní části byly vyválcovány z oceli, měřicí prostor a následný difuzor byly odlity z bronzu a následně obrobena. Díky těmto materiálům a masivní konstrukci dochází k tlumení vibrací a vysvětluje to, proč bylo toto „laboratorní zařízení“ ve své době jedním z nejtěšších testovacích tunelů na světě. V listopadu 1947 dokončil tým konstruktérů technickou dokumentaci a v létě následujícího roku byla zahájena výstavba.

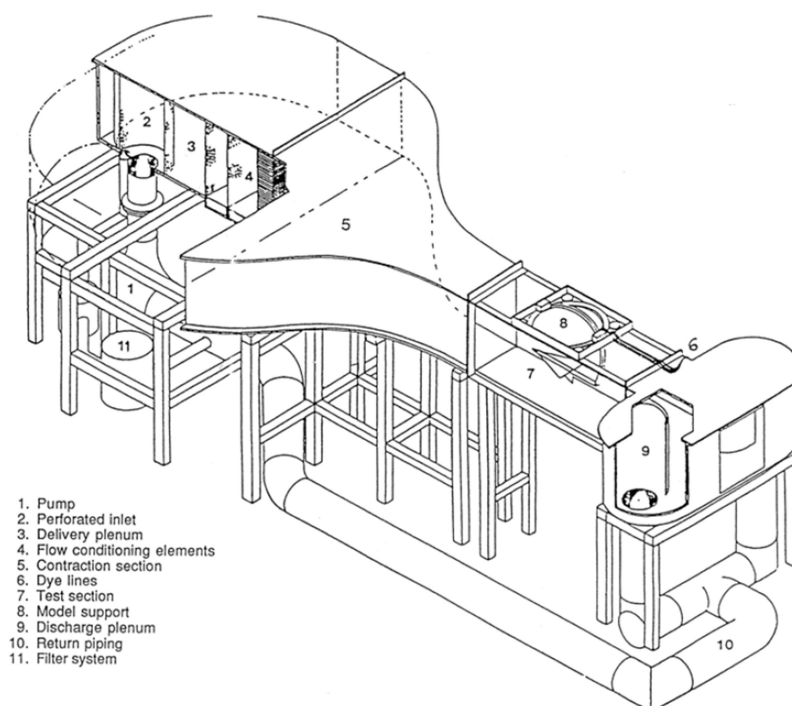
Pomocné systémy umožňují obsluze kontrolovat vlastnosti vody protékající trati. Axiální vrtulové čerpadlo umožňuje regulovat rychlost proudění změnou otáček

oběžného kola a změnou natočení čtyř lopatek. Úhel lopatek je možné měnit v rozmezí 28° pomocí hydraulického servomechanismu, který je ovládán z řídicího střediska. Elektrický motor použitý k pohonu hlavního čerpadla má příkon 2000 HP (přibližně 1500 kW) s volitelnými otáčkami pohybujícími se mezi 0 a 180 otáčkami za minutu. Motor je spojen s oběžným kolem axiálního čerpadla o průměru 95 placů (2410 mm) se stavitelnými lopatkami. Bylo zvažováno použití většího motoru, ale náklady na provoz by byly příliš vysoké.

Jedním z požadavků, při návrhu tunelu, byla možnost regulovat statický tlak v měřicím prostoru. Regulování statického tlaku v měřicím prostoru je důležité pro studování kavitací. Toho je dosaženo změnou tlaku vzduchu v horní části velké tlakové regulační nádoby spojené se spodním ramenem tunelu. Nádrž obsahuje mamutí plovák, který brání vzduchu ve styku s vodní hladinou, čímž je minimalizován obsah plynu rozpuštěného v cirkulující kapalině. Pomocné systémy tunelu také zahrnují ochlazování vody, nebo bypass, ve kterém je filtr, který pomáhá s odstraňováním rozpuštěného plynu, a také čidla pro měření teploty proudícího média. Jedinečnou vlastností tohoto tunelu je možnost regulovat stav proudící kapaliny během provozu i přes jeho velké rozměry. Kontrola obsahu rozpuštěného plynu je obzvláště důležitá, protože obsah plynu ovlivňuje kavitační jádra a následný růst kavitace.

### 2.1.2 „Kytarové“ tratě od firmy Rolling Hills Research Corporation

V předešlé kapitole je popsán velký cirkulační tunel klasické konstrukce. Následující kapitola je věnována cirkulačním tratím s neobvyklým uspořádáním (viz Obr. 3), které profesionálně vyrábí a prodává kalifornská firma Rolling Hills Research Corporation [6]. Hlavními odběrateli těchto tratí jsou převážně univerzity z celého světa.



**Obr. 3 - Schéma tratí o firmy Rolling Hills Research Corporation, převzato z [6]**

Firma Rolling Hills Research Corporation je letecká technologická společnost, která byla založena v roce 2002 a jedním z hlavních cílů společnosti je vyvíjet technologie pomáhající při výzkumu aerodynamických jevů. Vodní tunel je vynikající laboratorní nástroj pro zkoumání fyziky proudnic díky možnosti vizualizace proudění. Ačkoliv byla dříve testování ve vodních tunelech považována pouze za kvalitativní nástroj, RHRC vyvinulo techniku i pro kvantitativní měření sil a momentů, tzv. ponorné tenzometrické váhy. Dají se použít jak pro statická měření, tak pro studium dynamických účinků.

Zatímco při měření s modely v aerodynamických tunelech musí být dynamické experimenty prováděny při vyšších rychlostech než ve skutečném měřítku, ve vodních tunelech není nutné rychlost zvyšovat tolik oproti skutečnosti. Při nižší rychlosti proudění jsou setrvačné síly malé a model a podpory nemusí být tak pevné a tuhé.

RHRC nabízí dva modely výzkumných vodních tunelů, typ 2436 a typ 1520. Uspořádání těchto tunelů je téměř shodné, liší se pouze velikostí zkušebních úseků. Oba tunely nemají zakrytou hladinu měřicího prostoru z důvodu snadného přístupu k testovaným modelům během experimentu. Otevřený měřicí prostor umožňuje změny modelu bez nutnosti vypuštění celé trati, ale znemožňuje měnit statický tlak dle potřeb experimentu.

Typ 2436 má zkušební úsek široký 24 palců (610 mm), hluboký 36 palců (915 mm) a dlouhý 72 palců (1830 mm), v tomto typu tunelu se dají testovat modely letadel v měřítku 1/32 i při vysokých úhlech náběhu až do 90°. Typ 1520 má zkušební úsek široký 15 palců (380 mm), hluboký 20 palců (510 mm) a dlouhý 60 palců (1530 mm). V tomto typu tunelu se dají testovat modely letadel v měřítku 1/48.

Klíčovými konstrukčními rysy tunelu jsou rovnoměrný rychlostní profil v měřicím prostoru a horizontální orientace. Horizontální orientace usnadňuje přístup k modelu, což umožňuje modely upravovat, případně měnit, bez vypouštění celé trati. Celá vrchní část trati je vyrobena z nekorodujícího materiálu a je vyztužena pomocným rámem z konstrukční oceli. Hlavní části trati jsou vyrobeny z polyuretanové pryskyřice a skelných vláken. Díly jsou laminovány do předem připravených forem, které jsou vyleštěné do co nejvyššího lesku. Vyleštěný povrch forem má za následek mimořádně hladký vnitřní povrch částí trati. Exteriér je nastříkán epoxidovým gelcoatem. Měřicí prostor je vyroben z tvrzeného skla pro maximální zobrazení zkoumaného předmětu. Takto zkonstruovaný měřicí prostor je ideální pro použití metody PIV (Particle Image Velocimetry), také je možné tuto konstrukci použít pro sledování modelů ze všech stran, čehož je dosaženo pomocí okna v symetrickém spirálním difuzoru na konci měřicího prostoru. Osa tunelu se nachází ve výšce očí, aby pro boční a zadní pohledy do zkušební sekce nebylo nutné používat různé pomocné platformy, nebo se k měření shýbat. Plocha pod měřicím prostorem je prázdná z důvodu možného umístění fotoaparátů nebo videokamer.

Rychlost proudění v průtočném průřezu měřicího prostoru se pohybuje v rozmezí od 0 až do 0,3 m/s. U většiny prováděných vizualizací, s barvívem na povrchu modelu, se používá rychlost okolo 0,15 m/s. Vyšší rychlost je vhodná pro měření

hydrodynamickými tenzometrickými vahami, protože větší dynamický tlak poskytuje lepší poměr signálu k šumu pro měřené síly.

Voda cirkuluje v trati průtokem 10 600 litrů za minutu. Proud vody vstupuje do uklidňovací komory přes perforovaný válec umístěný na začátku komory. Perforovaný válec absorbuje dostatečné množství energie, pro zajištění jednotné dodávky vody po celé délce válce. Na konci uklidňovací komory je sekce s prvky upravujícími proudění. První z nich je perforovaná deska, která zmenšuje velké víry. Následují dvojce síta ze skelných vláken, která dále snižují intenzitu turbulence. Poslední je voštinový díl, který usměrňuje proudění. Tyto díly pro úpravu proudění lze snadno vyměnit, nebo zaměnit jejich pořadí a získat tak jiné zkušební podmínky v měřicím prostoru.

Kontrakce je v poměru ploch 6 ku 1, tedy rychlost v měřicím prostoru je 6 násobně vyšší než v uklidňovací komoře. Geometrie zúžení byla vybrána s ohledem na minimální délku kontrakce, s rovnoměrným rozložením rychlostního profilu, snížením intenzity turbulence a zamezením odtržení proudu od stěny.

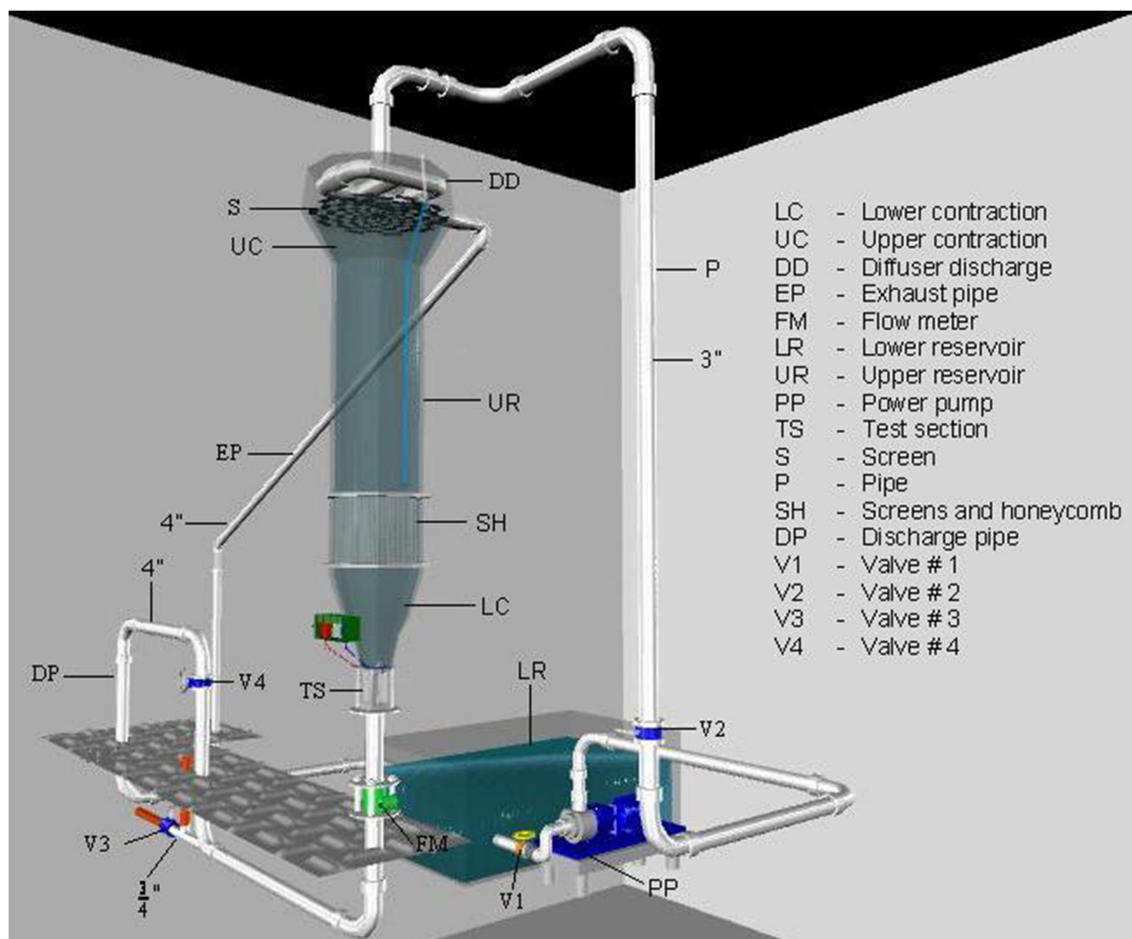
Konfigurace symetrického spirálního difuzoru za měřicím prostorem je unikátním rysem tohoto tunelu. Obsahuje okno pro přímé prohlížení obtékaného modelu zezadu, což eliminuje potřebu zrcadla. Konstrukce spirálního difuzoru byla navržena tak, aby se žádný vír, který v něm vzniká, nemohl dostat proti proudu do měřicího prostoru. Uprostřed spirálního difuzoru vznikaly veliké víry, které vstupovaly do potrubí a nasávaly nežádoucí vzduch, proto byly do vstupů nainstalovány perforované válce z nerezové oceli. Ty také brání před vplutím nežádoucích předmětů do potrubí a následně do čerpadla.

Ze symetrického spirálního difuzoru teče voda dolů dvojitým paralelním vertikálním potrubím do sběrného potrubí, dále do zpětného potrubí kolem celé trati zpět do čerpadla. Zpětné potrubí může vést přímo pod tunelem, vhodnější je vedení potrubí jinudy, aby prostor pod testovacím úsekem zůstal volný pro pořizování videozáznamu nebo fotografování. Ventil pro vypuštění trati je umístěn v nejnižším bodě potrubí.

Vodu cirkulující v tunelu žene axiální čerpadlo poháněné elektromotorem, o výkonu 5,6 kW, s regulovatelnými otáčkami. Těleso čerpadla je vyrobeno z litiny a je chráněno proti oxidaci. Oběžné kolo je vyrobeno z bronzu a je namontováno na hřídeli

z korozivzdorné oceli. Ovládací prvky čerpadla se nachází na pracovišti v blízkosti měřicího prostoru.

### 2.1.3 Vertikální vodní tunel



Obr. 4 - Schéma vertikálního cirkulačního tunelu, převzato z [7]

Dalším možným typem je vertikální vodní cirkulační tunel. Konstrukce takového tunelu je popsána ve článku [7] a jedná se o trať s osmibokým měřicím prostorem postaveným na výšce s rozměry 146 x 146 x 500 mm. Na Obr. 4 je vidět schéma tohoto zařízení, z něž je patrné, že nad měřicím prostorem se nachází 6 metrů vysoký zásobník vody, který dokáže zajistit dlouhý provoz při měření v tunelu.

Je zřejmé, že při takovéto velikosti bylo nutné navrhnout všechny části způsobem, aby byly dostatečně tuhé, nevibrovaly a nezpůsobovaly oscilaci proudění. Vnější nádrž vody označená v Obr. 4 písmeny LR má objem 9,8 m<sup>3</sup> a je pečlivě chráněná proti vniknutí prachu a nečistot. Z ní je voda čerpána do zásobníku nad měřicím prostorem pumpou z

nerezové oceli o výkonu 5,5 kW potrubím z PVC o jmenovitém průměru 75 mm a stěně 5 mm. Šestimetrový rezervoár (UR) se skládá z horní kontrakce (UC), síta (S), voštin (SH) a vypouštěcího difuzoru. Vypouštěcí difuzor, zúžení a síta jsou nutná pro minimalizování intenzity turbulence ve stagnační sekci tratě. Maximální výška hladiny v rezervoáru je řízena přepadem do PVC trubky o průměru 100 mm. Zúžení (LC) je krátké s poměrem kontrakce 1/16. Měřicí prostor je vyroben z leteckého hliníku (duralu) s okny z plexiskla silného 10 mm. Průměrná rychlost v měřicím prostoru je určována elektromagnetickým průtokoměrem (FM). Podpůrná konstrukce celé tratě byla svařena z bezešvých trubek o průměru 150 mm, takto masivní a pevná konstrukce byla zvolena z důvodu minimalizace vibrací.



### 3. Ideový návrh

Trať je určena pro testování a kalibraci kapalinových měřidel vyvíjených pracovní skupinou „Měřicí techniky“ Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. Většinou se jedná o výrobky vyvíjenými ve spolupráci s firmou MAVEL, a.s. Prozatím se jedná o:

- rychloměrné tyče
- nový druh průtokoměru kruhového průřezu
- soustavu žhavených voštin měřících rychlost

Rychloměrné tyče jsou jedním ze zařízení, pro které byla určena tato hydrodynamická cirkulační trať. Tyto tyče se mají skládat z přibližně metrových dílců. Předpokládaný průměr byl předběžně stanoven v době návrhu trati na 10 mm. Z hlediska nízkého ovlivnění stěnami měřicího prostoru by tedy vyhovoval průřez měřicího prostoru 200×1000 mm. To by ovšem znamenalo průtok okolo 1600 l/s a několikamilionovou investici pouze do pohonu trati s předpokládaným příkonem přesahujícím 200 kW. Bylo tedy třeba najít určitý kompromis, který by umožňoval stavbu celé trati a kalibraci všech měřících zařízení. Při konstrukci byl kladen velký důraz na minimalizaci pořizovacích nákladů a velkou variabilitu trati. K pohonu bylo nakonec použito již existující axiální kolenové čerpadlo v majetku Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky s průtokem až 150 l/s, které je více popsáno v kapitole 5.1.

Ze tří variant hydrodynamických tunelů popsanych v kapitole 2 bylo vybráno druhé konstrukční řešení, tedy trať „kytarového“ tvaru popsaná detailněji ve zdroji [6]. Přestože se tento typ hydrodynamické trati skládá nestandardních komponent, a je tedy náročnější na výrobu, vysoký obdélníkový měřicí prostor je vhodný pro měření rychloměrných tyčí. Na rozdíl od řešení firmy RHRC byly navrženy dva obdélníkové měřicí prostory za sebou o rozměrech 100×300 mm a 50×300 mm. Měřit je možné pouze v jednom, protože při měření v prvním se do proudu vnášejí poruchy a víry, které ovlivňují rychlostní profil v následujícím. Při stejných otáčkách čerpadla jsou dvě různé rychlosti v testovacích sekcích. Rychloměrnou tyč je možné posunovat měřicím prostorem pomocí průchodek. Ve zpětném potrubí se nachází jeden kruhový měřicí prostor o průměru 250 mm, ve kterém byl testován nově vyvíjený průtokoměr kruhového průřezu o stejném průtočném průměru. Celá trať je vodotěsně zakrytá, aby

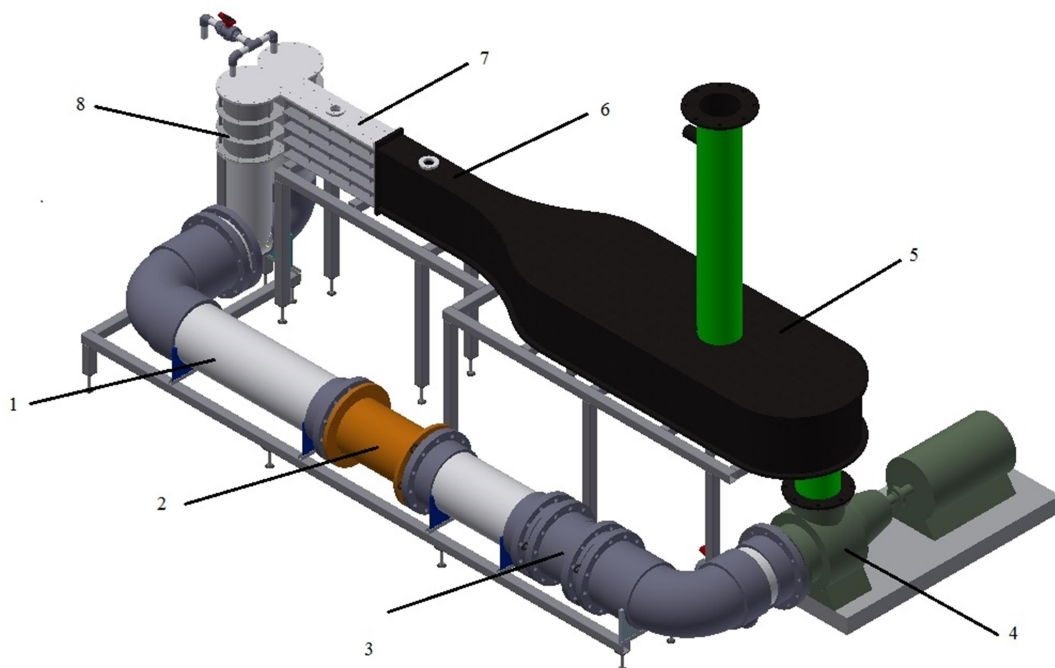
bylo možné měnit statický tlak, toho bylo docíleno umístěním takzvaného komínu na uklidňovací komoře. Na vrcholu komína se nachází přepad.

Je nutné podotknout, že tratě od firmy RHRC z [6] používají poměrně slabá čerpadla na celkový objem trati, a proto maximální dosažitelná rychlost v poměrně velkém měřicím prostoru je pouze 0,3 m/s. V trati, navrhované v této práci má být maximální rychlost v měřicím prostoru dvacetinásobná při použití jen o málo výkonnějšího čerpadla. Toho je dosaženo zmenšením rozměrů měřicího prostoru na minimální, které by splňovaly zadání.

Je vhodné, aby trať měla malý celkový objem vody, jednak z důvodu úspor při jednotlivých servisních zásazích, kdy je nutné trať vypustit, a dále kvůli jednoduchému snížení teploty prostým vypuštěním ohřáté vody a opětovným napuštěním z vodovodního řadu. Teplotu lze během měření regulovat právě rychlostí dopouštění nové vody. Přepad reguluje stálou výšku hladiny naplněné trati a zajišťuje spojení s atmosférou. Voda je napouštěna před čerpadlo, aby se při průchodu čerpadlem a uklidňovací komorou ustálil teplotní profil. Jelikož je trať uzavřená, je nutné, aby měla odvětrávací otvor. Pro bezchybné naplnění je lehce nakloněná o několik stupňů, aby veškerý vzduch při napouštění směřoval k odvětrávacímu ventilu a naopak při vypouštění všechna voda odtékala k výpusti.

Bohužel malý objem vody v trati má za následek velice rychlou cirkulaci. Při velké rychlosti oběhu mohou vznikat vibrace, vysoká intenzita turbulence a poruchy, které se nestačí uklidnit, proto jsou v uklidňovací komoře umístěna síta.

Výsledkem ideového návrhu je schematické zobrazení tratě na Obr. 5 skládající se z částí uvedených pod obrázkem. V kapitole 5 jsou detailně popsány postupy použité při návrhu jednotlivých částí a stavbě celé trati.



**Obr. 5 - Model vodní trati s popisem**

1. Potrubí
2. Průtokoměr Flonet FN 2014.1 DN250
3. Kruhový měřicí prostor průměr 250 mm, délka 302 mm
4. Čerpadlo AFG 200 67,5
5. Uklidňovací komora se sítí
6. Větší měřicí prostor 100×300×500 mm
7. Menší měřicí prostor 50×300×500 mm
8. Dvojité symetrický spirální difuzor

## 4. Návrhové výpočty

V této části diplomové práce jsou popsány hydrodynamické výpočty podporující návrh celého objektu před započítáním výroby. Jedná se o výpočty bezrozměrných součinitelů místních hydraulických ztrát  $\zeta$ , díky nimž jsou následně určovány tlakové ztráty jednotlivých komponent. Dále jsou zde popsány výpočty tlakových ztrát způsobených třením proudící kapaliny. Většina výpočtů byla provedena podle knihy [8].

### 4.1 Výpočet místních ztrát

Místní tlaková ztráta je vyjádřena vztahem

$$p_z = \zeta \rho \frac{v^2}{2} \quad (4.1)$$

kde  $\zeta$  je bezrozměrný součinitel místních ztrát.

#### 4.1.1 Ztráta v kolenech

Trat' je navržena s těmito koleny:

Koleno	Vnitřní průměr D [mm]	Poloměr křivosti $R_0$ [mm]	Poměr $R_0/D$ [-]	Úhel ohybu [°]
A	253	210	0,83	90
B	183	100	0,55	90

Tab. 1 - Údaje o kolenech použitých v trati

Na základě [8] str. 206 jsou určeny koeficienty místních ztrát pro daná kolena (viz Tab. 2).

Koleno	Koeficient ztrát [-]
A	0,4
B	0,98

Tab. 2 - Koeficienty místních ztrát pro kolena

#### 4.1.2 Ztráta v T-tvarovce

T-tvarovka je navržena se stejnými průměry na obou vstupech a výstupu. Pro potřeby nalezení součinitele místních ztrát se předpokládá, že průběžný proud a připojovaný

proud mají stejný průtok. Na základě těchto údajů jsou podle [8] str. 266 stanoveny součinitele (viz Tab. 3).

<b>Proud</b>	<b>Koeficient ztrát [-]</b>
Průběžný	0,53
Připojovaný	0,46

**Tab. 3 - Koeficienty místních ztrát pro T - tvarovku**

#### 4.1.3 Ztráty v uklidňovací komoře

Lokální ztráty v uklidňovací komoře jsou uvažovány ze dvou zdrojů – vstupem do uklidňovací komory a ztráty způsobené uklidňovacími sítí.

Ztráta vstupem do uklidňovací komory, vzhledem k její ploše, je uvažována jako ztráta veškeré kinetické energie proudu v potrubí před uklidňovací komorou. Ztrátu způsobenou výpustním košem lze přibližně uvažovat podle [8], str. 439 jako 1,1-násobek kinetické energie vzhledem k rychlosti proudění ve vstupním potrubí. Celkově proud ztratí vstupem do uklidňovací komory 2,1-násobek své kinetické energie. Součinitele tlakových ztrát  $\xi$  uklidňovacích sítí jsou počítány v závislosti na Reynoldsově čísle vzhledem k průměru drátu  $d_v$  podle vztahů z [9].

Pro Reynoldsovo číslo menší než 600:

$$\xi = 6,5 \left( \frac{1 - \beta}{\beta^2} \right) \left( \frac{v \cdot d_v}{\beta \cdot \nu} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (4.2)$$

a pro Reynoldsovo číslo větší než 600:

$$\xi = 0,9 \left( \frac{1 - \beta}{\beta^2} \right) \quad (4.3)$$

Pro trať byla navržena dvojice sítí se stejnými parametry: průměr drátu  $d_v = 0,112 \text{ mm}$  a otevřenost síta  $\beta = 60\%$ .

<b>Rychlost [m s<sup>-1</sup>]</b>	<b>Re [-]</b>	<b>Součinitel ztrát [-]</b>
0,7	100	1,5561
0,2	29	2,3626

**Tab. 4 – Součinitel místní ztráty pro jedno síto při dvou rychlostech v uklidňovací komoře**

#### 4.1.4 Ztráty na výstupu z měřicího prostoru

Na výstupu z měřicího prostoru v místě rozdělení proudů do dvou paralelních vertikálních potrubí lze pro potřeby návrhu tratě uvažovat ztrátu 50% kinetické energie vlivem disipace.

## 4.2 Výpočet třecích ztrát

Tlaková ztráta způsobená třením na stěnách potrubí je spočítána z Darcy-Weisbachova vztahu:

$$p_z = \lambda \rho \frac{l v^2}{d} \quad (4.4)$$

kde  $l$  je charakteristická délka úseku potrubí,  $d$  je hydraulický průměr a  $\lambda$  je součinitel třecích ztrát.

Součinitel třecích ztrát je počítán ze dvou vztahů v závislosti na Reynoldsově čísle:

$Re < 2500$ :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4.5)$$

$Re > 2500$ : na základě Colebrookovy rovnice:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{f}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}}\right) \quad (4.6)$$

kde  $f$  je součinitel drsnosti (pro návrh se uvažuje hydraulicky hladké potrubí, tedy  $f = 0$ )

### 4.2.1 Třecí ztráty v dýzách

Trať má navrhovaný tvar dýz na základě hyperbolických funkcí. Vzhledem k předpokládanému nízkému vlivu třecích ztrát je tvar stěn zjednodušen a dýza je počítána jako lichoběžníkový hranol.

### 4.3 Výsledky výpočtu

Jako výsledky výpočtů jsou uvedeny grafy tlakových ztrát v závislosti na vzdálenosti od čerpadla (Obr. 6 a Obr. 8). Velice důležitá je konečná celková tlaková ztráta  $p_{zvc}$ . Při návrhu byla použita pro výpočet průtoku  $Q$ , odpovídající tlakové ztrátě z charakteristiky čerpadla. Bylo nutné posoudit, jestli je průtok dostatečný pro dosažení zadaných rychlostí v měřicích prostorech. Při návrhu konstrukce trati byly některé komponenty dimenzovány podle provozního zatížení, proto bylo nutné vypočítat průběh statických tlaků v trati za provozu (Obr. 7 a Obr. 9). Výpočty statických tlaků byly také důležité pro posouzení, zda nebude docházet ke kavitacím. Tab. 5 se vztahuje k Obr. 6, Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9 a ukazuje pozice přírůstků tlakové ztráty a statických tlaků.

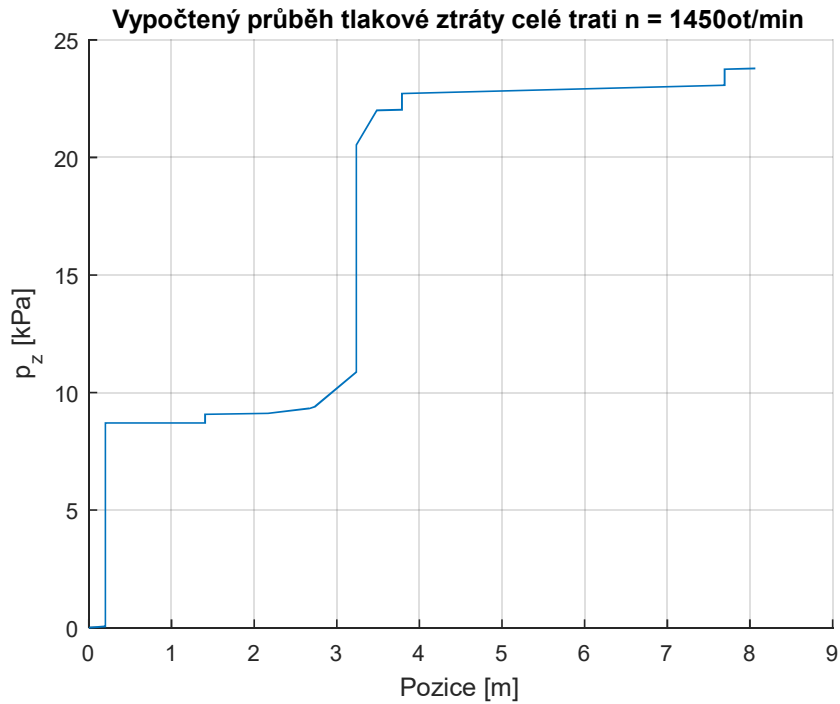
Pozice [m]	Popis ztráty
0,2	Vstupní potrubí
0,2	Ztráta na vstupu
1,407	Třecí ztráta uklidňovací komory
1,407	Síta
2,167	1. dýza (třecí ztráty)
2,667	1. měřicí prostor (třecí ztráty)
2,736	2. dýza (třecí ztráty)
3,236	2. měřicí prostor (třecí ztráty)
3,236	Ztráta na výstupu z měřicího prostoru
3,486	Paralelní potrubí
3,789	Potrubí (třecí ztráty)
3,789	1. koleno sacího potrubí (místní ztráta)
7,694	Sací potrubí (třecí ztráty)
7,694	2. koleno sacího potrubí (místní ztráta)
8,054	Sací potrubí (třecí ztráty)
8,054	Čerpadlo

Tab. 5 - Popis umístění tlakových ztrát na Obr. 6 a Obr. 8

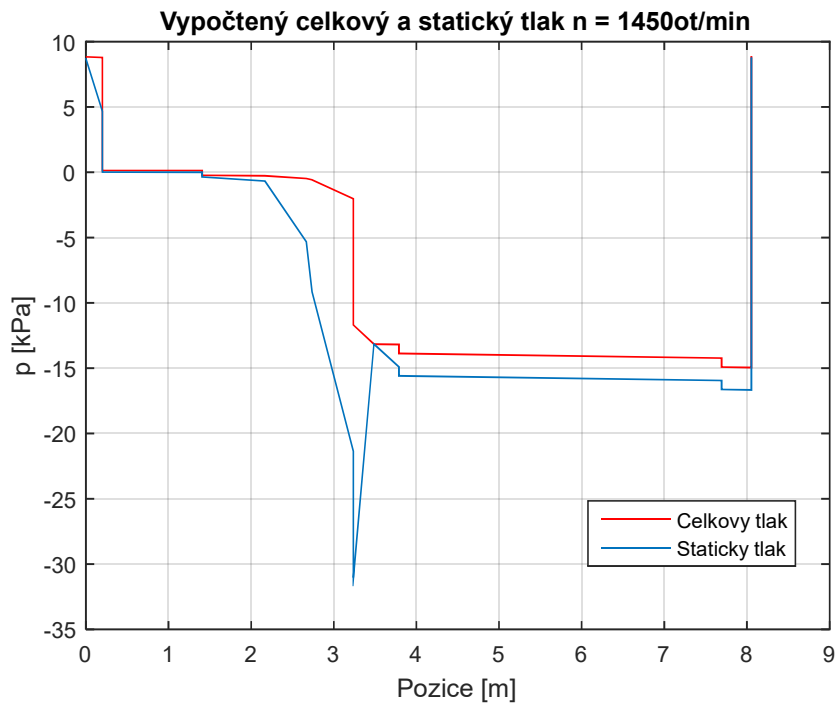
Třecí ztráty v kolenech jsou uvažovány součástí třecích ztrát sacího potrubí.

Pro otáčky motoru 1455 ot/min

Průtok:  $Q = 0,0933 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Celkové ztráty:  $p_{zvc} = 23,786 \text{ kPa}$



Obr. 6 – Průběh tlakových ztrát,  $n = 1455 \text{ ot/min}$

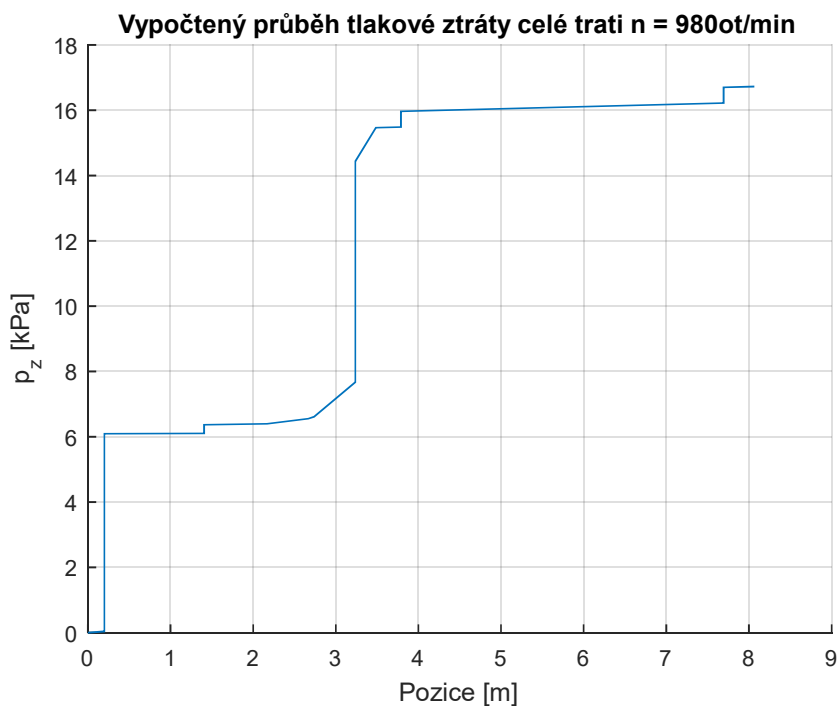


Obr. 7 - Průběh celkového a statického tlaku podél vodní tratě,  $n = 1455 \text{ ot/min}$

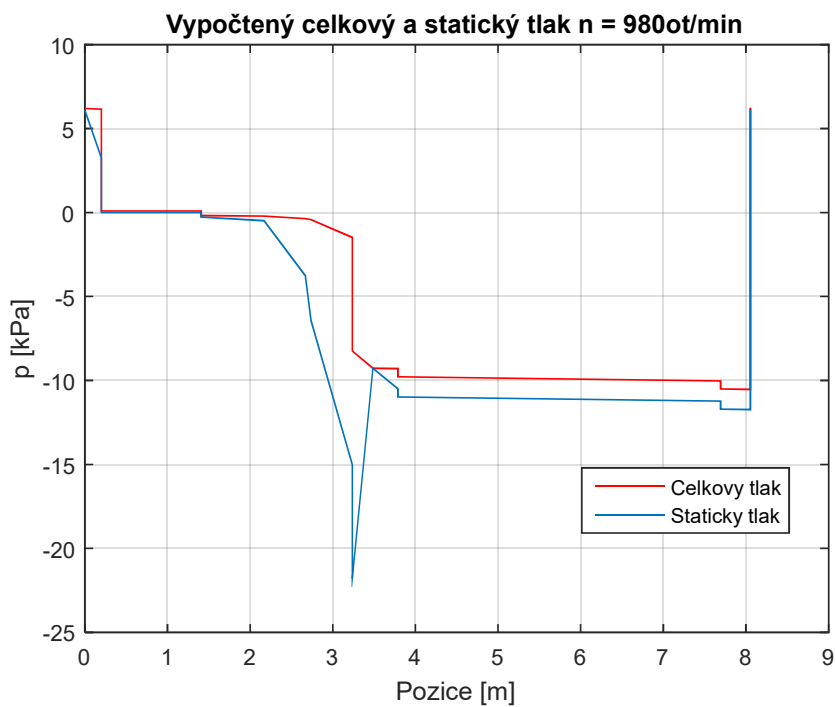


Pro otáčky motoru 980 ot/min

Průtok:  $Q = 0,078\text{m}^3/\text{s}$ ; Celkové ztráty:  $p_{zvc} = 16,723\text{ kPa}$



Obr. 8 - Průběh tlakových ztrát, n = 980 ot/min



Obr. 9 - Průběh celkového a statického tlaku podél vodní tratě, n = 980ot/min

## 5. Návrh, konstrukce a realizace vodní tratě

Popis návrhu celé trati postupuje od zdroje tlakové energie částmi, které následují po proudu.

### 5.1 Čerpadlo

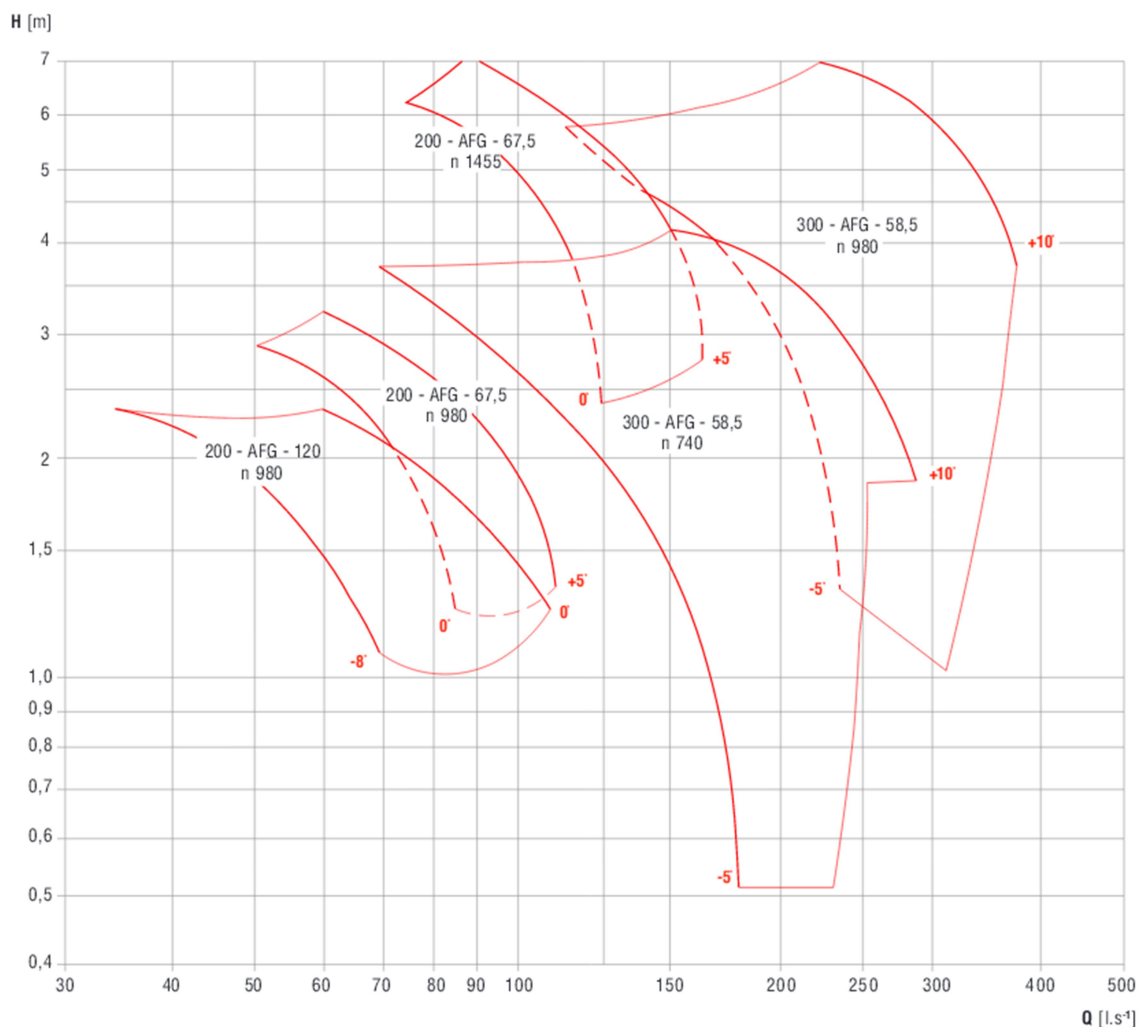
Jako zdroj tlakové energie bylo použito axiální, kolenové, vrtulové čerpadlo AFG 200 67,5 od firmy Sigma s elektromotorem o nominálních otáčkách 1455 ot/min a příkonu 11 kW.

Podle [10] jsou čerpadla řady AFG s axiálním průtokem použitelná především pro malé dopravní výšky. Jsou určena na dopravu nejen čisté a znečištěné vody, ale také kalu a podobných lehkých suspensí. Vrtulová čerpadla AFG jsou vhodná pro využití v různých cirkulačních, plavicích nebo čistících systémech (v potravinářském, cukrovarnickém, dřevozpracujícím, papírenském, chemickém průmyslu a podobně), v čistírnách odpadních vod ve městech a průmyslových objektech pro cirkulaci kalu ve vyhnívacích nádržích, v zemědělství k zavlažování pozemku přeronom nebo výtopy při volném přečerpávání vody z povrchových toků a nádrží.

Čerpadla řady AFG jsou konstruována jako horizontální vrtulová bezrozvaděčová. Oběžné kolo je tří lopatkové a jeho náboj je upevněn na konci hřídele letmo. Ucpávka hřídele je měkká, šňůrová, zařízená na proplachování čistou vodou při čerpání kalu a mechanicky znečištěné vody. Hřídel čerpadla je uložen v ložiskovém tělese ve valivých ložiscích s olejovým mazáním. Pohon čerpadla je přímý od elektro, nebo spalovacího motoru, s přenosem krouticího momentu pružnou spojkou.

Výhodou čerpadel AFG je, že lopatky oběžného kola jsou za klidu nastavitelné, takže je možné obsáhnout širší pracovní oblast, než je tomu u jiných čerpadel s pevnými lopatkami. Nastavení polohy (úhlu) lopatek na požadované výkonové hodnoty se provádí přímo na zkušební výrobního závodu. Eventuální přestavování lopatek pro jiné výkonové hodnoty je možné, avšak vyžaduje úpravu konce lopatek. Proto byly lopatky ponechány v původním úhlu nastavení.

Z diagramu celkové pracovní oblasti čerpadla (viz Obr. 10) můžeme vyčíst, že pro průtok 75 l/s máme k dispozici přibližně 6 m tlakového potenciálu čerpadla přepočteného na výšku, pro průtok 120 l/s je využitelný tlakový potenciál 2,5 m.



**Obr. 10 - Pracovní oblast čerpadla, převzato z [10]**

Použitím rovnice kontinuity

$$Q = S \cdot v \quad (5.1)$$

můžeme vypočítat, že při průtoku

$$Q = 120 \text{ l/s} = 0,12 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.2)$$

plochou průřezu menšího měřicího prostoru  $S_{mp2}$

$$S_{mp2} = 0,3 \cdot 0,05 = 0,015 \text{ m}^2 \quad (5.3)$$

bude rychlost v menším měřicím prostoru (5.4)  $v_{mp2}$  rovna podílu průtoku  $Q$  (5.2) a plochy  $S_{mp2}$  (5.3)

$$v_{mp2} = \frac{Q}{S_{mp2}} = \frac{0,12}{0,015} = 8 \frac{m}{s}. \quad (5.4)$$

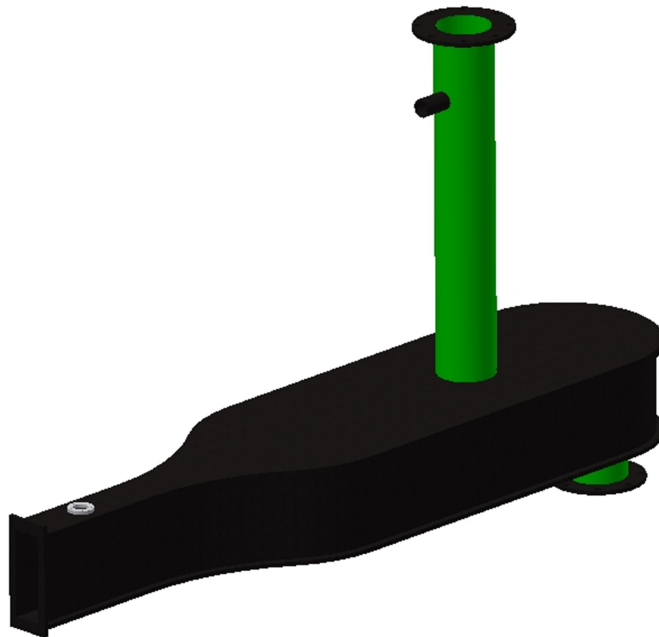
Můžeme tedy říci, že pokud bude trať postavena s celkovou tlakovou ztrátou  $p_{zc} = 25 \text{ kPa}$ , bude možné podle rovnice (5.4) dosáhnout v menším obdélníkovém měřicím prostoru rychlosti  $v_{mp2} = 8 \frac{m}{s}$ .

### 5.1.1 Renovace čerpadla

Před použitím čerpadla bylo nutné provést jeho generální opravu. Při renovaci bylo čerpadlo rozebráno, následně očištěno od starého nátěru a rzi a nanesena nová povrchová úprava. V ložiskovém domku byla vyměněna obě kuličková ložiska, hřídelová těsnění a olej. Hřídel vstupující do čerpadla byla utěsněna dvěma novými kroužky z ložové šňůry, lehce utaženými, aby prokapávaly, a docházelo ke chlazení ucpávky.

### 5.2 Uklidňovací komora

Uklidňovací komora na Obr. 11 slouží k změně směru, uklidnění a urychlení proudění před vstupem do měřicích prostorů. Celá komora i s měřicím prostorem je složena z vany a víka. Boky jsou z 5 mm tlusté polypropylenové desky, podstava, příruby, výztuhy a víko jsou z 12 mm silných polypropylenových desek. Výkresy obou částí jsou v příloze C. Na Obr. 11 je model uklidňovací komory s přívodním potrubím DN200 od čerpadla, komínem, kontrakcí a větším měřicím prostorem.



Obr. 11 - Uklidňovací komora s větším obdélníkovým měřicím prostorem

### 5.2.1 Vypouštěcí koš

Voda je do uklidňovací komory vháněna vertikálním směrem a ve vstupu do uklidňovací komory je nutné změnit směr jejího proudění z vertikálního na horizontální. Tuto funkci plní vypouštěcí koš, na jehož výrobu byl použit děrovaný plech o tloušťce 1,5 mm s kruhovými dírami o průměru 4 mm a rozteči 6 mm. Podle informací od prodejce plechu [11] je volná plocha  $k_{sv} = 40,31\%$ . Jednoduchým výpočtem popsaným níže bylo zjištěno, že volná plocha válcové části koše je větší v poměru (5.7)  $k_K \doteq 2$  než plocha průřezu potrubí mezi čerpadlem a uklidňovací komorou.

$$\begin{aligned} S_{Kv} &= (b - 50)\pi d_{DN200} k_{sv} = (0,3 - 0,05) \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot 0,4031 \\ &= 0,0633 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$S_{DN200} = \frac{\pi d_{DN200}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} = 0,0314 \text{ m}^2 \quad (5.6)$$

$$k_K = \frac{S_{Kv}}{S_{DN200}} = \frac{0,0633}{0,0314} \doteq 2 \quad (5.7)$$

Dno vypouštěcího koše je plné, aby se proud rozcházel do stran a nenarážel do víka uklidňovací komory.



Obr. 12 – Vypouštěcí koš

### 5.2.2 Začátek uklidňovací komory

Počáteční část uklidňovací komory byla navrhována s důrazem na co nejefektivnější převedení všesměrového horizontálního proudu vycházejícího z koše do jednosměrného proudu uklidňovací komorou. Pro výpočet geometrie poloviny počáteční části uklidňovací komory byly použity vztahy potenciálního proudění.

Potenciální proudění je nejjednodušším druhem proudění. Je nevazké, nestlačitelné, ustálené, dvourozměrné a nevířivé. Ze všech vlastností proudění respektuje pouze kontinuitu a setrvačnost.

V potenciálním proudění se pracuje s takzvanou proudovou funkcí  $\Psi$  a potenciálem rychlosti  $\Phi$ . Vztahy jsou převzaty ze skript [2] a je zde popsáno pouze použití pro návrh geometrie počátečního tvaru uklidňovací komory a symetrického spirálního difuzoru.

Pro návrh tvaru vstupní části uklidňovací komory byla použita proudová funkce paralelního proudu v cylindrických souřadnicích  $\Psi_1$  a proudová funkce zřídla  $\Psi_2$ .

$$\Psi_1(r, \varphi) = vr \sin \varphi \quad (5.8)$$

$$\Psi_2(r, \varphi) = \frac{q\varphi}{2\pi} \quad (5.9)$$

Paralelním proudem se rozumí přímočaré proudění konstantní rychlostí  $v$  ve směru osy  $x$ . U zřídla tekutina vytéká z bodového zdroje rovnoměrně na všechny strany v rovině. Průtočné objemové množství se nazývá vydatnost zřídla  $q$  [12].

Součtem výrazů pro  $\Psi_1$  a  $\Psi_2$  dostaneme rovnici (5.11).

$$\Psi(r, \varphi) = \Psi_1 + \Psi_2 \quad (5.10)$$

$$\Psi(r, \varphi) = vr \sin \varphi + \frac{q\varphi}{2\pi} \quad (5.11)$$

Pokud proudová funkce dosahuje konstantních hodnot, můžeme říci, že se jedná o proudnici.

$$\Psi = \text{konst.} = C \quad (5.12)$$

Poté je i součet proudových funkcí parciálního proudu a zřídla roven konstantě.

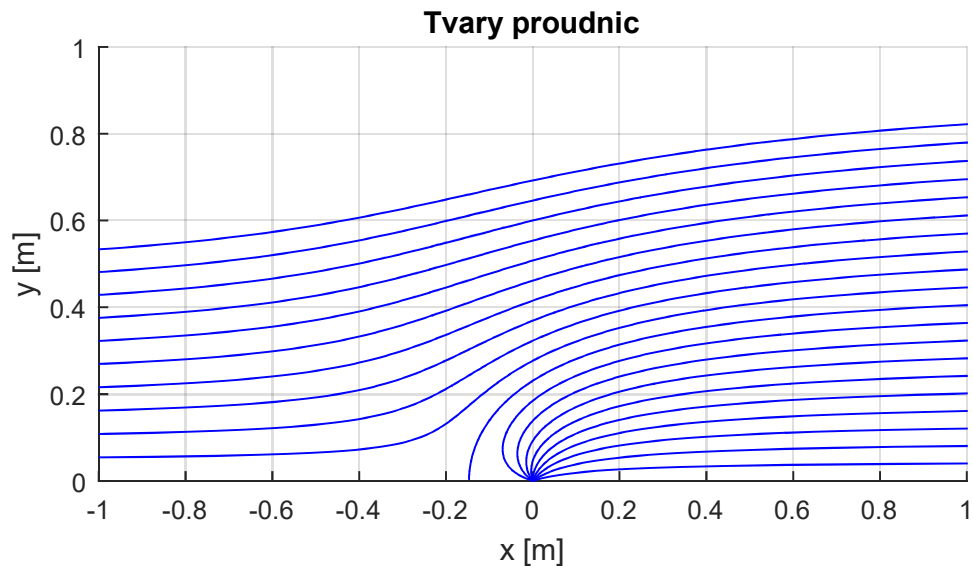
$$C = \Psi_1 + \Psi_2 \quad (5.13)$$

$$C = vr \sin \varphi + \frac{q\varphi}{2\pi} \quad (5.14)$$

Když z rovnice (5.14) vyjádříme poloměr  $r$  dostaneme rovnice pro proudnice (5.15) závislé na vstupních parametrech a konstantě  $C$

$$r = \frac{(C - \frac{q\varphi}{2\pi})}{v \sin \varphi} \quad (5.15)$$

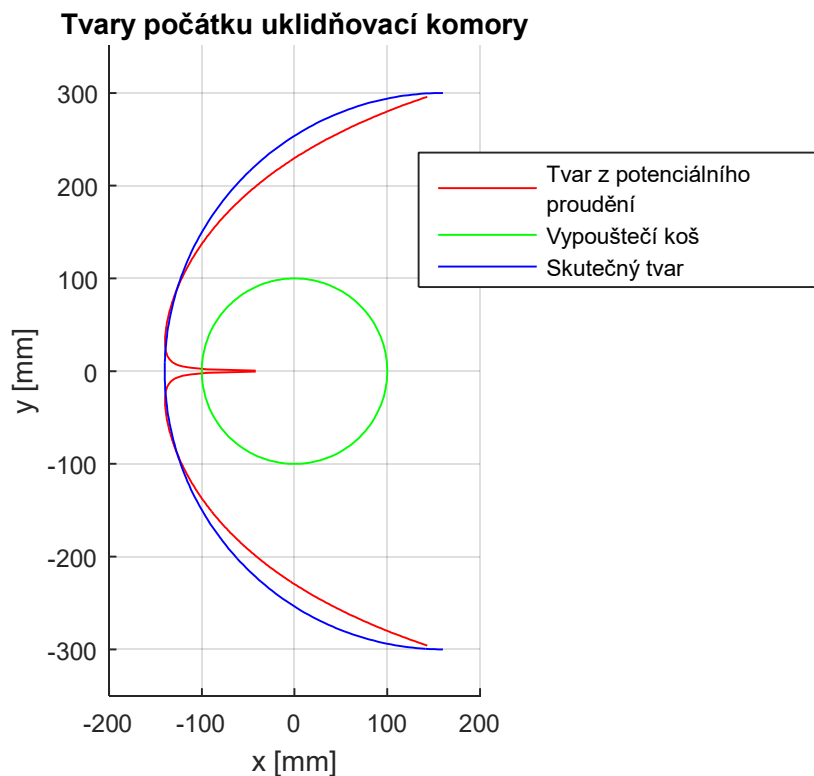
Pro výpočet proudnic byly použity následující vstupní parametry: vydatnost zřídla  $q = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ , rychlost paralelního proudu  $v = 0,13 \text{ m/s}$ , konstanta  $C = \langle 0; 0,12 \rangle$  a úhel  $\varphi = \langle \pi; \frac{\pi}{3} \rangle$ .



**Obr. 13 - Proudnice**

Na Obr. 13 jsou znázorněny proudnice pro parametry uvedené výše, z nichž byla vybrána ta s konstantou  $C = 0,0599$ , zobrazená na Obr. 14. Tento tvar byl navržen jako nejvhodnější z hlediska proudění, bohužel z hlediska výroby polypropylénové svařované nádrže musel být zjednodušen na půlkruh o poloměru 300 mm. Na Obr. 14 je vidět červený tvar navržený pomocí vzorců potenciálního proudění, modrý skutečný a zeleně je naznačen vypouštěcí koš.





**Obr. 14 - Tvary počátku uklidňovací komory**

### 5.2.3 Komín

Za počáteční částí uklidňovací komory se nachází komín s přepadem k udržování stálé hladiny a posunutí celkového tlakového pole výše z důvodů lepších kavitačních vlastností čerpadla. Při naplnění komínu jen do určité výšky je možné regulovat statický tlak v celé trati. Naplněním komínu až po přepad můžeme posunout celé tlakové pole o 10 kPa, což odpovídá výšce přibližně 1000 mm.



**Obr. 15 - Komín s přepadem**

#### **5.2.4 Síta**

V uklidňovací komoře se nachází, mezi komínem a kontrakcí dvě síta k uklidnění proudění a zmenšení intenzity turbulence do rozměrů odpovídajících vzdálenostem mezi drátky. Pro trať byla navržena dvojice sít o průměru drátu 0,112 mm a otevřenosti 60%. Ztráty na sítích jsou počítány v kapitole 4 a podkapitole 4.1.3.



**Obr. 16 - Síta**

### 5.2.5 Primární kontrakce

Za síty se uklidňovací komora zužuje do většího obdélníkového měřicího prostoru. Tvar a délka zúžení byly vypočítány podle článku [14] o navrhování axisymetrické kontrakce. Délka zúžení  $L$  je pro  $\alpha = 20^\circ$ , šířku před zúžením  $D_1 = 600\text{mm}$  a šířku za zúžením  $D_2 = 100\text{mm}$ .

$$L = \frac{D_1 - D_2}{2 \tan \alpha} = 686,7\text{mm} \quad (5.16)$$

Souřadnice tvaru první části křivky jsou vypočítány podle vztahů (5.18) a (5.19).

$$0 \leq k \leq \frac{L}{3 \cos \alpha} \quad (5.17)$$

$$x = k \cos \alpha + \frac{L}{3\pi} \tan^2 \alpha \sin \left( k \frac{3\pi}{L} \cos \alpha \right) \quad (5.18)$$

$$y = \frac{D_1}{2} - k \sin \alpha + \frac{L}{3\pi} \tan \alpha \sin \left( k \frac{3\pi}{L} \cos \alpha \right) \quad (5.19)$$

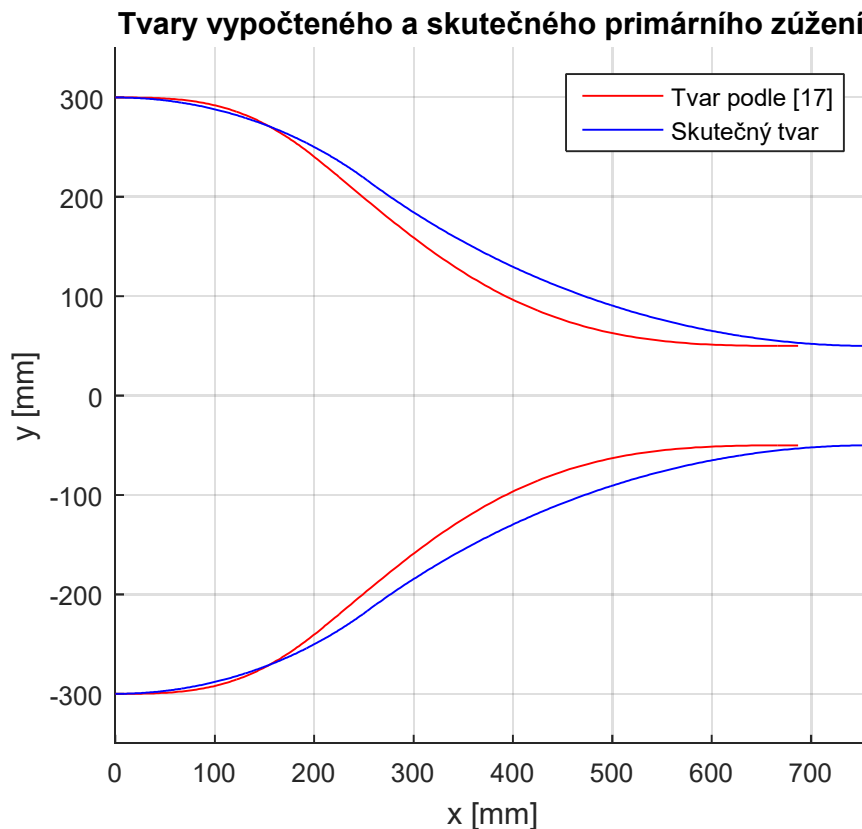
Souřadnice tvaru druhé části křivky jsou určeny podle vztahů (5.21) a (5.22) s parametrem  $k$ .

$$\frac{L}{3 \cos \alpha} \leq k \leq \frac{L}{\cos \alpha} \quad (5.20)$$

$$x = k \cos \alpha + \frac{2L}{3\pi} \tan^2 \alpha \sin \left( \frac{3\pi}{2L} \cos \alpha \left( k + \frac{L}{3 \cos \alpha} \right) \right) \quad (5.21)$$

$$y = \frac{D_1}{2} - k \sin \alpha + \frac{2L}{3\pi} \tan \alpha \sin \left( \frac{3\pi}{2L} \cos \alpha \left( k + \frac{L}{3 \cos \alpha} \right) \right) \quad (5.22)$$

Tvar zúžení vypočtený pomocí těchto vzorců je na Obr. 17 nakreslený červenou barvou. Bohužel bylo opět nutné pro zjednodušení výroby nahradit křivku dvěma na sebe navazujícími kružnicemi. Aby nedošlo k odtržení, bylo zúžení prodlouženo. Na Obr. 17 je skutečné primární zúžení znázorněno modrou barvou.



Obr. 17 - Tvary primárního zúžení

### 5.3 Větší obdélníkový měřicí prostor

Na konci uklidňovací komory je větší měřicí prostor o rozměrech 100×300 mm a délce 500 mm. Plocha průřezu tohoto měřicího prostoru je dvojnásobná oproti menšímu obdélníkovému měřicímu prostoru. Z rovnice kontinuity plyne, že rychlost proudění ve větším měřicímu prostoru je poloviční. Uprostřed měřicího prostoru jsou uvažovány otvory o průměru 50 mm pro umístění měřicí techniky, například pro kalibrování měřících tyčí se žhavenými filmy.

Výkresy celé uklidňovací komory jsou v příloze C.

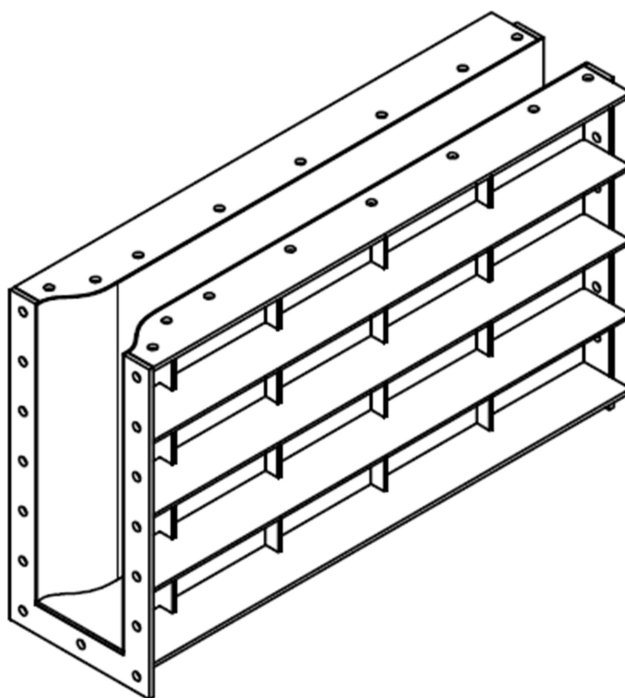
### 5.4 Menší obdélníkový měřicí prostor

#### 5.4.1 Sekundární kontrakce

Větší měřicí prostor na konci uklidňovací komory přechází sekundárním zúžením, tvarovaným podle vzorců uvedených výše (5.18), (5.19), (5.21) a (5.22) v menší měřicí

prostor. Vstupní šířka zúžení  $D_3 = 100 \text{ mm}$ , výstupní šířka zúžení  $D_4 = 50 \text{ mm}$  a  $\alpha = 20^\circ$ . Většina dílů pro výrobu menšího měřicího prostoru společně se sekundárním zúžením byla vypalována CNC laserem, proto bylo možné dodržet přesný tvar zúžení vypočtený podle zdroje [14]

Menší měřicí prostor má šířku 50 mm, výšku 300mm a délku 500mm. Opět jsou uprostřed měřicího prostoru otvory o průměru 50 mm pro měřicí techniku, která může být protažena skrz celou výšku prostoru.



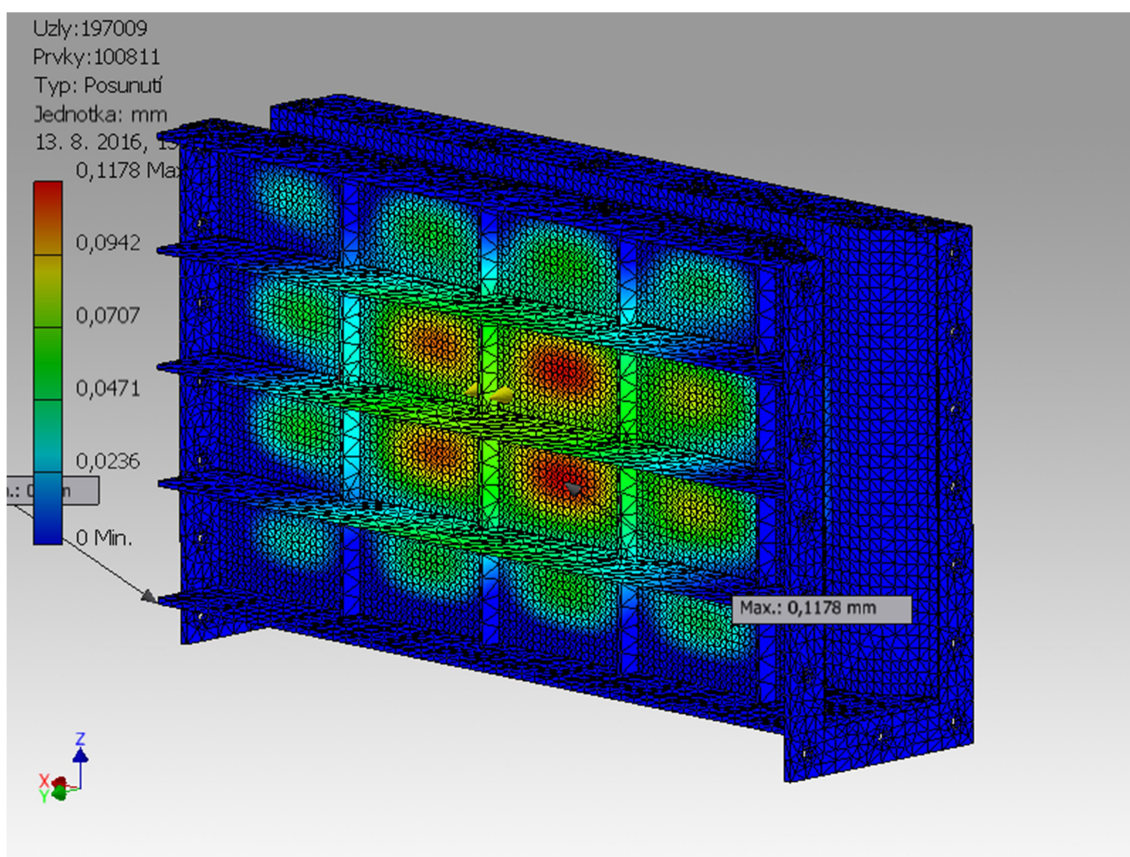
Obr. 18 - Schéma konstrukce menšího měřicího prostoru

Kostra malého měřicího prostoru je svařena z konstrukční oceli S235 a potažena plechem o síle 1,5 mm. Příruby jsou vypáleny z 5 mm plechu, podstava a vodorovná žebra udávající tvar ze 4 mm plechu a svislé výztuhy jsou z ploché tyče 3 mm silné a 20 mm široké. Tato náročná konstrukční varianta byla zvolena z důvodu vysoké pevnosti. Vzhledem k poměrně vysokému podtlaku uvnitř měřicího prostoru vycházely u jiných konstrukčních variant velká prohnutí směrem dovnitř. Jednalo se převážně o varianty z jiných materiálů, jako byl například polypropylen. Deformace měly za následek změnu šířky měřicího prostoru v řádu až desítek procent, což je pro kvalitu měření nepřijatelné. Ve výpočtové části vychází statický tlak v menším měřicím prostor

$p_{smp} = 31030 \text{ Pa} \quad 31,03 \text{ kPa}$ . Pro MKP simulaci v programu Autodesk Inventor 2016 bylo zatížení vynásobeno koeficientem bezpečnosti  $k_{mp} = 1,5$ .

$$p = k_{mp} \cdot p_{smp} = 1,5 \cdot 31,03 \doteq 46,5 \text{ kPa} \quad (5.23)$$

Na Obr. 19 jsou ukázány výsledné průhyby měřicího prostoru při zatížení určeném rovnicí (5.23). Jako pevné vazby byly zvoleny rohové hrany měřicího prostoru a příruby. V Obr. 19 je vidět část sítě použité pro výpočet, prvky sítě jsou pravděpodobně moc velké pro přesné řešení, ale v simulaci nešlo o přesné určení deformací, ale o odhad řádu posunutí, které by mohlo ovlivnit rychlost v kanálu.



**Obr. 19 - Průhyby menšího měřicího prostoru, při zatížení tlakem vypočteným v rovnici (5.23)**

Ze simulace vyplývá maximální posunutí 0,12 mm směrem dovnitř měřicího prostoru, při uvažování symetrické deformace se šíře měřicího prostoru zmenší o 0,47 %.

Celá konstrukce byla na závěr žárově pozinkována, aby byla chráněna proti korozi.

## 5.5 Dvojitý spirální difuzor

Dvojitý spirální difuzor je umístěn za menším měřicím prostorem z důvodu změny proudění z horizontálního na vertikální směr a změny obdélníkového kanálu na kruhové potrubí. Těchto dvou změn bylo třeba dosáhnout na co nejmenším prostoru a s co možná nejmenší tlakovou ztrátou. Proto byla zvolena symetrická šneková geometrie vypočtená pomocí vzorců potencionálního proudění [2], přesněji spojením proudových funkcí potencionálního víru  $\Psi_3$  a zřídla  $\Psi_2$ .

$$\Psi_2(r, \varphi) = \frac{Q}{2\pi} \varphi \quad (5.24)$$

$$\Psi_3(r, \varphi) = -\frac{\Gamma}{2\pi} \ln r \quad (5.25)$$

$$\Psi(r, \varphi) = \Psi_2 + \Psi_3 \quad (5.26)$$

$$\Psi(r, \varphi) = \frac{Q}{2\pi} \varphi - \frac{\Gamma}{2\pi} \ln r \quad (5.27)$$

Tvar obrysu byl určen pomocí tvaru proudnice, součet proudových funkcí (5.29) je tedy roven konstantě  $C$ .

$$\Psi = \text{konst.} = C \quad (5.28)$$

$$C = \Psi_2 + \Psi_3 \quad (5.29)$$

Pro parametry  $\varphi = 0$  a  $r = r_0$  je  $C$  rovno:

$$C = 0 - \frac{\Gamma \ln r_0}{2\pi} \quad (5.30)$$

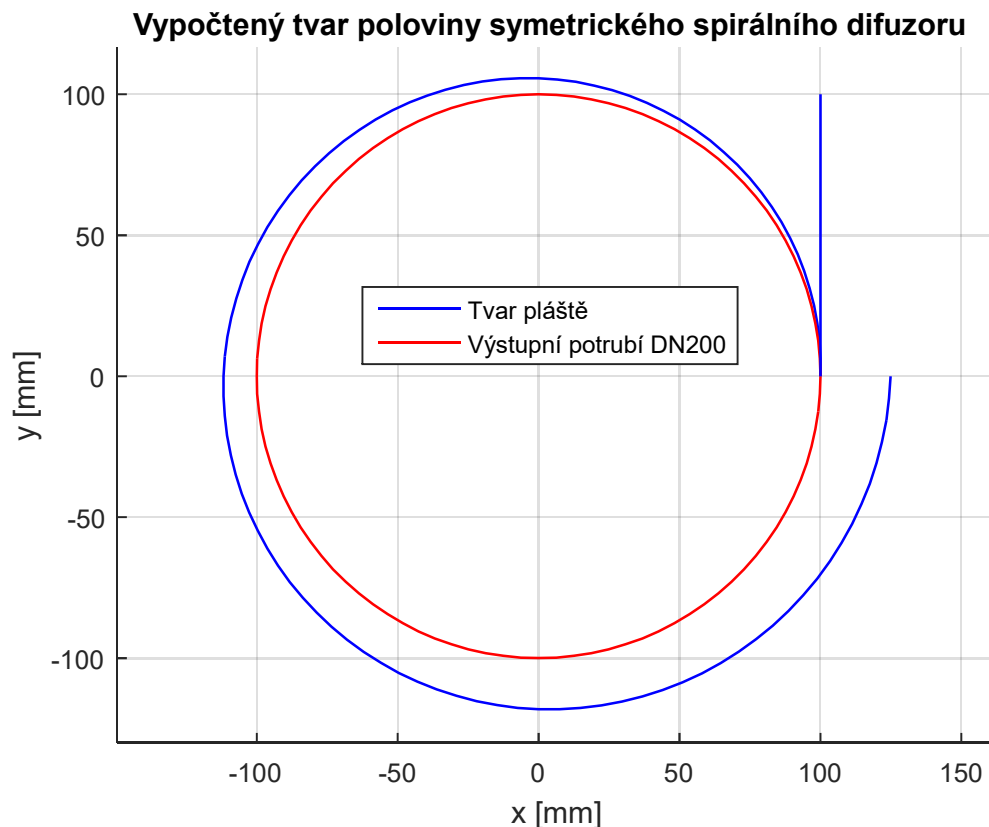
$C$  je dosazeno do rovnice (5.29) a vznikne rovnice (5.31), ze které je vyjádřena rovnice (5.32) pro  $r$

$$\frac{1}{2\pi} (Q\varphi - \Gamma \ln r) = -\frac{\Gamma \ln r_0}{2\pi} \quad (5.31)$$

$$r = r_0 e^{\frac{Q}{\Gamma} \varphi} \quad (5.32)$$

a jsou dosazeny hodnoty  $r_0 = 100\text{mm}$ ,  $\varphi = \langle 0; 2\pi \rangle$ ,  $b = 25\text{mm}$  a  $\frac{Q}{\Gamma} = \frac{b}{2\pi(r_0 + b/2)}$ .

Na Obr. 20 je nakreslena polovina symetrického spirálního difuzoru, modrou barvou je obrys difuzoru a červenou barvou výstupní potrubí.



**Obr. 20 - Tvar poloviny symetrického spirálního difuzoru**

Kostra symetrického spirálního difuzoru je obdobně jako menší měřicí prostor svařena z konstrukční oceli S235 a potažena plechem o síle 1,5mm. Příklad je vypálena z 5 mm plechu, podstava a vodorovná žebra udávající tvar ze 4 mm plechu a svislé výztuhy jsou z ploché tyče 3 mm silné a 20 mm široké.

Celá konstrukce byla na závěr žárově pozinkována, aby byla chráněna proti korozi.

Uklidňovací komora, malý měřicí prostor a výstupní plenum jsou k sobě sešroubovány a utěsněny akrylovým lepidlem. Na symetrický spirální difuzor je zespodu našroubován začátek potrubí.



## 5.6 Potrubí

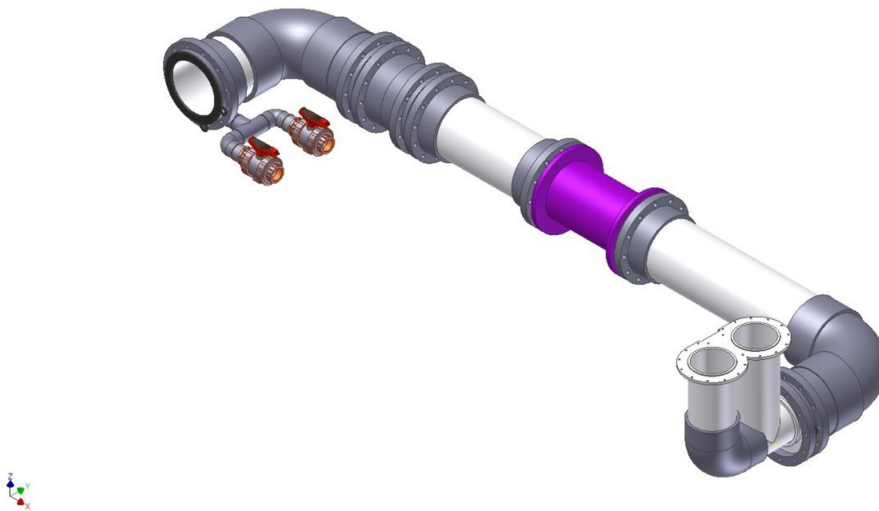
Potrubí začíná výstupem ze symetrického spirálního difuzoru svisle dolů dvěma trubkami o DN200 a tloušťce stěny 11,4 mm, které uhýbají mimo trať, a jedna vstupuje do druhé. Následně přechází skokově průměr DN200 na průměr DN280. Celý zbytek potrubí je již o průměru DN280 a stěně 13,4 mm. Ve vzdálenosti 800 mm od osy trati je potrubí zahnuto rovnoběžně s tratí. Za kolenem je rovné potrubí o délce pěti průměrů, poté průtokoměr a dále rovné potrubí o délce tří průměrů. Tyto uklidňovací délky jsou nutné ke správné funkci průtokoměru a jsou zvoleny podle manuálu průtokoměru [15]. Za kratší uklidňovací částí se nachází třetí měřící prostor. Následuje koleno, měnící směr potrubí k čerpadlu. Mezi kolenem a čerpadlem se zespod nachází napouštěcí a vypouštěcí vývod DN40.

Potrubí bylo sestaveno, přesněji řečeno slepeno z PVC-U trubek a tvarovek. Na Obr. 21 je vidět celá potrubní sestava. Tato sestava je složena z dílčích segmentů spojených, k sobě přes normované příruby, závitovými tyčemi a šrouby M20.

Polyvinylchlorid (PVC), patří do skupiny termo-plastů, je dobře svařitelný, dá se dobře lepit, je tvárný teplem a to opakovaně a též recyklovatelný. Odpady z PVC umožňují opětovné použití. PVC vzniká polymerizací vinylchloridu [16].

Náklady na kovové svařované potrubí by byli pravděpodobně nižší, ale PVC-U potrubí sestavené z dílů je značně variabilní. Jednotlivé části lze velice rychle zaměňovat za jiné, a je možné vkládat do potrubí zařízení s normalizovanými přírubami. Sestavu z Obr. 21 dokáže smontovat jeden člověk za pár desítek minut, i přesto že PVC-U potrubí má silnou stěnu a vypadá velice masivně. Svařované potrubí by jistě nebylo tak variabilní a montáž by byla mnohem náročnější.

Výkres celé sestavy potrubí z Obr. 21 je v příloze C.



**Obr. 21 - Model sestavy potrubí**

Jak již bylo dříve naznačeno PVC-U potrubí se za předpokladu nerozebíratelného spojení lepí. V případě rozebíratelného spojení se na trubky lepí tvarovky. Pro přírubový spoj je třeba na konec trubky nalepit manžetu, o kterou se opírá volně otočná příruba. Pro správné provedení kvalitního, těsného a přesného slepení je nutné dodržovat několik zásad: konec trubky zaříznout kolmo, vnější hranu zkosit pod úhlem  $15^\circ$  a délce přiměřené k tloušťce stěny, následně je nutné vnější konec trubky a vnitřní konec tvarovky opravit čističem Tangit. Oba očištěné konce se natrou větší vrstvou lepidla Tangit a zasunou do sebe. Tlakovou zkoušku lze provádět po 24 hodinách.

### **5.7 Měření rychlosti, průtokoměr**

Existuje mnoho možností jak měřit rychlost. U aerodynamických tunelů se používá měření rozdílu tlaků před a za částí, která uměle způsobuje tlakovou ztrátu. Následně je z rozdílu tlaků vypočtena rychlost. Tato metoda sice není tolik náročná finančně, ale přidává další tlakovou ztrátu. Proto byl pro měření průtoku použit přírubový indukční průtokoměr Flonet FN 2014.1 o průměru DN250, jehož vnitřní průměr přesně odpovídá vnitřnímu průměru potrubí DN280.

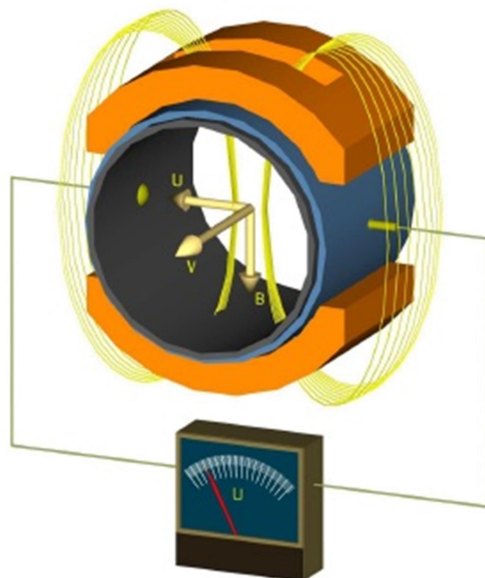


**Obr. 22 - Indukční průtokoměr FLONET 2014.1 DN250**

Indukční průtokoměr FLONET FN 2014.1 je podle článku [15] měřidlo objemového průtoku vodivých kapalin v uzavřeném potrubí. Umožňuje obousměrné měření průtoku s vysokou přesností v širokém pásmu rychlostí proudění 0,1 - 10 m/s . S maximální chybou měření 0,2 % pro 10 – 100 %  $Q$  a 0,5 % pro 5 – 100 %  $Q$ . Vyhodnocovací jednotka umožňuje zobrazovat měřené hodnoty na dvouřádkovém alfanumerickém displeji a pomocí klávesnice měnit velké množství provozních parametrů měřidla. Disponuje dvěma pasivními binárními výstupy, proudovým aktivním výstupem a možností číslicové komunikace. Všechny funkce a parametry výstupů je možno měnit za provozu uživatelem.

Podle [15] je indukční průtokoměr založen na Faradayově indukčním zákonu. Čidlo se skládá z nemagnetické a nevodivé trubky, v níž jsou kolmo na směr magnetických siločar zabudovány dvě měřicí elektrody pro snímání indukovaného napětí. Pro vytvoření střídavého magnetického pole jsou na trubce umístěny dvě cívky rovnoběžně s rovinou snímacích elektrod. Pohybem vodivé tekutiny, která tvoří vodič elektrického proudu v magnetickém poli  $B$ , vzniká na měřicích elektrodách indukované napětí  $U$ , které je úměrné rychlosti proudění  $v$  a délce vodiče (vzdálenosti elektrod = hydraulický průměr průtokoměru)  $d_p$ . Magnetická indukce a vzdálenost elektrod je konstantní pro

danou dimenzi čidla. Indukované napětí na snímacích elektrodách je přímo úměrné rychlosti proudění kapaliny v trubici.



Obr. 23 - Schéma fungování průtokoměru, převzato z [15]

Z průtoku  $Q$  lze pomocí jednoduchého vzorce určit rychlost  $v_p$  (5.34), k tomu je nutné znát plochu průřezu průtokoměru  $S_p$  (5.33).

$$S_p = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4}; d_p = 250 \text{ mm} \quad (5.33)$$

$$v_p = \frac{Q}{S_p} = \frac{4Q}{\pi d_p^2} \quad (5.34)$$

Takto určíme rychlost v potrubí, která odpovídá rychlosti proudění v kruhovém měřicím prostoru. Pro výpočet rychlosti v obdélníkových měřicích prostorech, nebo v jakékoliv části trati, použijeme zjednodušenou rovnici kontinuity, tedy že průtok  $Q$  ve všech částech trati je konstantní.

$$Q = \text{konst.} \quad (5.35)$$

V rovnici (5.1) je popsáno, že průtok je součinem rychlosti a plochy průřezu. Pokud budeme znát plochu průřezu například menšího obdélníkového měřicího prostoru, je snadné v něm spočítat rychlost.

$$v = \frac{Q}{S} \quad (5.36)$$

Průtokoměr nejlépe měří při stacionárním proudění s vyvinutým rychlostním profilem, proto bylo nutné dodržet minimální rovné uklidňovací úseky, jejichž délka je přímo úměrná vnitřnímu průměru potrubí. Při jednosměrném měření průtoku je uklidňovací délka před průtokoměrem dlouhá minimálně pět průměrů a za průtokoměrem tři.

Pro správnou funkci indukčního průtokoměru je nutno zajistit dokonalé elektrické propojení čidla s navazujícím potrubím, zemním potenciálem a ochranným vodičem napájení. Měřená kapalina musí být před čidlem a za čidlem uzemněna. V našem případě bylo při použití nevodivého PVC-U potrubí nutné vložit do potrubí zemnicí kroužky.

## 5.8 Kruhový měřicí prostor

V potrubí za uklidňovacím dílem o délce tři průměru je kruhový měřicí prostor o vnitřním průměru 250 mm a délce 302 mm. Tato část je výměnná a je možné ji zaměňovat za díly se stejnými rozměry, ve kterých je například použita měřicí technika.

## 5.9 Podpůrný rám

Z Obr. 5 je patrné, že celá trať včetně potrubí je postavena na podpůrném rámu. Ten je svařen z profilů čtvercového průřezu o rozměrech 40×40 mm a síle stěny 2 mm. K vyšší části rámu je přišroubována uklidňovací komora, měřicí prostor a symetrický spirální difuzor. Na nižší části rámu jsou připevněna překližková lože, ve kterých je usazeno potrubí. Potrubí je samo o sobě tolik tuhé, že není nutné jej nijak kotvit. Jednotlivé úseky podpůrného rámu jsou výškově nastavitelné, proto je možné trať naklonit požadovaným směrem. Výkres svařence celého podpůrného rámu je v příloze C.

## 5.10 Závěr kapitoly návrh, konstrukce a realizace vodní tratě

V předcházejících devíti podkapitolách byl popsán postup návrhu důležitých, tvarově náročných, komponent trati, výrazně ovlivňujících proudění. Podle návrhů byla vytvořena výkresová dokumentace přiložená na konci této diplomové práce. Na základě výkresové dokumentace autor vybudoval celou trať v laboratořích Ústavu mechaniky

tekutin a termodynamiky, Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze  
Obr. 24. Výpočty a předpoklady použité při návrhu byly ověřeny měřením popsáním  
v kapitole 6.



**Obr. 24 – Vodní cirkulační trať v prostorech laboratoře Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky**

Další fotografie dokumentující realizaci tratě jsou v Příloha A.

## 6. Ověřovací experimenty

V této kapitole jsou popsána měření ověřující splnění zadání i měření ověřující návrhové výpočty tratě. Před začátkem měření je nutné trať zprovoznit, popis práce s tratí je v Příloha B – Návod k použití.

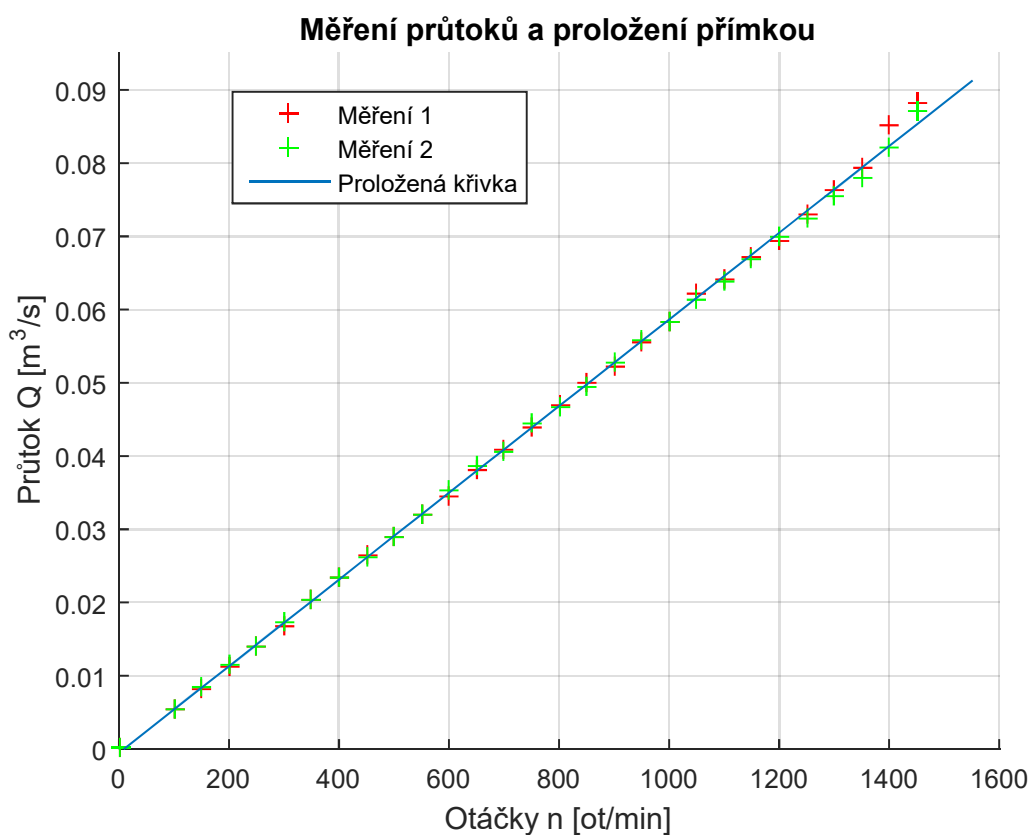
### 6.1 Měření průtoků

Nejprve byla ověřována závislost průtoků tratí na otáčkách čerpadla. Byla provedena dvě měření, při nichž se po nastavení otáček  $n$  na frekvenčním měniči odečetl průtok  $Q_h$  z displeje indukčního průtokoměru popsaného v kapitole 5.7. Výsledky jsou v Tab. 6 a na Obr. 25.

Otáčky pumpy $n$ [ot/min]	Měření 1		Měření 2		Průměrný průtok	Hodnoty z rovnice	Rychlosti v měřicích prostorech		
	Průtok $Q_{h1}$ [m <sup>3</sup> /h]	Průtok $Q_l$ [m <sup>3</sup> /s]	Průtok $Q_{h2}$ [m <sup>3</sup> /h]	Průtok $Q_2$ [m <sup>3</sup> /s]	Průtok $Q_p$ [m <sup>3</sup> /s]	Průtok $Q_v$ [m <sup>3</sup> /s]	$v_{mp2}$ [m/s]	$v_{mp1}$ [m/s]	$v_{mk}$ [m/s]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	19,3	0,0054	19,1	0,0053	0,0053	0,0054	0,356	0,178	0,106
150	29,9	0,0083	30,3	0,0084	0,0084	0,0084	0,557	0,279	0,166
200	40,2	0,0112	41,8	0,0116	0,0114	0,0113	0,759	0,380	0,227
250	50,6	0,0141	50,7	0,0141	0,0141	0,0143	0,938	0,469	0,280
300	60,5	0,0168	62,8	0,0174	0,0171	0,0172	1,142	0,571	0,341
350	73,2	0,0203	73	0,0203	0,0203	0,0202	1,354	0,677	0,404
400	84,3	0,0234	84,3	0,0234	0,0234	0,0231	1,561	0,781	0,466
450	95,1	0,0264	94,2	0,0262	0,0263	0,0261	1,753	0,876	0,523
500	103,8	0,0288	104,3	0,0290	0,0289	0,0291	1,927	0,963	0,575
550	115,2	0,0320	115,5	0,0321	0,0320	0,0320	2,136	1,068	0,637
600	124,5	0,0346	126,7	0,0352	0,0349	0,0350	2,326	1,163	0,694
650	136,7	0,0380	138,7	0,0385	0,0383	0,0379	2,550	1,275	0,761
700	147	0,0408	146,2	0,0406	0,0407	0,0409	2,715	1,357	0,810
750	158,3	0,0440	159,7	0,0444	0,0442	0,0439	2,944	1,472	0,879
800	169,1	0,0470	167,7	0,0466	0,0468	0,0468	3,119	1,559	0,930
850	180	0,0500	178,1	0,0495	0,0497	0,0498	3,316	1,658	0,989
900	188,2	0,0523	189,5	0,0526	0,0525	0,0527	3,497	1,749	1,043
950	199,6	0,0554	201,1	0,0559	0,0557	0,0557	3,710	1,855	1,107
1000	210,2	0,0584	210,2	0,0584	0,0584	0,0586	3,893	1,946	1,161
1050	223,4	0,0621	220,5	0,0613	0,0617	0,0616	4,110	2,055	1,226

1100	230,6	0,0641	230,2	0,0639	0,0640	0,0646	4,267	2,133	1,273
1150	241,3	0,0670	240,3	0,0668	0,0669	0,0675	4,459	2,230	1,331
1200	250,1	0,0695	251,5	0,0699	0,0697	0,0705	4,644	2,322	1,386
1250	262,5	0,0729	260,6	0,0724	0,0727	0,0734	4,844	2,422	1,445
1300	274,4	0,0762	271,7	0,0755	0,0758	0,0764	5,056	2,528	1,509
1350	285,8	0,0794	281	0,0781	0,0787	0,0794	5,248	2,624	1,566
1400	306,4	0,0851	295,6	0,0821	0,0836	0,0823	5,574	2,787	1,663
1450	317,1	0,0881	313,3	0,0870	0,0876	0,0853	5,837	2,919	1,742

Tab. 6 - Měření průtoku Q v závislosti na otáčkách n



Obr. 25 - Závislost průtoku Q na otáčkách čerpadla n

Průtok  $Q_h$  byl přepočten na průtok  $Q$  pomocí jednoduchého vzorce (6.1).

$$Q = \frac{Q_h}{3600} \quad (6.1)$$

Z Obr. 25 je zřejmé, že se hodnoty prvního a druhého měření liší jen velmi málo a nikam se neodchylují, proto byl spočítán jejich průměr (6.2).



$$Q_p = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (6.2)$$

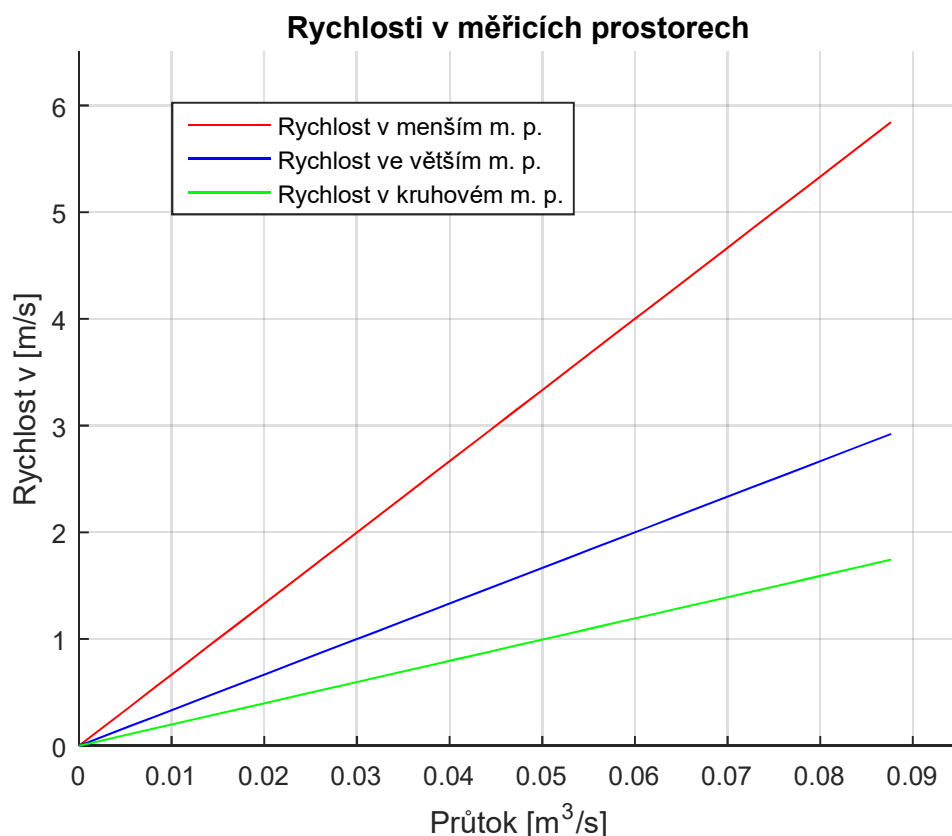
Průměrnými hodnotami byla proložena přímka, která je vyznačena modrou barvou na Obr. 25. Rovnice přímky (6.3) je napsána níže.

$$Q_v = 5,9173 \cdot 10^{-5} n \quad (6.3)$$

$$n = \langle 0; 1550 \rangle \text{ ot/min} \quad (6.4)$$

Součet kvadrátů odchylek vypočtených hodnot od hodnot naměřených je  $1,0458 \cdot 10^{-5}$ .

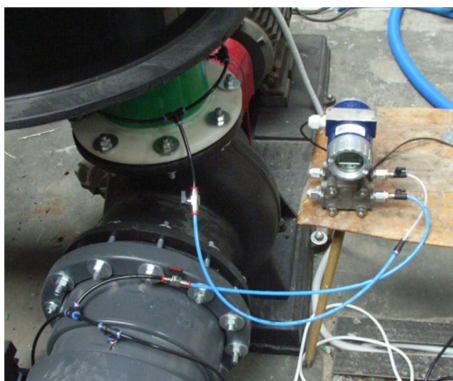
V zadání jsou ovšem požadavky na rychlosti v měřicích prostorech. Abychom z průtoků dostali rychlosti (5.36), je nutné vydělit průtok  $Q_p$  příslušnou plochou měřicího prostoru  $S_{mp2}$  pro menší obdélníkový měřicí prostor,  $S_{mp1}$  pro větší obdélníkový měřicí prostor a plochou  $S_{mk}$  pro kruhový měřicí o průměru  $d_{DN280}$ . Výsledné rychlosti jsou na Obr. 26.



Obr. 26 - Rychlosti v měřicích prostorech

## 6.2 Měření rozdílu statických tlaků a výpočet tlakových ztrát

Pro ověření správnosti výpočtů z kapitoly 4 a posouzení zda se tlaková ztráta celé trati pohybuje v návrhovém režimu čerpadla, bylo nutné ji změřit. Tlakovou ztrátu lze přímo měřit velice obtížně, proto byl pro její získání měřen rozdíl statických tlaků před a za čerpadlem. Pro měření byl použit tlakový diferenční převodník XMD 340–2001–A0–I–JAKO–N56–1–1–1–000, s měřicím rozsahem od 0 do 200 kPa a přesností 0,1% [17]. Tlakové odběry na potrubí jsou rovnoměrně rozmístěny po třech kolem obvodu, pro měření průměrného statického tlaku v celém průřezu. Zapojení měřicí techniky a provedení tlakových odběrů je na Obr. 27. Realizace celých tlakových odběrů je z hadiček a fitinek od firmy Festo s připojovacím rozměrem 6 mm.



**Obr. 27 - Uspořádání při měření rozdílu statického tlaku před a za čerpadlem**

Před připojením diferenčního tlakoměru je nutné co nejdříve odvzdušnit tlakové odběry. Při zapnutí čerpadla a změnách otáček musí být ventily na hadičce odběrů uzavřeny, aby nedošlo k poškození tlakoměru. Po nastavení příslušných otáček otevřeme oba ventily a vyčkáme na ustálení hodnoty na měřidle, kterou poté odečteme.

Při měření rozdílu statických tlaků před a za symetrickým spirálním difuzorem postupujeme stejně, jenom tlakový odběr před difuzorem je pouze jeden na víku. Na Obr. 28 je zapojení diferenčního převodníku při měření symetrického spirálního difuzoru.

V Tab. 7 jsou naměřené tlakové rozdíly před čerpadlem a za čerpadlem, celé trati, a před a za difuzorem.

Otáčky pumpy n [ot/min]	Průměrný průtok $Q_p$ [m <sup>3</sup> /s]	Rozdíl statických tlaků		Tlakové ztráty	
		Celá trat' $\Delta p_{sc}$ [Pa]	Difuzor $\Delta p_{sdif}$ [Pa]	Celá trat' $p_{zc}$ [Pa]	Difuzor $p_{zdif}$ [Pa]
0	0	0	0	0	0
100	0,0053	50	140	235,0	183,4
150	0,0084	200	320	542,0	426,6
200	0,0114	930	620	994,9	817,7
250	0,0141	1570	1020	1669,0	1321,7
300	0,0171	2340	1460	2486,7	1907,0
350	0,0203	3350	2060	3556,2	2688,5
400	0,0234	4490	2670	4764,3	3505,8
450	0,0263	5720	3480	6065,7	4533,6
500	0,0289	7080	4130	7497,8	5403,3
550	0,0320	8570	5030	9083,5	6594,9
600	0,0349	10310	6080	10918,8	7935,3
650	0,0383	12370	7230	13101,8	9460,0
700	0,0407	14170	8430	14999,4	10957,6
750	0,0442	16270	9730	17245,7	12703,3
800	0,0468	18870	11330	19964,5	14665,2
850	0,0497	21070	12630	22307,3	16400,4
900	0,0525	23670	14030	25046,4	18224,4
950	0,0557	26070	15430	27619,2	20150,8
1000	0,0584	28470	16930	30175,2	22126,4
1050	0,0617	31270	19030	33171,2	24823,6
1100	0,0640	34570	20830	36618,7	27073,2
1150	0,0669	37270	22230	39507,8	29049,5
1200	0,0697	40370	23930	42797,6	31327,7
1250	0,0727	42970	26330	45610,1	34375,4
1300	0,0758	46170	28130	49047,4	36898,5
1350	0,0787	49670	29930	52769,7	39375,8
1400	0,0836	52470	31630	55966,6	42285,5
1450	0,0876	56070	32230	59904,3	43914,6

Tab. 7 - Naměřené rozdíly statických tlaků a vypočtené tlakové ztráty

Pro výpočet tlakových ztrát použijeme Bernoulliho rovnici [2] v tlakovém tvaru. Budeme předpokládat, že rozdíl výšek je zanedbatelný. Dostaneme velikost tlakové ztráty  $p_z$  (6.8) jako rozdíl kvadrátu rychlosti před a za měřeným úsekem plus rozdíl statických tlaků (6.7).



Obr. 28 - Uspořádání při měření rozdílu statických tlaků před a za spirálním difuzorem

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho gh = konst. \quad (6.5)$$

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_{s1} = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_{s2} + p_z \quad (6.6)$$

$$\Delta p_s = (p_{s1} - p_{s2}) \quad (6.7)$$

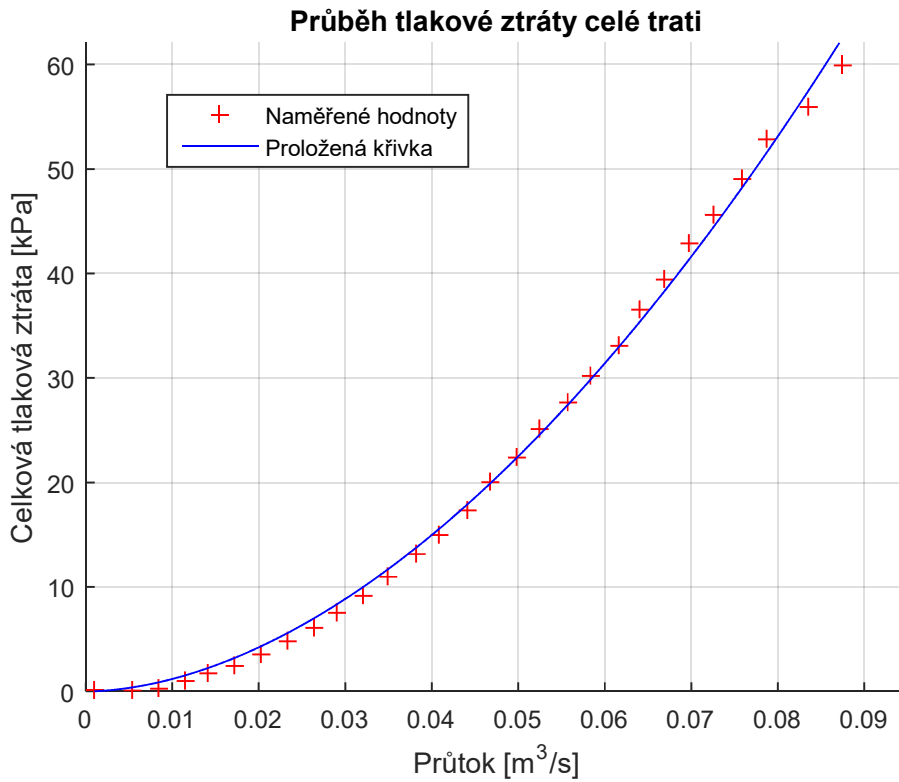
$$\frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} + \Delta p_s = p_z \quad (6.8)$$

Obr. 29 ukazuje závislost tlakové ztráty celé trati  $p_{zc}$  na průtoku a v Obr. 30 je zachycen nárůst tlakové ztráty symetrického spirálního difuzoru  $p_{zdif}$ . Křivka proložená hodnotami tlakové ztráty celé trati na Obr. 29 má rovnici (6.9).

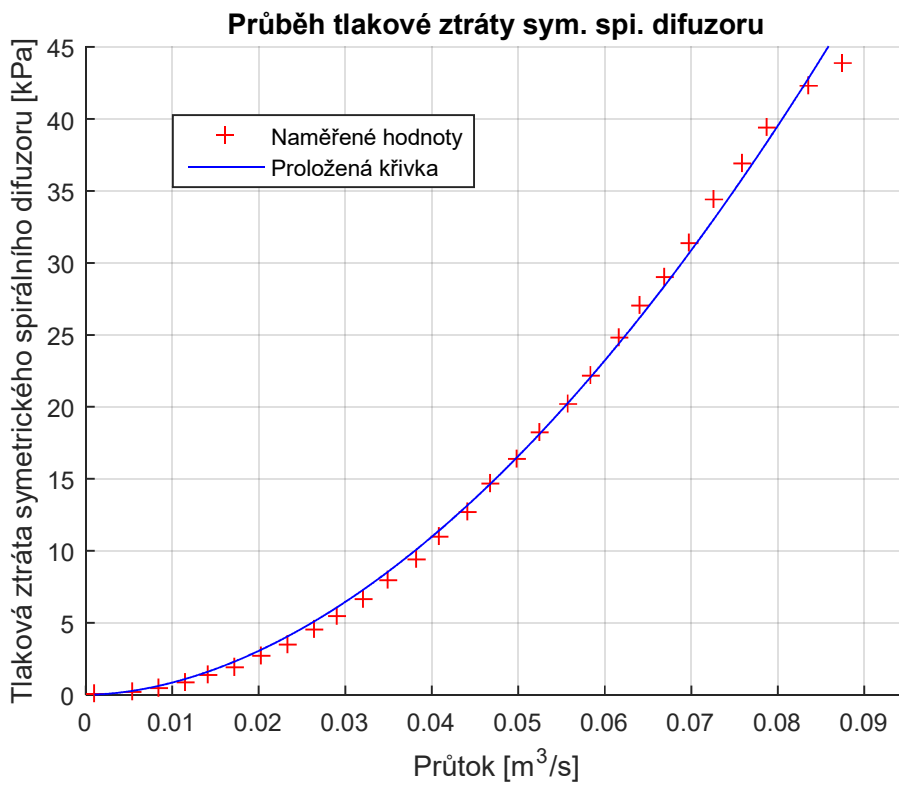
$$p_{zc} = 5373 \cdot Q^{1,828} \quad (6.9)$$

V Obr. 30 jsou tlakové ztráty symetrického spirálního difuzoru aproximovány křivkou s rovnicí (6.10).

$$p_{zdif} = 4218 \cdot Q^{1,849} \quad (6.10)$$



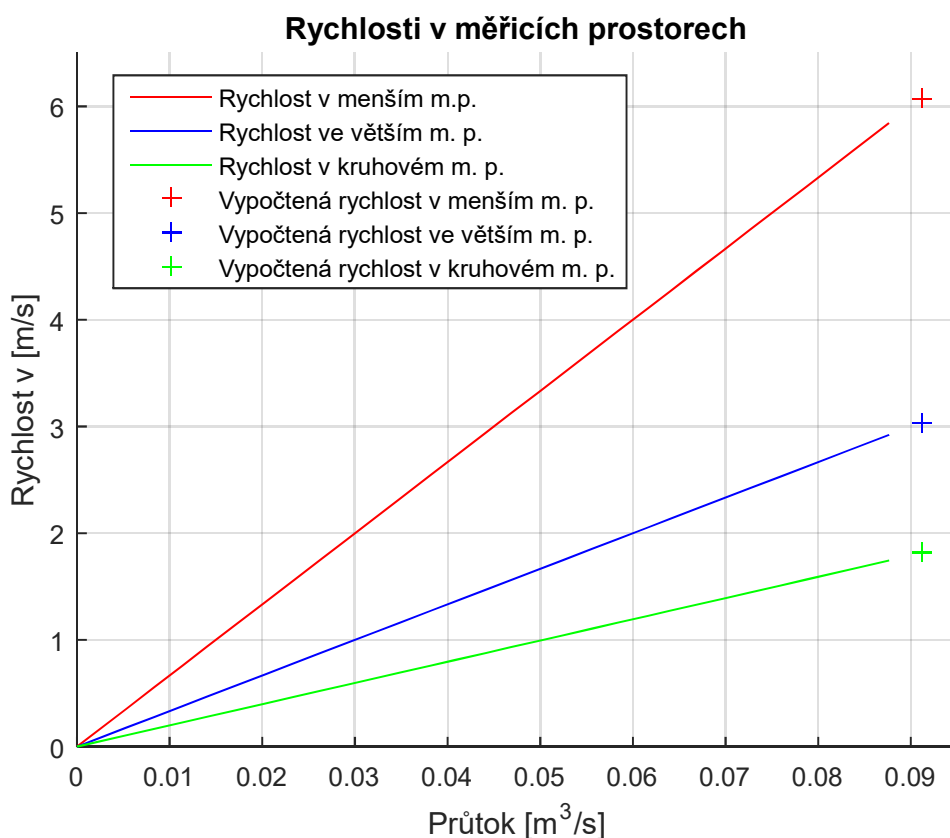
**Obr. 29 - Tlaková ztráta celé trati**



**Obr. 30 - Tlaková ztráta symetrického spirálního difuzoru**

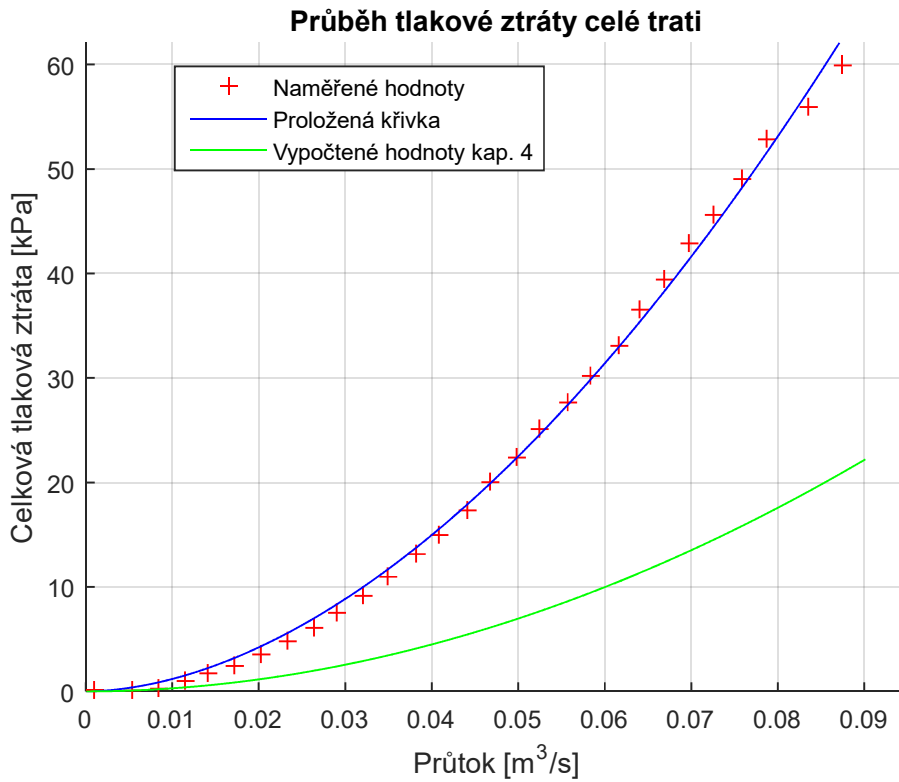
### 6.3 Zhodnocení výsledků měření

Z Obr. 26, nebo Tab. 6 můžeme vyčíst, že se rychlosti v obdélníkových měřicích prostorech při otáčkách čerpadla  $n = 1450 \text{ ot/min}$  těsně přibližují k hodnotám daným zadáním. Pro dosažení zadaných hodnot je potřeba větší průtok. Pokud by frekvenční měnič dokázal zvýšit otáčky čerpadla na  $n = 1550 \text{ ot/min}$ , bylo by možné se s rychlostmi dostat nad hranice v zadání. V Obr. 31 to dokazují body na pravé straně grafu, které vyznačují rychlosti odpovídající průtokům vypočteným z funkce (6.3) pro otáčky  $n = 1550 \text{ ot/min}$ .

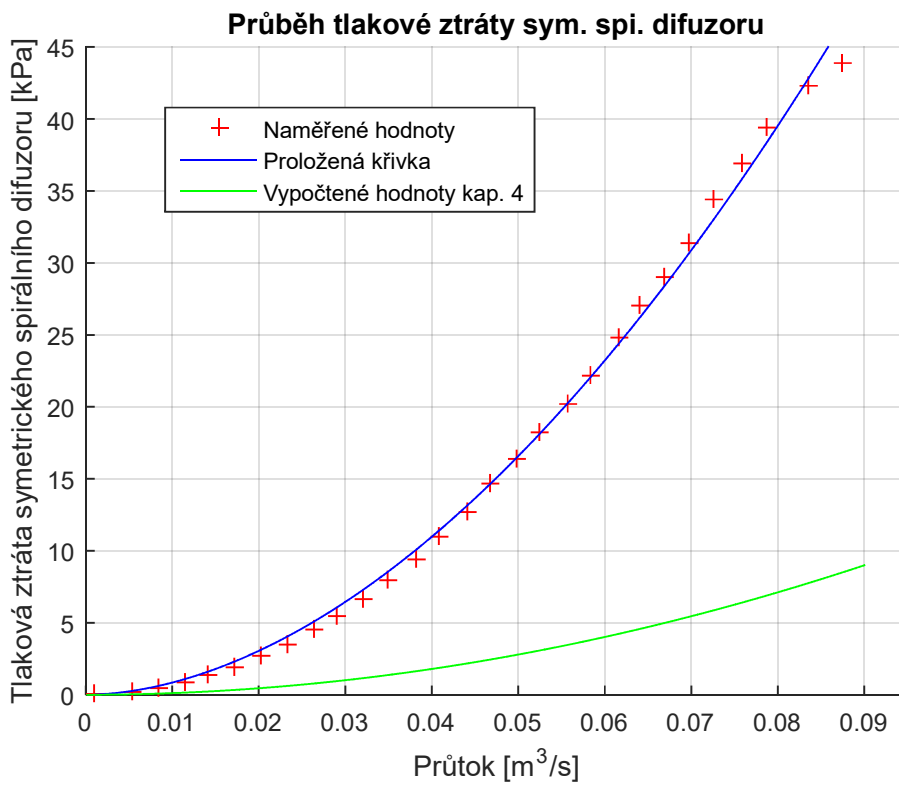


Obr. 31 - Rychlosti v měřicích prostorech s vypočtenými rychlostmi pro  $n = 1550 \text{ ot/min}$

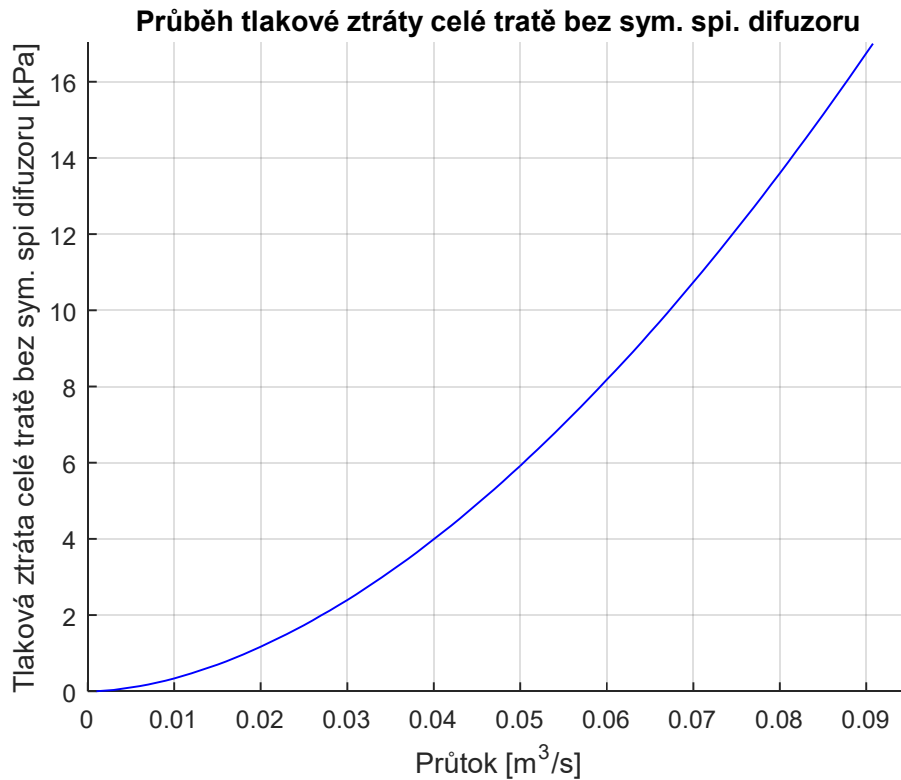
Dále je posouzeno, zda výsledky návrhových výpočtů v kapitole 4 odpovídají měření. Při porovnání výsledné celkové tlakové ztráty vypočtené a naměřené Obr. 32 je vidět, že experimentálně zjištěná tlaková ztráta je 2,52-násobně větší než vypočtená. Tento razantní nárůst vysvětluje Obr. 33, ze kterého je patrné, že velikou částí celkové tlakové ztráty je ztráta v symetrickém spirálním difuzoru. Odečtením od celkové naměřené tlakové ztráty, je vypočítána (6.12) tlaková ztráta zbytku tratě  $p_{zz}$  (viz Obr. 34).



Obr. 32 - Porovnání vypočtené a naměřené tlakové ztráty celé trati



Obr. 33 - Porovnání vypočtené a naměřené tlakové ztráty sym. spi. Difuzoru



**Obr. 34 – Průběh naměřené tlakové ztráty cele trati bez sym. spi. difuzoru**

$$p_{zz} = p_{zc} - p_{zdif} \quad (6.11)$$

$$p_{zz} = 59,904 - 43,914 = 15,989 \text{ kPa} \quad (6.12)$$

Když je od vypočtené celkové tlakové ztráty  $p_{zvc}$  odečtena vypočtená tlaková ztráta symetrického spirálního difuzoru  $p_{zdif}$  (Obr. 33), rozdíl je roven vypočtené tlakové ztrátě zbytku tratě  $p_{zvz}$

$$p_{zvz} = p_{zvc} - p_{zdif} \quad (6.13)$$

$$p_{zvz} = 23,786 - 9,665 = 14,121 \text{ kPa} \quad (6.14)$$

Při porovnání hodnot  $p_{zvz}$  a  $p_{zz}$  je vidět, že experimentálně určená tlaková ztráta trati bez difuzoru je větší jenom o necelé 2 kPa, což je dobrý výsledek jelikož byla trať pro výpočty značně zjednodušena a ve skutečné trati je mnoho technologických nedostatků, které tlakovou ztrátu zvětšují. Ukázalo se, že tlaková ztráta difuzoru je přibližně 5-násobná oproti výpočtu. Jelikož se jedná o tvarově velmi složitý prvek, bylo analyticky velmi obtížné určit součinitel místní tlakové ztráty. Pro přesnější výpočet by bylo nutné díl podrobit CFD simulaci.



## 7. Závěr

Cílem této práce bylo vybudovat vodní cirkulační trať určenou pro testování a kalibraci nově vyvíjených měřidel vznikajících při spolupráci Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky s firmou Mavel a.s.

Po prostudování podkladů z dostupné odborné literatury a seznámení se s několika typy hydrodynamických cirkulačních tratí, které se v dnešní době používají, bylo zvoleno kytarové dvouúrovňové uspořádání s obdélníkovým průřezem horního kanálu a zpětným potrubím kruhového průřezu. Schéma trati je na Obr. 5. Pro měřidla zadaných rozměrů byly navrženy dva na sebe navazující obdélníkové měřicí prostory o rozměrech  $50 \times 300 \times 500$  mm a  $100 \times 300 \times 500$  mm a jeden kruhový měřicí prostor o průměru 250 mm a délce 302 mm. Konstrukce složitějších částí byla podpořena analytickými hydrodynamickými výpočty. Vysoká variabilita je zajištěna sešroubováním trati z jednotlivých komponent, které je možné rychle měnit. Na základě návrhu byla vytvořena výkresová dokumentace, podle níž autor celou trať v prostorech laboratoří vybudoval (viz Obr. 35 v příloze A) Při následně provedených ověřovacích experimentech bylo zjištěno, že maximální rychlost v kruhovém měřicím prostoru je  $v_{mk} = 1,742$  m/s a v obdélníkových je  $v = 5,837$  m/s.

Rychlost proudění v kruhovém měřicím prostoru je větší než 1,5 m/s a tedy splňuje zadání. Rychlost v užším obdélníkovém měřicím prostoru se blíží k hranici uvedené v zadání. To je zapříčiněno 2,52-násobně vyšší tlakovou ztrátou celé trati, než bylo určeno při návrhových výpočtech. Důvodem velké nepřesnosti ve výpočtech bylo velice obtížné určení tlakové ztráty symetrického spirálního difuzoru. Změřená tlaková ztráta byla 5-násobně vyšší, než byla uvažována při výpočtech. Problém s nedostatečnou rychlostí je možné řešit dvěma způsoby. Při prvním jednodušším a méně pracném je možné díky frekvenčnímu měniči zvýšit otáčky čerpadla nad hodnotu nominálních otáček a dosáhnou tak zvýšení rychlosti nad požadovanou hranici. Druhá varianta spočívá v opětovném rozebrání čerpadla a změně úhlu náběhu lopatek vrtule. Tímto zásahem se změní charakteristika čerpadla, která bude odpovídat zvýšení průtoku při stejné tlakové ztrátě.

V trati již byla testována nová měřidla, jako například nový průtokoměr kruhového průřezu se sítí žhavených drátků.

## Seznam použité literatury

- [1] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2933-6.
- [2] VÁRADIOVÁ, Blanka, Jan JEŽEK a Josef ADAMEC. *Mechanika tekutin*. Vyd. 3., přeprac. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1615-3.
- [3] NOŽIČKA, Jiří. *Dynamika plynů*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3300-7.
- [4] Efekty při proudění vysokými rychlostmi. *Transformační technologie* [online]. [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/efekty-pri-proudeni-vysokymi-rychlostmi.html>
- [5] *Garfield Thomas Water Tunnel* [online]. 1996, , 30 [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: <https://www.asme.org/getmedia/a780f1aa-900b-469c-9e79-0f125cd9cc93/188-Garfield-Thomas-Water-Tunnel-brochure.aspx>
- [6] *RESEARCH WATER TUNNELS* [online]. 2014 [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: [http://www.rollinghillsresearch.com/Water\\_Tunnels/Brochures/RHRC\\_Research\\_Water\\_Tunnels.pdf](http://www.rollinghillsresearch.com/Water_Tunnels/Brochures/RHRC_Research_Water_Tunnels.pdf)
- [7] BASSAN, Ricardo Augusto, Sérgio Said MANSUR a Edson DEL RIO VIEIRA. REBUILDING AND TESTING A VERTICAL HYDRODYNAMIC TUNNEL. *ResearchGate* [online]. 2011, , 11 [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/235936496\\_REBUILDING\\_AND\\_TESTING\\_A\\_VERTICAL\\_HYDRODYNAMIC\\_TUNNEL](https://www.researchgate.net/publication/235936496_REBUILDING_AND_TESTING_A_VERTICAL_HYDRODYNAMIC_TUNNEL)
- [8] IDEL'CHIK, I.E. *Handbook of Hydraulic Resistance*. Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatel'stvo. Moskva – Leningrad 1960. (Translated from Russian by The Isreal Program for Scientific Translations).
- [9] MEHTA, R. D. a P. BRADSHAW. Design rules for small low speed wind tunnels. *The Aeronautical journal for the Royal Aeronautical Society*[online]. 1979, , 8 [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: <http://navier.stanford.edu/bradshaw/tunnel/LowSpeedTunnels.pdf>
- [10] Horizontální vrtulová čerpadla AFG. In: *BOYSER* [online]. [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: [http://www.boyser.sk/cerpadla/Sigma/afgp\\_sigma\\_lutin.pdf](http://www.boyser.sk/cerpadla/Sigma/afgp_sigma_lutin.pdf)
- [11] Děrovaný ocelový plech. *EPELCHY.CZ* [online]. 2015 [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: <http://www.eplechy.cz/eshop/1-5-x-1000-x-2000-rv-4-6-dc01-derovany-ocelovy-plech-112.html>

- [12] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTĚÁVA. *MECHANIKA TEKUTIN*. Ostrava: VŠB-TU, 2002. Dostupné také z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>
- [13] LINHART, Jiří. *Mechanika tekutin I*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-766-7.
- [14] JONÁŠ, Pavel. *Design of an axisymmetric contraction*. 1991.
- [15] Indukční průtokoměry FLONET FN20XX.1. In: *ELIS.CZ* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: <http://www.elis.cz/cs/produkty/indukcni-prutokomer-kapalin/indukcni-prutokomery-flonet-fn20xx1.html>
- [16] Základy pro plánování PVC - U. *GeorgeFischer.cz* [online]. [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: [http://www.georgefischer.cz/wadm/spc\\_file\\_download.php?dl=dwn&f=13.pdf&uid=69&h=8c5cd0537e&fn=PVC-U\\_-\\_z%C3%A1klady\\_projektov%C3%A1n%C3%AD\\_potrubn%C3%ADch\\_syst%C3%A9m%C5%AF\\_CZ](http://www.georgefischer.cz/wadm/spc_file_download.php?dl=dwn&f=13.pdf&uid=69&h=8c5cd0537e&fn=PVC-U_-_z%C3%A1klady_projektov%C3%A1n%C3%AD_potrubn%C3%ADch_syst%C3%A9m%C5%AF_CZ)
- [17] Snímač diferenčního tlaku pro technologické procesy. *APOELMOS.CZ* [online]. Nová Paka, 2014 [cit. 2016-08-18]. Dostupné z: [http://www.apoelmos.cz/download/catalogue/1445/XMD\\_CS.pdf](http://www.apoelmos.cz/download/catalogue/1445/XMD_CS.pdf)

## Příloha A



Obr. 35 - Boční pohled na trat'



**Obr. 36 - Nezakrytá trať**



**Obr. 37 - Boční pohled na trať s volnou hladinou**

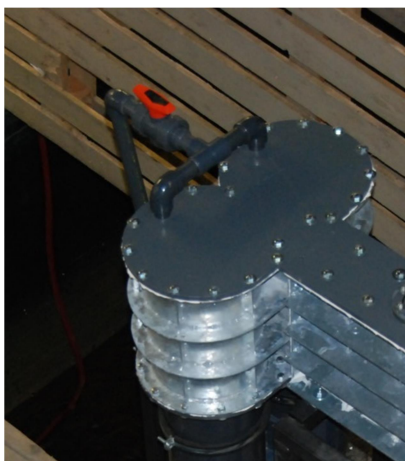
## Příloha B – Návod k použití

V této části je stručný návod k použití trati. Je zde vysvětleno jak trať naplnit vodou, odvzdušnit ji a komplexně připravit pro měření. Dále je vysvětleno, jak pracovat s ovládáním průtoku, respektive nastavováním otáček čerpadla.

### Napuštění a odvzdušnění

Před začátkem samotného napuštění je nutné:

1. Zkontrolovat, zda je odvzdušňovací ventil Obr. 38 - Odvzdušňovací ventil (otevřený) Obr. 38 nad spirálním difuzorem otevřen, a pokud není, tak oranžovou páku otočit rovnoběžně s odvzdušňovacím potrubím.
2. Zavřít vypouštěcí ventil celé trati. Ten se nachází kousek před čerpadlem na spodní části zpětného potrubí – na Obr. 39 je označen písmenem B. Ovládací páka by měla být kolmo k potrubí.
3. Je vhodné zkontrolovat výšku hladiny v kanálu kam je vyvedeno vypouštěcí potrubí. Při vysoké hladině v kanálu a nuceném náhlém vypuštění trati by mohlo dojít k vyplavení laboratoře, proto je vhodné sledovat hladinu vody v kanále a včas jí odčerpávat pryč.



Obr. 38 - Odvzdušňovací ventil (otevřený)

Abychom trať naplnili vodou, je nutné otevřít tři ventily na přívodním potrubí. První se nachází u stěny kde ústí vodovod, druhý je nad průchodem za rozvětvením potrubí do několika odboček a třetí je přímo před vstupem do trati. Na obrázku Obr. 39 označen

písmenem A. Napouštěcí a vypouštěcí potrubí mají společnou část, aby zásahů do potrubí bylo co nejméně.



**Obr. 39 - Napouštěcí (A) a vypouštěcí (B) ventily**

Nejprve se naplní potrubí, následně čerpadlo a zdvojené potrubí. Po naplnění uklidňovací komory, měřicích prostorů a spirálního difuzoru začne voda vytékat z odvzdušňovací soustavy. V tuto chvíli je vhodné přiškrtit přívod na polovinu a spustit čerpadlo na 200 ot/min. Cirkulující kapalina sebou strhává vzduchové bubliny uvízlé v různých nechtěných zákoutích a dopravuje je k odvzdušňovacímu potrubí. Občas je dobré zvýšit otáčky na 500 jen na krátký okamžik a poté zase ubrat. Po 10 minutách takového provozu můžeme čerpadlo vypnout, zavřít odvzdušňovací ventil, naplnit komín až po přepad a uzavřít přívod vody.

Objem kapaliny v trati je  $0,75m^3$ , naplnění z vodovodního řadu trvá cca 10 minut a dalších 10 minut trvá odvzdušnění. Pokud chceme počet bublin v cirkulačním médiu dále redukovat, postup pro odvzdušnění opakujeme několikrát.

### **Ovládání rychlosti cirkulace**

Jak již bylo napsáno výše, zdrojem tlakové energie je axiální kolenové čerpadlo AFG poháněné elektromotorem o výkonu 11,5 kW. Aby mohla být ovládána velikost průtoku, je přívod elektrické energie veden přes frekvenční měnič GPD 3404 30.KW (viz Obr. 40). Na něm se spouští čerpadlo a nastavením příslušných otáček elektromotoru v rozmezí (60; 1450) je možné regulovat velikost průtoku.





Obr. 40 - Frekvenční měnič GPD 3404 30.KW

Frekvenční měnič se zapne zeleným tlačítkem na rozvaděči napravo. Čerpadlo se začne otáčet na minimální otáčky po stisku zeleného tlačítka na frekvenčním měniči. Otáčky se zobrazují na displeji. Šipkou nahoru se přidávají, šipkou dolů se ubírají. Motor se zastaví stiskem červeného tlačítka na měniči. Po opětovném stisku zeleného tlačítka se čerpadlo roztočí na otáčky, ze kterých bylo vypnuto, proto je vhodné před vypnutím snížit otáčky na minimum. Frekvenční měnič se vypne červeným tlačítkem na rozvaděči vpravo.

Čerpadlo nezapínáme naprázdno (nezaplavené) mohlo by dojít k přehřátí ucpávky a jejímu zničení.

V kapitole 6 je Obr. 25 a rovnice (6.3), s konstantou určenou z naměřených dat, popisující závislost velikosti průtoku na otáčkách čerpadla.

## Vypuštění

Vypouštění trati je velice jednoduché. Nejprve vypneme čerpadlo a frekvenční měnič a následně otevřením ventilu B z Obr. 39 celý obsah trati vypustíme do „kanálu“.

## **Příloha C – Výkresová dokumentace**