

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra energetických zařízení**



**Vojtěch Balner**

**Měření tlakových ztrát při tlaku 4000 bar**

**(Measurement of pressure drop at pressure 4000 bar)**

Vedoucí bakalářské práce:            Ing. Petr Novotný, CSc.

Konzultant bakalářské práce:        Doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Rozsah práce:

Počet stran:                                31

Počet obrázků:                            12

Počet tabulek:                            5

Počet grafů:                                4

Počet příloh:                               9

Liberec 2013

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením tlakové ztráty v jednotlivých součástech vysokotlakého rozvodu používaného při řezání vodním paprskem. V úvodu práce autor popisuje konstrukci vysokotlakých čerpadel. Dále autor popisuje teoretický model tlakových ztrát, následovaný experimentálním měřením. V závěru se autor věnuje praktickému výpočtu modelu ztrát z naměřené drsnosti vnitřního průměru vybraných součástí.

## **Anotation**

This bachelor thesis deals with determining of the pressure drop in individual parts of high pressure piping used in waterjet cutting. In the introductory part of the thesis the author describes construction details of high pressure pumps. In the next part the author describes theoretical model of pressure drop, followed by experimental measurement. In the final part the author deals with practical calculation of pressure loss model based on measured roughness of interior diameter of selected parts.

## **Klíčová slova**

tlaková ztráta, konstrukce vysokotlakých čerpadel, viskozita tekutin, Reynoldsovo číslo, součinitel třecích ztrát

## **Keywords**

Pressure drop, high pressure pumps construction details, fluid viscosity, Reynolds number, friction loss factor

## **Zadání BP**

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 27.5.2013

Podpis

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date 27.5.2013

Signature

# Obsah

Seznam použitých veličin, konstant a symbolů .....	7
<b>1 Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Popis technologie řezání vodním paprskem a konstrukcí čerpadel.....</b>	<b>9</b>
2.1 Řezání vysokotlakým vodním paprskem.....	9
2.2 Funkce vysokotlakého čerpadla.....	10
2.2.1 Jednostupňové stlačení – přímé stlačení .....	11
2.2.2 Dvoustupňové stlačení .....	12
2.2.3 Popis čerpadla PTV JETS – 3.8/60 COMPACT.....	12
<b>3 Teorie tlakové ztráty a proudění.....</b>	<b>14</b>
3.1 Viskozita tekutin.....	14
3.2 Reynoldsovo číslo .....	14
3.3 Součinitel třecích ztrát.....	15
3.3.1 Součinitel třecích ztrát pro laminární proudění.....	15
3.3.2 Součinitel třecích ztrát pro turbulentní proudění .....	15
3.4 Třecí ztráty při proudění tekutin.....	16
3.5 Místní ztráty.....	17
<b>4 Měření tlakové ztráty.....</b>	<b>18</b>
4.1 Měřicí aparatura .....	18
4.2 Návrh měřicí tratě .....	19
4.3 Měření .....	21
4.4 Vyhodnocení měření .....	21
4.4.1 Vliv rozdílných vlastností výstupních ventilů z multiplikátoru .....	22
4.4.2 Vliv funkce multiplikátoru.....	23
<b>5 Teoretický výpočet tlakové ztráty u hladkého potrubí z naměřené drsnosti vnitřního průměru</b>	<b>25</b>
<b>6 Závěr .....</b>	<b>30</b>
<b>Použitá literatura a zdroje .....</b>	<b>31</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>32</b>

## Seznam použitých veličin, konstant a symbolů

$e_z$ .....	ztrátová energie	[J.kg <sup>-1</sup> ]
$g$ .....	tíhové zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$p_z$ .....	tlaková ztráta	[Pa]
$k$ .....	drsnost	[m]
$v$ .....	rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\xi$ .....	ztrátový součinitel	[-]
$\tau$ .....	tečné napětí	[Pa]
$\eta$ .....	dynamická viskozita	[Pa.s]
$\rho$ .....	hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\nu$ .....	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> .s]
$\lambda$ .....	součinitel třecích ztrát	[-]
Re .....	Reynoldsovo číslo	[-]
$v$ .....	atmosférický tlak při měření	[kPa]
$v$ .....	atmosférický tlak při měření	[kPa]

# 1 Úvod

Zadání práce bylo vybráno firmou PTV s r.o., která se zabývá výrobou technologií pro řezání vysokotlakým vodním paprskem. Zájem zrealizovat měření na jednotlivých součástech nabylo na významu po oslovení dodavatelů vysokotlakých součástí s dotazem na tlakovou ztrátu a jejich negativní, případně žádné, odpovědi. Určení tlakové ztráty by významně posunulo znalosti tlaku vysokotlaké vody na vstupu do řezací hlavy, možnosti upravit funkční rozměry hlavy a následné nastavení parametrů pro co nejlepší kvalitu řezu pro konkrétní materiál. Zvláštní význam má pokles tlaku v rozvodu u speciálních aplikací, kdy je čerpadlo značně vzdáleno od řezací hlavy.

Pro vlastní měření byla zapůjčena od Ústavu geoniky AV ČR přesná měřicí aparatura, která pracuje na principu piezoelektrického jevu. Odtud je signál veden přes zesilovač do počítače a vyhodnocen v softwaru Labview.

Pro ověření měření byla experimentálně naměřena vnitřní drsnost potrubí a z ní následně vypočtena teoretická tlaková ztráta. Touto metodou bylo testováno jak přímé potrubí, ale také L-kus. Vzhledem k tomu, že se u L-kusu vyskytuje i místní ztráta, která byla odhadnuta podle všeobecně známých poznatků, je nutno brát tyto výsledky pouze jako orientační.

Jako výrobce měřených dílů byla vybrána společnost H2O, která je hlavním dodavatelem součástí vysokotlakého rozvodu pro firmu PTV. Byly vybrány nejběžněji používané součásti vysokotlakého rozvodu. Vybráno bylo ze tří používaných průměrů 1/4“, 3/8“, 9/16“ a součástí pro jejich propojení. Zde je nutno zdůraznit, že označení 1/4“, 3/8“, 9/16“ vychází z vnějšího průměru trubky nikoli z vnitřní světlosti.

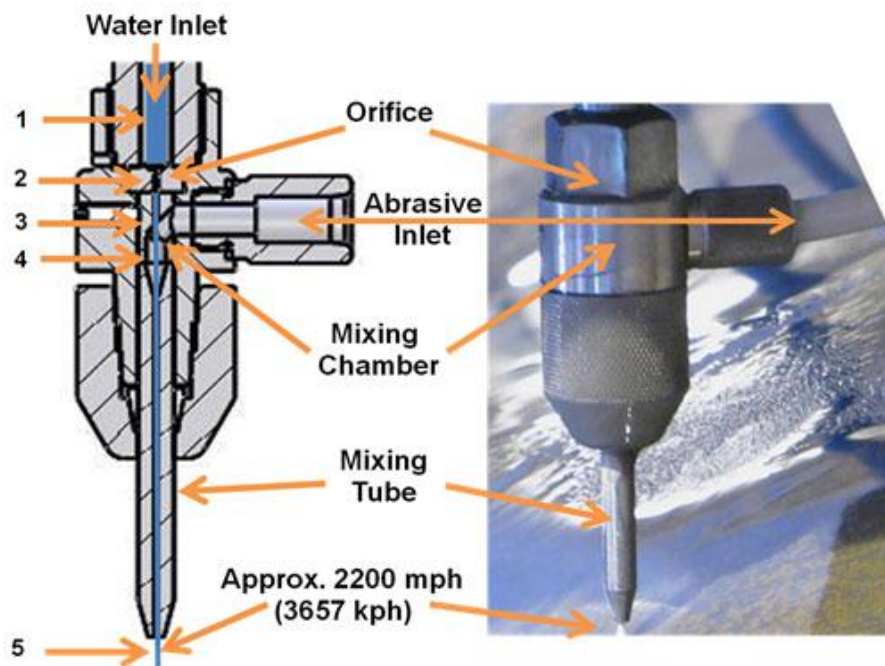


## 2 Popis technologie řezání vodním paprskem a konstrukcí čerpadel

Vznik konvenčního řezání vodním paprskem se odehrál v USA v 70. letech 20. století. Proto se také nejvýznamnější výrobci vysokotlakých rozvodů a ostatních vysokotlakých součástí nachází právě v USA. S tím jsou spojeny běžně používané jednotky a rozměry jednotlivých součástí. Technologie se na počátku využívala pouze jako dělicí a tomu odpovídala kvalita řezu. V dnešní době je tlak zákazníků na co neekonomičtější provoz a snížení počtu použitých technologií pro finální výrobek. Proto se kvalita řezu posunula od dělicí po velmi přesnou. Výrobci udávají přesnost řezů  $\pm 0,03$  mm. Využívají se 5-ti osé stroje pro kompenzaci ztráty energie paprsku při průchodu obrobkem.

### 2.1 Řezání vysokotlakým vodním paprskem

Voda je stlačena na velmi vysoký tlak. Nejběžněji na 60000 psi ale i více. Tento tlak se vytváří v čerpadlech různých konstrukcí. Čerpadlo, na kterém se konkrétně měřila tlaková ztráta, bude podrobněji popsána v další kapitole. Vysokotlaká voda je přepravována trubkami z nerezové oceli k řezací hlavě. Podle řezaného materiálu se používá buď "čistá voda" nebo "voda s příměsí abraziva". S tím je spojená konstrukce řezací hlavy.



Obr. 1 Části řezací hlavy [5]

Na vstupu do řezací hlavy se vysokotlaká voda výrazně urychluje průchodem tryskou o průměrech nejběžněji od 0,004“ do 0,020“ (  $\varnothing$  0,1016 mm –  $\varnothing$  0,508 mm). Vzhledem k vysokým pevnostním nárokům a požadované životnosti se v dnešní době používá technických diamantů vlisovaných do vysokopevnostní nerezové oceli. V trysce se převádí tlak proudu na rychlost. Mění se potenciální energie na kinetickou. Na výstupu z trysky má voda rychlost 2200 mph (983,5 m/s), což jsou přibližně 3 machy. Z tohoto je patrné, že přesné určení tlaku na vstupu do řezací hlavy je důležité pro určení parametrů na výstupu. Vyšší tlak má za následek vyšší rychlost. Vše je samozřejmě závislé na průměru použité trysky a směšovací trubice. Menší průměry trysky zvyšují rychlost vody po průchodu, zároveň je vody méně a proud nemá tolik kinetické energie pro urychlení zrn abraziva.

V řezné hlavě uzpůsobené pro řezání čistým vodním paprskem voda po průchodu tryskou vstupuje přímo do obrobku. Rychlost a síla proudu čistého vodního paprsku je dostatečná pro řezání měkkých nebo tenkých materiálů jako jsou různé pěnové materiály, guma, stavební izolace, měkké dřevo, plasty, koberce, jídlo, obvodové desky apod.

V případě abrazivní řezací hlavy se vodního paprsku používá jako nositele energie, kterou předává jednotlivým zrnům abraziva. Vstup abraziva je zajištěn rychlostí proudění, která vytváří v trubici vstupu abraziva podtlak. Jedná se o princip ejektoru. Poté dochází ke smíchání vody a abraziva a vstupu do zaostřovací trubice, kde dochází k usměrnění paprsku. Abrazivem je nejčastěji přírodní granát o různé zrnitosti. Zrnitost abraziva je také jeden z důležitých parametrů kvality řezu. Abrazivní vodní paprsek je vhodný pro řezání tvrdých materiálů, jako jsou kovy, kámen, keramika, kompozity, sklo a porcelán.

Mezi hlavní výhody řezání vodním paprskem patří „studený řez“ (nejsou teplotně ovlivněny vlastnosti řezaného materiálu), malé řezné síly (není mechanicky namáhán obrobek, s tím je spojeno i snadné upnutí) a možnost řezání materiálů o různých vlastnostech najednou (sendvičové materiály).

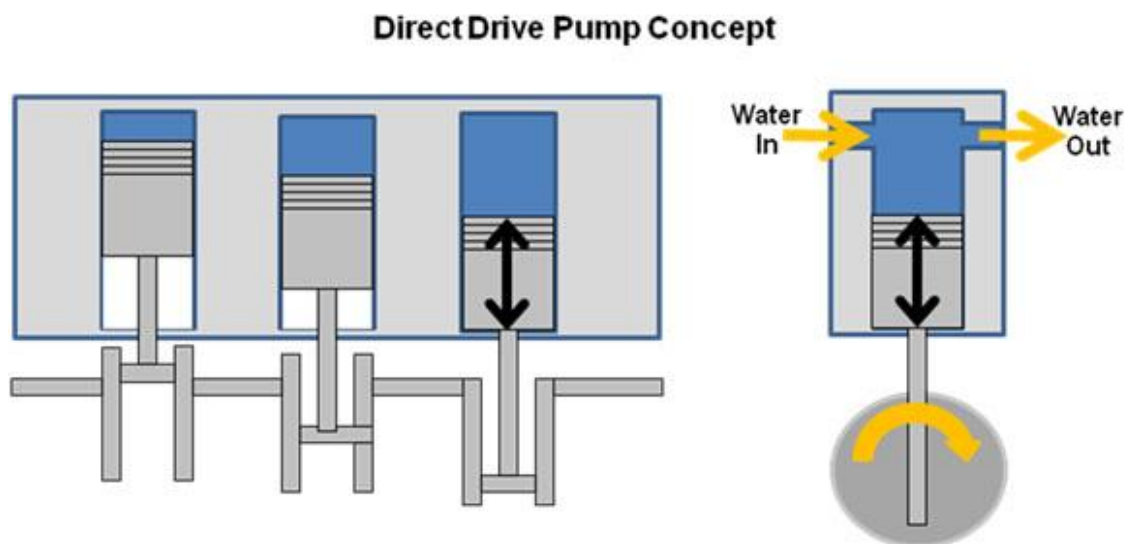
## **2.2 Funkce vysokotlakého čerpadla**

V této části se nachází popis systémů čerpadel pro stlačení vody na velmi vysoké tlaky. Systémů je více variant. V následující kapitole si popíšeme jen ty nejzákladnější a nejvíce používané. Podrobnější popis je u čerpadla, na kterém

probíhalo měření. Jedná se o čerpadlo PTV JETS – 3.8/60 COMPACT. Jeho dvoustupňový systém je v praxi nejběžněji používán.

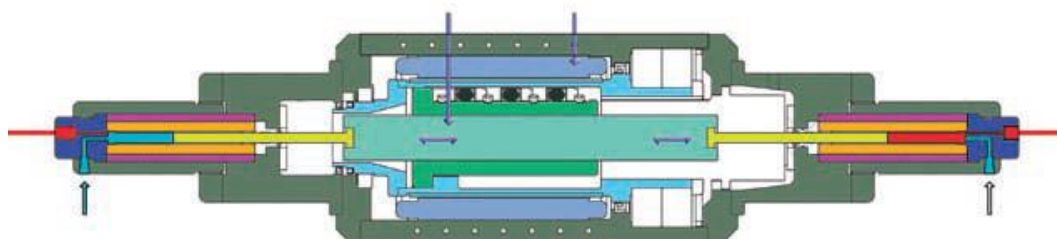
### 2.2.1 Jednostupňové stlačení – přímé stlačení

Tento typ čerpadla funguje po mechanické stránce jako obrácený běh spalovacího motoru. Motor otáčí klikovou hřídelí spojenou se třemi nebo více písty. Pracovní zdvih pístů na sebe navazuje a vytváří se tak potřebný tlak. Tlak a průtok se ovládá otáčkami klikové hřídele. Tento přímý pohon čerpadla reaguje mnohem rychleji na požadované změny tlaku než dvoustupňové systémy. Nevytvářejí se v něm tak velké tlakové rázy jako u čerpadel s použitím multiplikátoru.



Obr. 2 Přímá řízená pumpa [5]

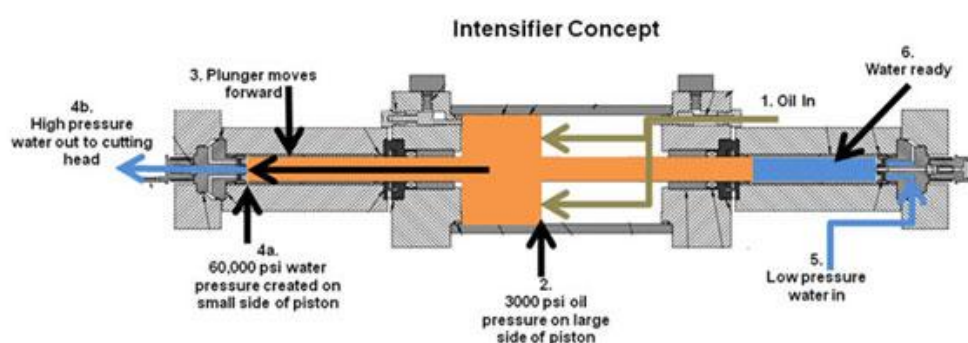
Druhý popisovaný systém používá servomotor pro pohon kuličkového šroubu, který pohybuje písty na svých koncích a tím stlačuje vodu na požadovaný tlak. Výhodou je pružné ovládání systému řízením servomotoru.



Obr. 3 Přímá řízená pumpa TECHNI Water Jet

### 2.2.2 Dvoustupňové stlačení

První stupeň je realizován hydraulickým čerpadlem, které stlačuje hydraulický olej, v malých aplikacích se používá stlačený vzduch. Ten je následně přiveden do multiplikátoru, ve kterém se rozdílnou plochou pístu navyšuje tlak pracovní vody.



Obr. 4 Multiplikátor [5]

### 2.2.3 Popis čerpadla PTV JETS – 3.8/60 COMPACT

#### 2.2.3.1 Hydraulická část

Hnacím prvkem hydraulického čerpadla je elektromotor o výkonu 37 kW, který je spojen pomocí spojky s hydraulickým čerpadlem Parker (regulační axiální pístové čerpadlo s pracovním tlakem 200 bar). Čerpadlo je osazeno proporcionálním ventilem, který řídí na základě signálu z řídicího automatu tlakovou úroveň na výstupu z čerpadla.

Na hydraulickém vedení do multiplikátoru jsou osazeny následující bezpečnostní prvky. Pojistný ventil, který zajišťuje výtlač čerpadla proti překročení maximálního nastaveného tlaku, prvky řízení Bleed Down ventilu, který zajišťuje odtlakování VT rozvodu při vypnutí čerpadla (zároveň se používá při snižování výstupního tlaku).

Hlavní tlakové vedení přivádí k multiplikátoru potřebný tlak a množství hydraulického oleje a ten jeho pomocí zvyšuje tlak vody na požadovanou úroveň. Odpad oleje z multiplikátoru je veden do nádrže přes zpětný filtr, který zajišťuje

jemnou filtraci oleje a tím chrání systém proti nečistotám a nadměrnému opotřebení jejich vlivem.

Chlazení hydraulického oleje probíhá v uzavřeném okruhu pomocí vzduchového chladiče, který zajišťuje správnou pracovní teplotu oleje. Chladič má vlastní oběhové čerpadlo a je možné chladič okruh uzavřít pomocí kulových ventilů a tím oddělit od nádrže. Na nádrži hydraulického oleje je dále osazen hladinový spínač, který chrání hydraulický okruh před poškozením vlivem úniku oleje.

#### 2.2.3.2 *Vysokotlaká část*

Voda vstupuje do čerpadla přes filtrační jednotku. Používá se běžně dostupná užitková voda, která ale musí mít odpovídající parametry běžnému standardu.

Před vstupem vody do multiplikátorů je na vedení osazen snímač tlaku vstupní vody, který při poklesu tlaku pod kritickou úroveň odstaví stroj. Funkce stroje vyžaduje minimální tlak vstupní vody 3,3 bar, který je možné zajistit přídavnou vodárnou.

Voda je z filtrační jednotky vedena hadicemi do multiplikátoru, kde se zvyšuje její tlak na 4100 bar. VT voda je vedena do vyrovnávacího válce, který tlumí hydraulické rázy v potrubí. Za tímto válcem je výstup vody do přívodního potrubí k řezacímu stroji. Do tohoto výstupu je paralelně připojen bleeddown ventil jehož funkce je popsána v části 2.2.3.1. Na odpadní linii vody z tohoto ventilu je připojeno elektrické teplotní čidlo, které indikuje na ovládacím panelu přehřátí bleeddown ventilu a tím jeho případné poškození (protékání).



*Obr. 5 PTV JETS – 3.8/60 COMPACT [6]*

### 3 Teorie tlakové ztráty a proudění

Disipace energie způsobená vazkostí tekutiny (hydraulické ztráty způsobené překonáváním hydraulických odporů) je závislá na řadě parametrů např. viskozitě tekutiny, geometrii potrubí a jeho drsnosti, ale hlavně na rychlosti proudění. Při výpočtu se místní ztráty vyjadřují jako násobek kinetické energie (vztažené na střední objemovou rychlost).

$$e_z = gh_z = \frac{p_z}{\rho} = \zeta \frac{v^2}{2} \quad (3.1)$$

Kde  $\zeta$  (-) je ztrátový součinitel, který vyjadřuje třecí nebo místní ztrátu. U dlouhých potrubí převažují třecí ztráty, úměrné délce, u krátkých se uplatní ztráty způsobené vířením tekutiny v tzv. místních ztrátách např. v ohybech, při změně průřezu apod.

Zpravidla předpokládáme, že každý hydraulický odpor se projevuje nezávisle na účinku ostatních odporů. Celková ztráta je pak dána součtem jednotlivých ztrát způsobených každým odporem samostatně. [3]

#### 3.1 Viskozita tekutin

Viskozita je schopnost tekutiny přenášet tečná napětí. Je také příčinou odporu proti vzájemnému posunu částic tekutiny a vzniku tečného napětí  $\tau$  (Pa) na rozhraní mezi tekutinou a stěnou. [3]

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (\text{Newtonův zákon}) \quad (3.1)$$

Kde  $\eta$  (Pa.s) je dynamická viskozita a  $\frac{dv}{dy}$  je rychlost smykové deformace, při rovinném proudění nazývá rychlostní gradient. V rovnicích mechaniky tekutin se často vyskytuje poměr dynamické viskozity  $\eta$  dělené hustotou  $\rho$  ( $\text{kg.m}^3$ ) a nazývá se kinematická viskozita. [3]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.2)$$

Viskozita je také velmi závislá na teplotě.

#### 3.2 Reynoldsovo číslo

Jedná se o bezrozměrné číslo, pomocí kterého lze ze střední rychlosti  $v$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ), charakteristického rozměru potrubí  $d$  (m) a kinematické viskozity  $\nu$  ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) určit typ proudění v potrubí nebo i při obtékání těles.

- $Re < 2300$  – laminární proudění
- $2300 < Re < 3000$  – přechodová oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním
- $Re > 3000$  – turbulentní proudění

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (3.3)$$

### 3.3 Součinitel třecích ztrát

Pro přesné určení třecích ztrát je důležité i správné stanovení součinitele třecích ztrát  $\lambda$  (-), který je funkcí střední rychlosti  $v$ , viskozity  $\nu$ , průměru a délky potrubí  $d$  (m) a  $l$  (m), jeho absolutní drsnosti  $k$ , času, koncentrace příměsí atd.

$$\lambda = f(v, \nu, d, l, k, t, \dots)$$

U dostatečně dlouhých potrubí  $ld > 100$  je závislost ztrát na délce lineární a pak součinitel  $\lambda$  už na délce nezávisí, což neplatí pro krátká potrubí. [3]

Rozlišuje se také mezi hydraulicky hladkým a hydraulicky drsným potrubím.

- Hladké potrubí  $Re < 500 \cdot \frac{d}{k}$  (3.4)

- Drsné potrubí  $500 \cdot \frac{d}{k} < Re$  (3.5)

#### 3.3.1 Součinitel třecích ztrát pro laminární proudění

U laminárního potrubí se součinitel třecích ztrát počítá pouze z  $Re$  a to jak pro hydraulicky hladké, tak pro hydraulicky drsné potrubí.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.6)$$

#### 3.3.2 Součinitel třecích ztrát pro turbulentní proudění

U turbulentního proudění se rozlišuje mezi hydraulicky hladkým a hydraulicky drsným potrubím.

U hydraulicky hladkého potrubí závisí odpor pouze na  $Re$ . Nerovnosti stěny potrubí (drsnost) jsou menší než mezní vrstva.

- $3 \cdot 10^3 < Re < 8 \cdot 10^4 \Rightarrow \lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}$  (3.7)

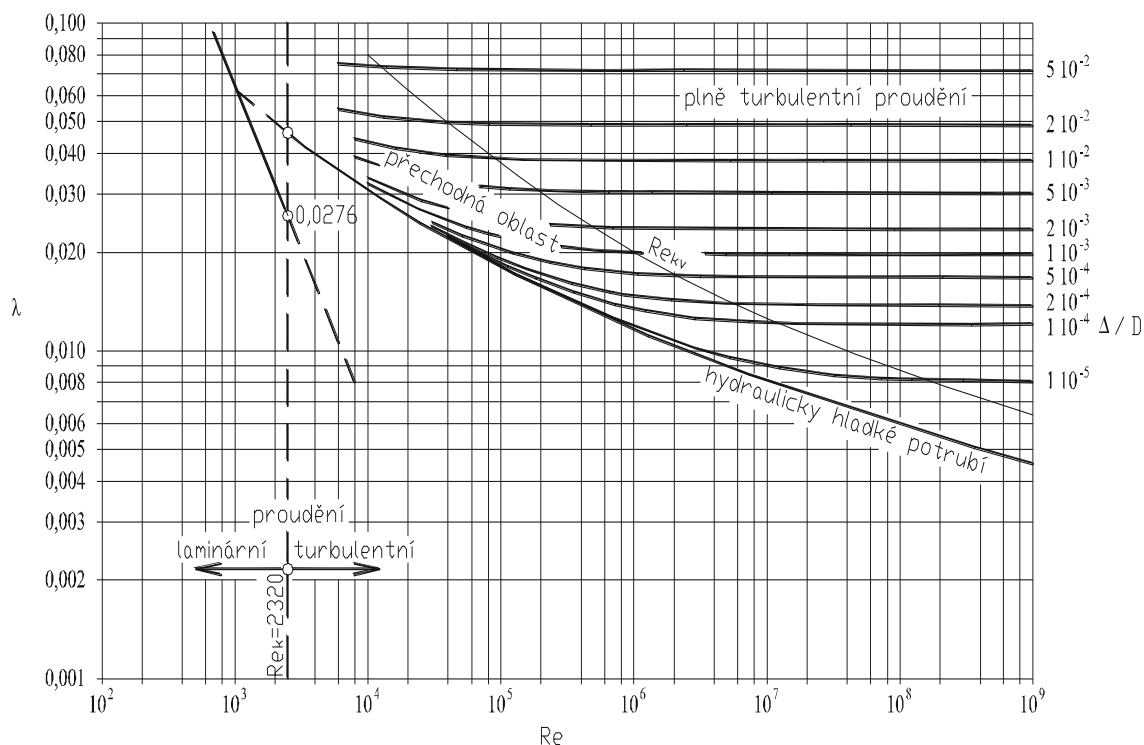
- $10^5 < Re < 10^6 \Rightarrow \lambda = \frac{0,184}{\sqrt[5]{Re}}$  (3.8)

U hydraulicky drsného potrubí závisí také na relativní drsnosti potrubí  $\frac{k}{d}$

$$\lambda = \left(2 \log \frac{d}{k} + 1,138\right)^{-2} \quad (3.9)$$

U přechodové oblasti platí rovnice White – Colebrockova.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{k}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.10)$$



Graf 1 Moodyho graf

### 3.4 Třecí ztráty při proudění tekutin

Třecí ztráty jsou závislé jednak na tekutině dopravované potrubím (množství, hustotě, viskozitě, koncentraci příměsí), jednak na potrubí (délka, průměr, drsnost). Protože se tyto veličiny mohou během používání měnit např. průměr se může zmenšovat, budou i ztráty závislé na čase.

Pro výpočet se používá Weisbachova vzorce.

$$e_z = gh_z = \frac{p_z}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} \Rightarrow p_z = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} \rho \quad (3.11)$$



### 3.5 Místní ztráty

Místní ztráty jsou způsobené změnou směru nebo průřezu, převládají v daném místě nad ztrátami třením. Místní ztráta je všude tam, kde se mění vektor rychlosti. Čímž se v tekutině vytváří víry. Kinetická energie těchto vírů se odebírá z energie hlavního pohybu proudu tekutiny tj. energie se mění v teplo – disipuje.

Pro hodnotu místní ztráty je určující zejména ztrátový součinitel  $\xi$  (-), který je funkcí  $Re$ , geometrického tvaru průtočného kanálu, tvaru rychlostního profilu před změnou, polohy předcházejícího místního odporu, atd... Ztrátový součinitel se určuje většinou experimentálně. [4]

$$e_z = \xi \frac{v^2}{2} \Rightarrow p_z = \xi \frac{v^2}{2} \rho \quad (3.12)$$

## 4 Měření tlakové ztráty

### 4.1 Měřicí aparatura

Pro měření bylo krátkodobě zapůjčeno vybavení od Ústav geoniky AV ČR v Ostravě. Měřicí aparatura obsahovala:

- 2 x nábojový zesilovač Kistler  
Nepřesnost  $< \pm 0,5 \% \text{ FS}$  (full scale) při využití  $\text{FS} \geq 100 \text{ pC}$
- 2 x snímač tlaku Kistler  
Citlivost snímače je  $2,5 \text{ pC/bar}$ . Nepřesnost  $\pm 1 \% \text{ FSO}$  (full scale output)
- Měřicí karta PCI
- Stíněnou sběrnici National Instrument NBC – 2110
- 2 x propojovací kabel BNC – BNC
- 2 x vysokoodporový kabel Microdot - NBC

Měření bylo vyhodnocováno v programu LabView. Jako výstup byly naprogramovány oba snímače a jejich diference.

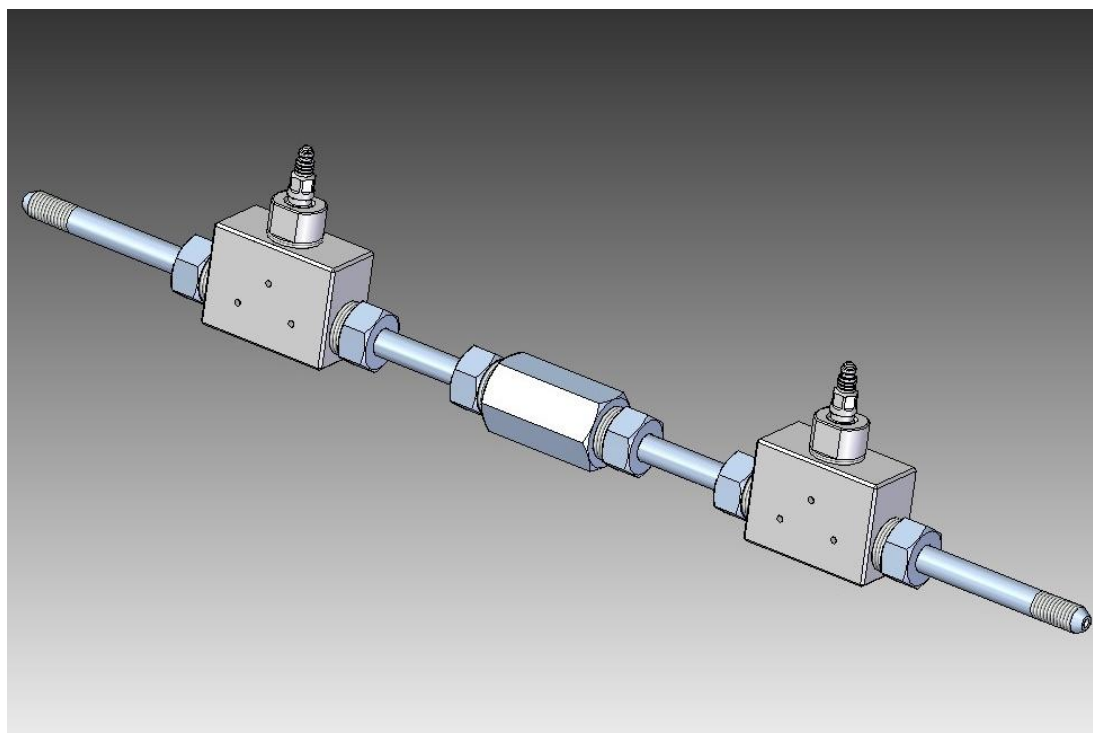


Obr. 6 Nábojový zesilovač Kistler, Obr. 7 snímač tlaku Kistler

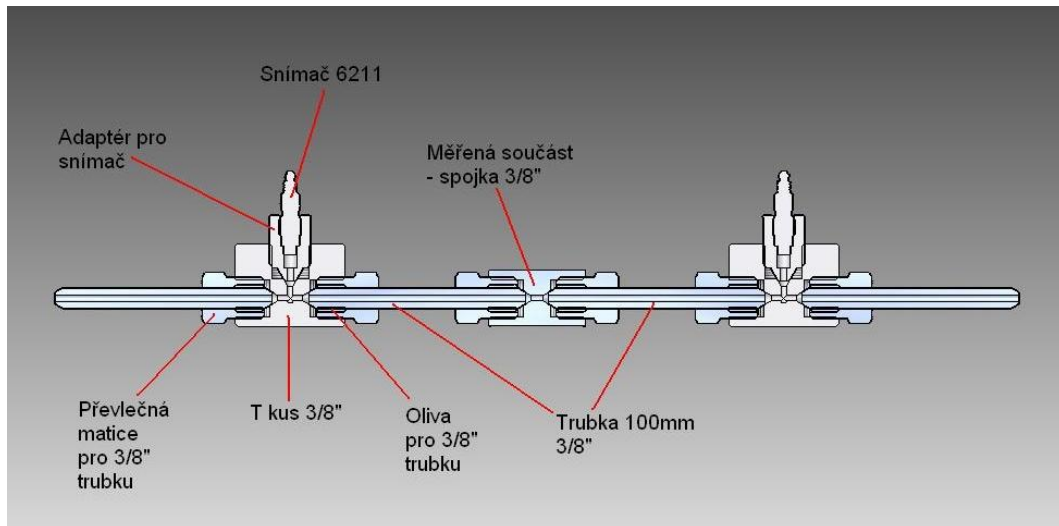
## 4.2 Návrh měřící tratě

Měřící trať byla navržena jako diferenční měření, kdy se od sebe budou hodnoty snímačů odečítat. Vzhledem k velmi vysokému tlaku vody bylo potřeba vyřešit připojení snímačů. Připojení bylo realizováno pomocí T – kusu 3/8“, do kterého byl vyroben adaptér, který byl uzpůsoben na dosedací plochu snímače dle návodu výrobce, aby nedošlo k netěsnostem. Měřená součást se vkládala mezi snímače a byla spojena trubkou o délce 60 – ti násobku vnitřního průměru pro uklidnění proudění. Poté bylo provedeno pro jednotlivé průměry měření 120 - ti násobku vnitřního průměru s názvem Chyba. Tato hodnota představuje tlakovou ztrátu připojení měřené součásti, která se odečítá z naměřené difference.

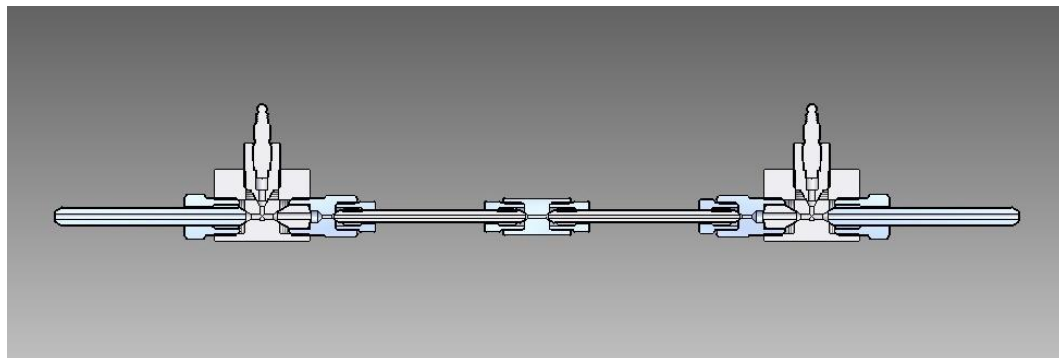
Měření bylo provedeno na pracovišti firmy PTV s r.o., kde byly nejlepší možné podmínky pro připojení do rozvodu. A to konkrétně do testovací trati pro zkoušení nově vyrobených čerpadel. Vstup měřící tratě byl spojen flexibilní hadicí k čerpadlu. Toto řešení se jevilo jako nejlepší vzhledem k proměnným rozměrům tratě. Výstup byl spojen s pevně uchycenou tryskou, která byla nasměrována do dlouhé trubky naplněné vodou, kde se zachycovala a mařila energie vodního paprsku. Odtud voda odtékala přepadem do kanalizace.



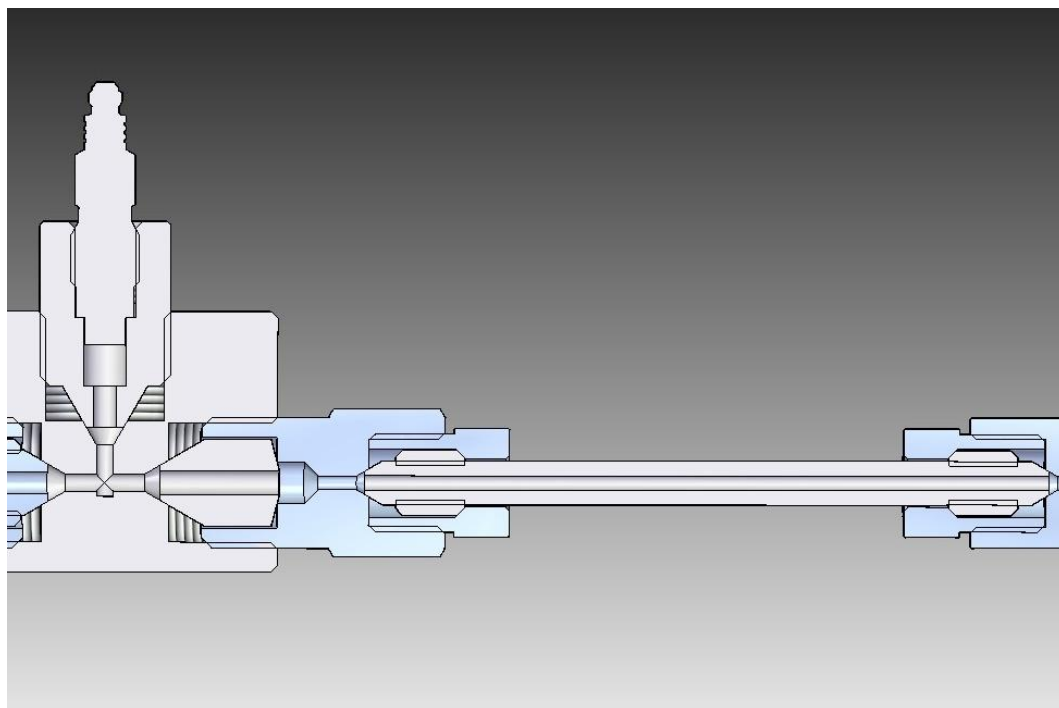
*Obr. 8 Měřící trať pro rozvod 3/8“*



*Obr. 9 Řez měřicí tratí 3/8"*



*Obr.10 Řez měřicí tratí 1/4"*



*Obr. 11 Detail připojení měřené součásti spojky do 3/8" rozvodu přes adaptér*

### 4.3 Měření

Měřicí aparatura byla nejprve přivezena do laboratoře Katedry energetických zařízení TUL, kde se nachází kalibrační stanice. Na tuto stanici se aparatura připojila. Následně se simulovalo měření, aby se otestovala celá měřicí sestava a metodika měření. Testování proběhlo neúspěšně, vzhledem k protékajícímu těsnění kalibrační jednotky.

Při realizaci měření ve firmě PTV nejprve probíhalo zkoušení měřicí aparatury připojené na různá čerpadla. Po připojení snímačů byla vždy celá soustava natlakována a ponechána po určitou dobu v maximálním tlaku, aby byla zkontrolována těsnost celého systému. Několikrát se projevila netěsnost armatur a pojistného ventilu ve vysokotlakém rozvodu. Tyto závady bylo vždy nutno odstranit, aby nedošlo ke zkreslení měření.

Vzhledem k možným odchylkám při nastavení jednotlivých funkčních prvků na čerpadle, opotřebení výstupních ventilů vysokotlaké vody z čerpadla a okolním vlivům bylo stanoveno, že bude měření probíhat uceleně na jednom čerpadle.

Metoda měření byla zvolena s ohledem na statickou složku tlaku, která se pohybovala kolem 400 MPa. Rozsah měření byl proto nastaven na 500 MPa (s chybou měření menší nebo rovnou 1% z rozsahu). Výhodou tohoto nastavení byla možnost zjišťovat tlakové diference mezi oběma snímači resetováním aktuálně měřených hodnot a tím odstraněním statické složky ze záznamů tlaku, které pak znázorňovaly pouze dynamické změny.

### 4.4 Vyhodnocení měření

Naměřené hodnoty se nachází v příloze 1, 2, 3, 4. Naměřené hodnoty v příloženém CD.

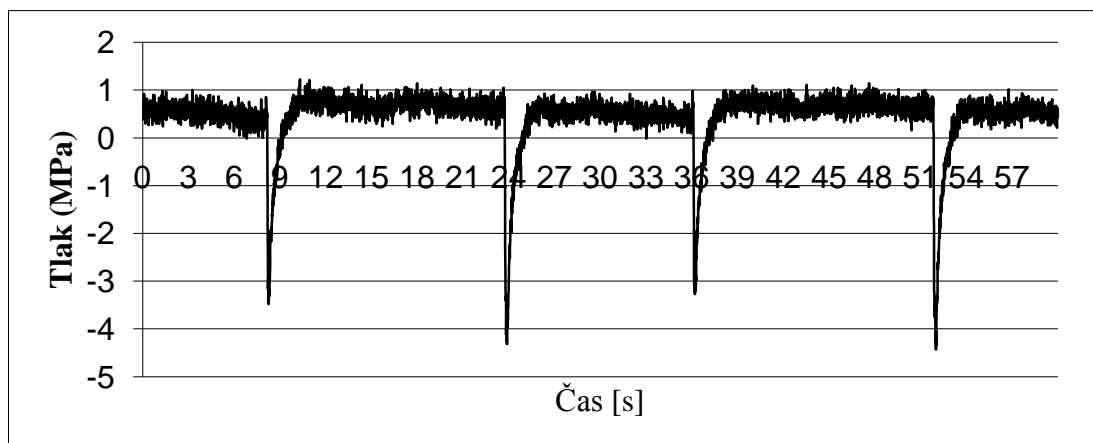
Předpokládalo se, že rozdíly tlaku mezi oběma snímači budou natolik výrazné, že chyba, kterou bude měření zatíženo, bude řádově menší. Metodika byla stanovena tak, že po natlakování měřicí tratě budou zesilovače měřicí aparatury vynulovány a tím se měření soustředí pouze na dynamickou složku a z té se bude počítat tlaková ztráta. Při dodatečné analýze bylo zjištěno, že zvolená metodika měření je zatížena značnou chybou v postupu, kdy při vynulování přístroje nebylo možno spolehlivě určit výchozí podmínky měření u jednotlivých snímaných míst, tj. absolutní hodnota nuly u jednoho snímače nebyla stejná jako u druhého snímače. Z naměřených dat je

patrně, že aparatura měřila velice přesně a samotná relativní chyba měření by výsledky neznehodnotila. Na grafech jsou znázorněny i velmi malé rozdíly mezi jednotlivými přesuny multiplikátoru. Naměřené hodnoty se dají považovat za přesné, ale s chybou plynoucí z jednotlivého vynulování přístroje, kdy je dynamická složka tlaku snímána s nejistotou „položení nuly“.

Na chybném výsledku měření měla svůj podíl i konstrukce čerpadla, která se ukázala jako nevhodná pro tento druh měření. Jedná se především o multiplikátor a výstupní ventil, které vytváří značné hydraulické rázy v celém systému.

Již od počátku se začala projevovat rozdílnost jednotlivých čerpadel dána jejich konstrukcí, kterou přesná měřící aparatura byla schopna rozlišit. Tuto vlastnost ovlivňuje především funkce multiplikátoru a jeho nastavení ventilů na výstupu. Z toho plynul závěr, že měření bude celé probíhat na jednom čerpadle ve stejný den, aby se omezila chyba spojená s funkcí čerpadla a okolními vlivy.

#### 4.4.1 Vliv rozdílných vlastností výstupních ventilů z multiplikátoru



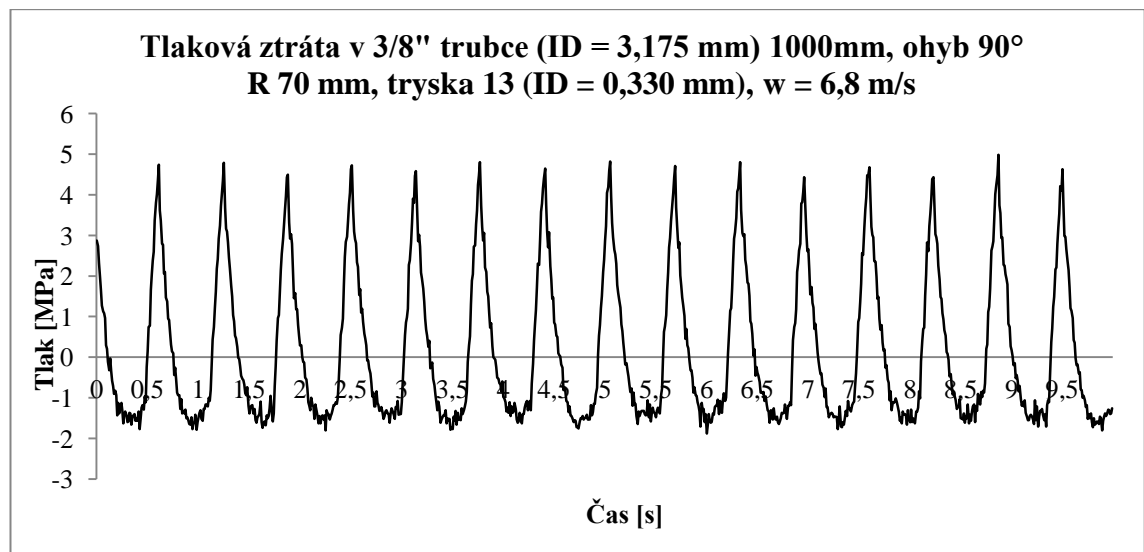
Graf 2

Na přiloženém grafu je znázorněna tlaková diference. Na vodorovné části grafu je patrné, jak oba výstupní ventily nepracují ve stejném tlakovém rozmezí a s rozdílnou časovou prodlevou. Části grafu, které se dostaly do záporných tlakových hodnot, ukazují časovou prodlevu, kdy je výstupní ventil ještě otevřen, ale píst multiplikátoru je již za úvratí a pohybuje se ve směru stlačení druhého výstupu. Tím se vytvoří zpětný ráz v celém hydraulickém systému. Pro omezení těchto

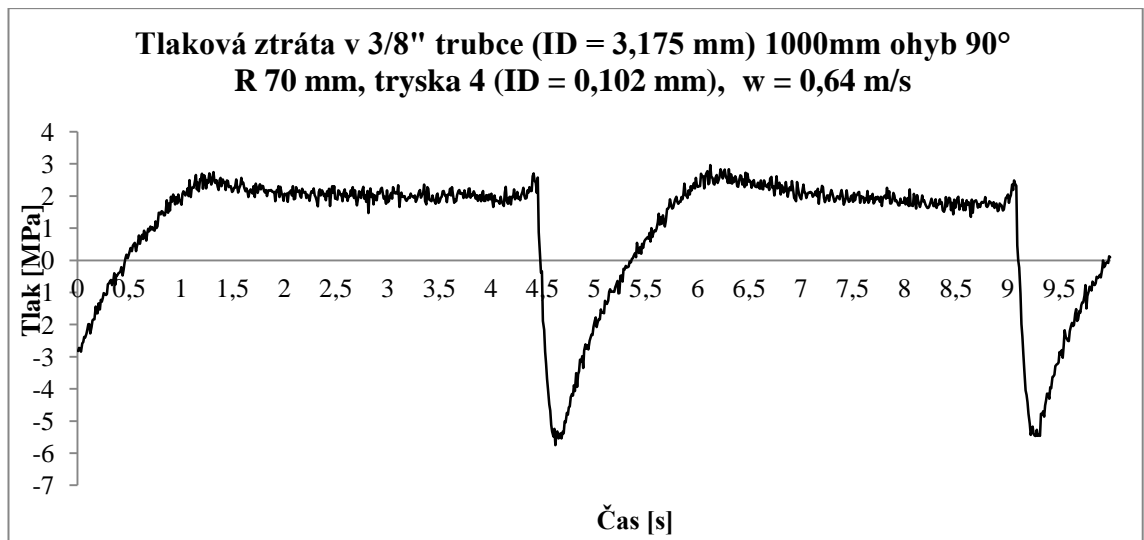
hydraulických rázů je na výstupu z čerpadla instalována vyrovnávací nádrž. Graf prokázal, že není schopna dostatečně omezit ráz a tak byla za čerpadlo připojena ještě jedna vyrovnávací nádrž, což mělo za následek jen jeho částečné omezení. Na naměřené křivce je patrné jak odlišné nastavení výstupních ventilů, tak jejich zpoždění. Což se později potvrdilo jako zásadní nedostatek při následujících pokusech o naměření tlakové ztráty součástí ze zadání.

#### 4.4.2 Vliv funkce multiplikátoru

Na přiloženém grafu je vidět průběh tlakové difference při použití trysky o průměru 0,013“, kdy se pohybuje frekvence přesuvů multiplikátoru okolo 100 1/min. Při této frekvenci je nemožné ztrátu naměřit. Proto se musela frekvence snížit, to se provádělo zmenšením průměru trysky na výstupu. Tím se ale také omezil průtok a tlaková ztráta se dala očekávat nižší.



Graf 3

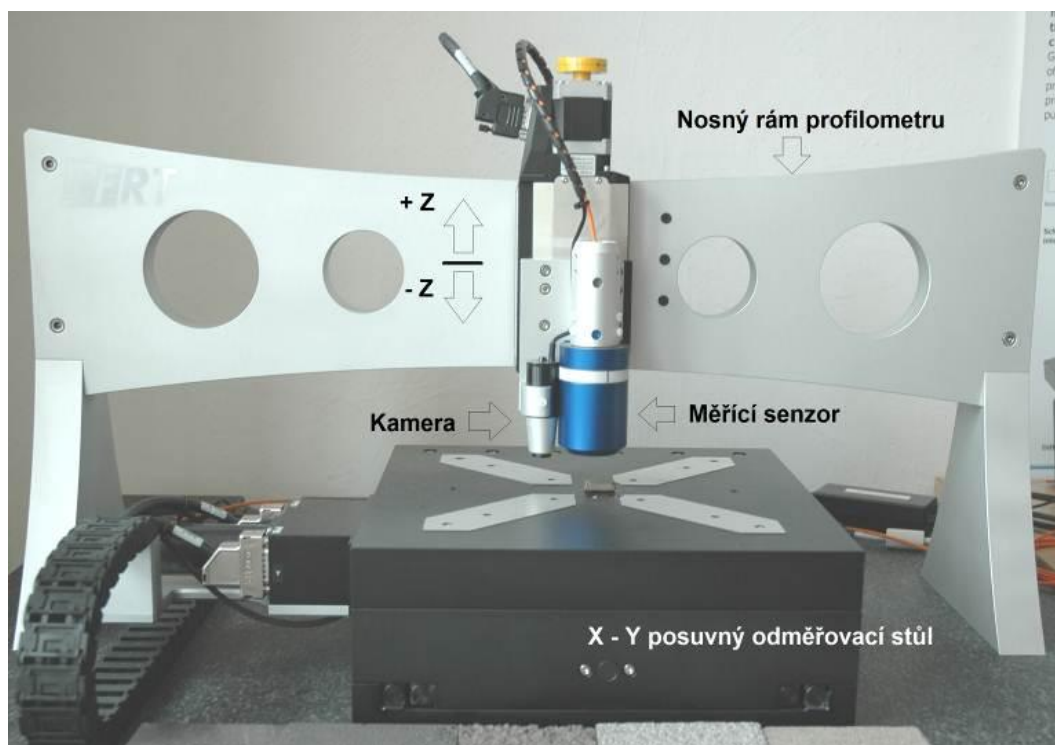


*Graf 4*



## 5 Teoretický výpočet tlakové ztráty u hladkého potrubí z naměřené drsnosti vnitřního průměru

Měření drsnosti vnitřního průměru proběhlo na přístroji profilometru MicroProf FRT výrobce Fries and research technology (<http://www.frt-gmbh.de/> viz. Obr. 12)



Obr. 12 vlastní zdroj

Jako vzorky měření byly vybrány trubky o průměrech 1/4“, 3/8“, 9/16“ a také L-kus 1/4“. Všechny součásti byly vyrobeny z materiálu AISI 306. Trubky a L-kus mají rozdílnou technologii výroby, proto byl také podroben měření. Pro měření byly vzorky ofrézovány tak jak je zobrazeno v příloze 5, 6, 7, 8.

Výpočet tlakové ztráty byl proveden podle teorie uvedené v kapitole 3. Hodnoty tlakové ztráty jsou vypočteny pro všechny běžně dosahované průtoky (podle použité trysky), jak je uvedeno v Příloze 9.

Pro výpočet tlakové ztráty byla Weisbachově vztahu převedena rychlost na průtok

$$p_z = \lambda \frac{16}{\pi^2} \frac{l}{d^5} \frac{V^2}{2} \rho$$

Stejně tak výpočet Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{4\dot{V}}{\pi d v}$$

Pro hodnotu absolutní drsnosti  $k$  byly brány hodnoty  $Ra$  z měření.

- Trubka 1/4“,  $\varnothing d = 0,002108 \text{ m} - Ra = 1,895 \mu\text{m}$
- Trubka 3/8“,  $\varnothing d = 0,003175 \text{ m} - Ra = 0,918 \mu\text{m}$
- Trubka 1/4“,  $\varnothing d = 0,00475 \text{ m} - Ra = 1,750 \mu\text{m}$
- L-kus 1/4“,  $\varnothing d = 0,002108 \text{ m} - Ra = 0,620 \mu\text{m}$

Kinematická viskozita a hustota vody jsou brány pro 30°C, což je hodnota odpovídající teplotě proudícím v potrubí při provozu.

$$\nu = 0,801 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}, \rho = 995,6502 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$$

Vzhledem k velmi malým hodnotám  $Ra$  lze předpokládat, že se u potrubí může uvažovat o hydraulicky hladkém potrubí. Což potvrzuje přiložená tabulka (Tab.), ve které jsou vypočítána  $Re$ , která se porovnají s nerovnicí ze vztahu (3.4) a (3.5)

- Trubka 1/4“  $\rightarrow 500 \frac{d}{k} = 500 \frac{0,002108}{0,000001895} = 556200$
- Trubka 3/8“  $\rightarrow 500 \frac{d}{k} = 500 \frac{0,003175}{0,000000918} = 1729302$
- Trubka 9/16“  $\rightarrow 500 \frac{d}{k} = 500 \frac{0,00475}{0,00000175} = 1357142$
- L-kus 1/4“  $\rightarrow 500 \frac{d}{k} = 500 \frac{0,002108}{0,00000062} = 1700000$

Kin. viskozita vody při 30°C = 0,801.10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s			trubka 1/4"	trubka 3/8"	trubka 9/16"	L-kus 1/4"
Průměr trysky	Průtok [l/min]	Průtok [m <sup>3</sup> /s]	Re	Re	Re	Re
0,003"	0,17	2,83333E-06	2136,50870	1418,5072	948,160075	2136,508
0,004"	0,31	5,16667E-06	3895,98647	2586,6896	1728,99778	3895,986
0,005"	0,48	0,000008	6032,49517	4005,1968	2677,15786	6032,495
0,006"	0,69	0,0000115	8671,71182	5757,4704	3848,41442	8671,711
0,007"	0,94	1,56667E-05	11813,6363	7843,5104	5242,76747	11813,63
0,008"	1,22	2,03333E-05	15332,5919	10179,875	6804,44289	15332,59
0,009"	1,55	2,58333E-05	19479,9323	12933,448	8644,98892	19479,93
0,010"	1,91	3,18333E-05	24004,3037	15937,345	10652,8573	24004,30
0,011"	2,31	0,0000385	29031,3830	19275,009	12883,8222	29031,38
0,012"	2,75	4,58333E-05	34561,1703	22946,44	15337,8835	34561,17
0,013"	3,23	5,38333E-05	40593,6654	26951,636	18015,0414	40593,66
0,014"	3,74	6,23333E-05	47003,1916	31207,158	20859,5216	47003,19
0,015"	4,3	7,16667E-05	54041,1026	35879,888	23982,8725	54041,10
0,016"	4,89	0,0000815	61456,0446	40802,942	27273,5457	61456,04
0,017"	5,52	0,000092	69373,6945	46059,763	30787,3154	69373,69

Tab 1

Vzhledem k tomu, že se v potrubí vyskytuje výhradně turbulentní proudění, bude pro výpočet součinitele třecích ztrát uvažován vztah (3.7).

Pro L-kus 1/4" je brán ztrátový součinitel  $\xi = 1,5$ , což je hodnota odhadnutá z podkladů [4]. Z toho plyne, že hodnota tlakové ztráty vypočtená pro tuto součást je pouze orientační.

Tlaková ztráta v trubce 1/4" délky 1 m						
Průměr trysky	Průtok [l/min]	Průtok [m <sup>3</sup> /s]	Re	$\lambda$	pz [Pa]	pz [MPa]
0,003"	0,17	2,83333E-06	2136,508709	0,046479	7234,144	0,007234
0,004"	0,31	5,16667E-06	3895,98647	0,039997	20700,68	0,020701
0,005"	0,48	0,000008	6032,495179	0,035856	44491,16	0,044491
0,006"	0,69	0,0000115	8671,71182	0,032746	83962,91	0,083963
0,007"	0,94	1,56667E-05	11813,63639	0,03031	144236,5	0,144237
0,008"	1,22	2,03333E-05	15332,59191	0,028398	227630,9	0,227631
0,009"	1,55	2,58333E-05	19479,93235	0,026748	346084,4	0,346084
0,010"	1,91	3,18333E-05	24004,30373	0,025387	498781,1	0,498781
0,011"	2,31	0,0000385	29031,38305	0,024209	695700,8	0,695701
0,012"	2,75	4,58333E-05	34561,1703	0,023176	943916,9	0,943917
0,013"	3,23	5,38333E-05	40593,66547	0,022262	1250852	1,250852
0,014"	3,74	6,23333E-05	47003,1916	0,021461	1616690	1,61669
0,015"	4,3	7,16667E-05	54041,10264	0,020726	2063818	2,063818
0,016"	4,89	0,0000815	61456,04463	0,02007	2584592	2,584592
0,017"	5,52	0,000092	69373,69456	0,019471	3195177	3,195177

Tab 2

Tlaková ztráta v trubce 3/8" délky 1 m						
Průměr trysky	Průtok [l/min]	Průtok [m <sup>3</sup> /s]	Re	λ	p <sub>z</sub> [Pa]	p <sub>z</sub> [MPa]
0,003"	0,17	2,83333E-06	1418,5072	0,051491	8014,113	0,008014
0,004"	0,31	5,16667E-06	2586,689599	0,04431	22932,57	0,022933
0,005"	0,48	0,000008	4005,196799	0,039722	49288,09	0,049288
0,006"	0,69	0,0000115	5757,470399	0,036277	93015,59	0,093016
0,007"	0,94	1,56667E-05	7843,510398	0,033578	159787,8	0,159788
0,008"	1,22	2,03333E-05	10179,8752	0,031459	252173,6	0,252174
0,009"	1,55	2,58333E-05	12933,448	0,029632	383398,4	0,383398
0,010"	1,91	3,18333E-05	15937,3456	0,028124	552558,5	0,552558
0,011"	2,31	0,0000385	19275,0096	0,026819	770709,7	0,77071
0,012"	2,75	4,58333E-05	22946,43999	0,025675	1045688	1,045688
0,013"	3,23	5,38333E-05	26951,63679	0,024663	1385716	1,385716
0,014"	3,74	6,23333E-05	31207,15839	0,023775	1790998	1,790998
0,015"	4,3	7,16667E-05	35879,88799	0,02296	2286334	2,286334
0,016"	4,89	0,0000815	40802,94239	0,022234	2863257	2,863257
0,017"	5,52	0,000092	46059,76319	0,02157	3539674	3,539674

Tab. 3

Tlaková ztráta v trubce 9/16" délky 1 m						
Průměr trysky	Průtok [l/min]	Průtok [m <sup>3</sup> /s]	Re	λ	p <sub>z</sub> [Pa]	p <sub>z</sub> [MPa]
0,003"	0,17	2,83333E-06	948,1600756	0,056946	8863,248	0,008863
0,004"	0,31	5,16667E-06	1728,997785	0,049005	25362,4	0,025362
0,005"	0,48	0,000008	2677,15786	0,043931	54510,41	0,05451
0,006"	0,69	0,0000115	3848,414424	0,040121	102871,1	0,102871
0,007"	0,94	1,56667E-05	5242,767477	0,037136	176718,1	0,176718
0,008"	1,22	2,03333E-05	6804,442895	0,034793	278892,6	0,278893
0,009"	1,55	2,58333E-05	8644,988924	0,032771	424021,4	0,424021
0,010"	1,91	3,18333E-05	10652,85732	0,031104	611104,8	0,611105
0,011"	2,31	0,0000385	12883,8222	0,02966	852370,2	0,85237
0,012"	2,75	4,58333E-05	15337,88358	0,028395	1156484	1,156484
0,013"	3,23	5,38333E-05	18015,04144	0,027276	1532540	1,53254
0,014"	3,74	6,23333E-05	20859,52166	0,026294	1980763	1,980763
0,015"	4,3	7,16667E-05	23982,8725	0,025393	2528582	2,528582
0,016"	4,89	0,0000815	27273,5457	0,02459	3166634	3,166634
0,017"	5,52	0,000092	30787,3154	0,023856	3914720	3,91472

Tab. 4

Tlaková ztráta v L-kusu 1/4"								
Průměr trysky	Průtok [l/min]	Průtok [m <sup>3</sup> /s]	Re	$\lambda$	P <sub>z</sub> třecí [Pa]	P <sub>z</sub> místní [Pa]	P <sub>z</sub> [Pa]	P <sub>z</sub> [MPa]
0,003"	0,17	2,83E-06	2136,50	0,04647	101,278	492,154	593,432	0,00059
0,004"	0,31	5,17E-06	3895,98	0,03999	289,809	1636,54	1926,35	0,00192
0,005"	0,48	0,00001	6032,49	0,03585	622,876	3923,61	4546,48	0,00454
0,006"	0,69	1,15E-05	8671,71	0,03274	1175,48	8107,77	9283,25	0,00928
0,007"	0,94	1,57E-05	11813,6	0,03031	2019,31	15047,3	17066,6	0,01706
0,008"	1,22	2,03E-05	15332,5	0,02839	3186,83	25346,7	28533,6	0,02853
0,009"	1,55	2,58E-05	19479,9	0,02674	4845,18	40913,5	45758,6	0,04575
0,010"	1,91	3,18E-05	24004,3	0,02538	6982,93	62125,5	69108,4	0,06910
0,011"	2,31	3,85E-05	29031,3	0,02420	9739,81	90871,4	100611	0,10061
0,012"	2,75	4,58E-05	34561,1	0,02317	13214,8	128786	142000	0,14200
0,013"	3,23	5,38E-05	40593,6	0,02226	17511,9	177667	195179	0,19518
0,014"	3,74	6,23E-05	47003,1	0,02146	22633,6	238202	260836	0,26083
0,015"	4,3	7,17E-05	54041,1	0,02072	28893,4	314876	343770	0,34377
0,016"	4,89	8,15E-05	61456	0,02007	36184,2	407212	443396	0,44339
0,017"	5,52	0,00009	69373,6	0,01947	44732,4	518897	563629	0,56363

Tab.5

## 6 Závěr

Cílem práce bylo určit tlakové ztráty v potrubí a součástech vysokotlakého rozvodu. Vzhledem k charakteru měřených součástí se jedná většinou o měření tlakové ztráty, která se dá rozdělit na místní a třecí. Ve většině odborné literatury je u místní ztráty uvedeno, že se hodnoty ztrátového součinitele určují experimentálně. Z tohoto důvodu, kdy nelze u konkrétních součástí určit místní ztrátu teoreticky. A výrobci v této oblasti nespolupracují. Byla navržena metodika a zrealizováno samotné měření.

Splnění cíle práce se podařilo pouze částečně a to z důvodů, které jsou popsány níže.

První částí je shrnutí konstrukce běžně používaných čerpadel. Zde je popsána konstrukce a funkce vysokotlakých čerpadel. Zejména čerpadla využívající pro stlačení vody multiplikátor (čerpadlo na kterém bylo měřeno) se ukázala jako značně nevhodná pro takovýto typ měření. Systém generuje velké hydraulické rázy do celého rozvodu a tím znemožňuje úspěšné měření. Z tohoto důvodu bylo potřeba při měření omezit frekvenci přesuvu pístu a tím se ale také omezit průtok. Nepomohlo ani přidání další vyrovnávací nádrže, pouze tyto rázy omezilo. Vzhledem k dosaženým poznatkům bych navrhoval u toho typu čerpadel zvětšit objem a změnit konstrukci vyrovnávací nádrže. Z důvodu velmi vysokých tlaků, na které je voda stlačována by bylo potřeba vybrat vhodný princip a konstrukčně ho upravit na požadované zatížení. Omezení těchto rázů by mělo za následek snížení namáhání celého systému a tím zvýšení jeho životnosti a bezpečnosti.

V další části práce je popsáno samotné měření. Zde se při vyhodnocení prokázalo, že zvolená metodika nebyla vyhovující a tím se do celého měření vnesla značná systematická chyba. Pro další pokusy bych navrhoval měřit bez vynulování přístrojů po natlakování, tím by zvýšil rozsah měření a z něj počítána chyba. Proto by bylo potřeba zvýšit předpokládanou tlakovou ztrátu přidáním více součástí za sebou, tak aby chyba byla řádově menší.

V poslední části byla tlaková ztráta spočítána teoreticky. Z těchto hodnot si lze udělat představu, k jakým ztrátám v rozvodu dochází.

## Použitá literatura a zdroje

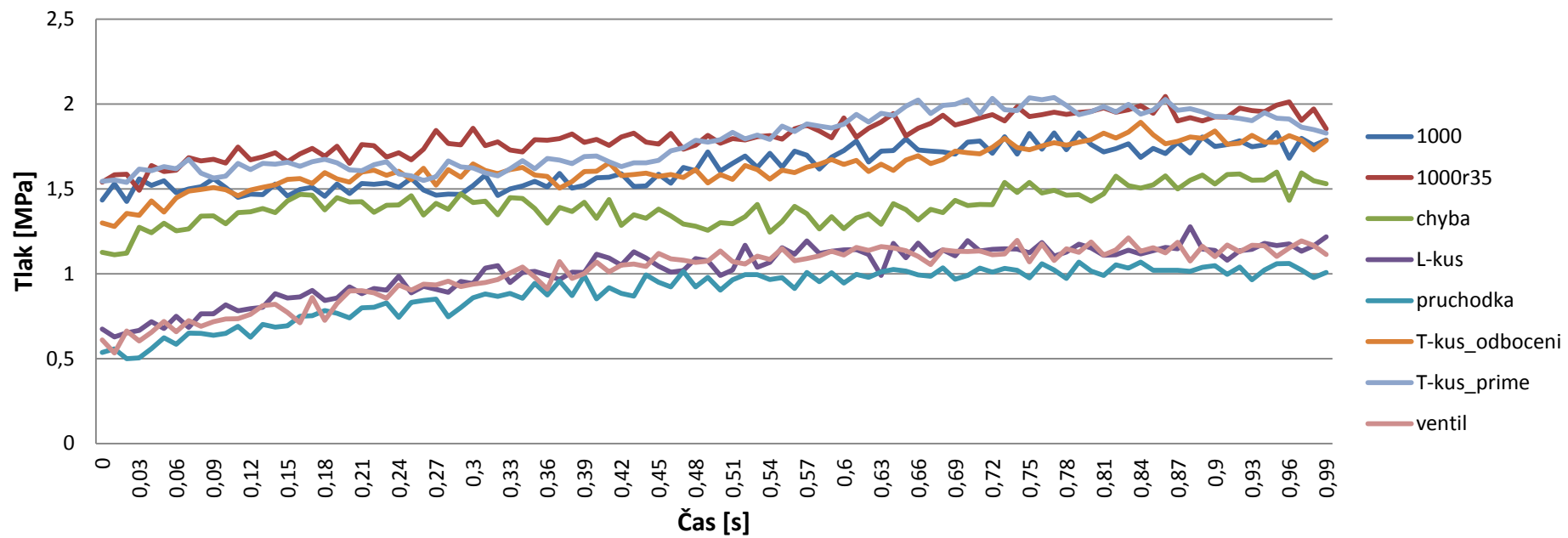
- [1] ING. ARNOLD PROCHÁZKA, Proudění tekutin potrubím a kanály, Praha 1962
- [2] ING. FOSEF PIVOŇKA A KOLEKTIV, Tekutinové mechanismy, Praha 1987
- [3] PROF. ING. JAN JEŽEK, DrSc., ING. BLANKA VARÁDIOVÁ, CSc, ING JOSEF ADAMEC, CSc., Mechanika tekutin, Vydavatelství ČVUT 1998
- [4] DOC. ING. VÁCLAV DVOŘÁK, Ph.D., podklady z přednášek
- [5] WARDJet. Katalog. <http://www.wardjet.com/>
- [6] Manuál k čerpadlu PTV JETS 3.8/60-COMPACT

## Seznam příloh

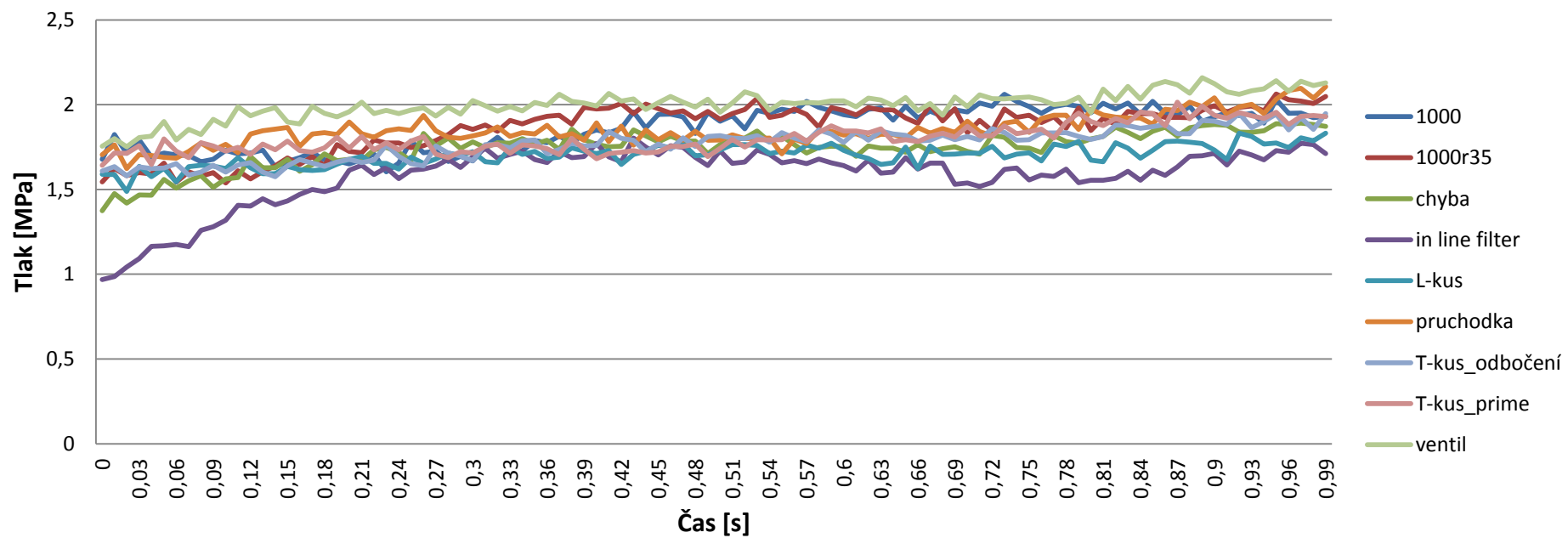
- Příloha 1 – Tlaková ztráta součástí VT rozvodu o průměru 1/4“
- Příloha 2 - Tlaková ztráta součástí VT rozvodu o průměru 3/8“
- Příloha 3 - Tlaková ztráta součástí VT rozvodu o průměru 9/16“
- Příloha 4 - Tlaková ztráta součástí VT rozvodu - adaptérů
- Příloha 5 – Měření drsnosti v trubce 1/4“
- Příloha 6 - Měření drsnosti v trubce 3/8“
- Příloha 7 - Měření drsnosti v trubce 9/16“
- Příloha 8 - Měření drsnosti L-kus 1/4“



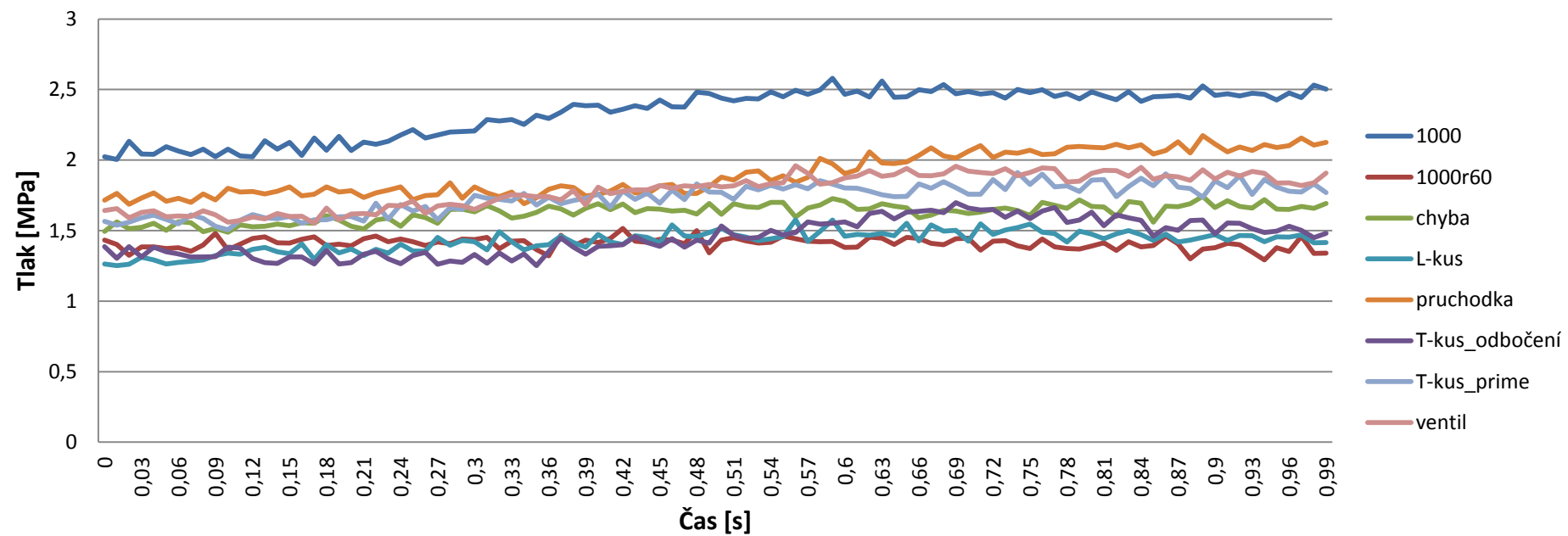
### Tlaková ztráta součástí VT rozvodu o průměru 1/4"



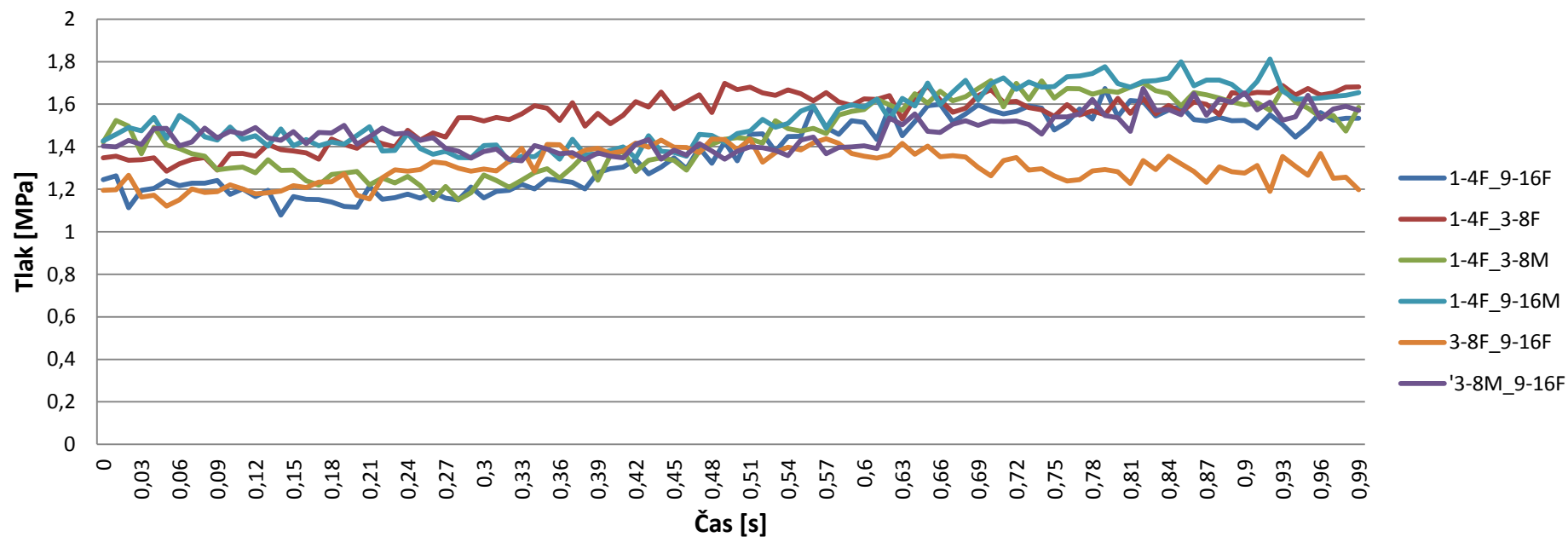
### Tlaková ztráta součástí VT rozvodu o průměru 3/8"



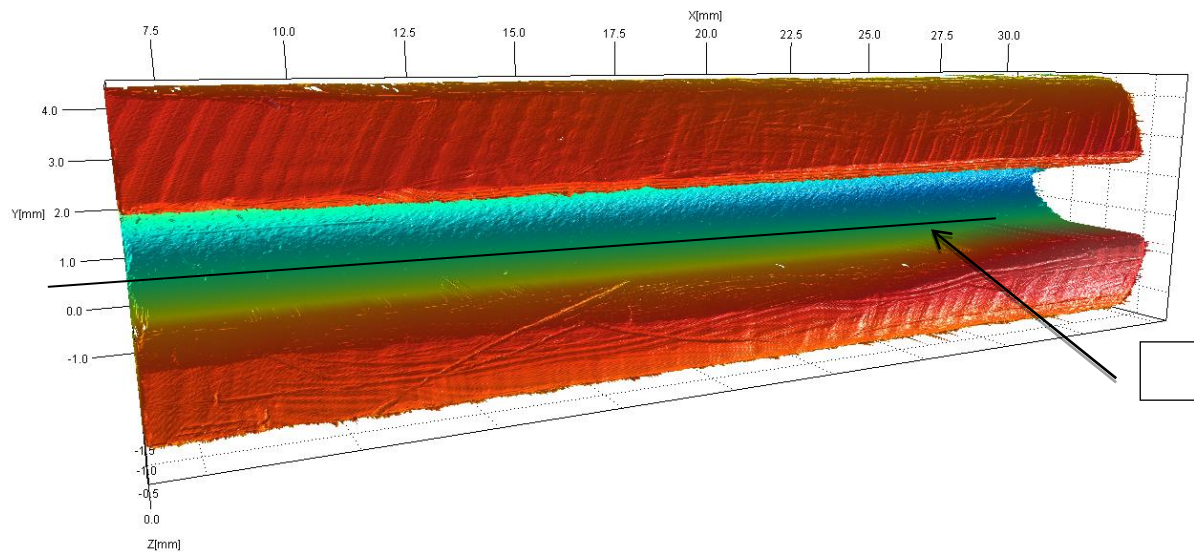
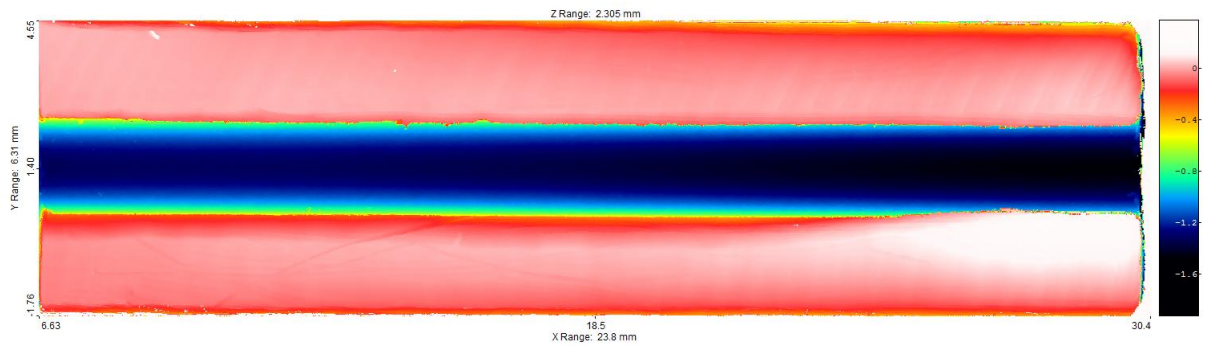
### Tlaková ztráta součástí VT rozvodu o průměru 9/16"



### Tlaková ztráta součástí VT rozvodu - adaptérů



*Měření drsnosti v trubce 1/4"*



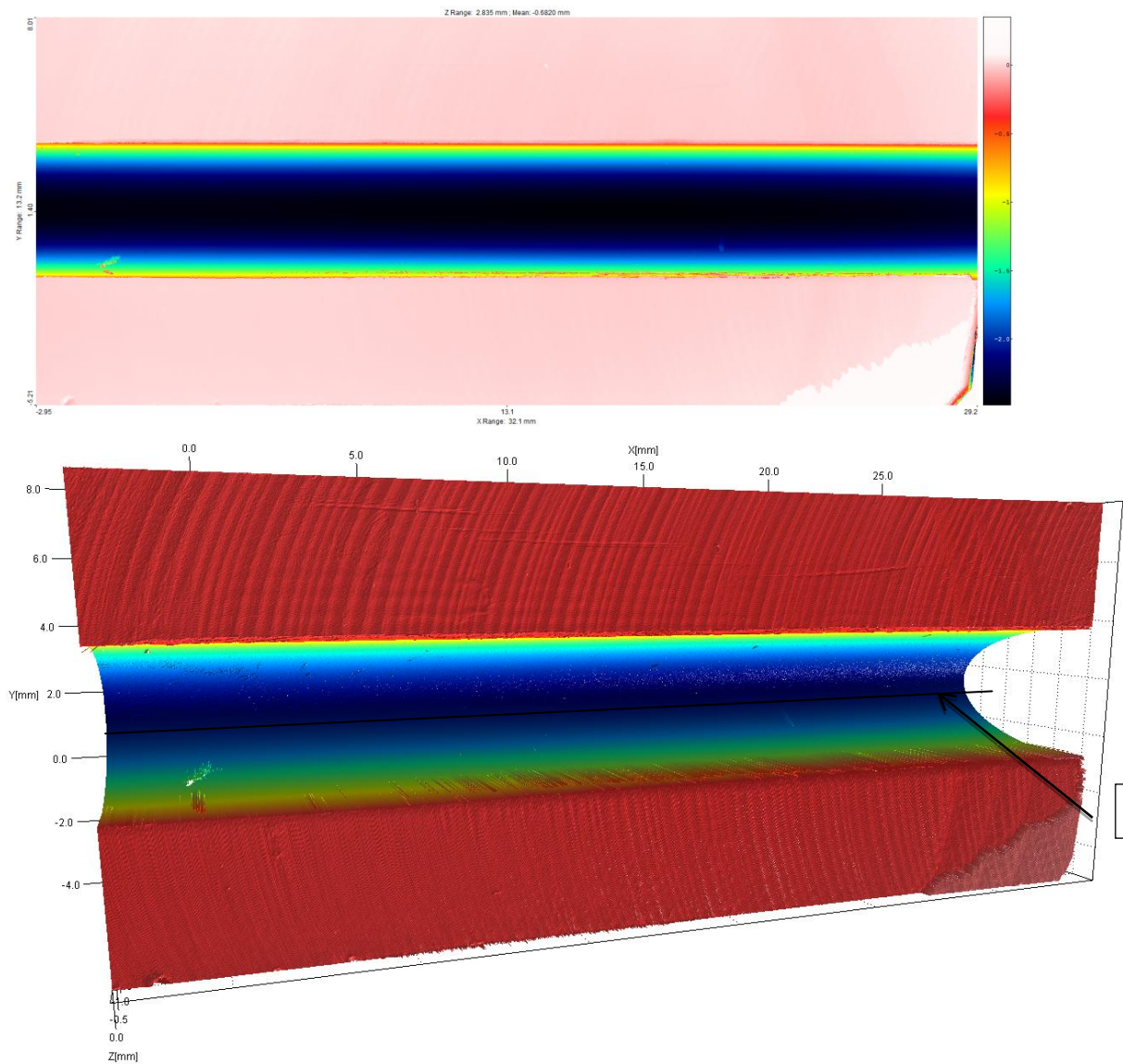
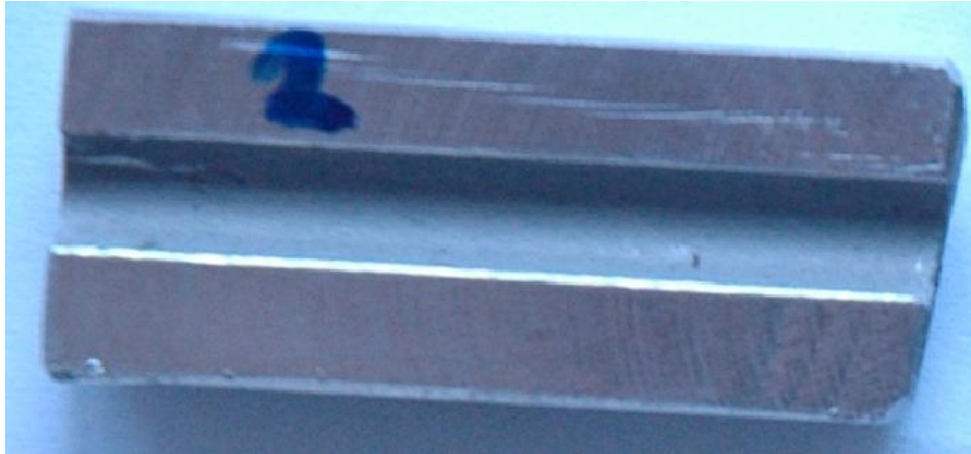
## Příloha 5.2

Statistics of roughness data ( $L_c = 0.808$  mm):

Ra:	1.895 $\mu\text{m}$
Rq:	2.353 $\mu\text{m}$
Rz(ISO):	10.219 $\mu\text{m}$
Rz(DIN):	10.474 $\mu\text{m}$
Rmax:	13.001 $\mu\text{m}$
Rp:	7.533 $\mu\text{m}$
Rv:	5.595 $\mu\text{m}$
Rt:	13.127 $\mu\text{m}$
Rsk:	0.083
Rku:	2.923
RPc:	59.518 /cm
Rk:	6.135 $\mu\text{m}$
Rpk:	2.413 $\mu\text{m}$
Rvk:	2.096 $\mu\text{m}$
Mr1:	10.784 %
Mr2:	91.667 %
V0:	0.087 $\mu\text{ml}/\mu\text{m}_x$
Rmr(c):	0.490 % (with $c = 1.6$ $\mu\text{m}$ )

Příloha 6.1

*Měření drsnosti v trubce 3/8"*



## Příloha 6.2

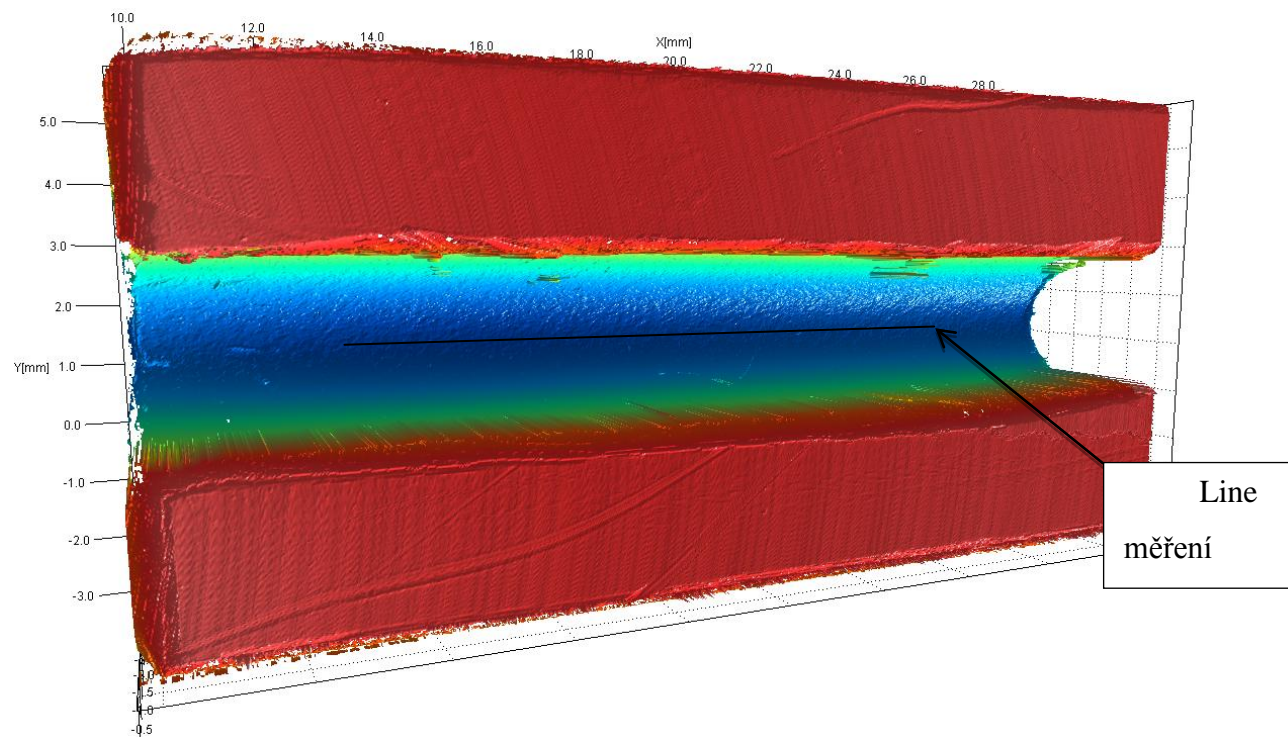
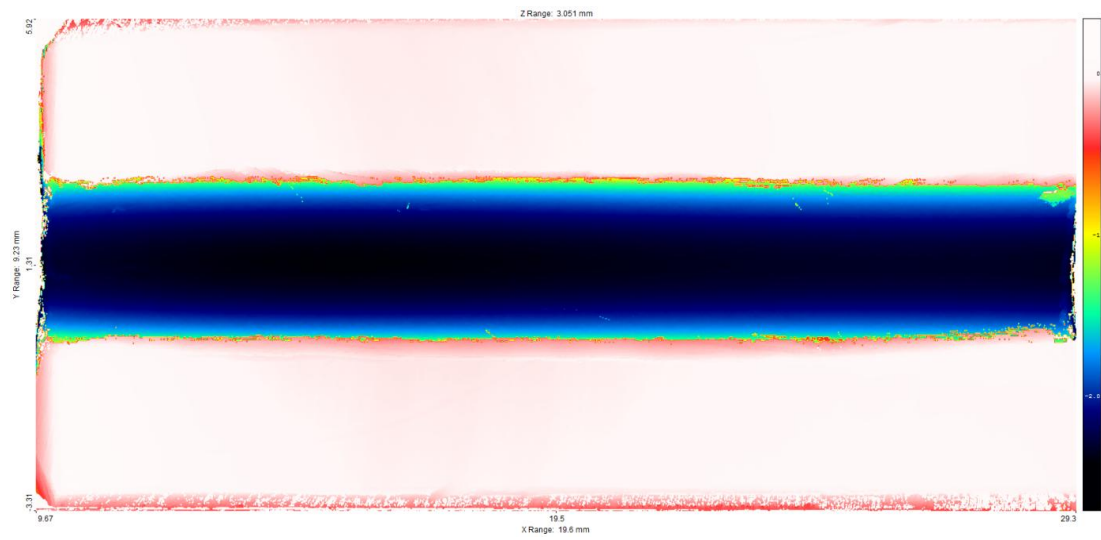
Statistics of roughness data ( $L_c = 0.804$  mm):

Ra:	0.918 $\mu\text{m}$
Rq:	1.208 $\mu\text{m}$
Rz(ISO):	5.841 $\mu\text{m}$
Rz(DIN):	5.219 $\mu\text{m}$
Rmax:	7.691 $\mu\text{m}$
Rp:	3.602 $\mu\text{m}$
Rv:	4.178 $\mu\text{m}$
Rt:	7.779 $\mu\text{m}$
Rsk:	-0.221
Rku:	3.622
RPc:	72.007 /cm
Rk:	2.495 $\mu\text{m}$
Rpk:	1.057 $\mu\text{m}$
Rvk:	1.627 $\mu\text{m}$
Mr1:	12.217 %
Mr2:	85.068 %
V0:	0.121 $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$
Rmr(c):	4.072 % (with $c = 1.6$ $\mu\text{m}$ )



Příloha 7.1

*Měření drsnosti v trubce 9/16“*



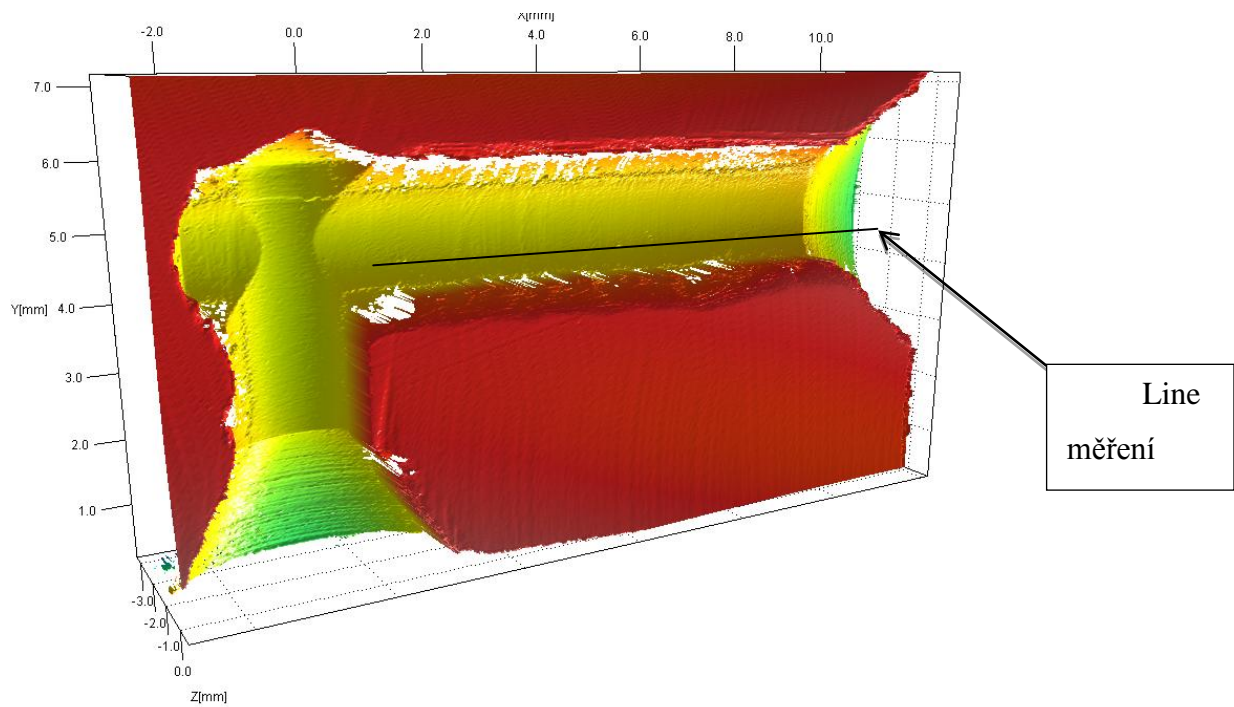
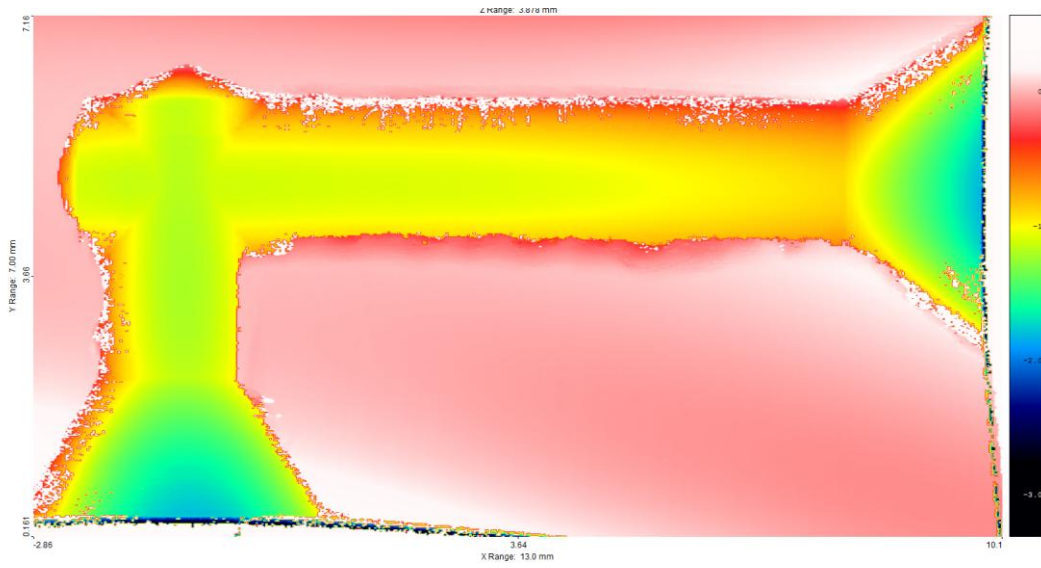
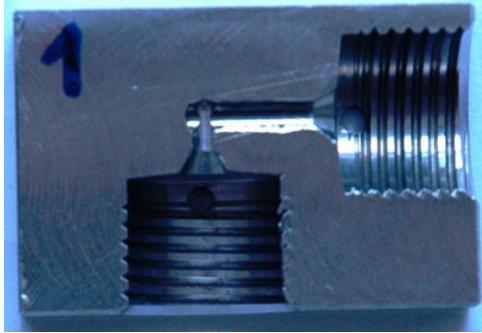
## Příloha 7.2

Statistics of roughness data ( $L_c = 0.798$  mm):

Ra:	1.750 $\mu\text{m}$
Rq:	2.319 $\mu\text{m}$
Rz(ISO):	11.857 $\mu\text{m}$
Rz(DIN):	10.749 $\mu\text{m}$
Rmax:	11.719 $\mu\text{m}$
Rp:	6.933 $\mu\text{m}$
Rv:	6.962 $\mu\text{m}$
Rt:	13.895 $\mu\text{m}$
Rsk:	0.118
Rku:	3.799
RPc:	65.124 /cm
Rk:	4.845 $\mu\text{m}$
Rpk:	3.016 $\mu\text{m}$
Rvk:	2.673 $\mu\text{m}$
Mr1:	12.653 %
Mr2:	88.571 %
V0:	0.153 $\mu\text{m}_l/\mu\text{m}_c$
Rmr(c):	2.857 % (with $c = 1.6$ $\mu\text{m}$ )

Příloha 8.1

*Měření drsnosti L-kus 1/4“*



## Příloha 8.2

Statistics of roughness data ( $L_c = 0.801$  mm):

Ra:	0.620 $\mu\text{m}$
Rq:	0.807 $\mu\text{m}$
Rz(ISO):	3.960 $\mu\text{m}$
Rz(DIN):	3.333 $\mu\text{m}$
Rmax:	4.120 $\mu\text{m}$
Rp:	2.400 $\mu\text{m}$
Rv:	2.463 $\mu\text{m}$
Rt:	4.863 $\mu\text{m}$
Rsk:	-0.079
Rku:	3.234
RPc:	45.027 /cm
Rk:	1.797 $\mu\text{m}$
Rpk:	0.697 $\mu\text{m}$
Rvk:	0.783 $\mu\text{m}$
Mr1:	14.286 %
Mr2:	86.364 %
V0:	0.053 $\mu\text{ml}/\mu\text{m}_x^2$
Rmr(c):	1.299 % (with $c = 0.6$ $\mu\text{m}$ )



## Příloha 9

### Závislost množství vody na průměru vodní trysky a tlaku

Tryska	Tlak	Množství
<b>3 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	0,10 l/min
	25 000 psi	0,11 l/min
	30 000 psi	0,12 l/min
	35 000 psi	0,13 l/min
	40 000 psi	0,14 l/min
	45 000 psi	0,15 l/min
	50 000 psi	0,16 l/min
	60 000 psi	0,17 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>4 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	0,18 l/min
	25 000 psi	0,20 l/min
	30 000 psi	0,22 l/min
	35 000 psi	0,23 l/min
	40 000 psi	0,25 l/min
	45 000 psi	0,26 l/min
	50 000 psi	0,28 l/min
	60 000 psi	0,31 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>5 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	0,28 l/min
	25 000 psi	0,31 l/min
	30 000 psi	0,34 l/min
	35 000 psi	0,36 l/min
	40 000 psi	0,39 l/min
	45 000 psi	0,41 l/min
	50 000 psi	0,44 l/min
	60 000 psi	0,48 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>6 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	0,40 l/min
	25 000 psi	0,44 l/min
	30 000 psi	0,49 l/min
	35 000 psi	0,53 l/min
	40 000 psi	0,56 l/min
	45 000 psi	0,60 l/min
	50 000 psi	0,63 l/min
	60 000 psi	0,69 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>7 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	0,54 l/min
	25 000 psi	0,60 l/min
	30 000 psi	0,66 l/min
	35 000 psi	0,72 l/min
	40 000 psi	0,76 l/min
	45 000 psi	0,81 l/min
	50 000 psi	0,85 l/min
	60 000 psi	0,94 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>8 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	0,71 l/min
	25 000 psi	0,79 l/min
	30 000 psi	0,86 l/min
	35 000 psi	0,93 l/min
	40 000 psi	1,00 l/min
	45 000 psi	1,06 l/min
	50 000 psi	1,12 l/min
	60 000 psi	1,22 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>9 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	0,89 l/min
	25 000 psi	1,00 l/min
	30 000 psi	1,09 l/min
	35 000 psi	1,18 l/min
	40 000 psi	1,26 l/min
	45 000 psi	1,34 l/min
	50 000 psi	1,41 l/min
	60 000 psi	1,55 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>10 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	1,10 l/min
	25 000 psi	1,23 l/min
	30 000 psi	1,35 l/min
	35 000 psi	1,46 l/min
	40 000 psi	1,56 l/min
	45 000 psi	1,65 l/min
	50 000 psi	1,74 l/min
	60 000 psi	1,91 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>11 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	1,33 l/min
	25 000 psi	1,49 l/min
	30 000 psi	1,63 l/min
	35 000 psi	1,77 l/min
	40 000 psi	1,89 l/min
	45 000 psi	2,00 l/min
	50 000 psi	2,11 l/min
	60 000 psi	2,31 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>12 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	1,59 l/min
	25 000 psi	1,78 l/min
	30 000 psi	1,95 l/min
	35 000 psi	2,10 l/min
	40 000 psi	2,25 l/min
	45 000 psi	2,38 l/min
	50 000 psi	2,51 l/min
	60 000 psi	2,75 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>13 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	1,86 l/min
	25 000 psi	2,08 l/min
	30 000 psi	2,28 l/min
	35 000 psi	2,47 l/min
	40 000 psi	2,64 l/min
	45 000 psi	2,80 l/min
	50 000 psi	2,95 l/min
	60 000 psi	3,23 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>14 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	2,16 l/min
	25 000 psi	2,42 l/min
	30 000 psi	2,65 l/min
	35 000 psi	2,86 l/min
	40 000 psi	3,06 l/min
	45 000 psi	3,24 l/min
	50 000 psi	3,42 l/min
	60 000 psi	3,74 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>15 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	2,48 l/min
	25 000 psi	2,77 l/min
	30 000 psi	3,04 l/min
	35 000 psi	3,28 l/min
	40 000 psi	3,51 l/min
	45 000 psi	3,72 l/min
	50 000 psi	3,92 l/min
	60 000 psi	4,30 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>16 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	2,82 l/min
	25 000 psi	3,16 l/min
	30 000 psi	3,46 l/min
	35 000 psi	3,74 l/min
	40 000 psi	3,99 l/min
	45 000 psi	4,24 l/min
	50 000 psi	4,46 l/min
	60 000 psi	4,89 l/min

Tryska	Tlak	Množství
<b>17 x 0,001 inch</b>	20 000 psi	3,19 l/min
	25 000 psi	3,56 l/min
	30 000 psi	3,90 l/min
	35 000 psi	4,22 l/min
	40 000 psi	4,51 l/min
	45 000 psi	4,78 l/min
	50 000 psi	5,04 l/min
	60 000 psi	5,52 l/min