

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**Měření průtoku vody v soustavě paralelních
trubek**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

PETR KOHOUT

3 – TZSI – 2023



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kohout** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **501340**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měření průtoku vody v soustavě paralelních trubek

Název bakalářské práce anglicky:

Measurement of Water Flow Rate in a System of Parallel Pipes

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte přehled metod měření průtoku tekutin v potrubí. Pro sadu průtokoměrů proveďte kalibraci měření průtoku vody a zjistěte závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku. S kalibrovanými průtokoměry změřte distribuci průtoku vody v soustavě paralelních trubek.

Seznam doporučené literatury:

Ďaďo S., Bejček L., Platil A. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-156-X.
Nožička J. Mechanika tekutin. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Barták, Ph.D. ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.03.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.06.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Martin Barták, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Souhrn

Bakalářská práce se zabývá metodami a principy měření průtoku tekutin. V první části jsou představeny principy různých průtokoměrů a jejich využití. Praktická část práce se zabývá kalibrací měřeného průtoku metodou vážení kapaliny a měřením závislosti tlakové ztráty na objemovém průtoku u pěti průtokoměrů. Na závěr byl změřen průtok v registru paralelních trubek pomocí kalibrovaných průtokoměrů. Výsledky této práce budou využity pro laboratorní měření průtoku vody a pro optimalizaci potrubních systémů.

Summary

The bachelor's thesis deals with the methods and principles of fluid flow rate measurement. In the first part the principles of various flowmeters and their applications are presented. The practical part of the thesis deals with the calibration of the measured flow rate by the method of weighing the liquid and measuring the dependence of the pressure loss on the volumetric flow rate for five flowmeters. Finally, the flow rate in a pipe register was measured using the calibrated flowmeters. The results of this thesis will be utilized for laboratory water flow measurement and for optimizing piping systems.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Měření průtoku vody v soustavě paralelních trubek“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Bartáka, Ph.D., s použitím zdrojů uvedených na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 14.06.2023

Petr Kohout

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Bartákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah:

Soupis použitého značení.....	- 8 -
1 Úvod.....	- 10 -
2 Základní pojmy	- 11 -
2.1 Objemový a hmotnostní průtok.....	- 11 -
2.2 Základní dělení měření průtoku	- 12 -
2.2.1 Dle základních metod	- 12 -
2.2.2 Dle měřicích principů	- 12 -
2.2.3 Dle konkrétních typů	- 12 -
2.3 Vlastnosti tekutin a proudění ovlivňující určení průtoku.....	- 13 -
2.3.1 Rozdělení druhů proudění.....	- 13 -
2.3.2 Vliv teploty a tlaku na hustotu a viskozitu tekutiny	- 14 -
3 Základní metody měření průtoku tekutiny.....	- 15 -
3.1 Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru.....	- 15 -
3.2 Měření rychlosti proudění tekutiny	- 16 -
3.3 Měření objemového průtoku	- 16 -
3.4 Měření hmotnostního průtoku.....	- 16 -
4 Typy průtokoměrů	- 18 -
4.1 Výběr průtokoměru	- 18 -
4.2 Průřezové průtokoměry	- 18 -
4.2.1 Průtokoměry na principu tlakového rozdílu	- 18 -
4.2.2 Průtokoměry se škrťacími orgány.....	- 19 -
4.3 Průtokoměry s proměnným průřezem.....	- 22 -
4.4 Turbínové a lopatkové průtokoměry	- 22 -
4.4.1 Turbínové průtokoměry	- 22 -
4.4.2 Průtokoměry s lopatkovými koly.....	- 23 -
4.5 Objemové průtokoměry	- 24 -
4.5.1 Oválný průtokoměr	- 24 -
4.5.2 Tělesový (piškotkový) průtokoměr.....	- 25 -
4.5.3 Průtokoměr s krouživým pístem.....	- 25 -
4.6 Deformační průtokoměry	- 26 -
4.7 Ultrazvukové senzory průtoku	- 27 -
4.7.1 Přímé impulzní.....	- 27 -
4.7.2 Zpětnovazební.....	- 27 -
4.7.3 Dopplerovy	- 28 -
4.8 Indukční senzory průtoku.....	- 28 -
4.9 Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly	- 29 -

4.10	Směšovací průtokoměry (značkovací)	- 30 -
4.11	Fluidické průtokoměry	- 31 -
4.12	Tepelné průtokoměry.....	- 32 -
4.12.1	Hmotnostní termoanemometry	- 32 -
4.12.2	Kalorimetrické hmotnostní senzory průtoku	- 33 -
4.13	Vírové průtokoměry (typ použitý při měření)	- 33 -
5	Kalibrace průtokoměrů	- 37 -
5.1	Použitá zařízení	- 37 -
5.1.1	Průtokoměry.....	- 37 -
5.2	Měřicí trať	- 38 -
5.3	Postup měření.....	- 39 -
5.4	Výsledky	- 39 -
6	Měření charakteristiky průtokoměrů	- 48 -
6.1	Tvorba charakteristiky a její využití	- 48 -
6.2	Použité přístroje	- 49 -
6.3	Měřicí trať	- 49 -
6.4	Postup měření.....	- 50 -
6.5	Výpočty a vyhodnocení.....	- 51 -
6.5.1	Výpočet tlakových ztrát	- 52 -
6.6	Výsledky	- 53 -
7	Měření průtoku v paralelním registru trubek.....	- 58 -
7.1	Použité přístroje	- 58 -
7.2	Měřicí trať	- 58 -
7.3	Postup měření.....	- 59 -
7.4	Výsledky	- 60 -
7.4.1	Posouzení kolísání průtoku v paralelních trubkách	- 61 -
8	Závěr	- 62 -
	Seznam použité literatury	- 63 -
	Seznam příloh	- 65 -

Soupis použitého značení

Označení	Název	Jednotka
A	plocha	m^2
F	síla	N
Re	Reynoldsovo číslo	-
Sr	Strouhalovo číslo	-
U	elektrické napětí	V
V	objem	m^3
c	rychlost šíření ultrazvuku	$m \cdot s^{-1}$
d	průměr otvoru	m
f	frekvence	Hz
g	gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
h	výška	m
l	vzdálenost	m
m	hmotnost	kg
p	tlak	Pa
q	náboj	C
t	čas	s
v	rychlost	$m \cdot s^{-1}$
\bar{v}	Střední rychlost proudění	$m \cdot s^{-1}$
α	rychlostní součinitel	-
β	poměrné zúžení	-

Označení	Název	Jednotka
ε	expanzní součinitel	-
η	dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
ρ	hustota	$kg \cdot m^{-3}$
ν	kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
ω	úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$
C_d	součinitel ztrát	-
Q_m	hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
Q_v	objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
Δp_z	tlaková ztráta	Pa

1 Úvod

Měření průtoku tekutin se řadí mezi důležité oblasti měření neelektrických veličin. Je důležitou součástí výroby a služeb v několika různých oborech. Existuje značné množství principů, které jsou používány pro měření průtoku, a tedy i spoustu typů průtokoměrů. Před nástupem moderních metod se proteklé množství kapaliny odměřovalo pomocí různých odměrek a nádob. S příchodem nových technologických možností a masové produkce začal být však tento způsob velmi zastaralý a zdlouhavý. Proto začaly vznikat nové metody a přístroje sloužící k rychlejšímu a přesnějšímu měření. Zároveň máme lepší možnost si vybrat nejvhodnější přístroj a metodu pro každý specifický účel. Tyto metody a typy průtokoměrů jsou popsány v první části práce, kde jsou rovněž vylíčeny vlastnosti, principy, výhody a nevýhody jednotlivých průtokoměrů.

Praktická část práce je zaměřena na jeden konkrétní typ průtokoměru, který byl použit pro měření distribuce průtoku v registru paralelních trubek. Těchto stejných průtokoměrů bylo k dispozici pět. Nejdříve byly všechny zkalibrovány pomocí metody vážení vody. Následně byla zjištěna závislost tlakové ztráty prvku na průtoku, která slouží například k modelování prvku v počítačových simulačních programech. Na závěr byl měřen právě průtok v registru paralelních trubek s cílem zjistit, jaká je distribuce celkového přiváděného průtoku vody v jednotlivých trubkách.

2 Základní pojmy

2.1 Objemový a hmotnostní průtok

Objemový průtok $Q_v [m^3 \cdot s^{-1}]$ je definován objemem tekutiny $V [m^3]$, který proteče daným průřezem za jednotku času $t [s]$. Ustálený objemový průtok za určitý čas t potom můžeme vyjádřit pomocí rovnice (1). Výpočet okamžitého objemové průtoky vyjádříme pomocí rovnice (2). [1]

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (1)$$

$$Q_v = \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Hmotnostní průtok $Q_m [kg \cdot s^{-1}]$ vyjadřuje hmotnost tekutiny $m [kg]$, která proteče za jednotku času t . Tuto definici vyjadřuje následující rovnice (3). Výpočet okamžitého hmotnostního průtoky vyjádříme pomocí rovnice (4). [1]

$$Q_m = \frac{m}{t} = \frac{V}{t} \cdot \rho \quad (3)$$

$$Q_m = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Když použijeme tyto definice, tak mluvíme o tzv. objemovém měření průtoky, což je varianta přesná a používá se při kalibračních a ověřovacích měřeních.

Objemový a hmotnostní průtok v potrubí je určen součinem střední průtočné rychlosti proudění a průřezu, kterým tekutina protéká. Tento vztah je vyjádřen pro objemový tok rovnicí (5) a pro hmotnostní tok rovnicí (6). V tomto případě předpokládáme, že tekutina zaplňuje celé potrubí, což ale nemusí vždy odpovídat skutečnosti.

$$Q_v = \bar{v} \cdot A \quad (5)$$

$$Q_m = \bar{v} \cdot A \cdot \rho \quad (6)$$

Pokud použijeme tyto vztahy se střední průtočnou rychlostí, mluvíme o tzv. rychlostním měření průtoky. Toto měření se používá u provozních přístrojů, které měří buď střední průtočnou rychlost nebo změnu průtočného průřezu. [1]

Množství tekutiny je veličina, která se velmi často měří. Množství, resp. objem V či hmotnost m tekutiny určíme stejným způsobem jako v případě objemového měření průtoku. Druhou možností, jak tuto veličinu stanovit, je použití integrace průtoku, který byl naměřen v čase, a to dle následující rovnice (7). [1]

$$V = \int_{\Delta t} Q_v dt; \text{ resp. } m = \int_{\Delta t} Q_m dt \quad (7)$$

Řada měřidel, které se běžně používají právě na zjišťování proteklého množství, jsou vybavena těmito integrátory průtoku. Jedná se například o vodoměry nebo plynoměry, jež se běžně používají v domácnostech.

2.2 Základní dělení měření průtoku

2.2.1 Dle základních metod

Do základních metod měření průtoku řadíme [2]:

- měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru
- měření rychlosti proudění tekutiny
- měření objemového průtoku
- měření hmotnostního průtoku

Pro každou uvedenou metodu používáme různé typy průtokoměrů, které jsou právě na této metodě založeny. Jednotlivé metody jsou blíže popsány v následující kapitole 3.

2.2.2 Dle měřicích principů

1. Objemové – s přerušovanou nebo s cyklickou činností
2. Rychlostní – škrťací orgány, kolenové, plováčkové, ultrazvukové, vírové, vířivé, indukční, hmotnostní Coriolisovy, optické vláknové a speciální

2.2.3 Dle konkrétních typů

1. Objemové průtokoměry – oválový, tělesový, bubnový, šroubový, s kyvným diskem, s oběžným kolem, s rotujícími lopatkami
2. Průřezové průtokoměry – clony, Venturiho trubice, Dallova trubice, dýzy, V-kužel, průtokoměry se škrťacími orgány, kolenové průtokoměry

3. Průtokoměry s proměnným průřezem – plováčkové průtokoměry, rotametry
4. Turbínové a lopatkové senzory – vrtulové, s koly
5. Deformační průtokoměry
6. Ultrazvukové senzory průtoku – přímé, zpětnovazební, Dopplerovy
7. Indukční senzory průtoku – elektromagnetický
8. Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly – Coriolisovy průtokoměry
9. Směšovací
10. Fluidické
11. Tepelné – termoanemometry, kalorimetrické
12. Vírové

Jednotlivé typy budou v práci dále popsány. [3]

2.3 Vlastnosti tekutin a proudění ovlivňující určení průtoku

2.3.1 Rozdělení druhů proudění

Druh proudění tekutiny v potrubí má zásadní vliv na funkci průtokoměru, a proto musíme při měření rozlišovat, které proudění pozorujeme. Povaha proudění tekutiny je závislá na poměru třecích a setrvačných sil. Proudění rozdělujeme na laminární a turbulentní. Laminární proudění v praxi není tak časté jako turbulentní, a je typické pro nízké rychlosti proudění a malé průřezy potrubí. Hodnota Reynoldsovo čísla se většinou pohybuje pod $Re = 2000$. Mezi laminárním a turbulentním prouděním dochází k tzv. přechodovému proudění, které se nachází přibližně mezi $Re = 2000$ – 4000 . Při turbulentním proudění pozorujeme křížení drah částic tekutiny, vytvářejí se víry a vzniká více či méně chaotický pohyb tekutiny. V případě tohoto typu proudění tekutina proudí ve většině průtočného průřezu v podstatě téměř stejnou rychlostí. Z praktických důvodů uvažujeme turbulentní proudění od $Re = 4000$. [2]

Jednotlivé typy průtokoměrů pracují správně pro určité hodnoty Reynoldsova čísla. Vždy záleží na konkrétní konstrukci a vlastnostech průtokoměru, ale můžeme zde uvést orientační hodnoty pro některé typy.

- objemové, průřezové, deformační a směšovací průtokoměry
 - Obvykle pracují spolehlivě v turbulentním režimu neboli $Re > 4\ 000$
- turbínové průtokoměry
 - $4\ 000 < Re < 20\ 000$
- ultrazvukové průtokoměry
 - Obecně se spolehlivost udává pro $Re > 2\ 000$, ale některé varianty mohou být spolehlivé i při nižších hodnotách, tj. v laminárním proudění
- indukční průtokoměry
 - Vyznačují se funkčností ve velmi nízkých hodnotách $Re > 100$
- vírové průtokoměry
 - Re musí být $> 4\ 000$, avšak nejlépe pracují, pokud $Re > 30\ 000$

2.3.2 Vliv teploty a tlaku na hustotu a viskozitu tekutiny

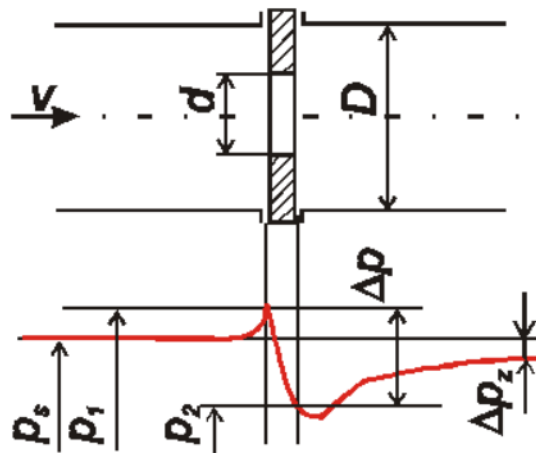
Důležitými vlastnostmi tekutin, které bychom měli znát při měření průtoku, jsou viskozita a hustota. Hustota a viskozita jsou funkcí teploty a tlaku. S rostoucí teplotou a tlakem totiž viskozita i hustota kapaliny klesá, v případě plynů kinematická viskozita roste. Hmotnost při pouhé změně teploty musí zůstat konstantní, což znamená, že se zvětšuje či zmenšuje objem. Pokud tekutinu zahřejeme, její objem vzroste díky teplotní roztažnosti a tím pádem hustota klesne. V případě plynů dochází po zahřátí k častějšímu interagování molekul mezi sebou, což způsobuje zvyšování vnitřního tření a pozorujeme změnu viskozity. U kapalin tedy s rostoucí teplotou kinematická viskozita klesá a u plynů roste. Dynamická a kinematická viskozita závisí na druhu tekutiny. Hodnoty jsou pro většinu typů tabelovány. [4]

3 Základní metody měření průtoku tekutiny

Obecně všechny metody spočívají v tom, že dochází k určité transformaci měřené veličiny, což je průtok, na nějakou jinou fyzikální veličinu, které říkáme měronosná. Tato měronosná veličina musí být jednoznačně funkčně závislá na rychlosti proudění tekutiny, popřípadě na její kinetické energii. [5]

3.1 Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru

Na principu snímání tlakové difference je založena většina průmyslových průtokoměrů. Základní skupinou právě těchto průtokoměrů jsou škrťací orgány, jejichž tlakové poměry jsou znázorněny na Obr. 1. Do této skupiny řadíme například clonu, dýzu nebo Venturiho trubici.



Obr. 1 - Tlakové poměry v okolí škrťacího orgánu. [3]

Pro vyjádření tlakových poměrů v potrubí používáme Bernoulliho rovnici, která říká, že statický tlak v tekutině s nárůstem její rychlosti proudění klesá. Vložíme-li překážku do potrubí, v němž proudí tekutina, dojde ke zúžení průtočného průřezu, zvýšení rychlosti a poklesu statického tlaku. Hledaný rozdíl tlaků Δp před a za překážkou, který je klíčový pro tuto metodu, je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění v , jak lze vidět v rovnici (8). Ovšem závisí také na tvaru překážky.

$$v = k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

Kde k [-] je konstanta určená vlastnostmi primárního prvku průtokoměru. [3]

3.2 Měření rychlosti proudění tekutiny

V případě tohoto principu měření se hledaný objemový průtok stanovuje dle již popsané rovnice (5) v kapitole 2.1. V tomto případě je signál z výstupu průtokoměru lineárně závislý na průtoku, oproti snímačům, které jsou založené na již popsané metodě měření rozdílu tlaků, kde je závislost kvadratická. Což mimo jiné v praxi znamená, že odpadají problémy s odmocňováním. Do skupiny průtokoměrů, které pracují na principu měření rychlosti proudění tekutiny řadíme turbínkové průtokoměry, vírové průtokoměry, elektromagnetické průtokoměry a ultrazvukové průtokoměry. [3]

3.3 Měření objemového průtoku

Při této metodě se měří objem tekutiny tak, že se rozdělí do samostatných odměrných prostor, u kterých známe jejich přesnou hodnotu objemu. Pokud tedy vynásobíme tento známý objem odměrného prostoru počtem postupně naplněných prostor, získáme hledanou hodnotu objemu tekutiny, která protekla potrubím za určitou dobu měření. Tyto průtokoměry většinou ukazují na počítadle rovnou celkový proteklý objem, můžeme se ale také setkat se zařízeními, které mohou mít na výstupu impulsy odpovídající právě počtu naplněných známých prostor. Existuje značné množství těchto dávkovacích průtokoměrů lišících se velikostí naplňovaných prostor, tvarem prostor či uložením lopatek. Do kategorie objemových průtokoměrů spadají průtokoměry s krouživým pístem, oválové měřidlo, bubnové průtokoměry a další. Zařízení měřící průtok dle objemové metody není vhodné používat pro snímání průtoku znečištěných kapalin a kapalin obsahujících pevné částice, protože v těchto průtokoměrech se nachází mnoho pohyblivých součástí. Také je důležité zmínit fakt, že způsobují velkou tlakovou ztrátu, což je často nežádoucí. [3]

3.4 Měření hmotnostního průtoku

Pro měření hmotnostního průtoku se často používá nepřímé zjištění přepočtem z objemového průtoku, který získáme pomocí metody popsané v kapitole 3.2. Následně použijeme vztah v rovnici (3) v kapitole 2.1. Metod, které by měřily hmotnostní průtok přímo, existuje relativně málo. Nejčastěji se používají dvě základní metody: Coriolisův průtokoměr a tepelný hmotnostní průtokoměr. [3]

Coriolisův průtokoměr využívá Coriolisovy síly, která vzniká v trubcích, které vibrují. Využívá se fázového posuvu v rezonančním kmitání trubic, který vzniká působením právě Coriolisovy síly, a je úměrný hmotnostnímu průtoku tekutiny trubicí a frekvence vlastních kmitů odpovídá hustotě tekutiny. Z těchto zařízení získáváme velmi přesné výsledky a výhodou je, že jejich údaj je v podstatě nezávislý na teplotě, tlaku, viskozitě a obsahu pevných částic v tekutině. [3]

Tepelný hmotnostní průtokoměr je založen na principu, který vychází ze závislosti výměny tepla mezi zdrojem a okolím, tvořeném proudící tekutinou, na hmotnostním průtoku. Rozlišujeme dva typy: termoanemometry a kalorimetrické průtokoměry. Termoanemometr neřadíme přímo mezi průtokoměry, ale spíše mezi přístroje určené k měření rychlosti nikoliv přímo průtoku. Jedná se o sondu, která je elektricky vyhřívaná, vložena do potrubí s proudící tekutinou. Principem měření je závislost množství tepla odebíraného na sondě tekutinou na rychlosti proudění, hustotě, tepelné vodivosti a na teplotě proudícího média. Druhý typ je kalorimetrický průtokoměr, který snímá teplotu před a za zdrojem tepla, jenž se nachází ve středu proudového profilu. Následně tedy můžeme určit průtok z rozdílu teplot. [3]

4 Typy průtokoměrů

4.1 Výběr průtokoměru

Když vybíráme vhodný snímač průtoku, je zapotřebí respektovat mnoho různých vlivů. Zde je výčet těch nejvýznamnějších z technického hlediska:

- pracovní činnost – řešíme, zda je spojitá, nespojitá, jednorázová či trvalá
- druh, vlastnosti a hodnoty parametrů měřené tekutiny – agresivita, teplota, tlak, viskozita nebo hustota
- měřicí místo – zajímá nás, jestli měříme v potrubí nebo otevřeném kanálu. Zásadní jsou rozměry potrubí, přístupnost či náběhové délky.
- rušivé vlivy senzoru – tlaková ztráta
- vyhodnocení
- přesnost (nejistoty) měření – bez korekcí nebo s nimi
- možné opotřebení – mechanické díly
- dynamické vlastnosti – časová konstanta a zpoždění

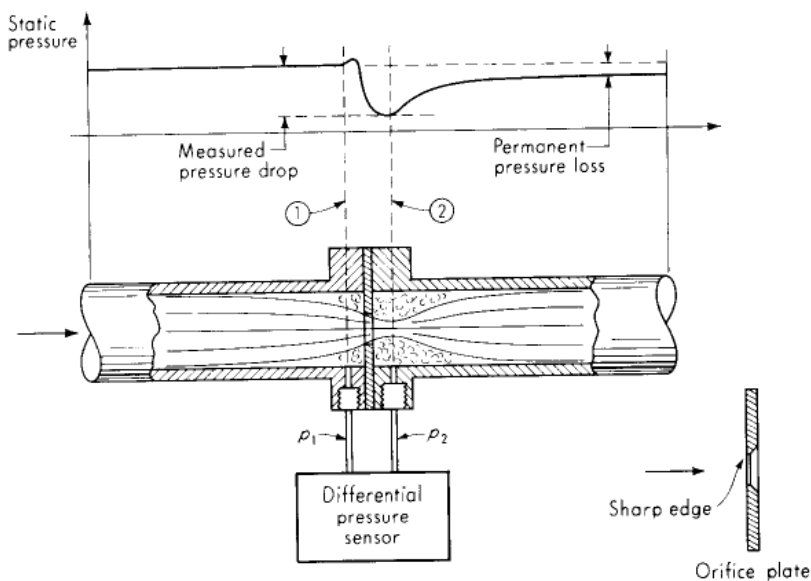
Vybrat správný průtokoměr je velmi náročný úkol, proto jsou k dispozici různé programy nebo třeba dotazníky výrobců, jejichž vyplněním dostaneme odpověď na otázku, který průtokoměr vybrat. Jelikož je výběr složitý a může být i chaotický, výrobci na základě znalostí a zkušeností publikují sestavené tabulky průtokoměrů pro vybrané aplikace. Z těchto podkladů lze již pouhým pohledem konstatovat, že neexistuje univerzální průtokoměr, který by byl použitelný pro většinu aplikací. Z tabulek uvedených v příloze 2 můžeme vyčíst různé hodnoty, které lze dosáhnout odlišnými typy průtokoměrů. Tyto tabulky jsou rozhodné pro výběr nejvhodnějšího zařízení. [5]

4.2 Průřezové průtokoměry

4.2.1 Průtokoměry na principu tlakového rozdílu

Tento typ průtokoměrů využívá platnost Bernoulliho rovnice. Princip spočívá v zachování konstantního součtu statického a dynamického tlaku v proudící tekutině. Znamená to tedy, že při proudění tekutiny roste dynamický tlak, ale celkový tlak zůstává

zachován, a v důsledku toho klesá statický tlak. Pro měření průtoku je důležité určit dynamický tlak, protože jsme z něj schopni získat informaci o rychlosti proudění, a můžeme ho stanovit dvěma způsoby. Buďto jako rozdíl statických tlaků před a za nějakou překážkou (tzv. primární člen průtokoměru), díky které se zúží průřez potrubí. Této problematice se věnuje následující kapitola 4.2.2. Statický a celkový tlak se měří pomocí senzorů tlaku (sekundární člen průtokoměru). Na Obr. 2 můžeme vidět pokles statického tlaku za clonou. [5] [6]



Obr. 2: Průběh tlaku v závislosti na vzdálenosti od clony [6]

V označených místech 1 a 2 nejčastěji dochází k odběru tlaku. Z průběhu je také zřejmé, že dochází k nevratné tlakové ztrátě, to znamená, že hodnota tlaku už se ani dále za clonou nevrátí přesně na původní hodnotu.

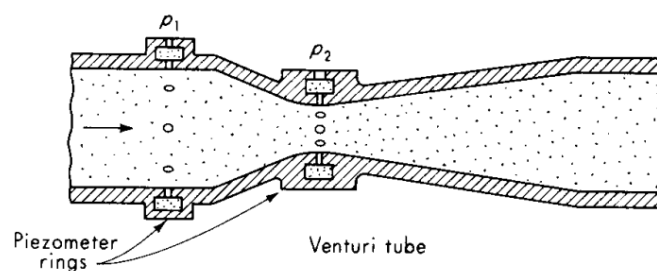
4.2.2 Průtokoměry se škrťicími orgány

V průmyslových aplikacích jsou tyto průtokoměry stále nejvíce využívány. Přístroje na měření průtoku se škrťicími orgány jsou založeny na principu popsaném v kapitole 4.2.1. Neexistuje žádná univerzální vyhovující geometrie škrťicího orgánu pro všechny aplikace, avšak v průmyslu se nejčastěji využívají následující: clony, dýzy, Venturiho trubice, Dallova trubice, klíny nebo V-kužel. [5] [6]

Nejnámějším primárním prvkem jsou clony. Mají tvar desky a jsou do potrubí vkládané kolmo na směr proudění. Tento škrťicí orgán je k dostání ke všem běžným

světlostem potrubí. Důležité je uvažovat ztráty na cloně. Znamená to tedy, že dochází k trvalému poklesu tlaku, a proto na to musíme při měření průtoku touto metodou dávat pozor. Clony bývají obvykle vyrobené z nerezové oceli a dbá se na ostré a čisté hrany, právě z důvodů tlakových ztrát. Parametry clon definuje norma DIN 19205 A, B a DIN 19214. Nejčastějším tvarem je kruh, neboť ten umožňuje minimalizaci dotyku plochy s tekutinou. Způsob instalace clon je běžně doporučován výrobcem, nicméně obecně platí, že pro rovnoměrné rozložení profilu průtoku je zapotřebí použití tzv. uklidňujícího přímého úseku potrubí, a to jak před, tak za clonou. [5]

Dalším známým a hojně používaným škrťícím orgánem je Venturiho trubice, kterou v roce 1797 vynalezl Giovanni Battista Venturi. Současně vynalezl s ní spjatý efekt. Jeho cílem bylo do značné míry zmenšit tlakovou ztrátu úpravou profilu tak, aby tření tekutiny bylo minimální. Zásadní bylo upravit podmínky proudění takovým způsobem, aby nedocházelo k nežádoucím turbulencím. Z tohoto důvodu bylo nejdůležitější vyhnout se náhlým změnám průtočného profilu, k čemuž dochází u clon, proto Venturiho trubice v tradičním provedení obsahuje dlouhý sbíhavý vstupní i rozbíhavý výstupní člen, jak můžeme vidět na Obr. 3. Zuzující část na začátku zde funguje jako škrťící orgán, zatímco v části za největším zúžením dochází k poklesu rychlosti proudění a vzrůstu statického tlaku. Výhodou je, že na rozdíl od clony nevyžaduje dlouhé přímé potrubí. Nejvhodnější použití je u čistých nekorodujících plynů a kapalin. [5] [6]



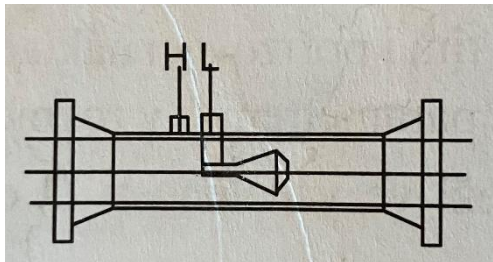
Obr. 3: Venturiho trubice [6]

Dalším škrťícím orgánem je Dallova trubice. Tento prvek je tvarově podobný Venturiho trubici, avšak neobsahuje žádné zaoblené úseky, které jsou nákladnější na výrobu, zároveň je kratší, což je výhodné i kvůli úspoře místa. Tlakový rozdíl Δp se clonám velmi podobá, naopak tlakové ztráty jsou menší než u clon, tedy hovoříme o velmi podobných hodnotách jako u Venturiho trubice. Praktickou aplikaci můžeme hledat tam, kde běžné clony selhávají. Jedná se tedy především o měření větších průtoků, s čímž se

můžeme setkat u odpadových kanálů nebo kalů. Tento typ průtokoměrů je nákladnější, zato však ale nižší spotřeba čerpacího zařízení díky menším tlakovým ztrátám tuto stránku věci kompenzuje.

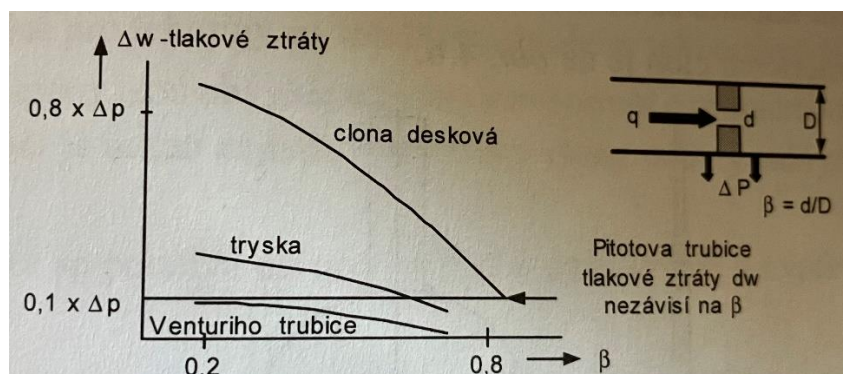
Posledním škrtícím orgánem, který zmíníme, je V-kužel. Funkce tohoto zařízení spočívá v tom, že se tekutina protlačuje úzkým průchodem V-kuželu, jehož tvar připomíná spojení delšího rozbíhavého a krátkého kužele, což způsobí vznik oblasti se zvýšenou rychlostí v prstenci mezi potrubím a překážkou a na její zadní straně. Měření se provádí podobně jako u clon nebo Venturiho trubice, a to tak, že jsou snímány hodnoty dvou tlaků. První tlak se měří před V-kuželem, zatímco druhý tlak za V-kuželem. Celý proces měření umožňuje vypočítání průtoku s velmi vysokou přesností. V-kužely jsou optimalizovány tak, že změny geometrie způsobené opotřebením nebo usazeninami naprosto minimálně ovlivňují přesnost měření.

Jejich výhodou je absence potřeby dlouhého přímého potrubí, takže můžeme měřit v blízkosti kolen. Zároveň je vhodné tento typ použít pro velké rychlosti průtoku, erozivní nebo abrazivní tekutiny. [5] [6]



Obr. 4: V-kužel [5]

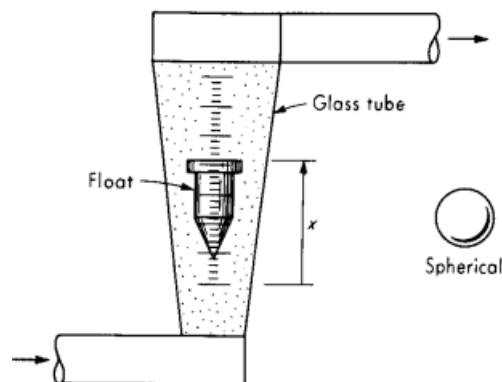
Na následujícím Obr. 5 můžeme názorně vidět rozdíl mezi škrtícími orgány v závislosti na tlakové ztrátě.



Obr. 5: Závislost trvalých tlakových ztrát na součiniteli β pro různé škrtící orgány [5]

4.3 Průtokoměry s proměnným průřezem

Do této skupiny průtokoměrů řadíme plováčkové průtokoměry a rotametry, z nichž používanější a známější jsou ty plováčkové. Tyto zařízení můžeme řadit do skupiny průtokoměrů pracujících na principu tlakové difference, avšak s tím rozdílem, že v tomto případě zůstává tlakový rozdíl konstantní a mění se zde naopak poloha plováčku, jejíž změnu vyvolává rychlost proudění tekutiny. Měřicí trubice má nejčastěji kónický tvar, který se ve směru proudění rozšiřuje. Tyto průtokoměry řadíme do skupiny s proměnným průřezem právě kvůli změně polohy rotačního tělíska (plováčku), které se vznáší v kuželové trubici a při tom dochází ke změně průřezu, kterým tekutina protéká. Důležité je, aby měřidlo bylo ve svislé poloze, potom je prvek udržován v základní pozici pomocí gravitace. Princip měření spočívá v tom, že se tělísko po ustálení své polohy díky rotaci nachází ve výšce h , kterou můžeme jednoduše měřit, a zároveň platí, že v tomto stavu jsou v rovnováze veškeré síly (tlaková, třecí, vztlaková a gravitační) působící na tělísko.



Obr. 6: kuželová trubice s plovákem [6]

K výhodám těchto průtokoměrů řadíme jednoduchou konstrukci a instalaci, s čímž jsou spojené nízké náklady nebo použitelnost pro širokou škálu kapalin. Naopak omezení představují limitní hodnoty tlaku a rychlosti proudění pro které fungují měřidla správně. [7] [5]

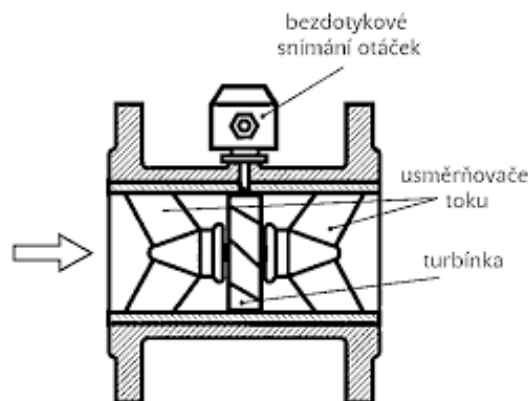
4.4 Turbínové a lopatkové průtokoměry

4.4.1 Turbínové průtokoměry

Jedná se o jeden z nejdéle známých způsobů měření průtoku. Uspořádání turbínového průtokoměru můžeme vidět na Obr. 7. Zásadním prvkem je lopatkový rotor s vhodně zakřivenými plochými lopatkami, který je umístěn v ose potrubí ve směru

proudění a uváděn do rotačního pohybu protékající tekutinou. Počet lopatek je volen dle aplikace, avšak obvykle se jedná o rozmezí 6–20 kusů. Počet otáček závisí na proteklém množství média a otáčky za jednotku času znázorňují okamžitý průtok. Otáčky rotoru mohou být snímány kontaktně i bezkontaktně. Měronosnou veličinou je proto frekvence impulzů f [Hz], jež je úměrná objemovému průtoku Q_v .

Známe dva typy konstrukcí, u první varianty vstupuje do zařízení kapalina přes spirálové lopatky statoru, díky čemuž rotuje proud kapaliny, který působí na kuličku a mezi prvním a druhým do spirály formovaným rotorem, a vyvolává tak její rotace v prostoru. Druhou možností jsou konstrukce, jejichž princip je založen na využití sil, které jsou vyvolány prouděním, k udržování rotoru v poloze mimo konce hřídele. [5] [8]

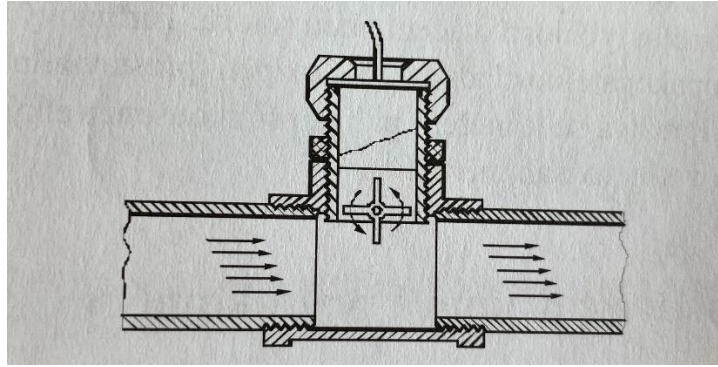


Obr. 7: Řez turbínovým průtokoměrem [5]

Místo turbínky může být umístěna vrtule neboli šroub, ovšem tato varianta je velmi nepřesná, nejistota se pohybuje kolem 2 %. Na druhou stranu se jedná o levné řešení. [5]

4.4.2 Průtokoměry s lopatkovými koly

Zásadní rozdíl oproti předešlému typu představuje orientace lopatek na směr proudění. Zatímco u turbínových průtokoměrů jsou lopatky orientovány ve směru proudění, v tomto případě jsou umístěny kolmo na směr proudění. Důvodem použití je cena, protože lopatková kola jsou levná především díky absenci ložisek. Na Obr. 8 můžeme vidět uspořádání průtokoměru s lopatkovým kolem v řezu. Existují také různé podtypy těchto průtokoměrů, jakou jsou turbínové a lopatkové průtokoměry s tryskou či obtokem. Tryska slouží k usměrnění tekutiny dle potřeby a obtok umožňuje výměnu a údržbu zařízení bez přerušování provozu. [5]



Obr. 8: Průtokoměr s lopatkovým kolem v řezu [5]

4.5 Objemové průtokoměry

Princip spočívá v přímém odměřování konkrétního objemu (případně hmotnosti) a zároveň času. Existují dvě možnosti tohoto měření – spojitě či diskrétní. V případě spojitěho měření hovoříme o akumulaci tekutiny za určitý čas, poté tedy můžeme po skončení získat údaj o měřeném objemu. Jestliže měříme pomocí objemových průtokoměrů pracujících v diskrétním režimu, jedná se o dělení tekutiny na konečná objemová kvanta neboli na tzv. dávky. Proto se někdy těmto zařízením říká „dávkovací průtokoměry“. Proudící tekutina je tedy rozdělována do vymezených prostor s přesným objemem. Tyto prostory jsou postupně naplňovány a vyprazdňovány. V průběhu naplňování a vyprazdňování se zaznamenává počet cyklů, z čehož se následně vyhodnotí kvantovaný hmotnostní průtok pomocí odvažování kvant.

Největší nevýhodou těchto průtokoměrů je případné zavzdušnění kapaliny, které je nežádoucí. Avšak pokud zařídíme odvzdušnění kapaliny, můžeme se dostat na velmi nízké hodnoty nejistoty měření, které téměř nejsou závislé na vlastnostech kapaliny jako je hustota či viskozita v porovnání s ostatními typy. Ovšem je nevhodné aplikovat tento typ měřidla v procesech, kde zaznamenáváme vysoké teploty a tlaky, a kapaliny by se tak mohly odpařovat. Máme k dispozici spoustu typů objemových průtokoměrů, ale nejužívanějšími jsou oválové, tělesové neboli piškotové a s krouživým pístem neboli prstencové. [5] [6]

4.5.1 Oválový průtokoměr

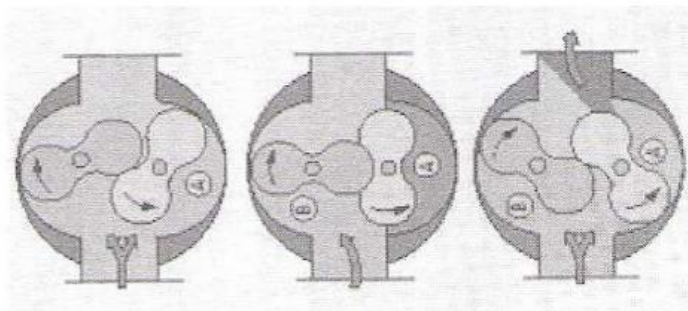
Oválové průtokoměry neboli průtokoměry s oválnými koly jsou složeny ze dvou ozubených či hladkých oválových těles, které zapadají do sebe a do komory. Protékající kapalinou se dvě oválná kola dostávají do rotačního pohybu a s každou otáčkou jednoho z kol proteče průtokoměrem mezi koly a stěnami přesně stanovený objem kapaliny.

Výstupem je pulzní signál generovaný magnety, které jsou umístěny v kolech. Počet otáček je zaznamenáván jakožto veličina úměrná objemovému průtoku.

Při vyloučení prokluzu mezi koly můžeme dosahovat velmi nízké nejistoty do 0,1 %. Další výhodou je značně vysoká životnost těchto zařízení, a to především z důvodu používání ložisek z tzv. uhlografitu. Naopak nevýhodou je vznikání pulzace v potrubí zapříčiněné kolísáním průtoku. [5] [9]

4.5.2 Tělesový (piškotkový) průtokoměr

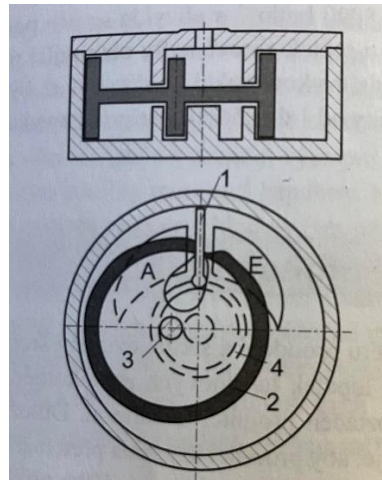
Jedná se o obdobné zařízení jako je oválový průtokoměr s tím rozdílem, že zde nejsou používána ozubená kola, která jsou dražší na výrobu kvůli přesnosti. Naopak v tomto měřidle najdeme dvě tělesa speciálního tvaru, která můžeme vidět na Obr. 9. Princip spočívá v tom, že tekutina se dostává mezi zmíněná tělesa a následně je vytlačována ven. Pohyb je vázaný, proto se měří pouze jedna hodnota otáček. Bohužel zde vzniká výrazně vyšší nejistota než v předešlém případě, a to především u nižších průtoků. [5]



Obr. 9: Tělesový (piškotkový průtokoměr) průtokoměr [5]

4.5.3 Průtokoměr s krouživým pístem

Energii pro pohon průtokoměru dodává proudící kapalina. Tento typ měřidla se skládá z odměrovací komory ve tvaru válce, ve které se pohybuje prstencový válec neboli krouživý píst, který má ve vertikálním řezu tvar písmene H, střední deskovou částí, jež je děrovaná, viz Obr. 10. Čep pístu se pohybuje v kanálku mezi vnitřními stěnami patky a kladkou. Píst je navíc přerušen po obvodě radiálním výřezem, který nazýváme štěrbina. Právě v tomto místě koná píst smýkavý pohyb po přepážce a osa pístu opisuje kružnici. Kapalina je poté pístem rozdělena do dvou odměrných prostorů, jeden se nachází uvnitř pístu a druhý vně. Tyto dva prostory se naplní právě jednou během jednoho cyklu. Cykly jsou poté počítány. [5]

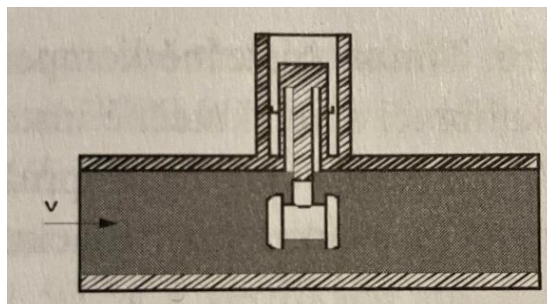


Obr. 10: Průtokoměr s krouživým pístem v řezu [5]

4.6 Deformační průtokoměry

Tento typ průtokoměrů pracuje díky kinetické energii, kterou přináší proudící kapalina. Ta způsobuje deformaci (stlačení) pružného členu, který může mít různý tvar a nazýváme ho obecně „reakční deska“. Konkrétně se může jednat o pádlo, nosník či kruhový terčík. Měřidlo tedy pracuje se silou vyvolanou dynamickým tlakem tekutiny a působící na plochu pružného členu umístěného v proudu tekutiny uvnitř trubice. Tvar terčíku je důležitý pro přesné a správné popsání síly.

Umístění reakčních desek se realizuje dle aplikace. Pokud se jedná o jednodušší operace, používají se především zavěšené reakční desky, přičemž jsou následně měřeny její výchylky senzory úhlové výchylky. Pro náročnější aplikace používáme odporové tenzometry, které jsou umístěny na pružném členu umístěném v trubce. Právě správné aplikování těchto tenzometrů řadíme do nejnáročnější částí výroby průtokoměru. Terčíky, jež můžeme nejčastěji potkat v průtokoměrech jsou ve tvaru desky, válce či klapky. [5]

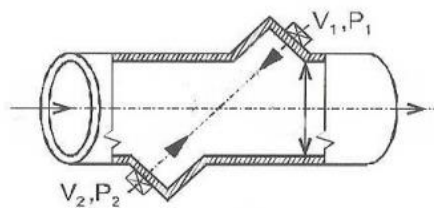


Obr. 11: Deformační průtokoměr v řezu [5]

Výhodou těchto průtokoměrů jsou vysoké přesnosti měření a široké škály měřitelného průtoku. Naopak mezi nevýhody řadíme citlivost na vlastnosti tekutin a potřebu časté údržby. [5]

4.7 Ultrazvukové senzory průtoku

Používají se především pro velká potrubí. Hlavním principem je využití unášení ultrazvukového signálu proudící tekutinou a jeho změny rychlosti šíření nebo frekvence, popřípadě také odrazu od překážek, pokud kapalina obsahuje vzduchové bubliny či nečistoty. Jak můžeme vidět na Obr. 12, zařízení je osazeno generátory signálu – V_1 , V_2 a přijímači tohoto signálu – P_1 , P_2 . Jedná se o ultrazvukový měnič, který pracuje ve dvou režimech – piezostrikčním a piezoelektrickém. Mezi těmito vysílači a přijímači umístěnými v potrubí se šíří ultrazvukové vlnění, kde se zároveň pohybuje kapalina rychlostí v . Proudění tekutiny vyvolává změnu rychlosti ultrazvukového vlnění. Podle uspořádání dělíme ultrazvukové průtokoměry do tří skupin: přímé impulzní, zpětnovazební, Dopplerovy. [10] [5] [11]



Obr. 12: Ultrazvukový průtokoměr [5]

4.7.1 Přímé impulzní

Tento typ ultrazvukového průtokoměru měří přímo dobu, za kterou projde ultrazvukový signál od vysílače k přijímači. Proto ho nazýváme přímým. Frekvence vlnění se běžně pohybuje v rozmezí 500 kHz až 1MHz a ultrazvuková vlna má tvar impulsu o trvání až několika ms. [5]

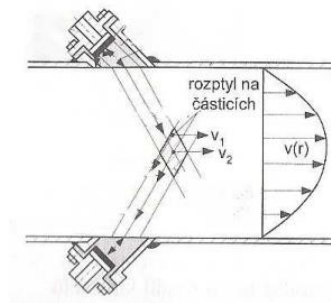
4.7.2 Zpětnovazební

Zde se používá zpětnovazební zapojení tvořící oscilátor, a to konkrétně tak, že do měniče pracujícího v režimu vysílače je po zesílení a úpravách fáze přiváděn výstupní signál z přijímače. Tento signál může být spojitý harmonický či ve tvaru impulsů harmonického signálu. Základními prvky zpětnovazebních průtokoměrů jsou dvě měřící dráhy, jež jsou diferenčně uspořádané a jsou tvořené dvojicemi vysílač – přijímač.

V jedné dvojici dochází ke sčítání rychlosti proudění v a ultrazvuku c , v druhé naopak k jejich odečítání. Při stejné délce akustické cesty můžeme pak pomocí dvou výše popsaných rychlostí vypočítat dobu oběhu v jednotlivých drahách. [5]

4.7.3 Dopplerovy

Tyto průtokoměry využívají Dopplerova jevu, konkrétně vyhodnocují změnu frekvence ultrazvukové vlny v době jejího odrazu od různých částic, respektive nehomogenit, které jsou unášeny proudící tekutinou. Proto můžeme hovořit o tom, že Dopplerovy průtokoměry měří rychlost právě nehomogenit, nikoliv tekutiny. Znamená to tedy, že částice, jako jsou nečistoty či bubliny se chovají jako reflektory o velmi malé velikosti odrážející stále vysílané ultrazvukové vlnění. Realizaci můžeme vidět na Obr. 13. [10]

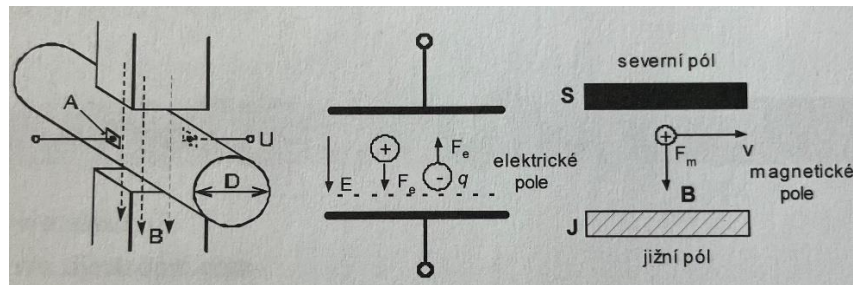


Obr. 13: Průtokoměr na principu Dopplerova jevu [5]

4.8 Indukční senzory průtoku

Značnou výhodou těchto průtokoměrů je dosažení poměrně velké přesnosti měření, a zároveň možnost použití pro velké spektrum kapalin. Zásadní výhodou oproti jiným průtokoměrům je také fakt, že se zde nepoužívají žádné mechanické pohyblivé části, tím pádem nemůže být ovlivněn tlak či průtok měřené tekutiny. Zároveň měření neovlivňuje složení, tlak, teplota ani hustota kapaliny. Jedinou, avšak zásadní podmínkou je, aby kapalina byla dostatečně vodivá. Používání označení „indukční“ je odůvodněno tím, že vznik napětí na elektrodách při proudění vodivé tekutiny je vysvětlován Faradayovým indukčním zákonem. Ve skutečnosti se jedná o důsledek Lorentzova zákona. Vznik napětí na elektrodách při pohybu dostatečně vodivé tekutiny v magnetickém poli je podstatou činnosti této skupiny průtokoměrů.

Hlavní část těchto měřidel představuje cívka, jež je vbudovaná do těla průtokoměru a vytváří tam magnetické pole, které je kolmé na směr proudění tekutiny. Při průchodu vodivé kapaliny magnetickým polem jsou nosiče nábojů q odkloněny a vzniká elektrické napětí U . Elektrické napětí je měřeno pomocí dvou elektrod a je úměrné průměrné rychlosti proudění, kterou poté zařízení díky znalosti rozměru potrubí přepočítá na hodnotu objemového průtoku. Princip průtokoměru je znázorněn na Obr. 14. [5] [10] [12]



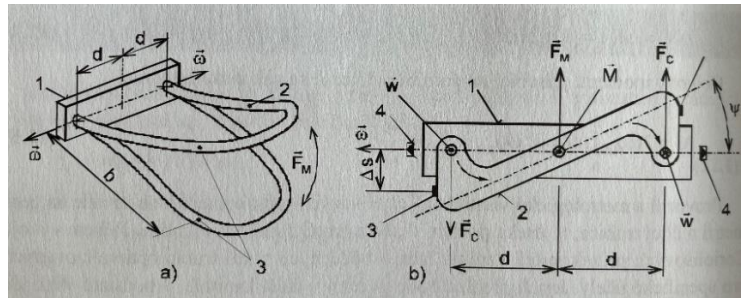
Obr. 14: Princip elektromagnetického průtokoměru [5]

4.9 Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly

Proudí-li tekutina v potrubí, které zároveň rotuje s určitou úhlovou rychlostí, potom na každý element tekutiny působí Coriolisova síla, čehož využívají průtokoměry z této skupiny. Jedná se o přímý převod Coriolisovy síly na hmotnostní průtok.

Provozní a metrologické vlastnosti jsou do značné míry závislé na konkrétní geometrii měřicí trubice, čímž rozumíme úsek, v němž protéká měřená tekutina. Vývojem vznikla škála osvědčených tvarů trubic určených pro konkrétní a specifické účely. Jedná se především o dvě skupiny trubic – zakřivené a přímé. Pohyb trubic může být otáčivý či kmitavý kolem osy. Princip trubice tvaru U s kmitavým pohybem je znázorněn na Obr. 15.

Coriolisovy průtokoměry jsou velmi přesné a spolehlivé, a můžeme s nimi měřit i jiné veličiny, kterými jsou teplota či hustota tekutiny. Ovšem jejich nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady. [5] [6]



Obr. 15: Coriolisův průtokoměr s U trubici – princip [5]

4.10 Směšovací průtokoměry (značkovací)

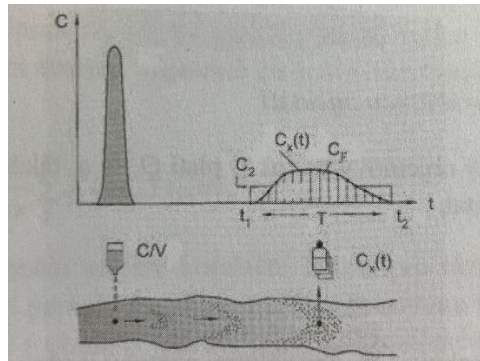
Tento typ je znám velmi dlouho, byl používán již starověkými civilizacemi. Principem je sledování unášené značky (předmětu) v tekutině. V dnešní době se místo předmětu používá vhodná látka přimíchaná do proudící tekutiny. Můžeme tedy měřit i průtok vícefázových směsí, protože různé fáze proudící látky mohou být značkovány jinými látkami. Směšovací měřidla poté vyhodnocují buďto dobu postupu značky ve známém úseku potrubí, nebo zředování značkovací čáry.

První možností určení průtoku je metoda postupové doby. Do měřené kapaliny je vstříkována dávka látky značkovače. Látky jsou málo rozpustné, při měření plynů se využívají radioaktivní látky. Na potrubí je umístěn pár detektorů, kterými je sledován průchod značkovače po proudu. Je důležité dosáhnout dostatečné značkovací a proudící délky. Potom jsme schopni určit střední rychlost průtoku. Z této rychlosti vyhodnotíme objemový průtok.

Druhou variantou pro určení průtoku je využití zředování značkovací látky. Rozlišujeme dva typy podle způsobu vstřiku:

- impulzní vstřik
- průběžná injektáž

Impulzní vstřik neboli integrační metoda spočívá ve vstřiku značkovací látky o známém objemu a koncentraci v krátkém časovém intervalu v určitém průřezu potrubí do měřené kapaliny. Následně jsou odebírány vzorky v časovém intervalu a v určité vzdálenosti po proudu, a je měřena jejich koncentrace (C_x na Obr. 16). Z časového průběhu koncentrace je následně určena její střední hodnota (C_2 na Obr. 16). Množství vstříknuté látky se při proudění s objemovým průtokem nemůže ztratit a díky tomu získáme hodnotu průtoku.



Obr. 16: Princip integrační značkovací metody [5]

V případě metody s průběžnou injektáží je vstřikování realizováno stálým objemovým průtokem Q_v po výrazně delší dobu než v předchozím případě. Opět jsou ve vhodné vzdálenosti odebírány vzorky a následně měřeny jejich koncentrace. Poté je vyhodnocen objemový průtok měřidlem.

Výhodou těchto průtokoměrů je snadnost identifikace průtoku a možnost pouze vizuální kontroly díky značce. Naopak nevýhodou zde představuje omezená použitelnost, protože kapalina musí dobře „přijmout“ značku. Také přidávání látky do tekutiny může negativně ovlivnit proudění. [5]

4.11 Fluidické průtokoměry

Zásadními prvky v této skupině jsou fluidická čidla neboli proudové tekutinové členy, které jsou založeny na aerodynamických principech. Podstatu jejich ovládní představuje využití vzájemného působení proudů tekutiny, snímače a aerodynamických jevů.

Pro popis fungování fluidických průtokoměrů se vhodně používá analogie s elektřinou, tzv. elektro-fluidická analogie, kde elektrické napětí nahrazujeme tlakem p měřené tekutiny. Potom elektrický proud analogicky představuje hmotnostní průtok Q_m .

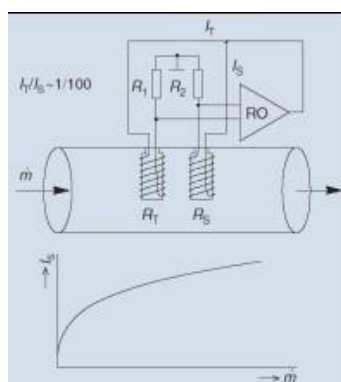
Tato měřidla se vyznačují možností použití v náročných pracovních podmínkách, kterými mohou být např. vysoké teploty, velká zrychlení, vibrace, silná elektromagnetická pole, ionizující záření či výbušná prostředí. K dalším nesporným výhodám patří dlouhá životnost, vysoká spolehlivost a nízké pořizovací náklady. Omezením může naopak být citlivost na vlastnosti tekutiny. [5]

4.12 Tepelné průtokoměry

Jedná se o skupinu měřidel sloužících k přímému měření hmotnostního průtoku. Tepelné průtokoměry jsou v průmyslové praxi hojně využívány. Základní princip představuje vliv proudění tekutiny na přestup tepla, jinými slovy mluvíme o výměně tepla mezi zdrojem tepelné energie a okolím v závislosti právě na hmotnostním průtoku. K hlavním výhodám patří rychlost a přesnost měření, a také již zmíněnou možnost měřit hmotnostní průtok na přímo. Ovšem tato měřidla jsou vhodná především pro malé průtoky a pro čisté tekutiny s nízkou hodnotou hustoty a také známým složením a vlastnostmi, což není vždy samozřejmostí. V praktickém technickém využití se vyskytují dva typy tepelných průtokoměrů – termoanemometry a kalorimetrické senzory. Vhodnost použití jednotlivých typů závisí na charakteru tepelného působení tekutiny na čidlo a také na uspořádání měřicího systému. [5]

4.12.1 Hmotnostní termoanemometry

Čidla termoanemometru zasahují přímo do proudící tekutiny a s jejich pomocí je vyhodnocován chladicí účinek nucené konvekce na vyhřívané čidlo. Jak je patrné z Obr. 17, do potrubí jsou umístěny dva odporové teploměry, z nichž jedno je čidlo studené a má vždy teplotu proudící tekutiny, a druhé čidlo je vyhřívané. V případě, že tekutina čidlem neproudí a zároveň zanedbáme radiaci a vedení tepla v přívodech, je z něj odváděno teplo pouze vedením a volnou konvekcí, avšak pokud tekutina proudí, je teplo odváděno především nucenou konvekcí, což se projeví právě větším ochlazováním vyhřívaného čidla. Ochlazování probíhá intenzivněji se zvyšující se rychlostí proudění, ze které jsme potom schopni získat průtok. Termoanemometry používáme především pro dynamická měření nebo měření při vysokých teplotách. [10] [5] [13]

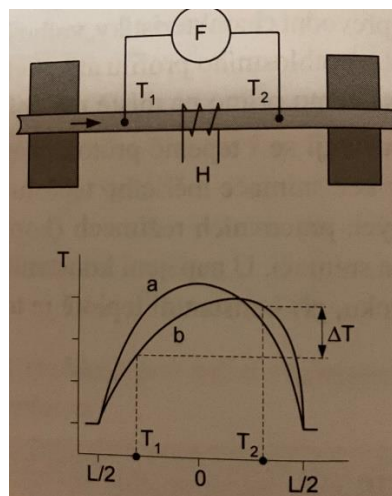


Obr. 17: Schéma hmotnostního termoanemometru [13]

4.12.2 Kalorimetrické hmotnostní senzory průtoku

Na rozdíl od termoanemometrů zde měříme míru oteplení vlivem proudící tekutiny. Jak si můžeme všimnout na Obr. 18, kapilárou proudí jen malá část měřené tekutiny. Sensory, na obrázku označenými T_1 a T_2 , jsou měřeny teploty stěny kapiláry, která uprostřed disponuje topným vinutím H . Z grafu na Obr. 18 vyplývá, že pokud kapilárou neproudí tekutina, jednotlivé teploty vykazují od zdroje tepla symetricky stejnou hodnotu (průběh „a“ na Obr. 18). Ovšem pokud tekutina kapilárou proudí, vlivem konvekce nastane porušení symetrického rozložení teplot právě podél kapiláry a čidlo na jejím začátku začne měřit hodnotu menší než čidlo na konci (průběh „b“ na Obr. 18). Tento rozdíl je následně převeden na průtok.

Nevýhodou je nutnost zajistit laminární proudění v obtokové kapiláře a taktéž v přímém potrubí, což se provádí pomocí vložení laminárního restriktivního členu, jenž je tvořen například několika drobnými kanálky. Naopak výhodou této skupiny měřidel spočívá v možnosti použití pro zvláště malé průtoky, kde již Coriolisův hmotnostní průtokoměr přestává správně fungovat. [10] [5] [13]

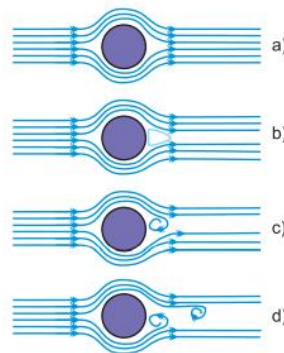


Obr. 18: Princip kalorimetrického průtokoměru a průběh teploty v závislosti na vzdálenosti od zdroje tepla pro neproudící a proudící tekutinu [5]

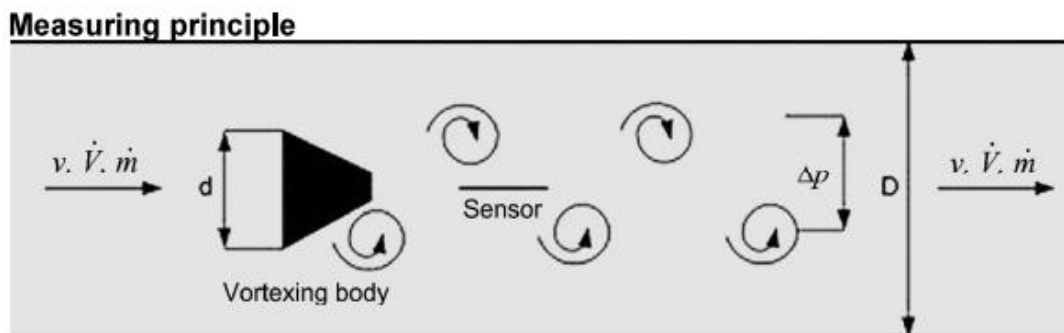
4.13 Vírové průtokoměry (typ použitý při měření)

Na principu vírových průtokoměrů byla založena měřidla použitá v praktické části této práce. Tento typ prošel za poslední dobu značným pokrokem v konstrukci a začal se výrazně častěji používat. Dalo by se říct, že vírové průtokoměry v určité míře nahradily původně velmi rozšířená průřezová měřidla (clony, dýzy či Venturiho dýzy).

Princip spočívá v tvorbě vírů, které vznikají při obtékání tělesa vloženého do proudící tekutiny, a měření jejich frekvence. Při obtékání tělesa dochází za určitých podmínek k odtržení mezní vrstvy od povrchu. Měřidla založená na tomto principu využívají konkrétně tvorbu tzv. Kármánových vírů, jež vznikají při obtékání tělesa neproudnicového tvaru. Tento proces vytváření vírů můžeme vidět na Obr. 19. Na Obr. 20 potom můžeme vidět, že po opakování zmíněného procesu se uvolňují víry z obou stran překážky. Na Obr. 20 je zároveň znázorněn totožný prvek, jako se nachází v průtokoměrech, kterými jsme měřili v praktické části. Uvolňování vírů probíhá pravidelně a střídavě na každé ze stran překážky a vzdálenosti jednotlivých vírů od sebe jsou totožné.



Obr. 19: Tvorba vírů za překážkou [14]



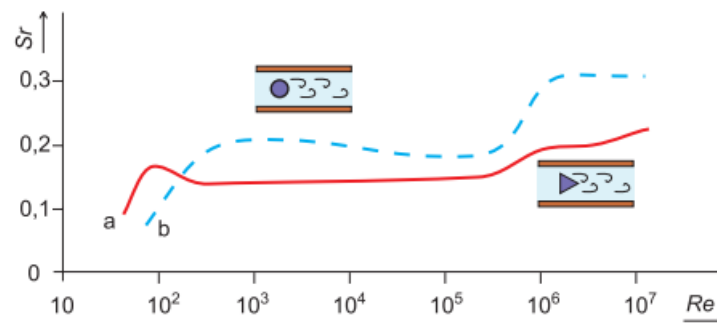
Obr. 20: Kármánova vírová stezka [15]

Vytváření vírů probíhá za určité frekvence, která je úměrná rychlosti průtoku tekutiny, a proto díky ní můžeme měřit průtok. Vzniká Kármánova stezka vyobrazena na Obr. 20 a charakterizují ji vzdálenosti mezi víry, jež jsou stejné. Pro frekvenci platí v určitém rozsahu lineární závislost na střední rychlosti v a popisujeme jí vztahem (9).

$$f = \frac{Sr}{d} \cdot v \quad (9)$$

Kde Sr je Strouhalovo číslo, d je charakteristický rozměr překážky.

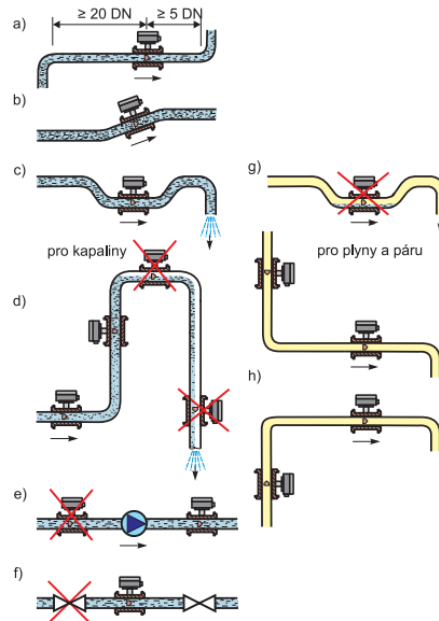
Strouhalovo číslo závisí na tvaru a rozměrech vloženého tělesa a taktéž na světlosti potrubí D . Na Obr. 21 je znázorněna závislost právě St na Reynoldsově čísle Re . V našem případě nás zajímá křivka „a“ představující průběh pro těleso tvaru delta. Můžeme si všimnout, že ve značně široké oblasti proudění je hodnota St konstantní. Výhodu konstantního Strouhalova čísla představuje přímá úměrnost frekvence tvorby vírů s rychlostí proudění bez závislosti na vlastnostech tekutiny (hustota, viskozita, teplota nebo tlak).



Obr. 21: Závislost Strouhalova čísla na Re [14]

Jak již bylo zmíněno, překážkou v našich průtokoměrech je hranolovité těleso deltovitého tvaru s ostře ohraničenou náběžnou hranou, jehož výhoda spočívá ve zřetelném určení místa tvorby vírů a vykazování vynikající linearitě závislosti dle vztahu (9).

Nejistota se pohybuje kolem hodnoty $\pm 0,5\%$, avšak za podmínky Reynoldsova čísla $> 30\,000$. Velikost Re proto hraje u vírového průtokoměru velkou roli, konkrétně by mělo měření probíhat vždy v turbulentním režimu a Reynoldsovo číslo by nemělo klesnout pod hodnotu 4000, protože pak už průtokoměr přestává správně fungovat. S klesajícím Reynoldsovým číslem roste chyba měření. Důležitá je správná montáž průtokoměru. Možnosti montáže ukazuje Obr. 22.



Obr. 22: Zásady pro montáž vírového průtokoměru [14]

Vírové průtokoměry přinášejí spoustu předností. Poskytují signál formou frekvence, což je velmi výhodné při číslicovém zpracování signálu. Také disponují značně vysokou spolehlivostí. Ovšem naopak je jejich použití omezeno charakterem proudění a také nelze tento typ průtokoměru použít pro malé průtoky. Dále vykazují trvalou tlakovou ztrátu. Nutností je umístit před a za prvek dostatečně dlouhé přímé úseky, což představuje další omezení. Naopak, vysoká odolnost proti vibracím a pulzacím v potrubí přináší další významnou přednost. [14] [5]

5 Kalibrace průtokoměrů

5.1 Použitá zařízení

Pro odměřování proteklé hmotnosti vody byla použita sběrná nádoba o objemu 35 l, viz Obr. 26 v kapitole 5.2.

Sběrná nádoba byla vážena na laboratorní digitální váze KERN FKB 36K0.1, 36 kg/0,1g s maximální nosností 36 kg, linearitou $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ kg a reprodukovatelností a čitelností $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ kg. Uváděný rozsah teplot pro správné fungování je $-10/+40$ °C, což bylo v laboratoři splněno. Kompletní technický list váhy je dostupný na přiloženém CD.

Pro sběr dat z průtokoměru byla použita ústředna Ahlborn ALMEMO 85909, a pro vypisování údajů byl použit program ALMEMO Control verze 5.19. Teplota uvnitř potrubí byla zaznamenávána pomocí platinového odporového teploměru Pt100.

5.1.1 Průtokoměry

K měření jsme měli k dispozici 5 průtokoměrů Ahlborn FVA 645 GV40QT provedených z ušlechtilé oceli s integrovaným měřením teploty a s rozsahem proudění 2 až 40 l·min⁻¹. Nejistota měření průtoku v případě vody uváděna výrobcem je $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ m³·s⁻¹, u teploty se jedná o ± 1 K. Měřidla byla připojována k trati pomocí 2 vnějších závitů. K ústředně byla připojována pomocí připojovacího kabelu dlouhého 2,9 m a konektoru ALMEMO. Průtokoměry pracují na vírovém principu, jenž je podrobněji popsán v kapitole 4.13. Jeden z použitých průtokoměrů se nachází na Obr. 23, a jeho technický list je k dispozici v příloze 1.



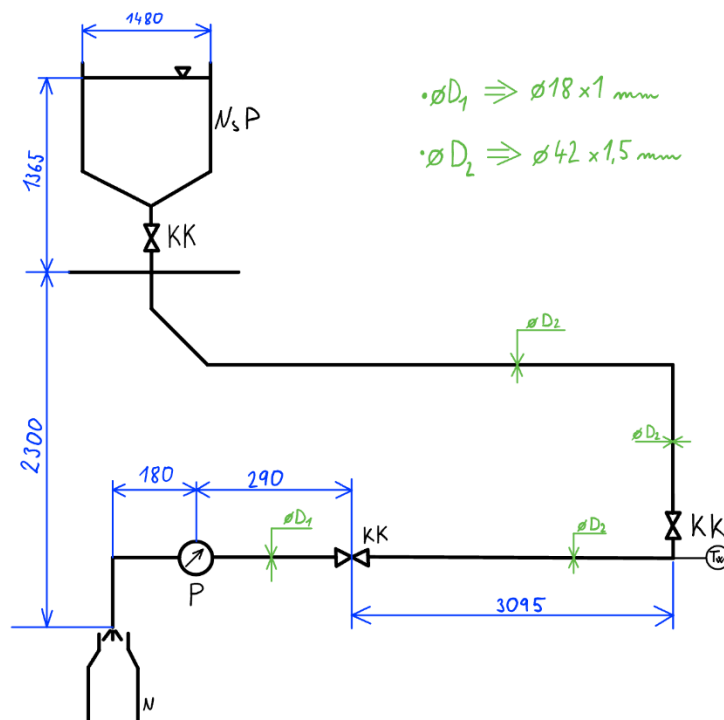
Obr. 23: Použitý průtokoměr

5.2 Měřicí trať

Trať byla složena ze soustavy potrubí, tří ventilů, teplotního čidla Pt100 a měřeného průtokoměru. Prítok vody byl zajišťován pomocí nádrže s přepadem, kterou můžeme vidět na Obr. 24. Schéma tratě včetně rozměrů je znázorněno na Obr. 25.



Obr. 24: Nádrž s přepadem



Obr. 25: Schéma měřicí tratě (legenda: P – průtokoměr, KK – kulový kohout, Tw – čidlo teploty vody, N – nádrž na vodu, NsP – nádrž s přepadem)



Obr. 26: Vyústění měřicí tratě s průtokoměrem a sběrnou nádobou

5.3 Postup měření

Nejdříve bylo nutné zajistit konstantní výšku hladiny v nádrži nad měřicí tratí, což bylo provedeno pomocí přepadu – viz Obr. 24, a zároveň byl nastaven stejný přítok jako odtok.

Následně bylo měřeno 12 bodů pro každý průtokoměr. Při měření každého bodu byl nastaven jiný průtok pomocí ventilu umístěného více než 3 metry proti proudu před průtokoměrem. Konkrétní hodnoty průtoku jsou zřejmé z tabulek s výsledky v kapitole 5.4. Pro každý nastavený průtok protékala voda soustavou do sběrné nádoby, která byla těsně před měřením zvážena. V průběhu byla zaznamenávána teplota pomocí Pt100, průtok kalibrovaným průtokoměrem každých 5 sekund a časové rozmezí, ve kterém ústředna sbírala data. Zároveň byl odměřen čas mezi začátkem a koncem napouštění nádoby. Poté byla zvážena nádoba s vodou pro výpočet skutečného objemového průtoku. Tento postup se opakoval pro všech 5 průtokoměrů a veškeré naměřené hodnoty se nachází v příložených textových či excelových souborech.

5.4 Výsledky

Pro každý z průtokoměrů byla nejdříve vyhodnocena hustota vody v každém bodě měření pomocí vzorce (10) [16], do kterého byly dosazovány průměrné teploty z každého bodu měření, viz příložený výpočtový Excel a tabulky 1–5.

$$\rho_w = 1000 - (t - 4) \cdot [0,097 + 0,0036 \cdot (t - 4)] \quad (10)$$

Po získání hustot bylo možné vypočítat průtok. Skutečný objemový průtok $Q_{V_{skut}} [m^3 \cdot s^{-1}]$ jsme vypočítali pomocí rovnice (11) za použití rozdílu hmotnosti nádoby před a po napuštění $\Delta m [kg]$, hustoty vody při měření jednotlivého bodu $\rho [kg \cdot m^{-3}]$ a času $\Delta t [s]$, kdy byla nádoba napouštěna.

$$Q_{V_{skut}} = \frac{\Delta m}{\rho \Delta t} \quad (11)$$

Objemový průtok $Q_{V_{měř}}$ naměřený pomocí průtokoměru byl zprůměrován pro každý bod měření a převeden na stejné jednotky $[m^3 \cdot s^{-1}]$. V tabulkách 1–5 jsou uvedeny výsledky pro všechny průtokoměry. Veškeré hodnoty v tabulce jsou zaokrouhleny s ohledem na nejistoty měření uvedených u popisu jednotlivých zařízení. Nejistota měření při mačkání stopek byla odhadnuta na $\pm 0,8 s$, a nejistota měření v případě digitální váhy činí $\pm 0,35 g$. Nejistota výpočtu hustoty byla stanovena na $\pm 1 kg \cdot m^{-3}$. Vypočítaný průtok má u všech kalibrovaných průtokoměrů (pro maximální průtok) nejistotu typu B řádově $\pm 1 \cdot 10^{-5}$, tudíž je zaokrouhlen stejně jako průtok naměřený na 5 desetinných míst. Výpočty a hodnoty nejistot jsou dostupné v příloze 3.

Tabulka 1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kalibraci průtokoměru A

A												
číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m1 [kg]	1,476	1,228	1,228	1,228	1,229	1,250	1,298	1,241	1,399	1,231	1,261	1,348
m2 [kg]	25,530	28,771	24,299	21,339	14,746	16,268	17,449	20,875	21,956	21,362	22,840	22,039
Δm [kg]	24,054	27,543	23,070	20,112	13,517	15,018	16,151	19,634	20,556	20,131	21,580	20,692
čas Δt [s]	52	59	57	60	56	95	255	179	100	70	59	49
teplota T [°C]	11,6	11,5	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,6	11,6	11,6	11,6
ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
$Q_{V_{měř}} [m^3 \cdot s^{-1}]$	4,8E-04	4,8E-04	4,2E-04	3,4E-04	2,5E-04	1,6E-04	0,7E-04	1,1E-04	2,1E-04	3,0E-04	3,8E-04	4,4E-04
$Q_{V_{skut}} [m^3 \cdot s^{-1}]$	4,6E-04	4,6E-04	4,0E-04	3,3E-04	2,4E-04	1,6E-04	0,6E-04	1,1E-04	2,1E-04	2,9E-04	3,7E-04	4,3E-04

Tabulka 2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kalibraci průtokoměru B

B												
číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m1 [kg]	1,242	1,323	1,233	1,231	1,234	1,233	1,236	1,237	1,237	1,238	1,240	1,240
m2 [kg]	23,396	24,433	21,020	18,439	17,794	16,965	19,198	20,880	21,062	20,385	20,691	22,597
Δm [kg]	22,154	23,110	19,787	17,209	16,560	15,732	17,963	19,644	19,824	19,147	19,451	21,356
čas Δt [s]	46	58	61	70	104	260	194	149	101	71	53	49
teplota T [°C]	11,7	11,7	11,7	11,7	11,6	11,7	11,7	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
$Q_{V_{měř}} [m^3 \cdot s^{-1}]$	4,9E-04	4,1E-04	3,4E-04	2,5E-04	1,6E-04	0,7E-04	1,0E-04	1,4E-04	2,0E-04	2,8E-04	3,8E-04	4,5E-04
$Q_{V_{skut}} [m^3 \cdot s^{-1}]$	4,8E-04	4,0E-04	3,3E-04	2,5E-04	1,6E-04	0,6E-04	1,0E-04	1,3E-04	2,0E-04	2,7E-04	3,7E-04	4,4E-04

Tabulka 3: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kalibraci průtokoměru C

C												
číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m1 [kg]	1,236	1,239	1,240	1,241	1,264	1,241	1,241	1,240	1,239	1,242	1,243	1,243
m2 [kg]	22,687	25,367	22,446	20,575	19,178	19,588	19,641	21,496	22,595	21,386	22,902	26,137
Δm [kg]	21,450	24,128	21,207	19,334	17,915	18,348	18,401	20,256	21,356	20,143	21,659	24,895
čas Δt [s]	44	59	68	78	110	270	192	151	105	72	58	5
teplota T [°C]	11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,1	12,0
ρ [kg · m⁻³]	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
$Q_{V_{m\acute{e}r}}$ [m³ · s⁻¹]	4,9E-04	4,2E-04	3,2E-04	2,5E-04	1,6E-04	0,7E-04	1,0E-04	1,4E-04	2,1E-04	2,8E-04	3,8E-04	4,5E-04
$Q_{V_{skut}}$ [m³ · s⁻¹]	4,8E-04	4,1E-04	3,1E-04	2,5E-04	1,6E-04	0,7E-04	1,0E-04	1,3E-04	2,0E-04	2,8E-04	3,8E-04	4,5E-04

Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kalibraci průtokoměru D

D												
číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m1 [kg]	1,245	1,245	1,244	1,245	1,246	1,244	1,243	1,243	1,244	1,244	1,246	1,244
m2 [kg]	22,306	24,397	20,971	22,295	20,940	18,883	20,464	21,096	24,369	21,334	21,361	22,889
Δm [kg]	21,061	23,152	19,727	21,050	19,694	17,639	19,221	19,853	23,125	20,090	20,115	21,645
čas Δt [s]	45	58	65	86	123	272	197	152	120	73	55	50
teplota T [°C]	12,0	12,0	11,9	11,8	11,8	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
ρ [kg · m⁻³]	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
$Q_{V_{m\acute{e}r}}$ [m³ · s⁻¹]	5,0E-04	4,2E-04	3,2E-04	2,5E-04	1,7E-04	0,7E-04	1,0E-04	1,4E-04	2,0E-04	2,9E-04	3,8E-04	4,5E-04
$Q_{V_{skut}}$ [m³ · s⁻¹]	4,7E-04	4,0E-04	3,0E-04	2,4E-04	1,6E-04	0,7E-04	1,0E-04	1,3E-04	1,9E-04	2,8E-04	3,7E-04	4,3E-04

Tabulka 5: Naměřené a vypočtené hodnoty pro kalibraci průtokoměru E

E												
číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m1 [kg]	1,233	1,243	1,246	1,248	1,243	1,247	1,243	1,244	1,261	1,246	1,252	1,245
m2 [kg]	23,110	23,651	21,817	21,848	21,876	20,584	21,321	21,378	23,513	21,230	21,478	23,443
Δm [kg]	21,877	22,408	20,571	20,600	20,633	19,337	20,078	20,134	22,251	19,983	20,225	22,198
čas Δt [s]	46	55	65	82	123	279	203	148	109	71	54	50
teplota T [°C]	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	11,9	11,9	11,8	11,8	11,8	11,8
ρ [kg · m⁻³]	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
$Q_{V_{m\acute{e}r}}$ [m³ · s⁻¹]	4,9E-04	4,1E-04	3,2E-04	2,5E-04	1,7E-04	0,7E-04	1,0E-04	1,4E-04	2,1E-04	2,8E-04	3,8E-04	4,5E-04
$Q_{V_{skut}}$ [m³ · s⁻¹]	4,8E-04	4,1E-04	3,1E-04	2,5E-04	1,7E-04	0,7E-04	1,0E-04	1,4E-04	2,0E-04	2,8E-04	3,8E-04	4,4E-04

Následně byla vytvořena kalibrační křivka neboli závislost skutečného objemového průtoku $Q_{V_{skut}}$ na měřeném $Q_{V_{m\acute{e}r}}$. Body byly proloženy přímkou, jejíž rovnice následně slouží pro přepočtení naměřeného průtoku na ten skutečný.

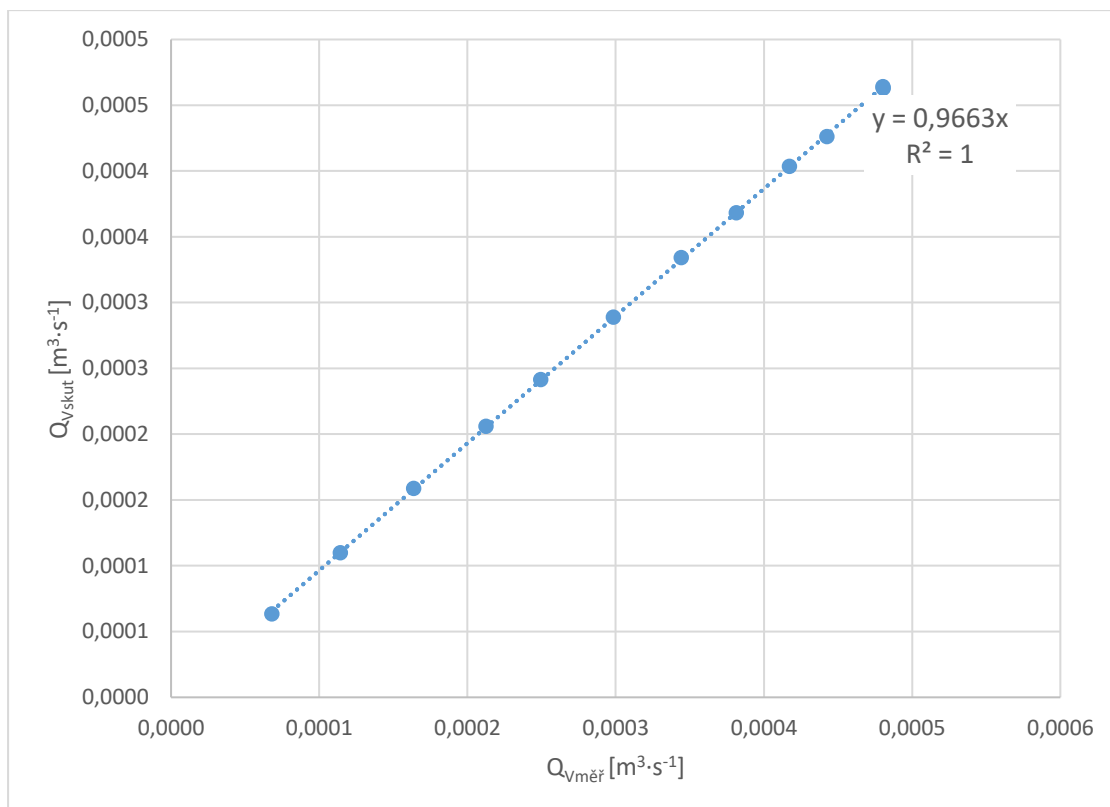
Byly vytvořeny dva případy pro každý průtokoměr. V prvním případě proložená přímkou vynuceně prochází bodem [0;0] a její rovnice má tvar (12), v případě druhém nulou neprochází a má kompletní tvar (13).

$$y = a \cdot x \quad (12)$$

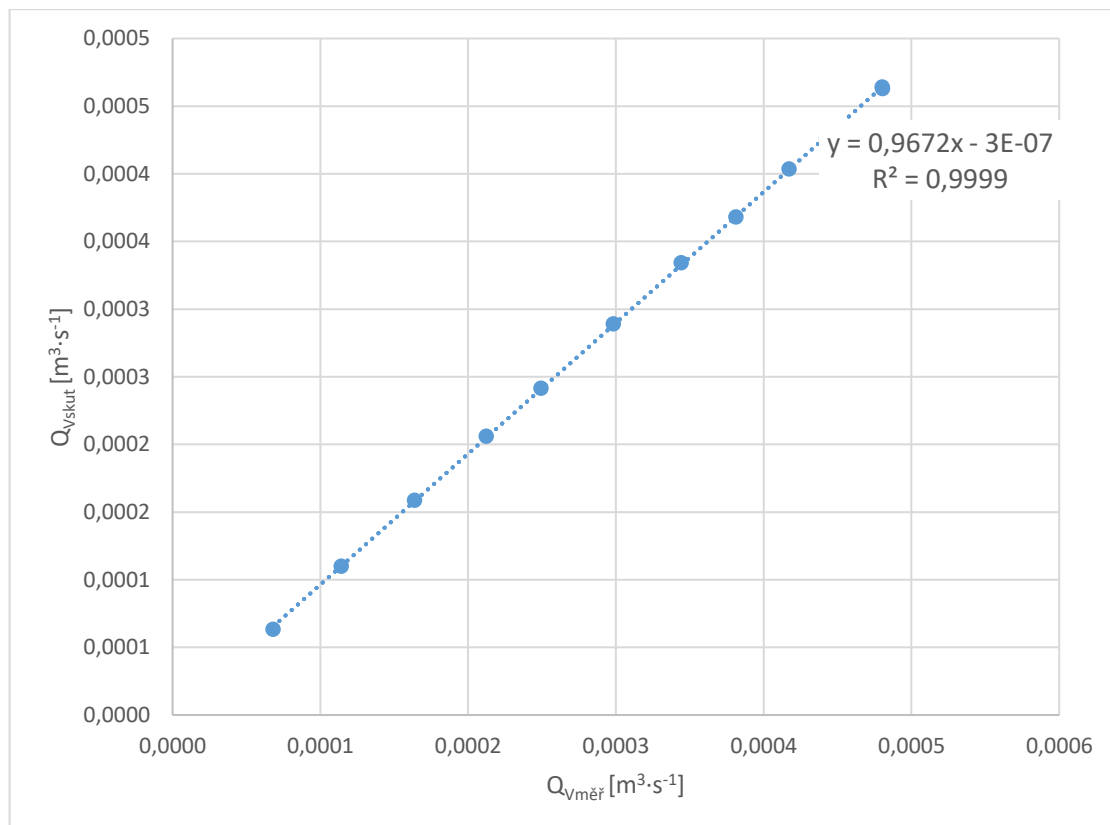
$$y = a \cdot x + b \quad (13)$$

V práci jsou proto představeny obě varianty grafů pro všechny průtokoměry. Vždy jsou pod sebou dva grafy pro stejný průtokoměr, první graf je vždy s přímkou začínající v počátku. Jedná se o grafy č. 1 až 10.

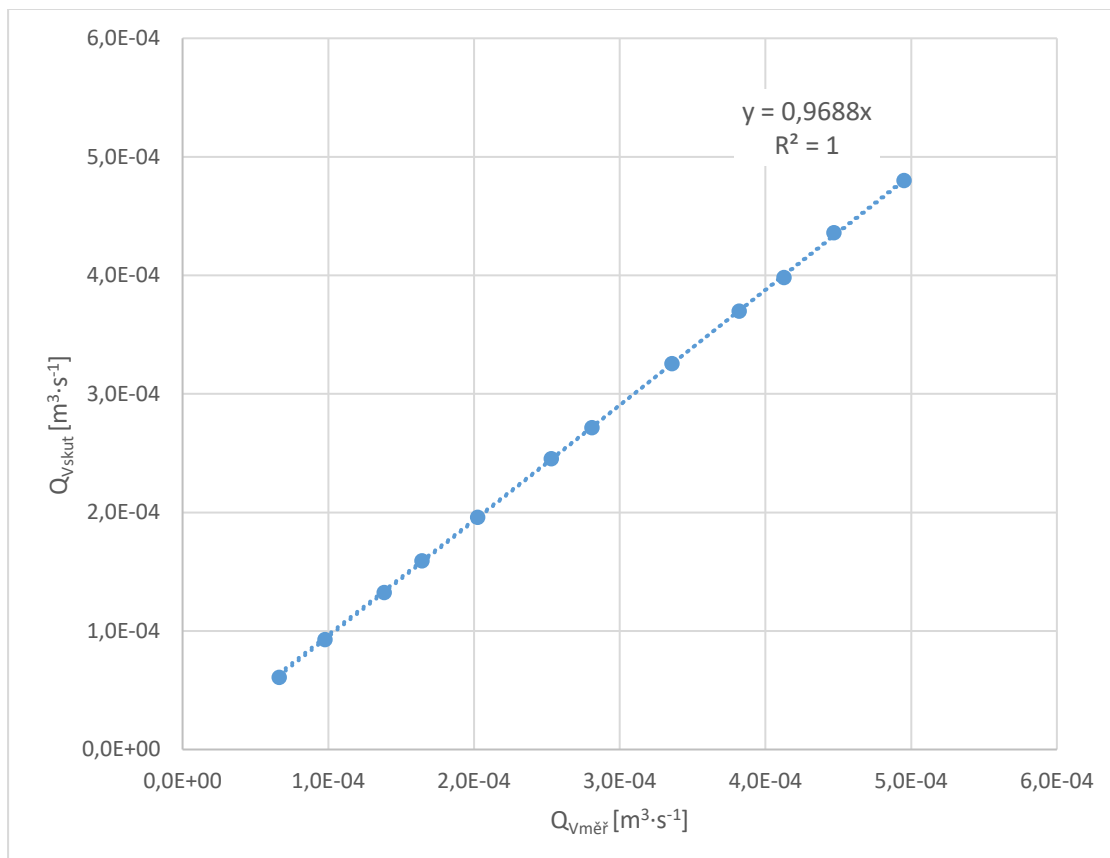
Varianta, jež byla následně použita při dalším měření a považujeme ji za výhodnější, je ta s přímkou ve tvaru (12). Značnou výhodou této varianty představuje možnost přepsání konstanty přímo v převodníku průtokoměru a přímé získání kalibrované hodnoty průtoku.



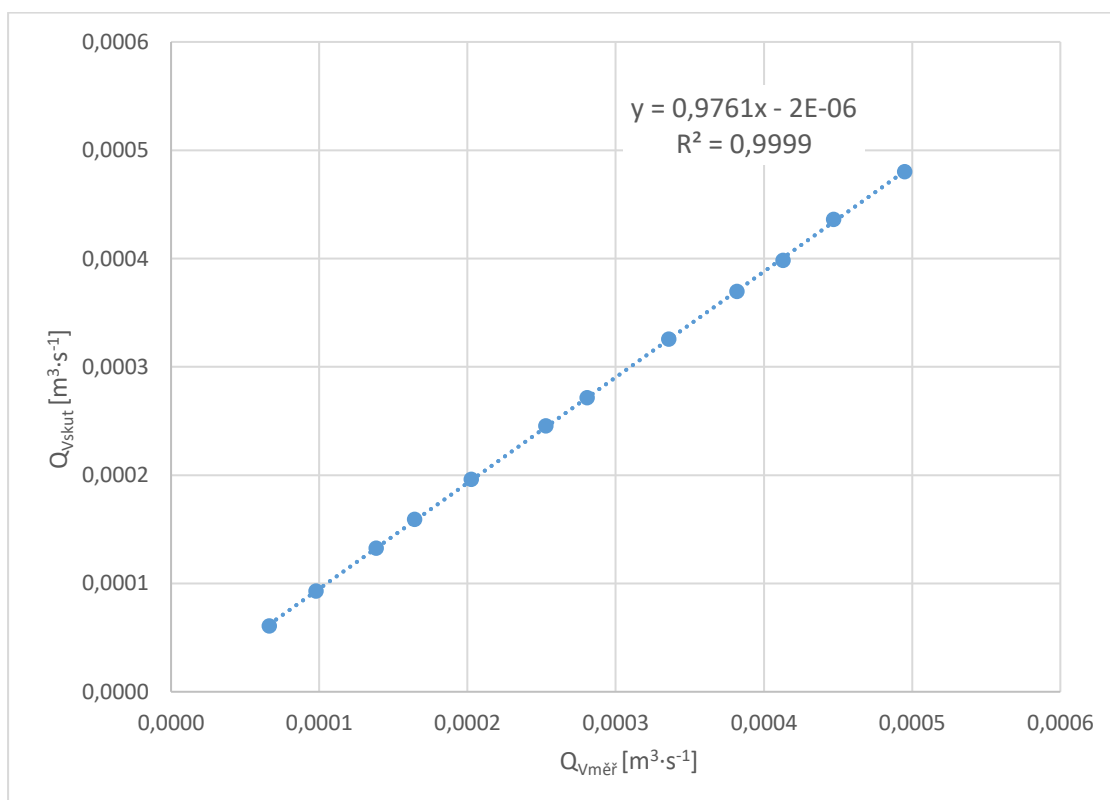
Graf 1: Kalibrační křivka průtokoměru A – varianta $y = a \cdot x$



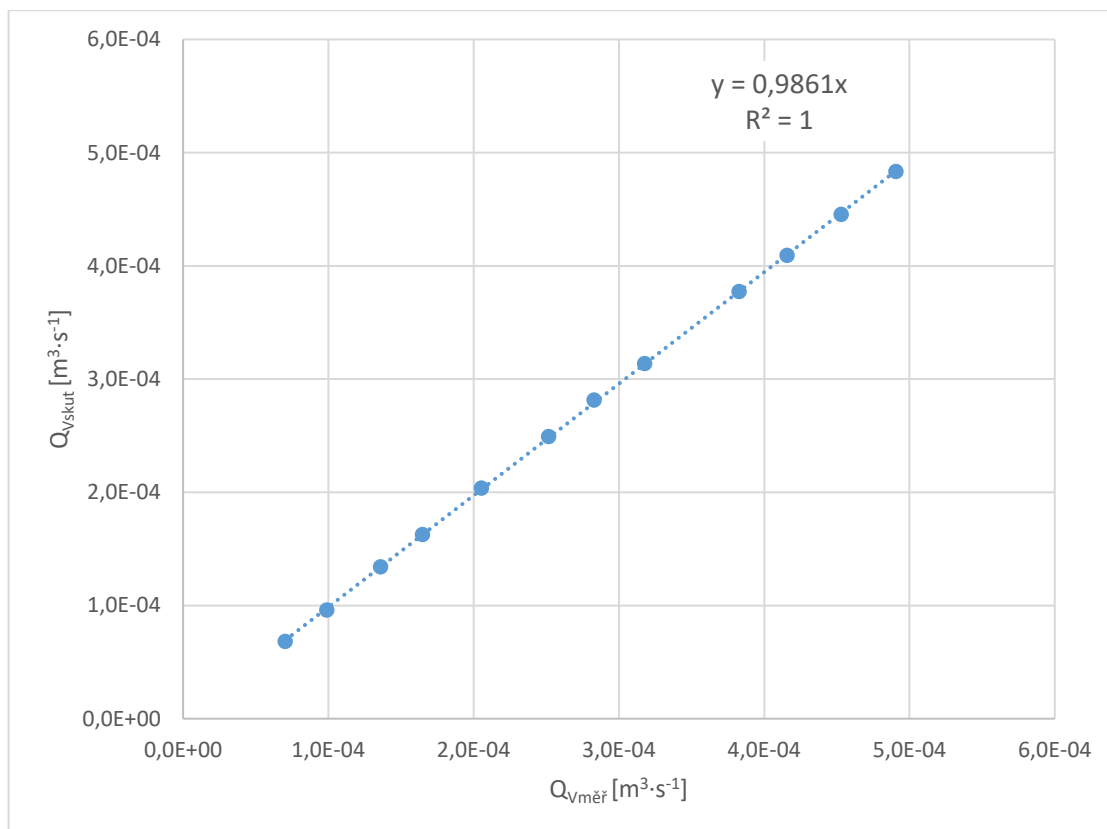
Graf 2: Kalibrační křivka průtokoměru A – varianta $y = a \cdot x + b$



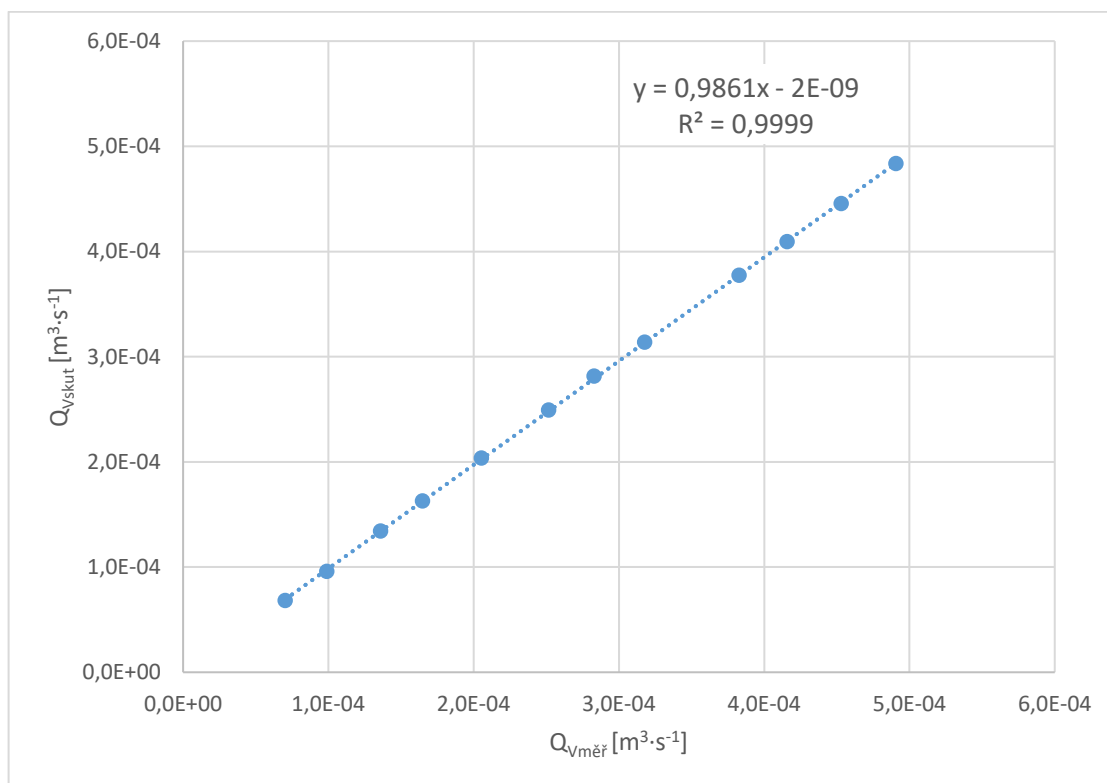
Graf 3: Kalibrační křivka průtokoměru B – varianta $y = a \cdot x$



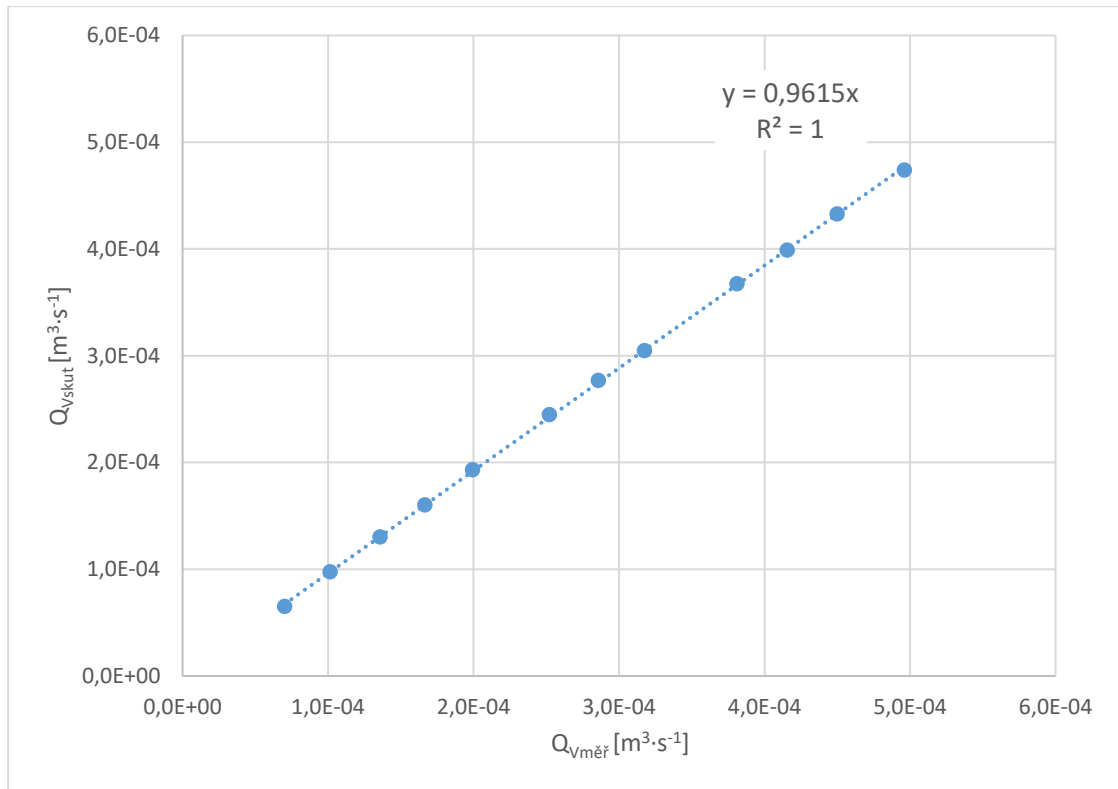
Graf 4: Kalibrační křivka průtokoměru B – varianta $y = a \cdot x + b$



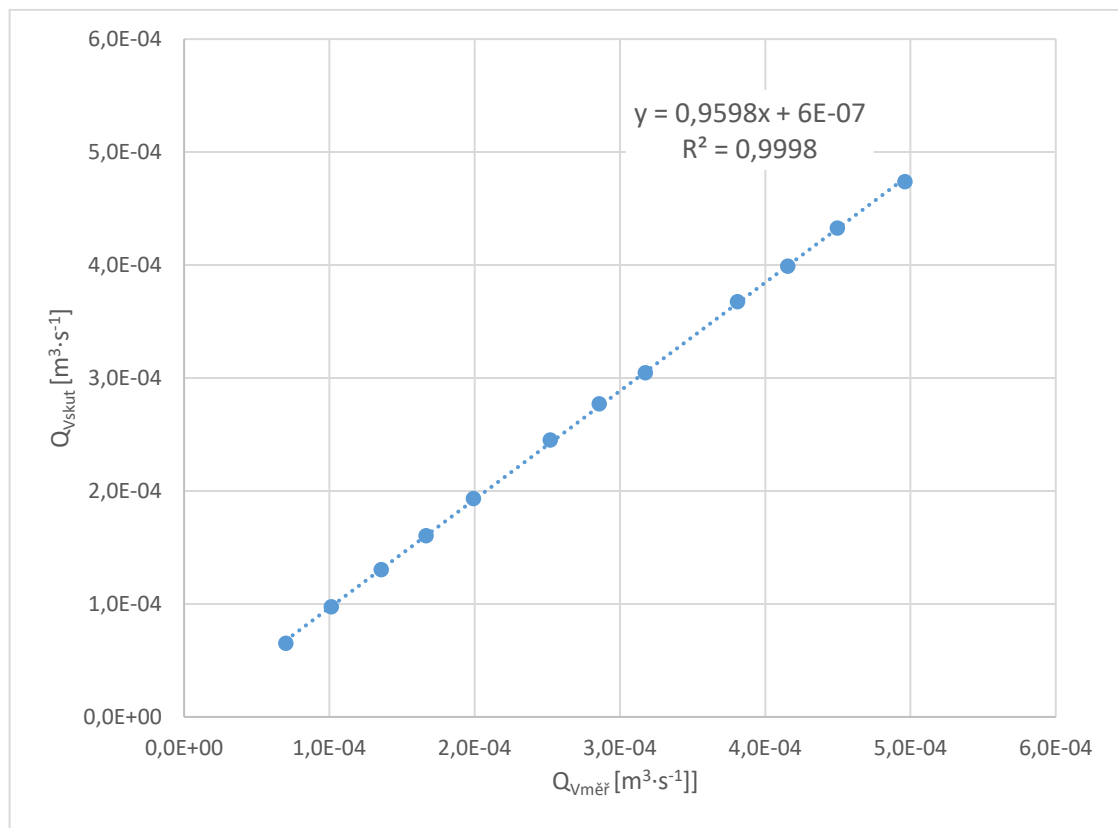
Graf 5: Kalibrační křivka průtokoměru C – varianta $y = a \cdot x$



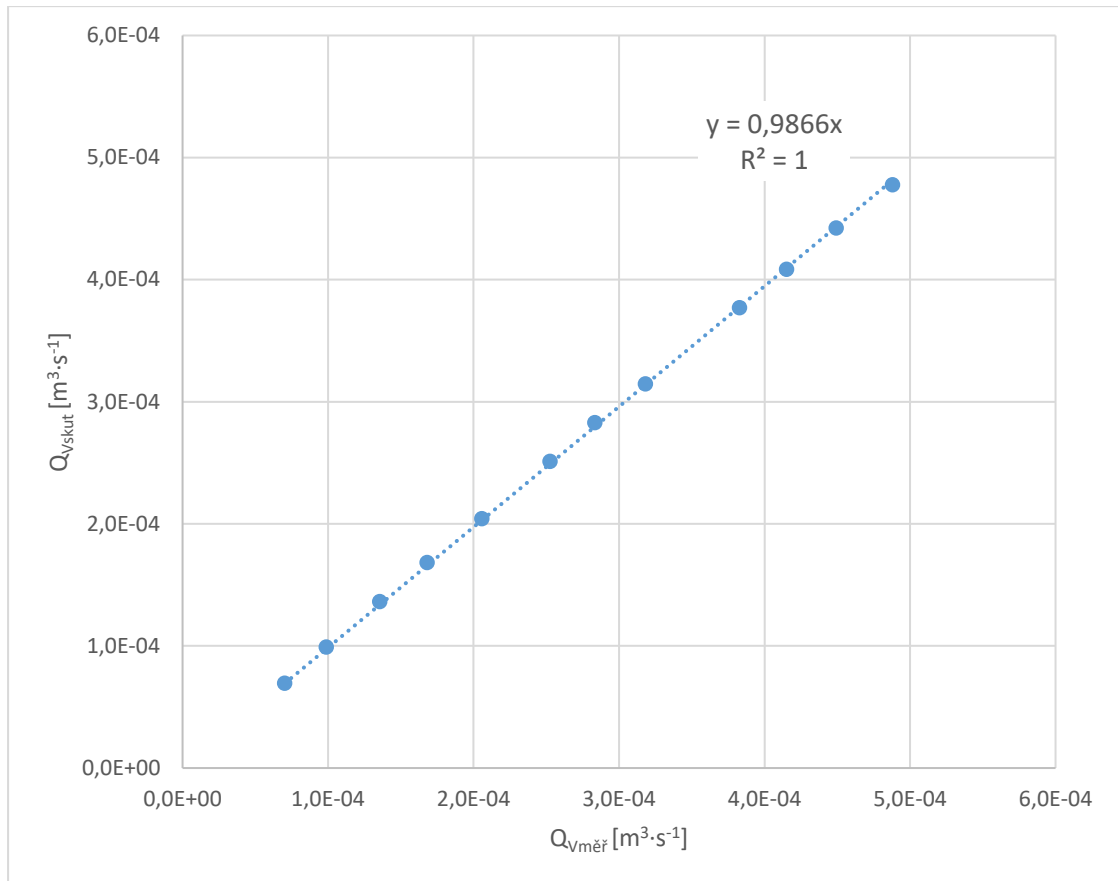
Graf 6: Kalibrační křivka průtokoměru C – varianta $y = a \cdot x + b$



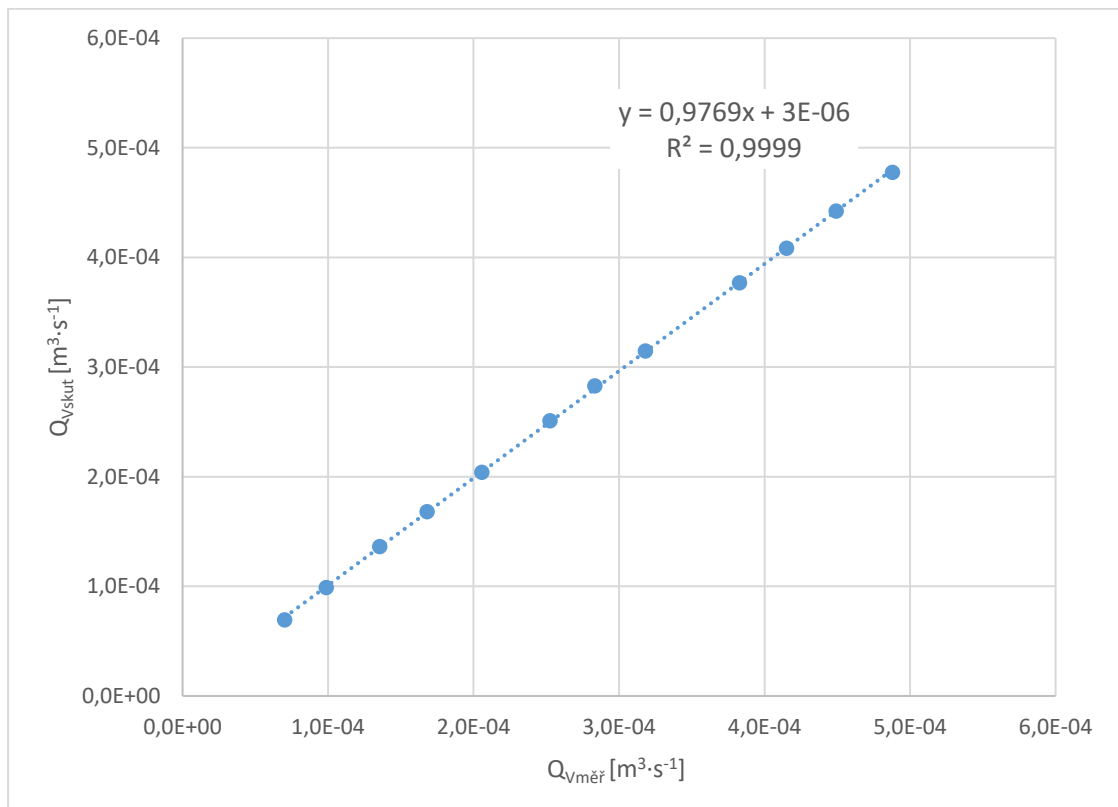
Graf 7: Kalibrační křivka průtokoměru D – varianta $y = a \cdot x$



Graf 8: Kalibrační křivka průtokoměru D – varianta $y = a \cdot x + b$



Graf 9: Kalibrační křivka průtokoměru E – varianta $y = a \cdot x$



Graf 10: Kalibrační křivka průtokoměru E – varianta $y = a \cdot x + b$

6 Měření charakteristiky průtokoměrů

6.1 Tvorba charakteristiky a její využití

Po vyhodnocení závislosti tlakové ztráty na průtoku byly jednotlivé body proloženy polynomickou křivkou druhého stupně začínající v bodě [0;0]. Následně byla vytvořena kvadratická rovnice této křivky ve tvaru (14), resp. (15) [17].

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x \quad (14)$$

$$\Delta p = a \cdot Q_V^2 + b \cdot Q_V \quad (15)$$

Kde $Q_V [m^3 \cdot s^{-1}]$ je naměřený objemový průtok a $\Delta p [Pa]$ je tlaková ztráta prvku.

Tato kvadratická rovnice (15) se mimo jiné využívá i pro modelování infiltrace v budovách a pro analýzu zkoušek těsnosti obálek budov. Obecně se dá tedy použít pro popis charakteristiky proudění úzkými otvory, které se nacházejí ve stavebních konstrukcích. Avšak princip kvadratické rovnice lze rovněž využít pro popis charakteristiky proudění v potrubí. Podrobnější popis využití kvadratické rovnice včetně experimentů, CFD výpočtů, výhod a porovnání s mocninným zákonem – viz [17].

Díky získané závislosti tlakové ztráty na průtoku můžeme pomocí kvadratické rovnice nastavit prvek zvaný „porous jump“ v simulačním programu ANSYS Fluent, čímž nahradíme reálné chování vřazeného hydraulického odporu a jeho vliv na proudění kapaliny v potrubním systému.

Toto je hlavní důvod a smysl měření charakteristiky a následné vytváření kvadratické rovnice v rámci této bakalářské práce, jejíž výsledky budou dále využity pro numerické modely soustav dlouhých paralelních trubek. Podrobnější návod na vkládání charakteristiky prvku „porous jump“ do programu ANSYS Fluent a jeho použití je k dispozici v [18].

6.2 Použité přístroje

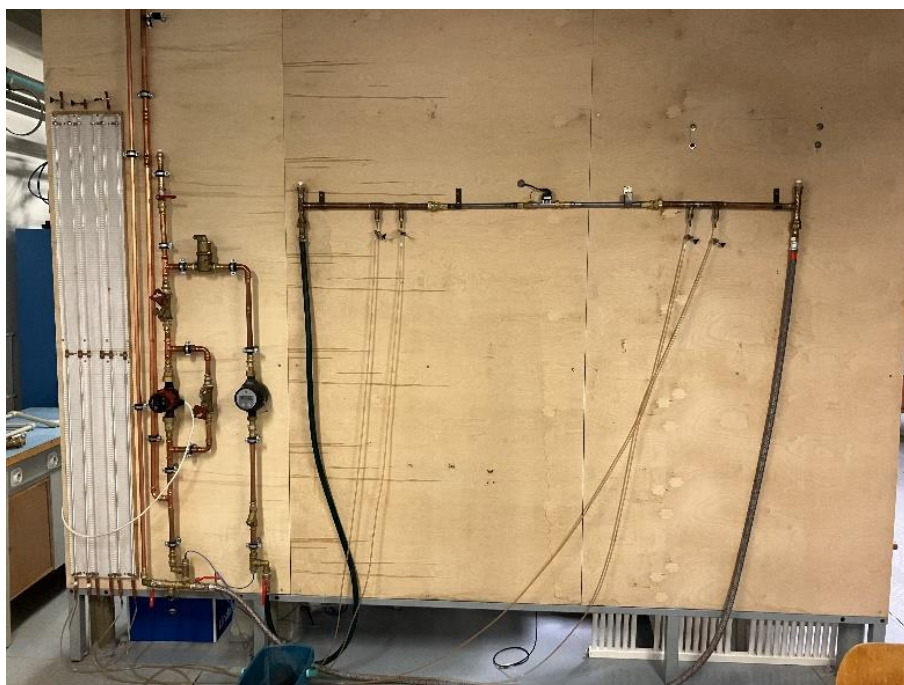
V měřicím okruhu jsme použili čerpadlo GRUNDFOS ALPHA 3 25-80 180, které bylo ovládáno pomocí aplikace „GO Remote“ v mobilním telefonu. Data se sbírala pomocí ústředny ALMEMO 3290, s využitím programu Almemo Control verze 5.13.

Zaznamenávané a vyhodnocované hodnoty průtoku byly měřeny pomocí průtokoměrů Ahlborn FVA 645 GV40QT uvedených v kapitole 5.1.1.

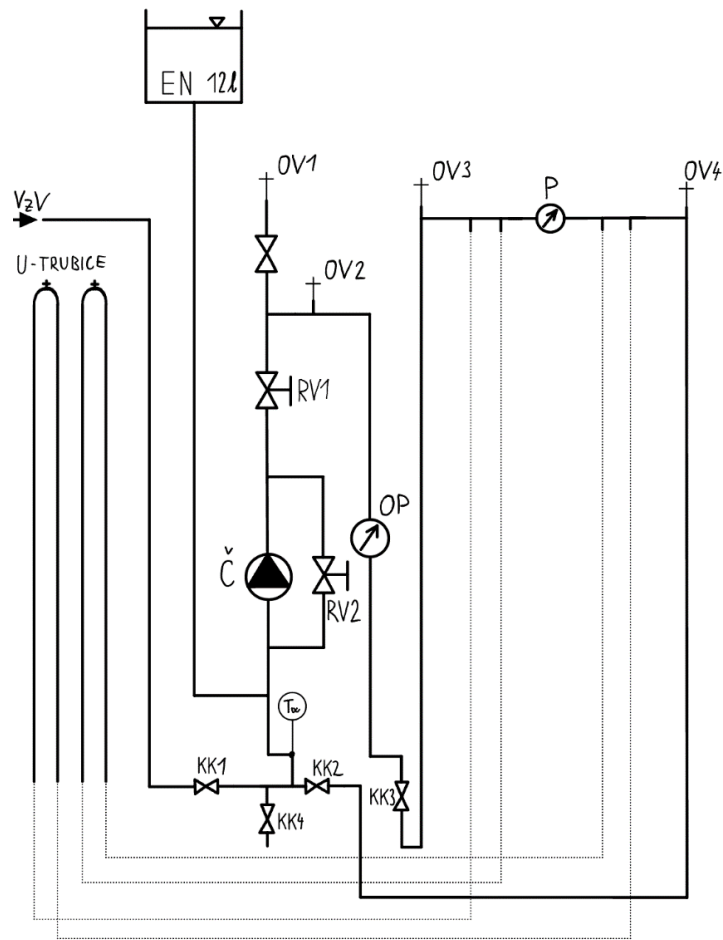
Dále bylo použito teplotní čidlo Pt100 a otevřená expanzní nádoba. Pro měření tlaků před a za prvkem sloužily U-trubice.

6.3 Měřicí trať

Fotografie soustavy z měření je zobrazena na Obr. 27, a schéma měřicí trati na Obr. 28. Expanzní nádrž musela být připojena k místu sání čerpadla, protože v případě, kdy tomu bylo naopak, byl odvzdušňovacími ventily 3 a 4 nasáván vzduch důsledkem podtlaku vytvořeného čerpadlem a soustava byla trvale zavzdušněna. Vznik tohoto nežádoucího podtlaku byl zamezen díky působení tlaku vody z expanzní nádrže.



Obr. 27: Fotografie měřicí trati



Obr. 28: Schéma měřicí tratě (legenda: Č – oběhové čerpadlo, OV – odvzdušňovací ventil, KK – kulový kohout, RV – regulační ventil, VzV – voda z vodovodu, EN – expanzní nádoba, Tw – teplotní čidlo, OP – orientační průtokoměr, P – měřený průtokoměr)

6.4 Postup měření

Vodu do soustavy bylo možné napustit z vodovodu, viz schéma na Obr. 28 (šipka VzV). V expanzní nádobě se udržovala přibližně stejná výška hladiny po celou dobu měření. Nejdříve bylo zapotřebí řádně odvzdušnit celou soustavu. Poté se vždy před jednotlivým měřením před i po zapnutí čerpadla odvzdušnila soustava pomocí odvzdušňovacích ventilů 1, 2, 3 a 4, viz Obr. 28, kdy ventil 2 je automatický.

Opět bylo měřeno 5 stejných průtokoměrů (A, B, C, D, E), jež jsou popsány v kapitole 5.1.1. Byly vždy namontovány na místo P ve schématu a připojeny do ústředny. Do ústředny bylo taktéž připojeno teplotní čidlo Pt100. Pomocí počítače

a programu ALMEMO Control 5.13 jsme zaznamenávali průtok a teplotu z průtokoměru a zároveň teplotu z teplotního čidla každých 5 sekund.

Pro každý průtokoměr jsme naměřili 5 bodů pro různé hodnoty průtoku. Požadovaný průtok byl regulován pomocí regulačního ventilu RV1 a nastavení výkonu čerpadla pomocí mobilní aplikace GO remote. Průtok byl také orientačně kontrolován pomocí průtokoměru OP.

Po ustálení požadovaného průtoku a odvodu soustavy byl zaznamenáván čas měření pro pozdější selekci hodnot z ústředny. Zároveň byly odečteny výšky hladin v U-trubicích pro výpočet tlakové ztráty. Tento postup byl opakován pro každý bod neboli každé nastavení průtoku.

6.5 Výpočty a vyhodnocení

Nejdříve bylo zapotřebí vyhodnotit teplotu vody. Z naměřených dat jsme získali průměrnou hodnotu teploty z průtokoměru t_1 [$^{\circ}\text{C}$] a teploty t_2 [$^{\circ}\text{C}$] získané pomocí teplotního čidla (T_w ve schématu na Obr. 28). Z této teploty jsme pomocí rovnice (16) vypočítali výslednou střední teplotu t [$^{\circ}\text{C}$], která byla použita pro výpočet hustoty vody dle vztahu (10) [16].

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (16)$$

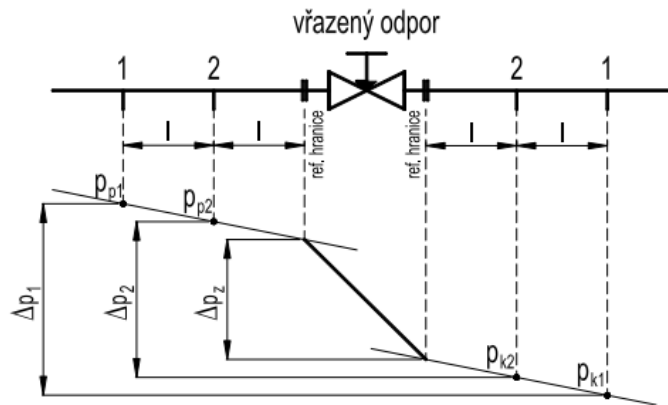
Pro každý bod měření byla zprůměrována hodnota objemového průtoku z ústředny za dobu, po kterou se daný bod měřil. Poté byl objemový průtok $Q_{V_{měř}}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] přepočítán na skutečný průtok $Q_{V_{skut}}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] díky kalibraci a použití rovnice z kalibrační křivky. Konkrétně jsme použili kalibrační křivku ve tvaru $y = a \cdot x$, což znamená, že měřený průtok byl přenásoben lineárním členem a . Tabulka 6 zobrazuje lineární členy, jež byly použity pro přepočet průtoku.

Tabulka 6: Hodnoty lineárních členů pro získání skutečného průtoku

KALIBRACE					
$y = a \cdot x$					
průtokoměr	A	B	C	D	E
koeficient a	0,9663	0,9688	0,9861	0,9615	0,9866

6.5.1 Výpočet tlakových ztrát

Použitá metodika měření vychází ze stanovení místní tlakové ztráty vřazeného hydraulického odporu v potrubí, viz Obr. 29, kde můžeme vidět i tlakové poměry na odběrech. V našem případě tento odpor představuje měřený průtokoměr. Před a za referenční hranicí průtokoměru jsou v rovných úsecích náběžných potrubí umístěny 2 odběry tlaku v definovaných totožných vzdálenostech na Obr. 29 značených jako „1“. To znamená, že snímáme tlaky před p_{p1} ; p_{p2} (tlak počáteční), a za p_{k1} ; p_{k2} (tlak koncový) vřazeným odporem (průtokoměrem).



Obr. 29: Průběh tlaku před a za vřazeným odporem [19]

Odběry byly zapojeny proti sobě do U-trubic a odečítáním výšky hladiny vodního sloupce na trubicích získáme h_{p1} ; h_{p2} ; h_{k1} ; h_{k2} [mm]. Poté z rozdílu výšek Δh_1 a Δh_2 a s použitím hustoty vody ρ_w [$kg \cdot m^{-3}$] a tíhového zrychlení g [$m \cdot s^{-2}$] získáme rozdíly tlaků Δp_1 a Δp_2 [Pa] dle vztahu (17).

$$\Delta p_i = \frac{\Delta h_i}{1000} \cdot g \cdot \rho_w = \frac{h_{pi} - h_{ki}}{1000} \cdot g \cdot \rho_w \quad (17)$$

Následně byla vyhodnocena tlaková ztráta Δp_z [Pa] právě v místě vřazeného průtokoměru za využití stanovení průběhu rozdílu tlaků před a za průtokoměrem. Jinými slovy můžeme mluvit o poklesu tlaku vlivem třecích ztrát v náběžném potrubí s odběry. Tlaková ztráta byla tedy vypočtena dle rovnice (18). [19] [16]

$$\Delta p_z = \Delta p_2 - (\Delta p_1 - \Delta p_2) \quad (18)$$

6.6 Výsledky

Následující tabulky 7–11 zobrazují veškeré naměřené a vypočtené hodnoty pro všechny průtokoměry a měřené body. Veškeré hodnoty v tabulkách byly zaokrouhleny s ohledem na nejistoty měření. V případě tlaku byly hodnoty zaokrouhleny na desítky, protože nejistoty uvedené v příloze 3 vychází v desítkách Pa. Nejistoty průtoků a hustot, viz kalibrace – kapitola 5.4. Veškeré výpočty nejistot jsou dostupné v příloženém Excelu.

Tabulka 7: Měřené a vypočtené hodnoty pro tvorbu charakteristiky průtokoměru A

průtokoměr	A				
měření	1	2	3	4	5
h_{p_1} [mm]	1811	1265	955	1083	1530
h_{k_1} [mm]	243	659	890	796	458
Δh_1 [mm]	1568	606	65	287	1072
h_{p_2} [mm]	1842	1287	971	1102	1555
h_{k_2} [mm]	279	684	907	817	491
Δh_2 [mm]	1563	603	64	285	1064
t [°C]	23,2				
$Q_{v_{m\ddot{e}r}} [m^3 \cdot s^{-1}]$	0,00033	0,00020	0,00006	0,00013	0,00027
$Q_{v_{skut}} [m^3 \cdot s^{-1}]$	0,00032	0,00019	0,00006	0,00013	0,00026
$\rho_w [kg \cdot m^{-3}]$	997	997	997	997	997
Δp_1 [Pa]	15330	5930	640	2810	10480
Δp_2 [Pa]	15280	5900	630	2790	10400
Δp_z [Pa]	15240	5870	620	2770	10330

Tabulka 8: Měřené a vypočtené hodnoty pro tvorbu charakteristiky průtokoměru B

průtokoměr	B				
měření	1	2	3	4	5
h_{p_1} [mm]	1805	1229	945	1060	1466
h_{k_1} [mm]	234	666	874	793	491
Δh_1 [mm]	1571	563	71	267	975
h_{p_2} [mm]	1822	1241	953	1069	1483
h_{k_2} [mm]	262	682	883	804	512
Δh_2 [mm]	1560	559	70	265	971
t [°C]	24,5				
$Q_{v_{m\ddot{e}r}} [m^3 \cdot s^{-1}]$	0,00034	0,00020	0,00007	0,00013	0,00026
$Q_{v_{skut}} [m^3 \cdot s^{-1}]$	0,00033	0,00019	0,00007	0,00013	0,00026
$\rho_w [kg \cdot m^{-3}]$	997	997	997	997	997
Δp_1 [Pa]	15360	5500	690	2610	9530
Δp_2 [Pa]	15250	5460	680	2590	9490
Δp_z [Pa]	15140	5430	670	2570	9450

Tabulka 9: Měřené a vypočtené hodnoty pro tvorbu charakteristiky průtokoměru C

průtokoměr	C				
měření	1	2	3	4	5
h_{p_1} [mm]	1815	1235	947	1065	1497
h_{k_1} [mm]	228	663	873	790	468
Δh_1 [mm]	1587	572	74	275	1029
h_{p_2} [mm]	1833	1247	956	1075	1514
h_{k_2} [mm]	257	679	881	801	492
Δh_2 [mm]	1576	568	75	274	1022
t [°C]	23,8				
$Q_{V_{měř}}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,00034	0,00020	0,00007	0,00013	0,00027
$Q_{V_{skut}}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,00033	0,00019	0,00007	0,00013	0,00026
ρ_w [$kg \cdot m^{-3}$]	997	997	997	997	997
Δp_1 [Pa]	15520	5590	720	2690	10060
Δp_2 [Pa]	15410	5550	730	2680	9990
Δp_z [Pa]	15300	5510	740	2670	9920

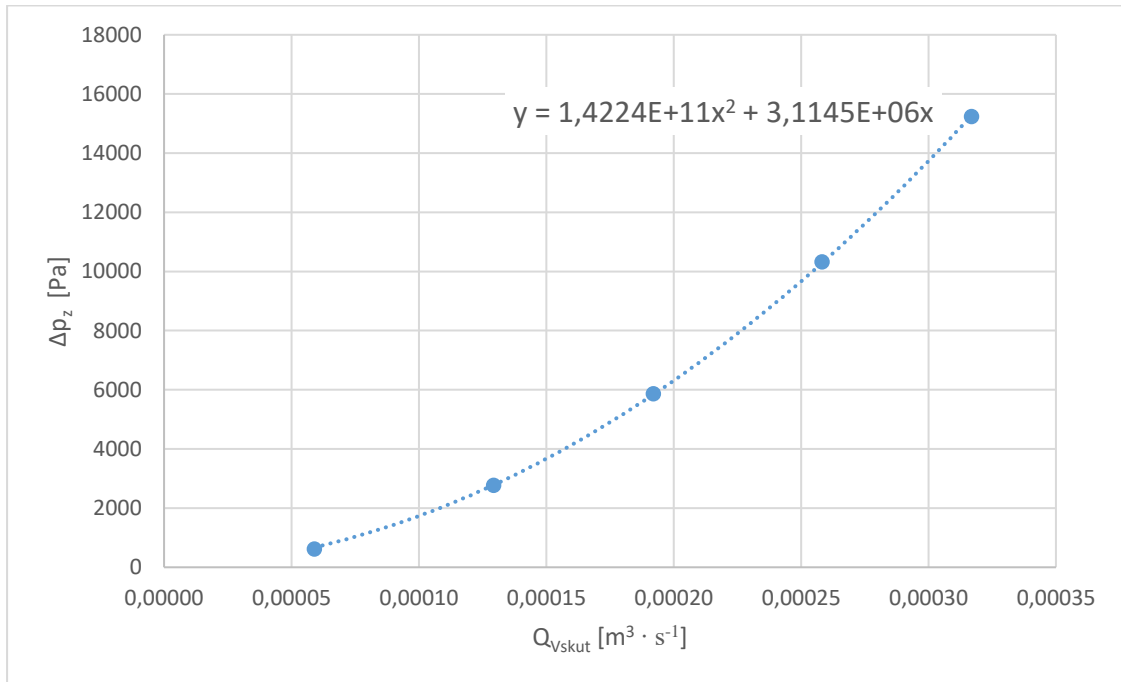
Tabulka 10: Měřené a vypočtené hodnoty pro tvorbu charakteristiky průtokoměru D

průtokoměr	D				
měření	1	2	3	4	5
h_{p_1} [mm]	1773	1268	953	1079	1535
h_{k_1} [mm]	271	656	889	797	453
Δh_1 [mm]	1502	612	64	282	1082
h_{p_2} [mm]	1800	1291	970	1097	1560
h_{k_2} [mm]	307	680	907	818	485
Δh_2 [mm]	1493	611	63	279	1075
t [°C]	23,8				
$Q_{V_{měř}}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,00032	0,00020	0,00006	0,00013	0,00027
$Q_{V_{skut}}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,00031	0,00019	0,00006	0,00013	0,00026
ρ_w [$kg \cdot m^{-3}$]	997	997	997	997	997
Δp_1 [Pa]	14690	5980	630	2760	10580
Δp_2 [Pa]	14600	5970	620	2730	10510
Δp_z [Pa]	14510	5960	610	2700	10440

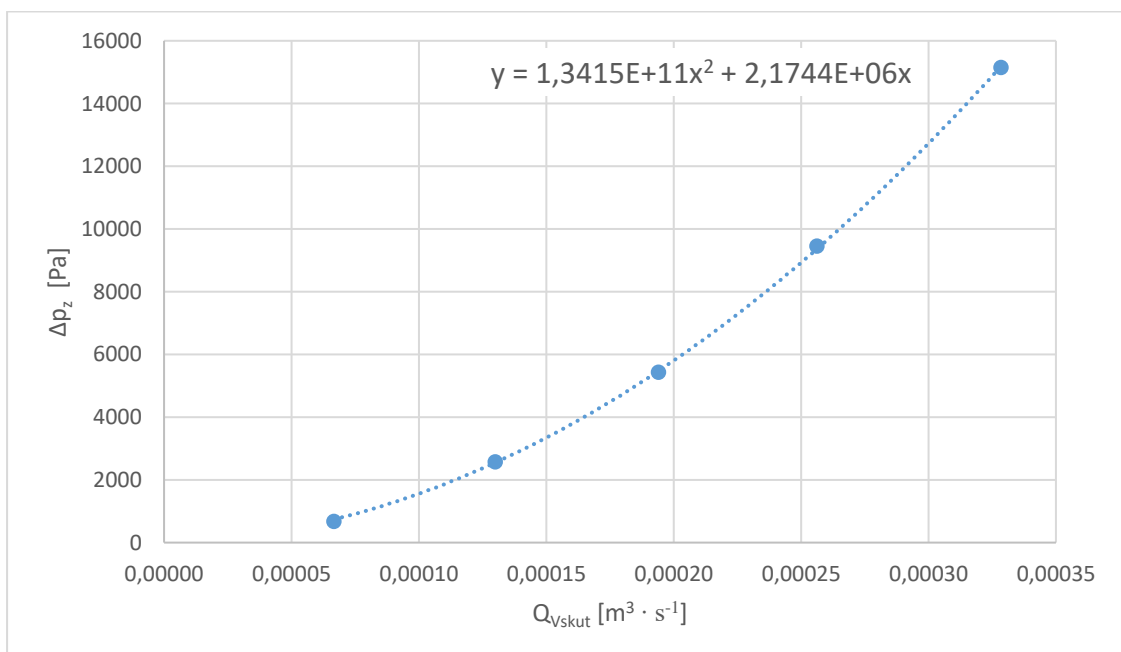
Tabulka 11: Měřené a vypočtené hodnoty pro tvorbu charakteristiky průtokoměru E

průtokoměr	E				
měření	1	2	3	4	5
h_{p_1} [mm]	1820	1280	954	1088	1550
h_{k_1} [mm]	241	651	892	795	448
Δh_1 [mm]	1579	629	62	293	1102
h_{p_2} [mm]	1848	1302	971	1107	1575
h_{k_2} [mm]	278	677	909	816	481
Δh_2 [mm]	1570	625	62	291	1094
t [°C]	22,9				
$Q_{V_{měř}}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,00032	0,00020	0,00006	0,00013	0,00027
$Q_{V_{skut}}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,00032	0,00020	0,00006	0,00013	0,00026
ρ_w [$kg \cdot m^{-3}$]	997	997	997	997	997
Δp_1 [Pa]	15440	6150	610	2870	10780
Δp_2 [Pa]	15350	6110	610	2850	10700
Δp_z [Pa]	15440	6150	610	2870	10780

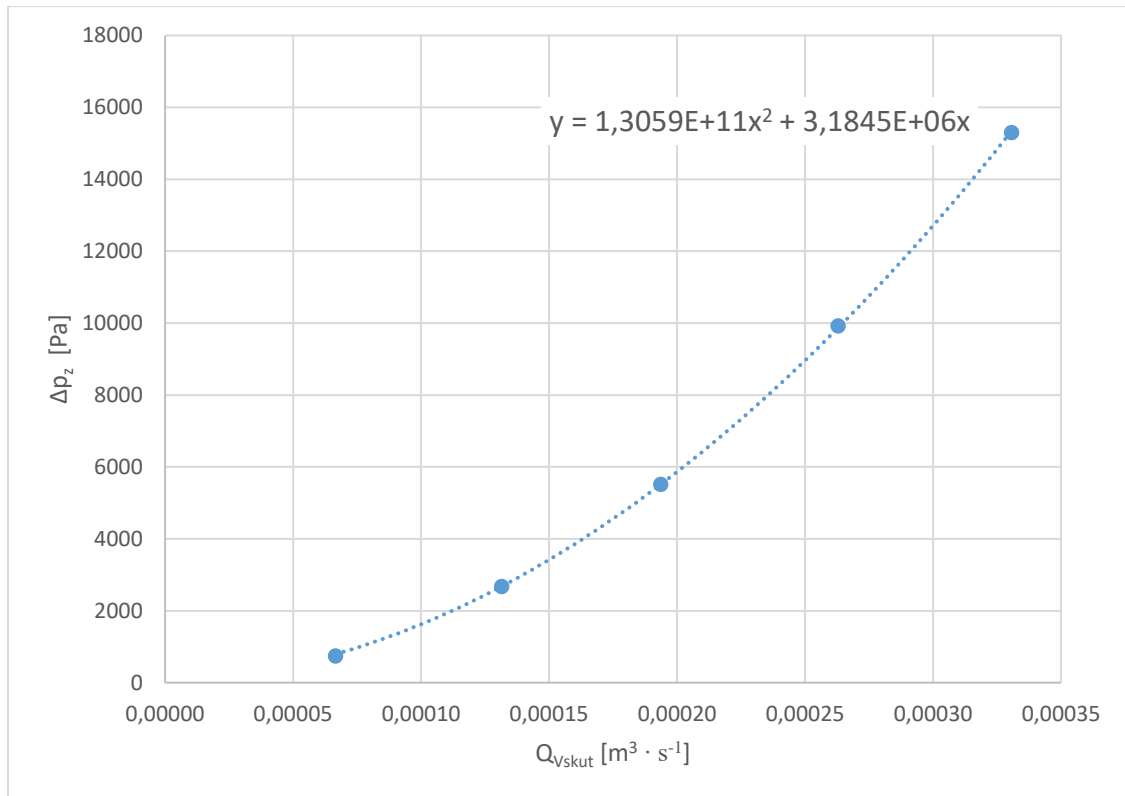
Na závěr byly vytvořeny výsledné charakteristiky neboli závislosti tlakové ztráty Δp_z [Pa] na objemovém průtoku $Q_{V_{skut}} [m^3 \cdot s^{-1}]$ (grafy č. 11–15). Křivka je polynommická druhého stupně a je vynucena procházet bodem [0;0]. Členy rovnice proložené křivky můžeme využít pro nahrazení prvku a modelování proudění, např. v programu Fluent. Využití a tvorba charakteristiky jsou blíže popsány v kapitole 6.1.



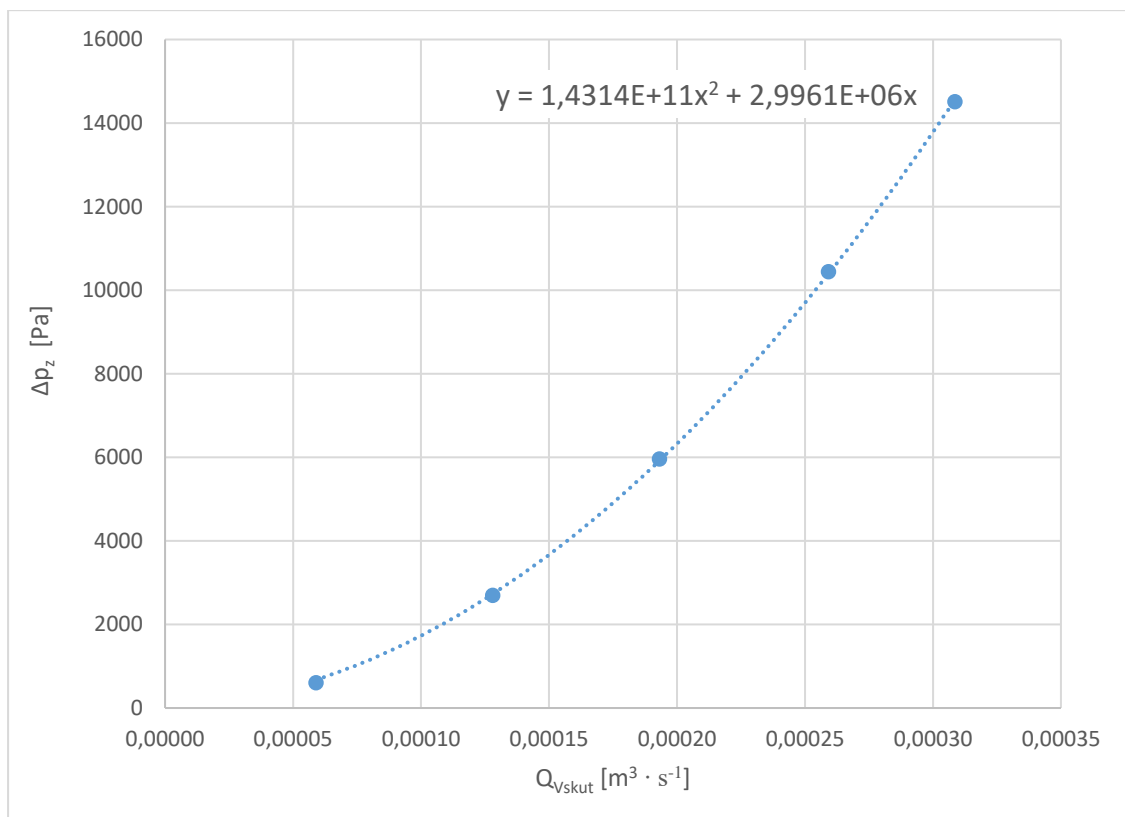
Graf 11: Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku – průtokoměr A



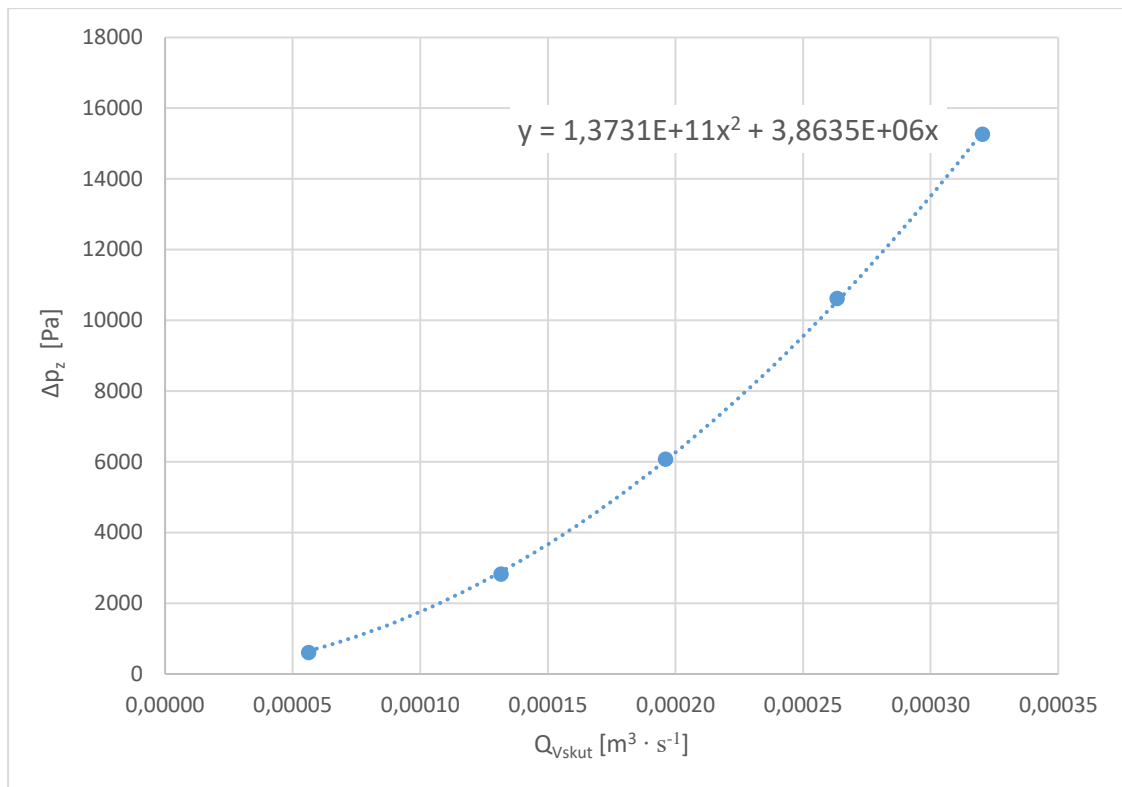
Graf 12: Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku – průtokoměr B



Graf 13: Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku – průtokoměr C



Graf 14: Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku – průtokoměr D



Graf 15: Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku – průtokoměr E

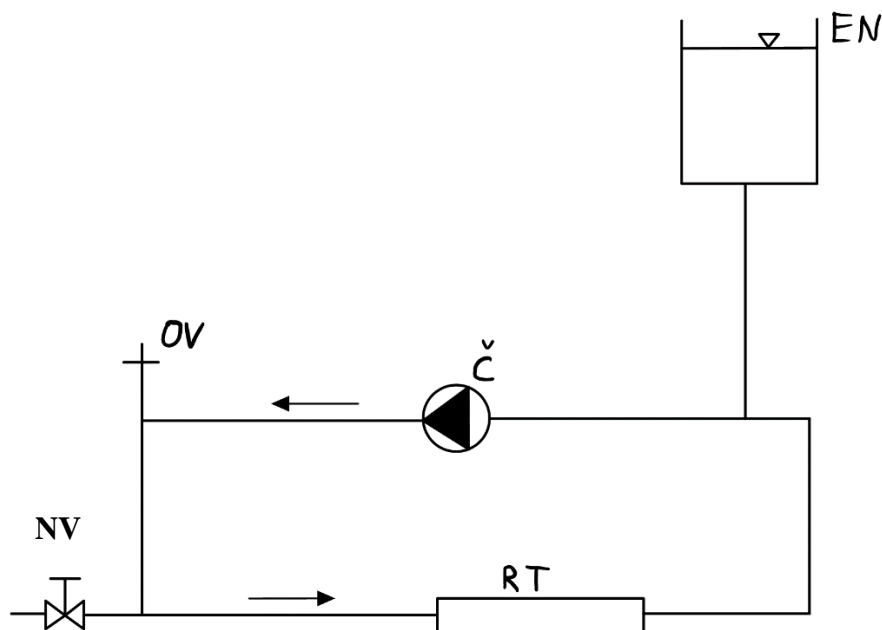
7 Měření průtoku v paralelním registru trubek

7.1 Použité přístroje

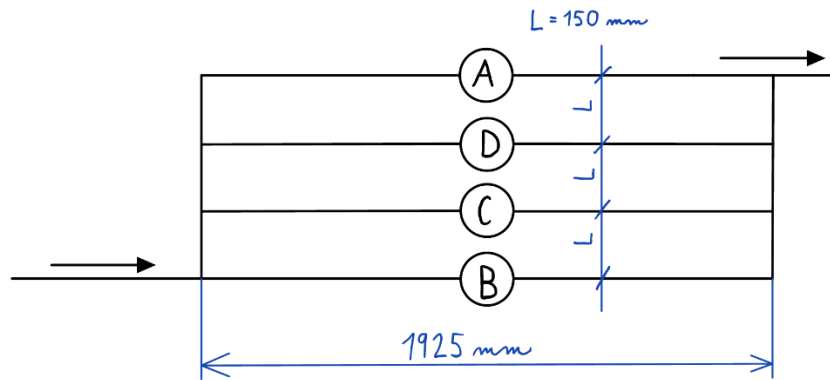
Pro měření průtoku byly použity průtokoměry Ahlborn FVA 645 GV40QT popsané v kapitole 5.1.1. Data byla sbírána pomocí ústředny Ahlborn ALMEMO 3290, s využitím PC a softwaru Ahlborn AMR Control 5.13. Proudění vody v okruhu zajišťovalo čerpadlo GRUNDFOS ALPHA 3 25-80 180.

7.2 Měřicí trat'

Registr trubek se skládá z rozdělovače a sběrače, mezi kterými jsou vedeny paralelně čtyři trubky. Zapojení přívodu a odvodu je asymetrické. Průměr trubek D je 28 x 1,5 mm. Uzavřený měřicí okruh byl připojen k expanzní nádobě. Schéma tratě je k dispozici na Obr. 30, schéma zapojení na Obr. 31 a fotografie z měření na Obr. 32.



Obr. 30: Schéma uzavřeného měřicího okruhu (legenda: Č – oběhové čerpadlo, EN – expanzní nádoba, OV – odvzdušňovací ventil, RT – registr trubek, NV – napouštěcí ventil)



Obr. 31: Schéma zapojení paralelních trubek (legenda: A, B, C, D – jednotlivé průtokoměry)



Obr. 32: Fotografie tratě z měření

7.3 Postup měření

Okruh byl napuštěn vodou a řádně odvzdušněn. Čerpadlo bylo nastaveno na maximální průtok, který byl postupně snižován pro 6 měřených pracovních bodů. Nastavování výkonu čerpadla probíhalo pomocí stanovení procentuálního využití z maximálního dopravního tlaku, kdy maximum bylo 100 % a minimum 32 %. Po ustálení průtoku vody byly odečítány hodnoty průtoku po dobu jedné minuty s intervalem odečtu 5 sekund.

7.4 Výsledky

Veškeré naměřené hodnoty byly přepočítány pomocí kalibračních křivek ve tvaru $y = a \cdot x$ představených v kapitole 5.4, a koeficienty a pro přepočet jsou k dispozici v Tabulce 6 na str. 51. Následně byly hodnoty objemového průtoku zprůměrovány za dobu měření pro každé nastavení režimu čerpadla a pro každou trubku v registru zvlášť. Hodnoty byly převedeny na jednotku [l/s]. Na závěr byl vypočítán celkový průměrný průtok registrem pro každé nastavení čerpadla, a bylo vyhodnoceno procentuální rozložení průtoku v jednotlivých trubkách vůči celkovému průtoku registrem. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 12 a zaokrouhlení hodnot bylo provedeno s ohledem na nejistoty měření. Objemové průtoky Q_{VA} , Q_{VB} , Q_{VC} , Q_{VD} odpovídají průtokoměrům A, B, C, D, jejichž zapojení v paralelním registru je znázorněno na Obr. 31.

Tabulka 12: Rozdělení průtoku v paralelním registru trubek

nastavení čerpadla	průtok v jednotlivých trubkách				celkový průtok registrem	relativní porovnání vůči celkovému průtoku			
	Q_{VA} [l/s]	Q_{VB} [l/s]	Q_{VC} [l/s]	Q_{VD} [l/s]	$Q_{V_{celkový}}$ [l/s]	A [%]	B [%]	C [%]	D [%]
100 %	0,13	0,20	0,16	0,12	0,62	21	33	26	20
90 %	0,14	0,20	0,16	0,11	0,61	22	33	26	18
75 %	0,15	0,19	0,15	0,12	0,61	24	31	24	20
50 %	0,11	0,13	0,10	0,11	0,44	25	29	22	25
40 %	0,08	0,10	0,08	0,07	0,33	25	31	23	21
32 %	0,06	0,08	0,06	0,04	0,25	25	33	25	18

Jednotlivé trasy mají přibližně stejnou délku, ovšem různý počet 90° ohybů proudění. Na tlakové ztrátě se podílí jak třecí, tak místní forma. Přibližná stejnost délek tras a rozdíl počtu ohybů naznačuje, že rozhodující budou místní ztráty. Z výsledků plyne, že největší průtok byl v každém režimu čerpadla naměřen průtokoměrem B, který je přímo naproti přívodu a voda za vstupem neprochází žádným ohybem – viz Obr. 31. V trubce s průtokoměrem A, která je poslední trubkou od přívodu, byl naměřen relativně větší průtok než v případě průtokoměru D, který se nachází blíže přívodu. Pravděpodobně je to způsobeno tlakovými podmínkami v rozdělovači, na které mají vliv místní ztráty na výstupech do trubek registru.

Také je vidět, že při nastavení čerpadla na 40 % je rozdíl mezi vnitřními trubkami s průtokoměry C, D poměrně nízký (1,69 %) oproti ostatním režimům. V případě nastavení výkonu na 50 % dochází také ke změně u vnitřních trubek registru, konkrétně ke zvýšení průtoku v trubce s průtokoměrem D. V tomto případě je hodnota průtoku D

větší než hodnota průtoku C, zatímco u všech ostatních režimů tomu bylo naopak. Je důležité zmínit, že při vyšším celkovém průtoku dochází k významnější nestabilitě rozdělení proudů v jednotlivých trubkách.

7.4.1 Posouzení kolísání průtoku v paralelních trubkách

Pro jednotlivou trubku lze jako ukazatel kolísání průtoku použít výběrovou směrodatnou odchylku pro soubor dat N průtoků danou trubkou (hodnota s pruhem představuje aritmetický průměr z N hodnot). Pro výpočet směrodatné odchylky byl použit vzorec (19), a v Tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky pro všechny režimy čerpadla a jednotlivé trubky. Výpočet je dostupný v příloženém Excelu.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\dot{V}_j - \bar{\dot{V}})^2} \quad (19)$$

Tabulka 13: Výběrová směrodatná odchylka průtoků

nastavení čerpadla	s_A [l/s]	s_B [l/s]	s_C [l/s]	s_D [l/s]
100 %	0,0195	0,0010	0,0005	0,0245
90 %	0,0172	0,0010	0,0005	0,0053
75 %	0,0188	0,0021	0,0005	0,0238
50 %	0,0011	0,0007	0,0004	0,0062
40 %	0,0061	0,0004	0,0002	0,0138
32 %	0,0099	0,0024	0,0004	0,0060

Ze směrodatných odchylek vyplývá, že při větším průtoku dochází ke značnějšímu rozptylu hodnot v případě trubky A, což je nejvzdálenější trubka od přívodu, a trubky C. Avšak u obou těchto trubek při nastavení čerpadla na 90 % a 40 % dojde k mírnému poklesu rozptylu hodnot. V případě trubky B a D nepozorujeme žádný trend růstu či poklesu rozptylu se zvyšujícím se průtokem, hodnoty se pro každé nastavení výkonu, jak zvětšují, tak zmenšují. V trubce C, která je druhou v pořadí po přívodu, dochází k nejmenšímu rozptylu hodnot, veškeré hodnoty směrodatných odchylek jsou až na čtvrtém desetinném místě [l/s]. Naopak řádově nejvýraznější rozptyl jsme naměřili v trubkách D a A, což jsou dvě nejvzdálenější trubky od přívodu. V prvních dvou trubkách registru tedy dochází k relativně menšímu kolísání průtoku oproti zbývajícím trubkám.

8 Závěr

Práce představila a vysvětlila principy a metody měření průtoku. Zároveň byly uvedeny nejznámější a nejpoužívanější typy průtokoměrů, vysvětleny jejich principy a také jejich výhody, nevýhody a vhodné použití.

V praktické části bakalářské práce bylo nejdříve úspěšně zkalibrováno 5 průtokoměrů pomocí metody vážení vody. Byl vysvětlen postup a princip kalibrace a byly prezentovány kalibrační křivky, jejichž rovnice slouží k přepočtu měřeného průtoku na skutečný.

Následně byla měřena charakteristika průtokoměru neboli závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku. Tlaková ztráta byla vypočítána pomocí odebíraných tlaků z míst před a za průtokoměrem. Díky předešlé kalibraci byl průtok přepočítán na skutečné hodnoty. Byl vysvětlen princip a smysl využití výstupu z charakteristik průtokoměrů pro nahrazení prvku při modelování proudění s použitím kvadratické rovnice křivky charakteristiky.

Na závěr byl změřen průtok v registru paralelních trubek. Na potrubí byly připojeny 4 stejně dlouhé paralelně řazené trubky. Cílem tohoto měření bylo zjistit, jak se průtok vody při průchodu paralelním registrem rozdělí do všech trubek. Bylo zjištěno, že rozhodující jsou místní tlakové ztráty. Zároveň bylo vyhodnoceno, že voda trubkami neprotéká rovnoměrně, největší hodnoty byly naměřeny v trubce hned za přívodem, a zároveň nestabilita rozdělení proudů roste s vyšším celkovým průtokem. Nejvýznamnější rozdíly kolísání průtoků pro různé hodnoty celkového průtoku byly zaznamenány u dvou prostředních trubek v paralelním registru.

Výsledky bakalářské práce budou dále využity v měření a počítačových simulacích různých systémů paralelních trubek.

Seznam použité literatury

- [1] VOLF, Jaromír a Josef JENČÍK. *Technická měření*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2138-6.
- [2] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin*. První vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1508-4.
- [3] Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů. *Elektrorevue* [online]. 2001, **2001**(49) [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html#_M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_objemov%C3%A9ho_pr%C5%AFtoku
- [4] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. *Mechanika tekutin*. První vydání. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0038-1.
- [5] BEJČEK, Ludvík a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0156-X.
- [6] DOEBELIN, Ernest O. *Measurement systems, Application and Design*. Fourth edition. Singapore: McGraw-Hill Publishing Company, 1990. ISBN 0-07-017338-9.
- [7] Plováckové průtokoměry – průtokoměry s proměnlivým průřezem. *Automa* [online]. 2016, **2016**(10), 4 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/plovackove-prutokomery-prutokomery-s-promenlivym-prurezem-2016_10_0_9085/
- [8] Turbinové průtokoměry a jejich vlastnosti. *Automa* [online]. 2002, **2002**(2), 4 [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/turbinove-prutokomery-a-jejich-vlastnosti-2002_02_28343_1643/
- [9] Průtokoměr s oválnými koly. *Automa* [online]. 2016, **2016**(3), 2 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/prutokomer-s-ovalnymi-koly-2016_03_54589_7965/
- [10] CHEREMISINOFF, Nicholas a Paul CHEREMISINOFF. *Flow measurement for engineers and scientists*. 1. New York: M. Dekker, INC., 1988. ISBN 08-247-7831-6.
- [11] Principy měření průtoku a množství tekutin. *Automa* [online]. 2002, **2002**(2), 4 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/principy-mereni-prutoku-a-mnozstvi-tekutin-2002_02_28336_320/
- [12] ELEKTROMAGNETICKÉ PRŮTOKOMĚRY - MĚŘICÍ PRINCIP. In: *Profess* [online]. Plzeň: PROFESS, spol. s r.o., 2023 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://www.profess.cz/cs/pci/elektromagneticke_prutokomery
- [13] Tepelné hmotnostní průtokoměry a regulátory. *Automa* [online]. 2003, **2003**(12), 8 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/tepelne-hmotnostni-prutokomery-a-regulatory-2003_12_29006_599/
- [14] KADLEC, Karel. Vírové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. *Automa* [online]. 2014, **2014**(10), 6 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/web-clanky/virove-prutokomery-%E2%80%93-princip-vlastnosti-a-pouziti-53030_07323/

- [15] *ALMEMO Manual: Flow measurement, basic principles*. 9. edition. Holzkirchen: Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, 83607 Holzkirchen, Germany, 2011.
- [16] MATUŠKA, Tomáš. *Experimentální metody v technice prostředí*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3291-4.
- [17] CHIU, Y.H. a D.W. ETHERIDGE. Calculations and Notes on the Quadratic and Power Law Equations for Modelling Infiltration. *International Journal of Ventilation*. 2016, **1**(1), 65-77. ISSN 1473-3315. Dostupné z: doi:10.1080/14733315.2002.11683623
- [18] *ANSYS® Fluent Theory Guide*. 2020 R2. Canonsburg: ANSYS, Inc, 2020.
- [19] ZMRHAL, V. Tlakové ztráty kapilárních rohoží - Experimentální měření (část 1). *Vytápění, větrání, instalace*. 2012, **21**(4), 29-34. ISSN 1210-1389.
- [20] *Ahlborn* [online]. Praha: AHLBORN, měřicí a regulační technika, 2023 [cit. 2023-06-07]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/prislusenstvi/prutokomer-snimac-ahlborn-almemo-fva645gv40qt5.html>

Seznam příloh

Příloha 1 – technický list průtokoměru [20]

Průtok

Snímače průtoku kapalin FVA 645 GVx

Provedení z ušlechtilé oceli, bez pohyblivých částí, s integrovaným měřením teploty



- měřicí trať v robustním provedení z ušlechtilé oceli, vhodném pro průmyslové použití
- bez pohyblivých částí, nulové opotřebení
- integrované měření teploty
- nízká ztráta tlaku
- široký teplotní rozsah
- rychlá doba odezvy
- použití ve vodě a glykolu s vodou
- k měření tepelného množství v topných a chladicích zařízeních

Technické údaje:

Průtok:		Ztráta tlaku:	typ. 0,1 bar při průtoku 50 % z koncové hodnoty
Princip měření:	tlaková pulzace, Kármánova vírová řada	Podmínky použití:	
Měřicí rozsah:	viz Provedení	Média:	voda glykol s vodou (max. 42 % glykolu)
Přesnost:	u média - voda 0... 100 °C ±1,5 % z koncové hodnoty	FVA645GV12QT/40QT s viskozitou < 4 mm ² /s, FVA645GV100QT/200QT s viskozitou < 2 mm ² /s	
FVA645GV12QT/40QT: u média - glykol s vodou (42 %), 30...100 °C (viskozita < 4 mm ² /s) ±5 % z koncové hodnoty		Teplota média:	0 až 100°C
Rozlišení:	viz Provedení	Teplota prostředí:	-25 až 60°C
Doba odezvy (63%):	< 1 s (< 3 s für FVA645GV12QT)	Vlhkost prostředí:	do 95% RH, nekondenzující
Teplota:		Elektrické připojení:	
Měřicí rozsah:	0 až 100°C	Výstupní signál:	2 x 0,5 až 3,5 V
Přesnost:	±1 K při 25...80°C ±2 K při 0...100°C	Napájení:	5 V DC (±5%), <10 mA, přes konektor ALMEMO®
Rozlišení:	0,5 K	Připojení:	senzor s připojovacím kabelem 2,9 m a konektorem ALMEMO®
Doba odezvy (63%):	<1 s při průtoku 50 % z koncové hodnoty	Montážní délka:	viz Provedení
Procesní připojení:	2 x vnější závity, viz Provedení	Materiály (v kontaktu s médii):	antikorozní vrstva, EPDM, PPS, PPA 40-GF
Tlak:	10 bar (průtlak > 16 bar)	Trubka:	ušlechtilá ocel 1.4408 (vnitřní trubka: PPA 40-GF)

Provedení

Snímač průtoku a teploty s měřicí trať, včetně připojovacího kabelu ALMEMO® délka 2,9 m

Rozsah	Rozlišení	Procesní připojení:	Montážní délka:	Obj. č.
1 až 12 l/min	0,06 l/min	vnější závít 3/4"	cca 110 mm	FVA645GV12QT
2 až 40 l/min	0,2 l/min	vnější závít 3/4"	cca 110 mm	FVA645GV40QT
5 až 100 l/min	0,5 l/min	vnější závít G 1"	ca. 129 mm	FVA645GV100QT
10 až 200 l/min	1,0 l/min	vnější závít G 1 1/4"	cca 137,5 mm	FVA645GV200QT

Tovární kalibrace KV91xx, průtok, pro snímač, viz kapitola Kalibrační certifikáty

Příloha 2 – tabulky sloužící pro výběr průtokoměru [5]

Princip průtokoměru	Tekutina (K, P, Pa)	Přesnost (typická hodnota)
Clona	K, P, Pa	0,6–2 % z rozsahu
Venturiho trubice	K, P	0,6–2 % z rozsahu
Rotametr	K, P	2 % z rozsahu
Terčik	K, P	< 0,1–1 % z údaje
Turbina	K, P, Pa	0,1–2 % z údaje
Vírový	K, P, Pa	0,5–1 % z údaje
Elektromagnetický	K	0,2–1 % z údaje
Ultrazvukový (Doppler)	K, P	1 % z údaje – 2 % z rozsahu
Ultrazvukový (klasický)	K, P, Pa	0,5 % z údaje – 2 % z rozsahu
Coriolisův	K, P, Pa	0,1–0,5 % z rozsahu
Tepelný	K, P, Pa	0,5 % z údaje – 2 % z rozsahu
Vážicí systémy	K, pevné látky	0,1 % z údaje
LDA	K, P, Pa	1 % z údaje
Značkovací	K, P, Pa	1–2 % z údaje
Přepady (otevřené kanály)	K	3–5 % z údaje
Žlaby (otevřené kanály)	K	3–5 % z údaje

Princip průtokoměru	Nominální průměr [mm/inch]	Max. teplota [°C/°F]	Max. tlak [bar/psi]
Clona	1–1000 (0,04–40")	1000/1830	500/7250
Venturiho trubice	25–4000 (1–160")	1000/1830	600/8700
Rotametr	2–150 (0,08–6")	450/840	100/1450
Terčik	5–400 (0,2–16")	250/480	50/700
Turbina	5–800 (0,2–32")	500/930	3000/43500
Vírový	15–400 (0,5–16")	450/750	250/3600
Elektromagnetický	1–3000 (0,04–120")	250/480	150/2200
Ultrazvukový (Doppler)	>5 (0,2")	200/390	200/2900
Ultrazvukový (klasický)	>2 (0,08")	200/390	200/2900
Coriolisův	1–150 (0, 04–6")	400/750	400/5800
Tepelný	1–2500 (0, 04–100")	400/570	100/1450
Vážicí systémy	bez omezení	150/300	okolní tlak
LDA	>25 (1")	150/300	200/2900
Značkovací	bez omezení	bez omezení	–
Přepady (otevřené kanály)	>25 (1")	teplota okolí	okolní tlak
Žlaby (otevřené kanály)	>100 (4")	teplota okolí	okolní tlak
Korelace	25–300 (1–12")	250/400	150/2200

Princip průtokoměru	Opakovatelnost	Rozsah	Min. hodnota Reynoldsova čísla
Clona	0,5 % z údaje	3–10:1	3000
Venturiho trubice	0,5 % z údaje	4–10:1	10000
Rotametr	1 % z údaje	10:1	–
Terčik	0,02 % z údaje	50:1	>100
Turbina	0,02 % z údaje	25:1	5000
Vírový	0,2 % z údaje	15:1	5000
Elektromagnetický	0,1 % z údaje	>100:1	2000
Ultrazvukový (Doppler)	0,5 % z údaje	>20:1	5000
Ultrazvukový (klasický)	0,25 % z údaje	>20:1	10000
Coriolisův	0,02 % z údaje	>100:1	1000
Tepelný	0,5 % z údaje	>100:1	5000
Vážicí systémy	0,01 % z údaje	50:1	>100
LDA	0,02 % z údaje	2000:1	>100
Značkovací	1 % z údaje	1000:1	5000
Přepady (otevřené kanály)	1–2 % z údaje	400:1	–
Žlaby (otevřené kanály)	1–2 % z údaje	120:1	–
Korelace	0,5 % z údaje	100:1	5000

*Příloha 3: Určení a výpočty nejistot a směrodatné odchylky***Chyba měření průtokoměrů:**Výrobce udává nejistotu $\pm 1,5\%$ z max. hodnoty:

$$\pm 1,5\% \text{ z } 40 \text{ l/min} = \pm 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Nejistota počítaného průtoku při kalibraci:

Standardní nejistota typu B je funkcí měřených veličin, v našem případě se jedná o hustoty, hmotnost a čas.

Nejistota času:

$$u_t = 2 \cdot \text{reakční doba} = 2 \cdot \pm 0,4 \text{ s} = \pm 0,8 \text{ s}$$

Nejistota hmotnosti:

$$u_m = \text{nejistota udávaná výrobcem} + \frac{1}{2} \text{ nejmenšího dílku} = \pm 0,3 \text{ g} \pm 0,05$$

$$u_m = \pm 0,35 \text{ g}$$

Nejistota hustoty odhadnuta:

$$u_\rho \pm 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Zjišťovanou veličinou je objemová průtok:

$$\dot{V} = \frac{1}{\rho} \frac{m_2 - m_1}{\Delta t}$$

Vzorec pro výpočet nejistoty typu B pro náš případ:

$$u_{B,\dot{V}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \rho} u_\rho\right)^2 + 2\left(\frac{\partial f}{\partial m} u_m\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t} u_t\right)^2}$$

$$u_{B,\dot{V}} = \sqrt{\left[\frac{\Delta m}{\Delta t} \left(-\frac{1}{\rho^2}\right) \cdot 1\right]^2 + 2\left(\frac{1}{\rho \cdot \Delta t} \cdot 0,35\right)^2 + \left[\frac{\Delta m}{\rho} \left(-\frac{1}{t^2}\right) \cdot 0,8\right]^2}$$

Výpočet pro hodnoty při max. průtoku u kalibrace průtokoměru A:

$$u_{B,\dot{V}} = \sqrt{\left[\frac{24,0537}{52,0} \left(-\frac{1}{999,0577804^2}\right) \cdot 1\right]^2 + 2\left(\frac{1}{999,0577804 \cdot 52,0} \cdot 0,00035\right)^2 + \left[\frac{24,0537}{999,0577804} \left(-\frac{1}{52,0^2}\right) \cdot 0,8\right]^2} =$$

$$= \pm 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Ostatní hodnoty byly vypočteny stejně a jsou uvedené v následující tabulce, a výpočty jsou dostupné v příloženém výpočetním excelu.

	max $Q_V - A$	min $Q_V - A$	max $Q_V - B$	min $Q_V - B$	max $Q_V - C$	min $Q_V - C$	max $Q_V - D$	min $Q_V - D$	max $Q_V - E$	min $Q_V - E$
Δm [kg]	24,054	16,151	22,154	15,732	21,450	18,348	21,061	17,639	21,877	19,337
Δt [s]	52	255	46	259	44	269	45	272	46	279
ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
$\pm u_{B,\dot{V}}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	2,7E-05	12,7E-05	2,4E-05	12,8E-05	2,4E-05	13,4E-05	2,4E-05	13,5E-05	2,4E-05	13,8E-05

Nejistota výpočtu tlaku při měření charakteristiky $\Delta p = f(V)$:

Měření tlakového rozdílu probíhalo na 2 U-manometrech, tedy celkem 4 odečty výšky, každý s nejistotou $\pm 0,5$ mm. Další podíl má hustota (popsáno výše).

Vzorec pro výpočet nejistoty:

$$u_{B,p} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \rho} u_{\rho}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial f}{\partial h_2} u_h\right)^2 + 2\left(\frac{\partial f}{\partial h_1} u_h\right)^2}$$

$$u_{B,p} = \sqrt{[g(2\Delta h_2 - \Delta h_1) \cdot 1]^2 + 2 \cdot (2\rho g \cdot 0,0005)^2 + 2 \cdot (\rho g \cdot 0,0005)^2}$$

Výpočet pro průtokoměr A – maximální hodnota tlakové ztráty:

$$u_{B,p} = \sqrt{[9,81(2 \cdot 1,809 - 1,822) \cdot 1]^2 + 2 \cdot (2 \cdot 996,8 \cdot 9,81 \cdot 0,0005)^2 + 2 \cdot (996,8 \cdot 9,81 \cdot 0,0005)^2}$$

$$u_{B,p} = \pm 21,7 \text{ Pa}$$

Ostatní hodnoty jsou uvedené níže:

	max $\Delta p - A$	min $\Delta p - A$	max $\Delta p - B$	min $\Delta p - B$	max $\Delta p - C$	min $\Delta p - C$	max $\Delta p - D$	min $\Delta p - D$	max $\Delta p - E$	min $\Delta p - E$
Δh_1 [m]	1,568	0,065	1,571	0,071	1,587	0,074	1,502	0,064	1,579	0,062
Δh_2 [m]	1,563	0,064	1,56	0,07	1,576	0,075	1,493	0,063	1,57	0,062
ρ [kg $\cdot m^{-3}$]	997	997	997	997	997	997	997	997	997	997
u_B \pm [Pa]	21,7	15,5	21,7	15,5	21,8	15,5	21,2	15,5	21,8	15,5

Příloha 4 – CD

Obsahující:

- Excel pro vyhodnocení kalibrace
- Excel pro vyhodnocení charakteristiky průtokoměrů
- Excel pro vyhodnocení měření průtoku v registru trubek
- Data z ústředen
- Informace z průběhu měření – časová rozmezí jednotlivých měření
- Elektronickou verzi bakalářské práce
- Technické listy průtokoměru a použité váhy
- Fotografie z měření
- Excel pro vyhodnocení nejistot