

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Teoretický základ strojního inženýrství



**Návrh vodní trati pro testování a kalibraci
průtokoměrů**

Design of testing and calibration rig of flow meters

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval:
Vedoucí práce:
Konzultant:
Rok:

Václav Čužna
Ing. Viktor Syrovátka
Ing. Jakub Suchý, Ph.D.
2024



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čužna** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **509145**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů

Název bakalářské práce anglicky:

Design of Testing and Calibration Rig of Flow Meters

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracujte přehled metod měření průtoku, popište jednotlivá čidla.
- 2) Navrhněte vodní trať pro testování a kalibraci průtokoměrů od světlosti potrubí DN 15 do DN 50. Vodní trať navrhněte tak, aby se v budoucnu nechala provést její výstavba v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. Během návrhu myslete na hospodárnost projektu.
- 3) Navrhněte uživatelské rozhraní v softwaru LabVIEW, které bude sloužit ke kalibraci průtokoměrů.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Viktor Syrovátka ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS

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

Ing. Jakub Suchý, Ph.D. ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Viktor Syrovátka
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Michal Schmirler, 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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci, Návrh vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Viktora Syrovátky a za použití uvedené literatury a pramenů. Souhlasím, že výsledky této bakalářské práce mohou být dále použity po dohodě a souhlasu s vedoucím bakalářské práce.

V Praze dne

.....

Václav Čužna

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali a poskytli potřebné podklady a informace. Především děkuji Ing. Viktoru Syrovátkovi za odborné vedení bakalářské práce a Ing. Jakobovi Suchému, Ph.D. za odborné rady a připomínky během realizace této bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora:	Václav Čužna
Název práce:	Návrh vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů
Anglický název:	Design of Testing and Calibration Rig of Flow Meters
Rok:	2024
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	Mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí BP:	Ing. Viktor Syrovátka
Bibliografické údaje:	Počet stran: 66 Počet obrázků: 40 Počet tabulek: 6 Počet grafů: 5 Počet příloh: 11
Klíčová slova:	Kalibrace průtokoměrů, průtok, průtokoměry, návrh vodní trati
Keywords:	Flow meter calibration, flow rate, flow meters, water line design

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce, je návrh vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů. V úvodní části jsou popsány základní fyzikální pojmy, které pomohou porozumět dané problematice. Teoretická část se zabývá jednotlivými druhy a typy průtokoměrů, přibližuje jejich princip, jednotlivé přednosti a nedostatky. Praktická část této bakalářské práce je zaměřena na samotný návrh vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů a vytvořením uživatelského rozhraní v softwaru Labview.

Abstract:

The aim of this bachelor thesis is to design of testing and calibration rig of flow meters. In the introductory part, it describes the basic physical concepts that will help to understand the subject. The theoretical part deals with the different types and kinds of flow meters, introduces their principle, individual advantages, and disadvantages. The practical part of this bachelor thesis focuses on the actual design of the water line for testing and calibration of flow meters and the creation of the user interface in Labview software.

Obsah

1	Úvod	1
2	Úvod do problematiky.....	2
2.1	Objemový tok	2
2.2	Hmotnostní tok.....	2
2.3	Druhy proudění.....	3
2.3.1	Laminární proudění.....	3
2.3.2	Turbulentní proudění	3
2.4	Reynoldsovo číslo	3
2.5	Viskozita	4
3	Přehled metod měření průtoku	5
3.1	Objemové průtokoměry	5
3.1.1	Objemová metoda – měření průtoku pomocí odměrného válce	5
3.1.2	Oválný průtokoměr	5
3.1.3	Průtokoměr s kyvným diskem.....	7
3.2	Škrťící orgány	8
3.2.1	Clony.....	8
3.2.2	Dýza ISA 1932.....	10
3.2.3	Klasická Venturiho trubice.....	11
3.3	Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly	12
3.3.1	Coriolisův průtokoměr se zakřivenou trubicí.....	12
3.3.2	Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí.....	13
3.4	Fluidikové průtokoměry.....	14
3.4.1	Vírový průtokoměr	14
3.4.2	Vířivý průtokoměr	16
3.5	Turbínkové a lopátkové průtokoměry	17
3.5.1	Turbínkové průtokoměry s tangenciálním vtokem (lopatkové radiální průtokoměry).....	18
3.5.2	Zásuvné turbínkové průtokoměry.....	18
3.5.3	Šroubové průtokoměry.....	19
3.5.4	Průtokoměry s lopatkovými koly	19
3.6	Deformační průtokoměry.....	20
3.7	Průtokoměry s proměnným průřezem.....	21
3.7.1	Plováčkový průtokoměr	22

3.8	Ultrazvukové průtokoměry	23
3.8.1	Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu	23
3.8.2	Průtokoměry využívající Dopplerův jev.....	24
3.9	Indukční průtokoměry	26
3.9.1	Historie.....	26
3.9.2	Konstrukce indukčního průtokoměru.....	26
3.9.3	Princip indukčního průtokoměru.....	27
3.9.4	Výpočet objemového průtoku	28
3.9.5	Vliv měřené kapaliny na výsledky měření.....	28
3.9.6	Vlastnosti indukčního průtokoměru.....	29
4	Návrh vodní tratě pro testování a kalibraci průtokoměrů	30
4.1	Výběr typu průtokoměru	30
4.2	Výběr indukčního průtokoměru.....	31
4.3	Zásady správné instalace indukčního průtokoměru	34
4.4	Výpočet uklidňovacích délek potrubí	37
4.5	Výběr materiálu potrubí	38
4.6	Komponenty měřicí tratě	39
4.7	Návrh uživatelského rozhraní v softwaru LabVIEW	49
4.8	Hospodárnost návrhu vodní trati pro kalibraci a testování průtokoměrů.....	52
5	Závěr	53
6	Seznam použité literatury	54

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Rychlostní profil laminárního proudění [2].....	3
Obrázek 2 – Rychlostní profil turbulentního proudění [2].....	3
Obrázek 3 – Tečné napětí vznikající mezi vrstvami newtonské tekutiny [2].....	4
Obrázek 4 – Fáze činnosti oválného průtokoměru s ozubenými koly [1].....	5
Obrázek 5 – Tělesový plynometr [1]	6
Obrázek 6 – Průtokoměr s oběžným kolem [1]	7
Obrázek 7 – Princip průtokoměru s kyvným diskem [1]	7
Obrázek 8 – Normalizovaná centrická clona [3].....	8
Obrázek 9 – Dýza ISO 1932 [5]	10
Obrázek 10 – Geometrický profil klasické Venturiho trubice [5].....	11
Obrázek 11 – Účinek Coriolisovy síly na měřicí trubici tvaru U [9].....	12
Obrázek 12 – Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí [1].....	13
Obrázek 13 – Tvary vírových těles [11]	14
Obrázek 14 – Princip vírového průtokoměru [11]	15
Obrázek 15 – Rotace proudnic ve vířivém průtokoměru [1]	16
Obrázek 16 – Vnitřní uspořádání typického turbínkového průtokoměru [1].....	17
Obrázek 17 – Turbínkový průtokoměr s tangenciálním vtokem [1].....	18
Obrázek 18 – Zásuvný turbínkový průtokoměr [1].....	18
Obrázek 19 – Šroubový průtokoměr [1]	19
Obrázek 20 – Lopatkový průtokoměr [1]	19
Obrázek 21 – Deformační průtokoměr [1].....	20
Obrázek 22 – Schéma odvození funkce plováčkového průtokoměru [1].....	21
Obrázek 23 – Schématické znázornění konstrukce plováčkových průtokoměrů [1]	22
Obrázek 24 – Ultrazvukový průtokoměr s vyhodnocením doby průchodu signálu [7]	24
Obrázek 25 – Princip Dopplerova průtokoměru [7]	25
Obrázek 26 – Princip indukčního průtokoměru [8]	27
Obrázek 27 – Minimální uklidňovací délky FLONET FN50XX.1 [12].....	34
Obrázek 28 – Správná aplikace zúžení [12].....	35
Obrázek 29 – Poloha čerpadla [12].....	35
Obrázek 30 – Poloha uzavíracího / regulačního členu [12]	36
Obrázek 31 – Zásady správné instalace [12].....	36
Obrázek 32 – Snímek 3D vizualizace, čerpadlo, překryt spojky, 3f asynchroní elektromotor	40
Obrázek 33 – Snímek z 3D vizualizace, potrubí před čerpadlem	41
Obrázek 34 – Snímek z 3D vizualizace, potrubí za čerpadlem část I.	43
Obrázek 35 – Snímek z 3D vizualizace, potrubí za čerpadlem část II.	44
Obrázek 36 – Snímek z 3D vizualizace, potrubí za čerpadlem část II.	44
Obrázek 37– Snímek z 3D vizualizace, potrubí za čerpadlem část IV.	45
Obrázek 38 – Snímek z 3D vizualizace, čelní pohled na vodní trať v laboratoři.....	46
Obrázek 39 – Snímek z 3D vizualizace, pohled zprava na vodní trať v laboratoři.....	47
Obrázek 40 – Snímek z 3D vizualizace, ISO pohled na vodní trať v laboratoři.....	48

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Měrné vodivosti vybraných látek [8]	28
Tabulka 2 – Hodnocení průtokoměrů	30
Tabulka 3 – Průřezy kontrolních oblastí indukčních průtokoměrů FLONET FN50XX.1	31
Tabulka 4 – Porovnání průřezů jednotlivých velikostí průtokoměrů FLONET FN50XX.1	32
Tabulka 5 – Rozsahy měření průtoku jednotlivých průtokoměrů dle DN – vyňato z katalogu [12].....	33
Tabulka 6 – Vypočítané minimální délky vodní trati	37

Seznam grafů

Graf 1 – Rozsah měření indukčních průtokoměrů řady FLONET FN50XX.1 [12].....	32
Graf 2 – Provozní rozsahy průtoků a rychlostí v závislosti na dimenzi čidla – vyňato z katalogu [12]	33
Graf 3 – Tlakově teplotní diagram pro ABS [13]	38
Graf 4 – Tlakově teplotní diagram pro PVC-C [14]	38
Graf 5 – Tlakově teplotní diagram pro PVC-U [15]	39

Seznam příloh

Přílohy a – součást vazby bakalářské práce

Příloha 1.a – Snímky obrazovky uživatelského rozhraní LabVIEW

Příloha 2.a – Finanční rozvaha vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů

Přílohy b – přílohy přiložené k bakalářské práci

Příloha 3.b – NÁVRHOVÉ SCHÉMA VODNÍ TRATI PRO KALIBRACI PRŮTOKOMĚRŮ, č.v. BP - 2023/2024-04-001

Příloha 4.b – VÝKRES SESTAVY – POTRUBÍ PŘED ČERPADLEM, č.v. BP-2023/2024-04-002

Příloha 5.b – VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ ČÁST I., č.v. BP-2023/2024-04-003

Příloha 6.b – VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ ČÁST II., č.v. BP-2023/2024-04-004

Příloha 7.b – VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ ČÁST III. (DN15), č.v. BP-2023/2024-04-005

Příloha 8.b – VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ ČÁST III. (DN32), č.v. BP-2023/2024-04-006

Příloha 9.b – VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ ČÁST IV., č.v. BP-2023/2024-04-007

Příloha 10.b – VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ V LABORATOŘI, č.v. BP-2023/2024-04-008

Příloha 11.b – NÁVRHOVÉ SCHÉMA VODNÍ TRATI PRO KALIBRACI PRŮTOKOMĚRŮ – NEREALIZOVANÉ, č.v. BP-2023/2024-03-001

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Jednotka SI	Veličina
A_2	$[m^2]$	Plocha mezikruží u plováčkového průtokoměru
A_d	$[m^2]$	plocha průřezu škrťícího členu, nebo kontrolní oblasti o průměru d
A_p	$[m^2]$	plocha průřezu plováčku
B	$[T]$	magnetická indukce
c	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost tekutiny
\bar{c}	$[m \cdot s^{-1}]$	střední rychlost tekutiny
C	$[1]$	průtokový součinitel škrťícího orgánu
C_d	$[1]$	opravný součinitel
d	$[m]$	průměr škrťícího členu, nebo kontrolní oblasti
D	$[m]$	průměr potrubí
f	$[Hz]$	frekvence
F	$[N]$	síla
F_A	$[N]$	síla působící po směru proudu plováčku
F_C	$[N]$	Coriolisova síla
F_d	$[N]$	dynamická síla
F_G	$[N]$	síla působící proti směru proudu plováčku
F_{VZ}	$[N]$	vztlaková síla
G	$[N]$	tíhová síla
g	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
h	$[m]$	výška
c_h	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost tekutiny ve výšce h
k	$[1]$	korekce
K_c	$[1]$	součinitel odporu
L	$[m]$	vzdálenost (dle schématu)
m	$[kg]$	hmotnost
M_C	$[N \cdot m]$	moment vznikající od Coriolisovy síly
p	$[Pa]$	tlak
p_c	$[Pa]$	celkový tlak
p_d	$[Pa]$	dynamický tlak
p_s	$[Pa]$	statický tlak
\dot{q}_m	$[kg \cdot s^{-1}]$	okamžitý hmotnostní tok
\dot{q}_V	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	okamžitý objemový tok
\dot{Q}_m	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok
\dot{Q}_V	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	objemový tok
Re	$[1]$	Reynoldsovo číslo
S	$[m^2]$	plocha terčíku
Sr	$[1]$	Strouhalovo číslo
t	$[s]$	čas
u	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost ultrazvuku
U	$[V]$	elektrické napětí
V	$[m^3]$	objem
x	$[m]$	souřadnice osy x (dle schématu)
y	$[m]$	souřadnice osy y (dle schématu)
z	$[m]$	souřadnice osy z (dle schématu)
α	$[^\circ]$	úhel (dle schématu)
β	$[1]$	poměr průměrů ($\beta=d/d$)

ε	[1]	expanzní součinitel
η	[Pa · s]	dynamická viskozita tekutiny
ν	[m ² · s ⁻¹]	kinematická viskozita tekutiny
ρ	[kg · m ⁻³]	hustota tekutiny
ρ_p	[kg · m ⁻³]	hustota plováčku
τ	[Pa]	tečné napětí
ω	[rad · s ⁻¹]	úhlová rychlost

1 Úvod

Měření průtoku má široké uplatnění nejen ve strojírenství, ale také v lékařství, farmaceutickém, chemickém, či potravinářském průmyslu. V jednotlivých odvětvích můžeme měřit různé kapaliny od agresivních látek jako jsou například kyseliny, přes kapaliny vyskytující se v potravinářském průmyslu, například mléko, až po kapaliny, se kterými se setkáváme denně, například kohoutková voda. Ve všech těchto provozech se průtokoměry volí podle různých kritérií, mezi která patří například přesnost, opakovatelnost měření, cena a jiné.

Na dnešním trhu nalezneme rozmanitou nabídku průtokoměrů, ze kterých je možno si na základě zvolených kritérií vybrat. Průtokoměry se volí dle konkrétní aplikace a požadavků, které se na ně kladou. Správná volba průtokoměru je nezbytnou podmínkou přesného měření.

Různé typy průtokoměrů pracují na základě různých fyzikálních zákonů. Jednotlivé druhy a principy průtokoměrů hodláme popsat v teoretické části této bakalářské práce.

V praktické části této bakalářské práce, se budeme zabývat výběrem vhodného průtokoměru a návrhem vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů, která svými specifiky bude odpovídat požadavkům zvoleného průtokoměru.

Požadavek na vytvoření této vodní trati na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky vnikl za účelem zjednodušení průběhu budoucích experimentů. Setkáváme se totiž s případy, kdy k jednotlivým průtokoměrům nejsou dostupné kalibrační listy, nebo by bylo vhodné provést novou kalibraci stávajících průtokoměrů. Díky realizaci této vodní trati bude možné jednotlivé průtokoměry řádně kalibrovat.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit projekt, který by sloužil jako předloha při samotné výstavbě trati pro testování a kalibraci průtokoměrů v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky.

V praktické části práce se budeme věnovat správnému výběru průtokoměru a potrubí vodní trati. Dále se budeme zabývat vhodným umístěním vodní trati do prostor laboratoře a volbu konstrukčních a funkčních prvků tak, abychom využili dostupné komponenty z laboratoře Ústavu. Tento krok povede k hospodárnosti celého projektu.

Po výběru všech dílčích komponent vodní trati provedeme 3D vizualizaci vodní trati v prostorech laboratoře, která poslouží k ověření zda nedochází ke kolizi stávajících armatur a námi vytvořené vodní trati. Posléze z této 3D vizualizace vytvoříme výkresovou dokumentaci, která bude sloužit během případné realizace jako návod k výstavbě. Práci doplníme i finančním odhadem, který vytvoříme na základě znalosti všech komponent vodní trati.

Naším posledním úkolem bude vytvoření uživatelského rozhraní v softwaru LabVIEW, které bude sloužit v případě realizace trati jako ovládací prostředí a prostředí pro sběr naměřených dat.

2 Úvod do problematiky

V této kapitole se seznámíme se základními rovnicemi a vztahy mechaniky tekutin, které budeme potřebovat k pochopení problematiky měření průtoku.

2.1 Objemový tok

Objemový tok je roven objemu tekutiny ΔV , který proteče kontrolní oblastí za určitý časový interval Δt . Pak platí vztah: [1]

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

Jestliže uvažujeme okamžitou změnu průtoku v čase, mluvíme o okamžitém objemovém toku. Pro okamžitý objemový tok platí vztah: [1]

$$\dot{q}_V = \frac{dV}{dt} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Objem, proteklý za časový interval Δt , je dán integrálem: [1]

$$V = \int_{t_0}^{t_1} \dot{q}_V dt \quad [\text{m}^3] \quad (3)$$

2.2 Hmotnostní tok

Hmotnostní tok je roven hmotnosti tekutiny Δm , která proteče kontrolní oblastí za určitý časový interval Δt . Spojitost mezi hmotnostním a objemovým tokem je následující. Hmotnostní tok je roven součinu objemového toku a hustoty tekutiny. Pak platí vztah: [1]

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_V \cdot \rho = \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Jestliže uvažujeme okamžitou změnu průtoku v čase, mluvíme o okamžitém hmotnostním toku. Pro okamžitý hmotnostní tok platí vztah: [1]

$$\dot{q}_m = \frac{dm}{dt} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

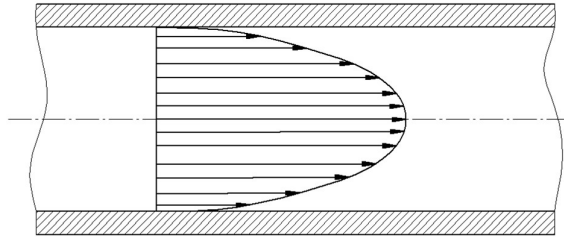
Hmotnost tekutiny proteklé kontrolní oblastí za časový interval Δt , je dán integrálem: [1]

$$m = \int_{t_0}^{t_1} \dot{q}_m dt \quad [\text{kg}] \quad (6)$$

2.3 Druhy proudění

2.3.1 Laminární proudění

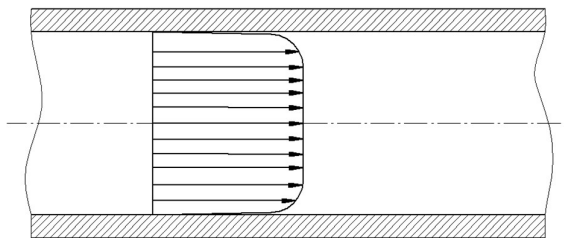
O laminárním proudění můžeme obecně říci, že se s ním setkáme v malých průřezech a při malých rychlostech proudění tekutiny. Vyniká malými odpory (nízké tření, malá disipace energie). Částice v tekutině se pohybují po drahách, které se navzájem nekříží. Laminární proud vody vytékající z potrubí má hladký povrch jako skleněná tyč. V kruhovém potrubí si můžeme představit rychlostní profil ve tvaru rotačního osově symetrického paraboloidu (viz obrázek 1). Rychlost na stěnách je rovna nule, v ose potrubí je rychlost maximální. [2; 3]



Obrázek 1 – Rychlostní profil laminárního proudění [3]

2.3.2 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění se obecně vyskytuje ve větších průřezech a při vyšších rychlostech proudící tekutiny. Odpory třením jsou výrazně vyšší než u laminárního proudění, vlivem disipace energie se tekutina zahřívá (kinetická energie se přeměňuje na vnitřní energii tekutiny). Vytvářejí se víry (turbulence), trajektorie částic jsou nepravidelné, dochází k intenzivnímu promíchávání tekutiny. Proto turbulentní proud vody vytékající z potrubí je nepravidelný, drsný a není transparentní. Okamžité hodnoty veličin, například rychlosti, neustále kolísají kolem střední hodnoty. Tyto náhodné výchylky nazýváme fluktuace. Stejně jako u laminárního proudění, rychlost kapaliny na stěně potrubí je rovna nule. Směrem od stěny k ose potrubí dochází k rychlému nárůstu rychlosti proudící tekutiny, která se ustálí na střední rychlosti tekutiny v potrubí (viz obrázek 2). V technických výpočtech počítáme s hodnotou střední rychlosti. [2; 3]



Obrázek 2 – Rychlostní profil turbulentního proudění [3]

2.4 Reynoldsovo číslo

Pro určení laminárního a turbulentního proudění je důležité Reynoldsovo číslo. Značí se Re a udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Jedná se o jedno z podobnostních čísel, tj. bezrozměrné číslo. Vztah, který ho definuje následuje: [4]

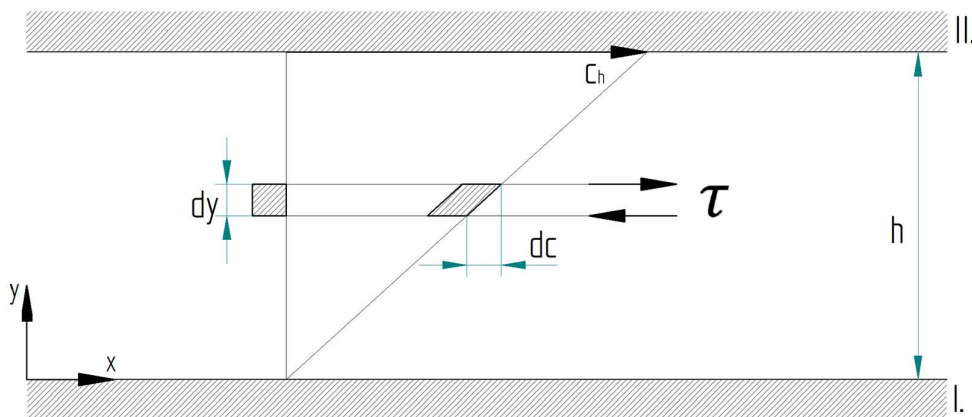
$$Re = \frac{\rho c^2 D}{\eta c} = \frac{\rho c D}{\eta} = \frac{c \cdot D}{\nu} \quad [1] \quad (7)$$

Jak jsme si již zmínili výše, Reynoldsovo číslo slouží, jako ukazatel hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním. Pro vyvinuté proudění je nejnižší hodnota, při níž dochází k přechodu laminárního proudění v turbulentní, dolní kritické číslo. Pro potrubí kruhového průřezu je hodnota $Re_k = 2300$. Při laboratorních podmínkách lze udržet laminární proudění až pro $Re \sim 10^4$. V případě, že chceme přejít z turbulentního do laminárního proudění, musíme rychlost tekutiny snižovat až pod dolní kritickou rychlost zde setrávat až do přechodu zpět na laminární proudění. [2; 4]

2.5 Viskozita

Viskozita, či česky vazkost je vlastnost reálné tekutiny, která způsobuje vznik nenulového smykového napětí mezi dvěma sousedními vrstvami (viz obrázek 3). Smykové napětí vzniká důsledkem vazebných sil mezi molekulami tekutiny. Pomalejší vrstva tekutiny zpomaluje rychleji se pohybující vrstvu a naopak. Pro Newtonské tekutiny je viskozita fyzikálně definována vztahem (8). [2; 4]

$$\tau = \eta \frac{dc}{dy} \text{ [Pa]} \quad (8)$$



Obrázek 3 – Tečné napětí vznikající mezi vrstvami newtonské tekutiny, deska I. stojí, deska II. se pohybuje rychlostí c_h [4]

Rozdělujeme dva druhy viskozity, dynamickou viskozitu a kinematickou viskozitu. Dynamickou viskozitu značíme symbolem η . Kinematickou viskozitu značíme symbolem ν . Vztah mezi dynamickou a kinematickou viskozitou je dán následujícím vztahem: [4]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

Viskozita u kapalin s rostoucí teplotou klesá, u plynů je tomu naopak. S rostoucí teplotou plynu viskozita roste. Viskozita má zásadní vliv na Reynoldsovo číslo, tudíž ovlivňuje celkový charakter proudění (laminární, nebo turbulentní proudění). [4]

3 Přehled metod měření průtoku

3.1 Objemové průtokoměry

Objemové průtokoměry fungují na velmi snadném principu. Pracují na základě odměrování objemu tekutiny v určitém prostoru. Při násobném plnění sčítáme dílčí objemy, čímž dostaneme celkový objem proteklé tekutiny. [5]

3.1.1 Objemová metoda – měření průtoku pomocí odměrného válce

Princip měření objemu za pomoci kalibrované nádoby (může to být například odměrný válec) spočívá v měření času, za jak dlouho se kalibrovaná nádoba naplní. Platí vztah (1) popisující objemový tok (tento vztah uvádíme již v kapitole 2.1, pro přehlednost uvádíme znovu): [1]

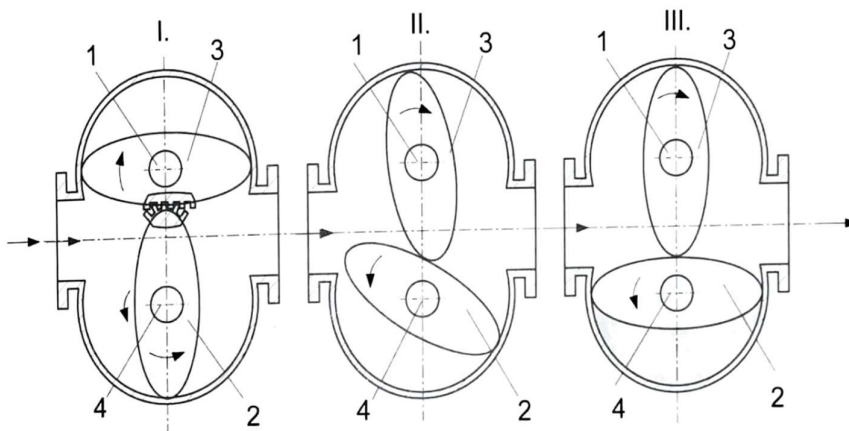
$$\dot{Q}_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

Kde ΔV je rozdíl objemu, jenž jsme odměřili v kalibrované nádobě za čas Δt . Kdyby byla kalibrovaná nádoba vybavena hmotnostní vahou, mohli bychom měřit i hmotnostní tok. Platí vztah (4) (tento vztah uvádíme již v kapitole 2.2, pro přehlednost uvádíme znovu). [1]

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_V \cdot \rho = \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

3.1.2 Oválný průtokoměr

Princip oválného průtokoměru je založen na přímém měření objemu tekutiny. V komoře průtokoměru se nachází dvě oválná ozubená kola, jenž do sebe zapadají. Proudící tekutina díky své kinetické a tlakové energii otáčí těmito oválnými koly. Množství tekutiny proteklé skrze oválný průtokoměr odpovídá objemu mezi oválným ozubeným kolem a komorou průtokoměru. Celkový proteklý objem pak určíme jako součin otáček oválných kol právě s objemem mezi komorou a oválným kolem (viz obrázek 4). [5]



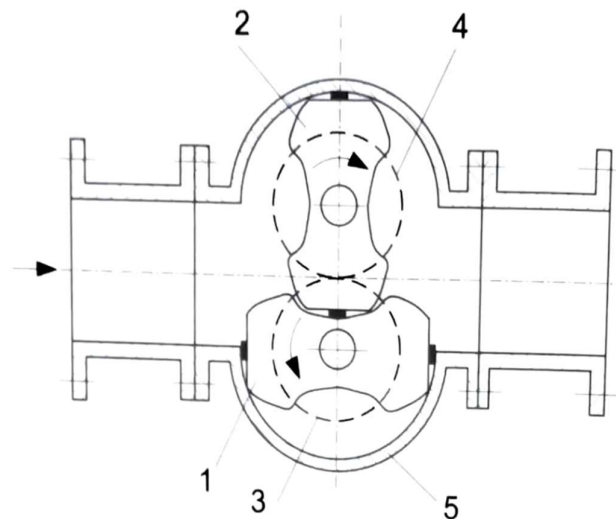
Obrázek 4 – Fáze činnosti oválného průtokoměru s ozubenými koly, 1,4 - střed oválného kola, 2,3 - oválná ozubená kola [1]

Při dodržení těsnosti kol můžeme dosáhnout velmi nízkých nejistot měření (0,1 %). Dodržení těsnosti kol je myšleno především dodržení provozních teplot, pro něž je průtokoměr konstruován. Materiály kol jsou často rozdílné od materiálu komory a tím pádem mají i jinou teplotní roztažnost. Vlivem rozdílné teplotní roztažnosti vede ke změně délkových a objemových rozměrů a vzniku netěsností mezi komorou a kolem. Dalším rušivým elementem mohou být abrazivní částice obsažené v tekutině, které mohou kola a komoru opotřebovávat, a tím vzniká netěsnost. Tento typ průtokoměrů vykazuje v porovnání s ostatními průtokoměry například z řad indukčních nebo ultrazvukových velice vysokou tlakovou ztrátu (řádově desítky až stovky kPa). Další nevýhodou tohoto průtokoměru je kolísání průtoku, způsobené otáčením kol, která vnáší do soustavy pulzace. [1]

Oválnými průtokoměry lze měřit celou řadu tekutin od plynů s velmi nízkou viskozitou až po oleje a mazací tuky, kdy dosahuje viskozita vyšších hodnot. Časté uplatnění nachází průtokoměr také v potravinářském průmyslu, například při měření objemu moštů, vína, piva, ale také například zmíněných tuků. [1]

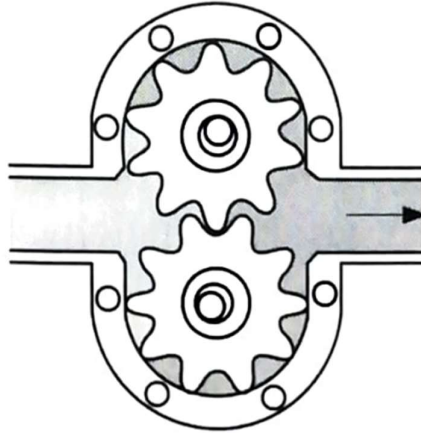
Oválné průtokoměry se vyrábí i v konstrukčním provedení s hladkými oválnými koly. Ve srovnání oválných průtokoměrů s ozubenými koly je varianta s hladkými koly jednodušší a levnější na výrobu není však tak přesná. Výhodou při proudění viskózních kapalin je neulpívání kapaliny v mezizubních prostorech. [1]

Dalším podobným průtokoměrem je tělesový (lalokový, piškotový průtokoměr) jehož princip je shodný s oválným průtokoměrem. Rozdíl je jen v konstrukci kol (viz obrázek 5). Nevýhodou je jeho nižší přesnost. [1]



Obrázek 5 – Tělesový plynoměr, 1, 2 - tělesové (piškotová) kola, 3, 4 - roztečné kružnice tělesových kol, 5 - komora průtokoměru [1]

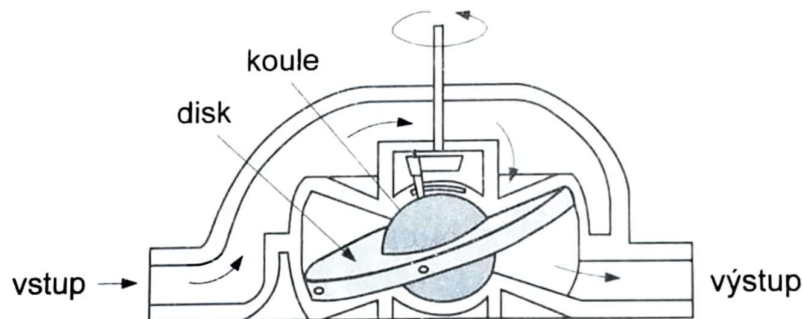
Podobný princip využívá i průtokoměr s oběžným kolem (viz obrázek 6). Objem tekutiny protéký průtokoměrem je roven objemu vzniklému mezi zuby ozubeného kola a komorou průtokoměru. Oproti oválnému a tělesovému průtokoměru způsobuje menší pulzy při výtoku tekutiny z průtokoměru. [1]



Obrázek 6 – Průtokoměr s oběžným kolem [1]

3.1.3 Průtokoměr s kyvným diskem

Princip průtokoměru s kyvným diskem (viz obrázek 7) spočívá v průtoku tekutiny skrze komoru s diskem, jejíž tvar a geometrie vyvolává kývavý pohyb disku. Kývavým pohybem disku dochází k otáčení vřetene, které je nejčastěji spojeno pomocí permanentního magnetu s kulovou částí disku (díky magnetu jsou komory oddělené a nedochází k úniku tekutiny). Obdobně jako u průtokoměru s oválnými koly celkový protéký objem určíme jako součin otáček (kyvů disku) s objemem vytvořeným mezi komorou a kyvným diskem. Nevýhodou průtokoměru je poměrně vysoká nejistota měření dosahující až 2 %. [1]



Obrázek 7 – Princip průtokoměru s kyvným diskem [1]

3.2 Škrťící orgány

Škrťící orgány využívají princip zachování energie v proudící tekutině, což znamená, že pro výpočet průtoku pomocí škrťících orgánů využijeme Bernoulliho rovnice. Proudící tekutina má určitou kinetickou, potenciální a tlakovou energii. V místě škrťení (clony, nebo dýzy) dochází k nárůstu dynamického a poklesu statického tlaku, celkový tlak zůstává stále stejný ($p_e = p_s + p_d$). Tekutina ve škrťeném místě zrychluje, tím se snižuje statický tlak. Nejnižší statický tlak je potom v nejužším místě škrťícího orgánu. Při měření tlaku před a za škrťícím členem získáváme diferenci tlaku Δp , jenž využíváme v následujících výpočtech. Platí následující vztahy: [6]

$$c = C \varepsilon \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

$$\dot{Q}_V = c A_d = C \varepsilon k A_d \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

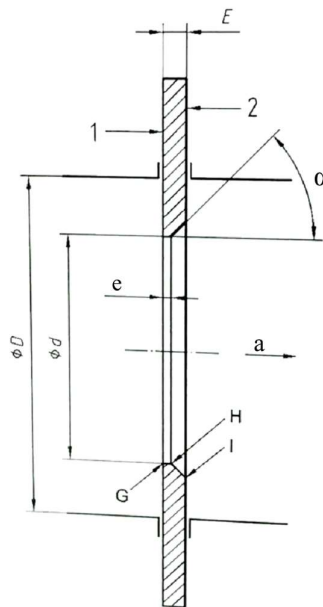
$$\dot{Q}_m = c A_d \rho = C \varepsilon A_d \sqrt{2 \Delta p \rho} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12)$$

Kde ε je expanzní součinitel a v případě kapalin je roven $\varepsilon = 1$ (uvažujeme nestlačitelnou kapalinu). U plynů je obecně $\varepsilon < 1$. C je průtokový součinitel škrťícího orgánu, který závisí na Reynoldsově čísle a poměrném zúžení β . Korekci k používáme jen v případě výpočtu objemového toku. Průtokové součinitele a korekce různých typů škrťících orgánů jsou zjišťovány experimentálně. [6]

Obecně u škrťících orgánů platí, čím vyšší diference tlaku, tím přesnější výsledky měření dostáváme. Zároveň musíme brát v úvahu, že čím vyšší je diference tlaku, tím vyšší je i trvalá tlaková ztráta za škrťícím orgánem. [2]

3.2.1 Clony

Clony (viz obrázek 8) se umísťují nejčastěji do mezipřírubových prostor, jsou orientovány kolmo na směr proudění a mají tvar desky zpravidla s kruhovým otvorem. [7]



Obrázek 8 – Normalizovaná centrická clona, 1...přední strana, 2...zadní strana, a...směr proudění [2]

Při správné instalaci a kalibraci (zjištění všech opravných součinitelů) dosahujeme velice přesných výsledků měření s nejistotou do 1 %. Obecně vyžadují clony dlouhé potrubí nutné k uklidnění tekutiny jak před samotnou clonou, tak za ní. Hodnoty přímých úseků se liší dle jednotlivých variant clon, ale zpravidla bývá nutné volit 10 až 15 DN před clonou a 5 až 10 DN za clonou. Částečně zkrátit délku uklidňovací části potrubí lze s použitím usměrňovače proudu (skládá se z trubiček, nebo čtvercových ok, které jsou v potrubí umístěné ve směru proudící tekutiny. [7])

Poměrné zúžení (poměr průměrů) $\beta = d/D$ se volí v rozmezí od 0,2 do 0,7. [7]

Průtokoměry využívající clonu pro získání tlakové diference vykazují největší tlakové ztráty ze všech dostupných průtokoměrů, jsou ale velice oblíbené pro svoji jednoduchost. [7]

Clony lze dělit podle tvaru, případně geometrie škrťacího členu a dále dle typu odběru diference tlaku. [7]

Rozdělení clon dle tvaru: [7]

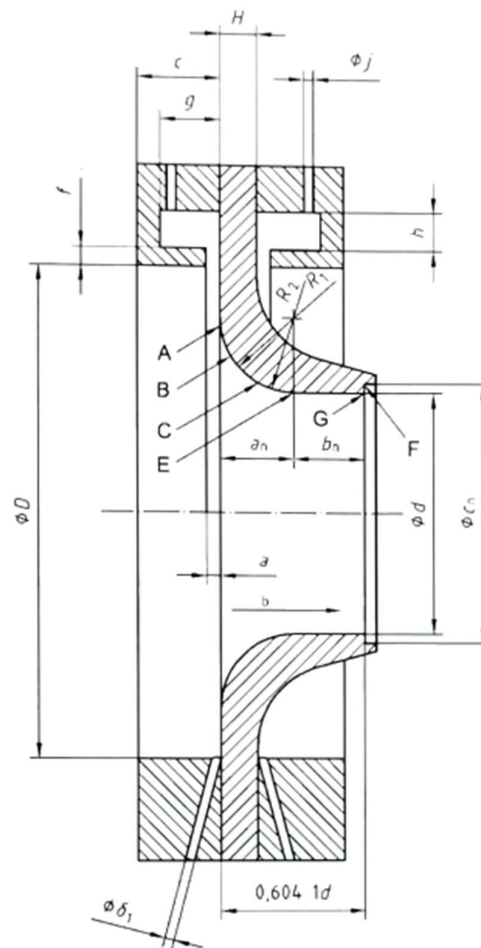
- a. Centrická clona – nejčastější provedení.
- b. Excentrická clona – použití v případě znečištěné tekutiny proti sedimentaci nečistot.
- c. Segmentová clona – opět pro znečištěné tekutiny. Zároveň je to jediná clona umožňující regulaci škrťacího průřezu.
- d. Čtyřtvarová clona – nepotřebuje tak dlouhou uklidňovací délku jako centrické clony.
- e. Čtvrtkruhová clona – je kombinací centrické clony a dýzy ISA 1932.
- f. Kónická clona – obdoba centrické kruhové clony, vstupní hrana zkosená.
- g. Centrická čtvercová a obdélníková clona – použití pro čtvercové, či obdélníkové průřezy potrubí (především vzduchotechnika).
- h. Obousměrná clona – používá se, když se mění směr proudící tekutiny.
- i. Omezující clona – využívá se zabezpečení trvalé tlakové ztráty z pravidla centrickou clonou.
- j. Vstupní clona – pro měření průtoku při sání z volného prostoru.

Rozdělení clon dle odběru tlaku: [7]

- a. Clony s koutovým odběrem, tj. clony komorové nebo clony bodové
- b. Clony s odběrem tlaku D před a $D/2$ za clonovým kotoučem
- c. Clony s přírubovým odběrem

3.2.2 Dýza ISA 1932

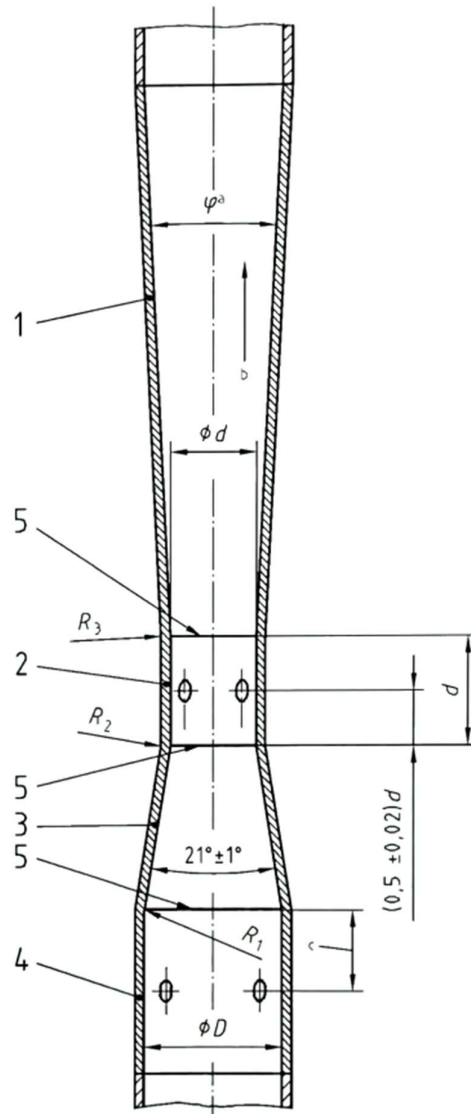
Dýza ISA 1932 se vyznačuje zaoblenou vtokovou stranou a válcovitou výtokovou stranou (viz obrázek 9). Díky své konstrukci lépe odolává dlouhodobému působení vysokých teplot a tlaků. Je technologicky náročnější na výrobu než centrická clona. Nevýhodou je také její náročnější montáž, a proto se obvykle do potrubí vevařuje. Oproti clonám nemá tak vysokou trvalou tlakovou ztrátu. Odběry diferenčního tlaku mohou být komorové, či bodové. Velkou výhodou této dýzy je její veliká spolehlivost a použitelnost při měření kapalin, plynů i par. [8]



Obrázek 9 – Dýza ISA 1932 [2]

3.2.3 Klasická Venturiho trubice

Venturiho trubice (viz obrázek 10) se používá pro měření průtoku kapalin, plynů a par tam, kde je požadavek na nízkou tlakovou ztrátu. Pro malé DN je obráběná z jednoho kusu, pro větší DN se používají plechové svařence. Odběry diferenčního tlaku jsou na stěnách Venturiho trubice, propojených prstencovými komorami. Použití Venturiho trubice definuje norma ČSN EN ISO 5167-4 od průměru DN 50 až po DN 1200. Venturiho trubice vynikají malou tlakovou ztrátou a nezanášejí se sedimenty. [9]



Obrázek 10 – Geometrický profil klasické Venturiho trubice, 1...výstupní kuželový difuzor, 2...válcové hrdlo, 3...vstupní kuželový difuzor, 4...vstupní válcové potrubí, 5...spojovací rovinny [2]

3.3 Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly

Coriolisův průtokoměr funguje na principu Coriolisovy síly. Tu popisuje vztah (13). [10; 11]

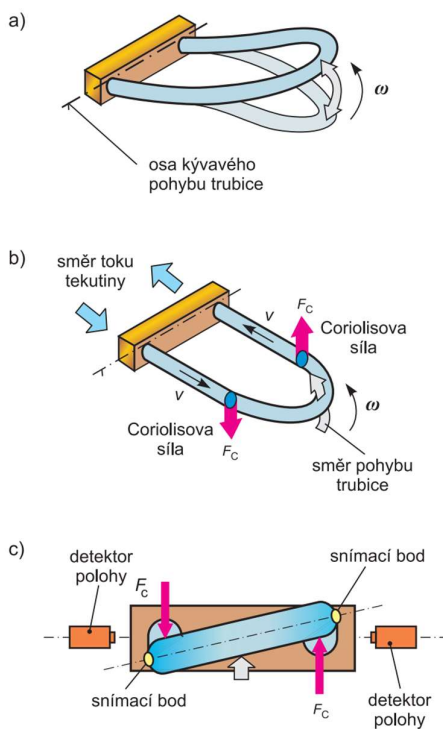
$$F_c = -2 m \omega \times c \quad [\text{N}] \quad (13)$$

Po úpravách dostáváme výsledný vztah v podobě momentu působícího na potrubí o délce L . Tento vztah je výhodný, protože při znalosti materiálu a geometrie potrubí převádíme moment na deformaci, kterou můžeme snadno měřit senzory polohy. Jak pro Coriolisův průtokoměr se zakřivenou trubicí, tak pro Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí platí stejný výsledný vztah (14). [10; 11]

$$M_c = -2 \dot{Q}_m \omega \int_0^L x dx = \dot{Q}_m \omega L^2 \quad [\text{Nm}] \quad (14)$$

3.3.1 Coriolisův průtokoměr se zakřivenou trubicí

Princip Coriolisova průtokoměru se zakřivenou trubicí (nejčastěji ve tvaru písmena U) spočívá v rozkmitání trubice pomocí elektromagnetické síly. Trubice tak vykonává periodický kývavý pohyb úhlovou rychlostí ω (viz obrázek 11). [10; 11]



Obrázek 11 – Účinek Coriolisovy síly na měřící trubicí tvaru U: a...kmitající senzor tvaru U s nulovým průtokem, b...působení Coriolisových sil při průtoku tekutiny, c...čelní pohled na deformovanou trubicí tvaru U [11]

Kmitání trubice se volí obvykle na rezonanční frekvenci U trubice, díky tomu je možné při nulovém průtoku určit hustotu tekutiny. [10; 11]

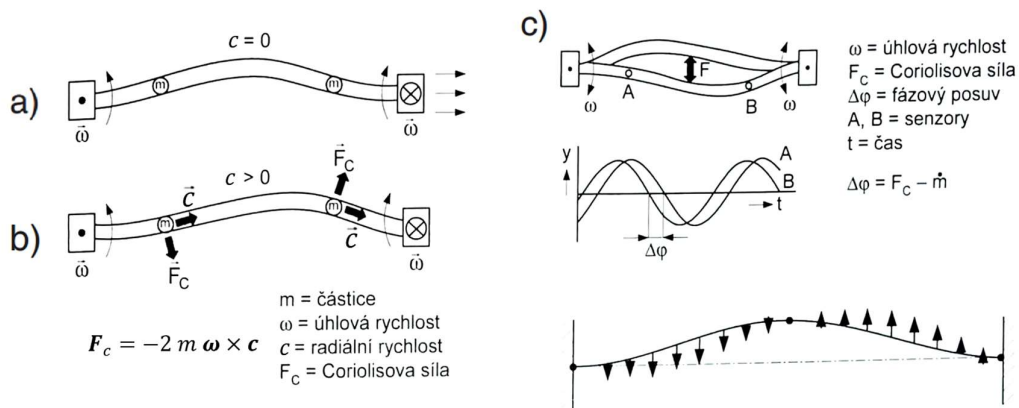
Zaznamenáváme polohu dvou snímacích bodů (viz obrázek 11). Při nulovém průtoku se oba body vychylují se stejnou frekvencí a se stejnou fází. Při průtoku tekutiny se výchylky fázově posunou. Se zvyšujícím průtokem roste fázový posun výchylek bodů. [10; 11]

3.3.2 Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí

Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí funguje na stejném principu jako Coriolisův průtokoměr s U trubicí. Přímalá trubice je periodicky vychylována elektromagnetickým polem a její poloha je snímána v místě A a B (viz obrázek 12) pomocí senzorů polohy. Díky vychylování, vetknuté konce měřící trubce vykonávají periodický kývavý pohyb úhlovou rychlostí ω . [12]

V případě nulového průtoku nedochází k vychylování trubice vlivem Coriolisovy síly, ale jen vychylováním trubice vlivem elektromagnetické síly. Sensory polohy umístěné ve stejné vzdálenosti od vstupu a výstupu do měřící trubice zaznamenávají stejné výchylky polohy. Díky tomu lze zjistit hustotu protékající tekutiny. [12]

Při nenulovém průtoku důsledkem Coriolisovy síly dochází k rozdílné výchylce v bodě A a B. Po vynesení průběhu do grafu je zřejmé, že výchylky v bodě A a B jsou totožné, ale fázově posunuté. Tento fázový posun je úměrný hmotnostnímu průtoku v závislosti na mechanických a geometrických parametrech měřící trubice. [12]



Obrázek 12 – Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí, a) Nesymetrie deformace měřící trubice vlivem Coriolisovy síly při hmotnostním průtoku, b) sčítání budící a Coriolisovy síly, c) časové průběhy výchylky trubice v místech senzorů polohy A, B při periodickém kývavém pohybu [1]

Vlastnosti Coriolisových průtokoměrů

Coriolisovými průtokoměry můžeme měřit téměř všechny tekutiny od plynů a par přes kapaliny a suspenze až po kaly. U plynů o nízkém tlaku je nutné zajistit vysoké rychlosti v měřené trubicí, abychom zvýšili citlivost (potřebujeme zajistit vyšší hmotnostní průtok), což má za následek vysokou tlakovou ztrátu. Lze jej využít i k měření viskózních kapalin a pastovitých hmot. [10; 11]

Výhody: [10; 11]

- Měření průtoku plynů a kapalin s velkou viskozitou.
- Velká přesnost měření a velmi dobrá opakovatelnost.
- Široký rozsah měřených průtoků za různých provozních podmínek.
- Není potřeba uklidňujícího potrubí před ani za průtokoměrem.
- Měření v obou směrech potrubí.
- Kalibraci je možné provést vodou pro všechna měřená média.

Nevýhody: [10; 11]

- U složitých tvarů trubic větší tlaková ztráta.
- Nutnost ochrany před pnutím a vibracemi.
- Vysoká cena.

3.4 Fluidikové průtokoměry

3.4.1 Vírový průtokoměr

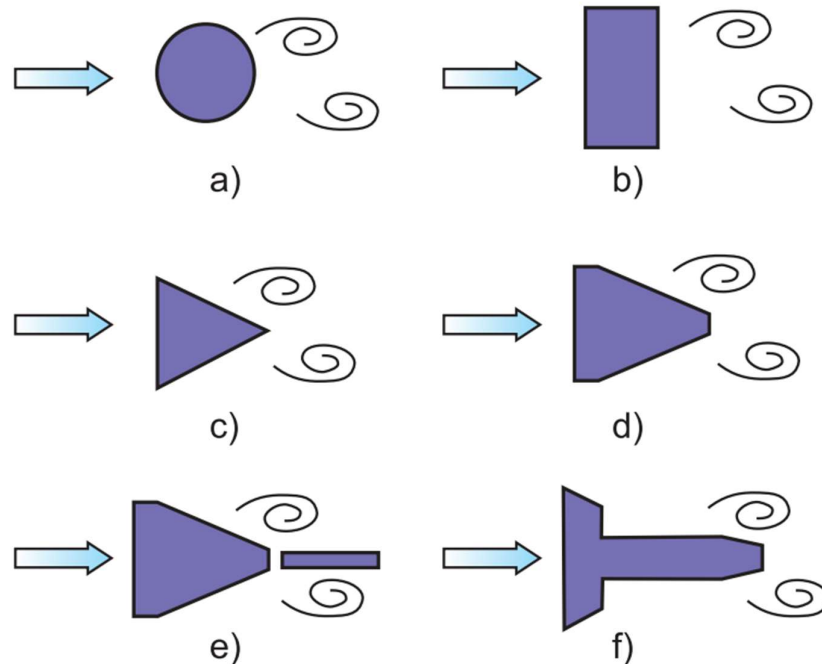
Vírový (vortex) průtokoměr využívá jevu známého jako von Karmánova vírová stezka. Proudící médium v potrubí obtéká vírové těleso (vetknutý nosník uvnitř trubice, sloužící ke vzniku von Karmánových vírů, ve tvaru prismatu viz obrázek 23), od kterého se periodicky odtrhávají víry z jedné a druhé strany. Tyto víry nazýváme právě von Karmánovy víry. Závislost mezi rychlostí proudící tekutiny a frekvencí těchto odtrhávajících se vírů popisuje Strouhalovo číslo, které je dáno následujícím vztahem: [13]

$$Sr = \frac{f \cdot d}{c} \quad [1] \quad (15)$$

Kdy f je frekvence odtrhávajících vírů, d popisuje charakteristický rozměr, (v našem případě průměr kontrolní oblasti), c je rychlost tekutiny. Po úpravách Strouhalova čísla dostáváme následující vztah pro objemový tok. [13]

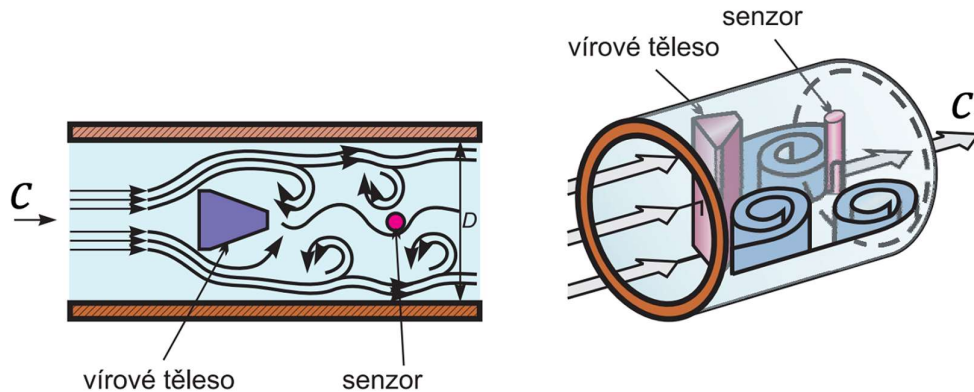
$$\dot{Q}_V = \frac{f \cdot d \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot Sr} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (16)$$

Nejpoužívanější tvary vírových těles jsou trojboká, nebo lichoběžníková prismata (viz obrázek 13). [13]



Obrázek 13 – Tvary vírových těles [13]

Konstrukční provedení vírových průtokoměrů je zpravidla vždy stejné (viz obrázek 14). Skládá se z vírového tělesa, jenž vytvoří von Karmánovu vírovou stezku. Za vírovým tělesem po proudu protékajícího média je ve vhodné vzdálenosti umístěn senzor, jenž zaznamenává frekvenci odtrhávaných vírů. V nejčastějším provedení se používá kapacitní senzor, kde snímací těleso ponořené v proudícím médiu je vychylováno von Karmánovými víry. [3]



Obrázek 14 – Princip vírového průtokoměru [13]

Vlastnosti vírových průtokoměrů

Výhody: [13]

- Měření průtoku kapalin, plynů i par.
- Po převedení frekvence na pulzy získáváme digitální signál.
- Široké rozmezí teplot (-200 do 450 °C).
- Kalibraci je možné provést vodou pro všechna měřená média, včetně plynů a par.
- Malá tlaková ztráta.
- Jednoduchá konstrukce, bez pohyblivých částí.

Nevýhody: [13]

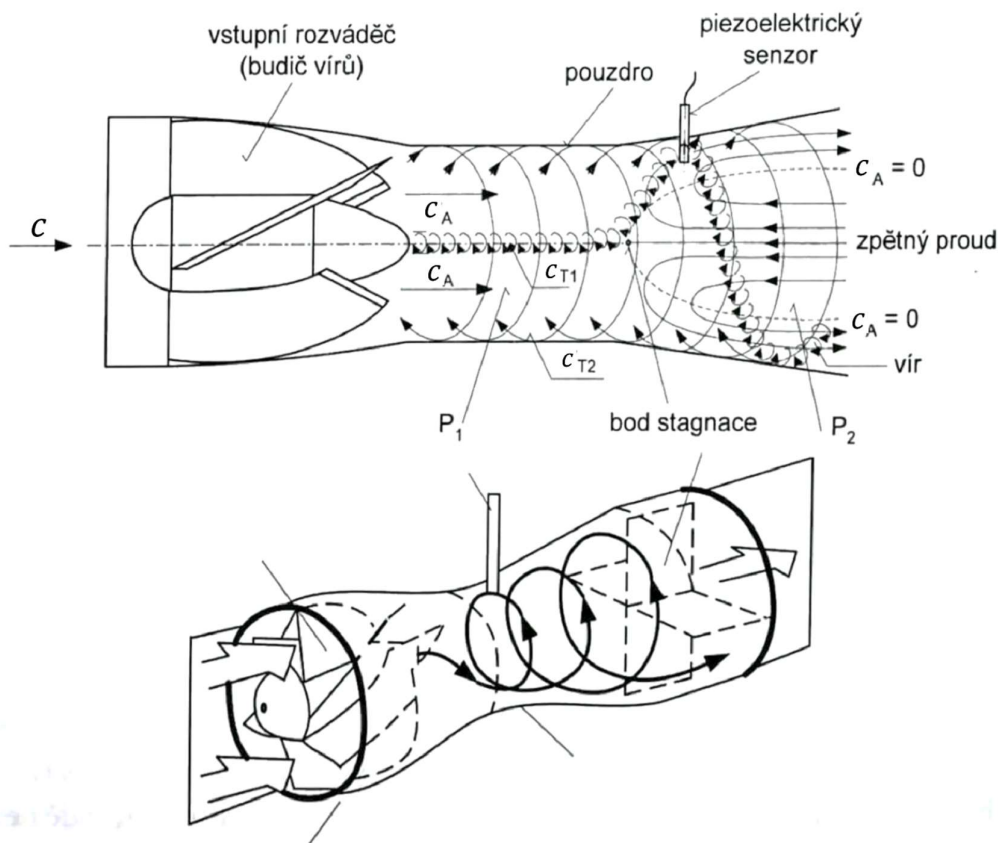
- Měření průtoků vhodné pro Reynoldsova čísla vyšší než 10 000, pod $Re = 4\,000$ nelze měřit.
- Lineární závislost jen na úzkém intervalu Reynoldsových čísel.
- Nutnost umístění dlouhých rovných úseků před a za vírový průtokoměr (minimálně 20 DN před a 5 DN za průtokoměrem, v případě použití regulační armatury umístění až 50 DN za tuto armaturu).
- Nelze měřit v obou směrech.
- Nestacionární proudění je spojeno s velkou chybou měření.
- Vhodné pouze pro čisté tekutiny.
- Průtočný průřez musí být zcela zaplněn.

3.4.2 Vířivý průtokoměr

Vířivý průtokoměr (viz obrázek 15) pracuje na podobném principu jako vírový průtokoměr. Také využívá Strouhalova čísla, ale víry vytvořené ve vířivém průtokoměru vznikají za pomoci pevně umístěné turbínky v potrubí. [3]

Pomocí turbínky se proudící médium uvede do šroubovitého pohybu (primární vír). V oblasti difuzoru (hned za turbínkou) se vytváří vířivé jádro (sekundární vír). Na konci difuzoru je toto vířivé jádro unášeno šroubovým pohybem média (primárním vírem) a to až k okraji potrubí. Zde máme umístěn senzor, jenž měří právě frekvenci vířivého proudu (sekundárního víru). Ze signálu určíme frekvenci, díky které jsme schopni vyjádřit objemový průtok stejně jako u vírového průtokoměru. [3]

Oproti vírovým průtokoměrům dosahují vířivé průtokoměry vyšší přesnosti ve větším rozsahu měření a jsou méně citlivé na vibrace z okolí. Velikou výhodou je, že nepotřebujeme dlouhé uklidňovací potrubí před průtokoměrem, doporučená vzdálenost je 3 DN před a 1 DN za průtokoměrem. [3]

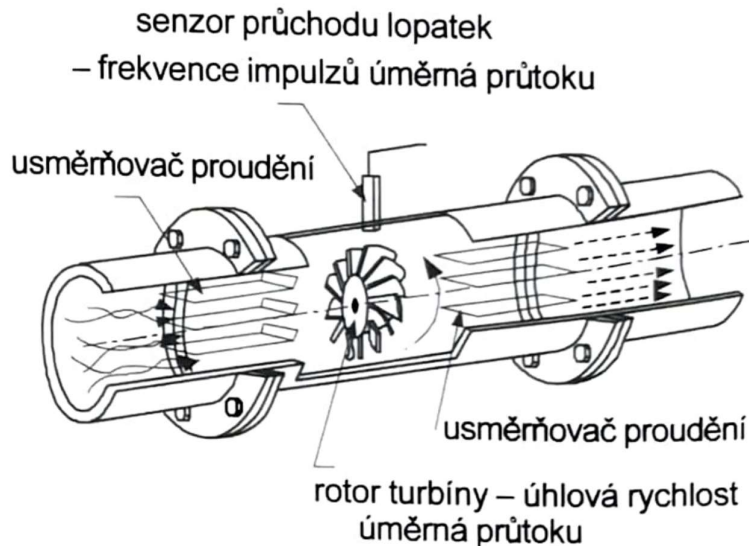


Obrázek 15 – Rotace proudnic ve vířivém průtokoměru, c_A ...axiální složka rychlosti, $c_{T1,2}$...tangenciální složka rychlosti, $p_{1,2}$...statický tlak [1]

3.5 Turbínkové a lopatkové průtokoměry

Konstrukce turbínkových a lopatkových průtokoměrů je velice podobná. Obecně lze říci, že turbínkové a šroubové průtokoměry mají oběžné kolo (rotor) vložené do potrubí axiálně (osa rotace je totožná s osou potrubí). U lopatkových průtokoměrů rotor připomíná mlýnské kolo, které je vloženo do potrubí radiálně vůči ose potrubí. [14]

Princip turbínkových a lopatkových průtokoměrů (viz obrázek 16) spočívá v převodu dopředné rychlosti tekutiny na úhlovou rychlost rotoru turbíny, nebo lopatkového kola, který je instalován v měřicí části potrubí. Vlivem pohybu proudícího média dochází k otáčení rotoru, jenž je osazen vhodně orientovanými lopatkami. [14]



Obrázek 16 – Vnitřní uspořádání typického turbínkového průtokoměru [1]

Počet lopatek rotoru závisí na velikosti potrubí, ale zpravidla se tento počet pohybuje od 6 do 20 lopatek. Objemový průtok je přímo úměrný úhlové rychlosti rotoru, proto měřenou veličinou u těchto průtokoměrů je frekvence otáčení. [14]

U analogového průtokoměru jsou otáčky rotoru zaznamenávány čítačem otáček. Počet otáček je přímo úměrný proteklému množství tekutiny. V případě digitálního turbínkového průtokoměru se frekvence otáčení měří proximálními snímači polohy, kdy sledujeme kolikrát lopatka (případně bod na rotoru) proběhla kolem senzoru. Využívají se indukční senzory, kapacitní senzory, Hallova sonda, nebo zřídka optické senzory. [14]

Vlastnosti turbínkových a lopatkových průtokoměrů

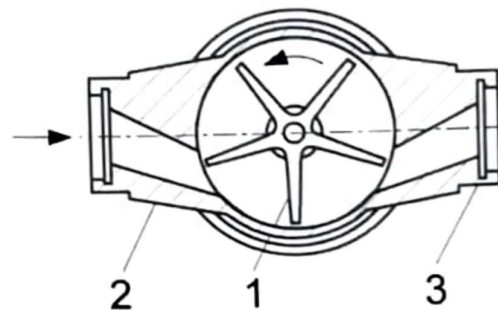
Mezi výhody těchto průtokoměrů patří jejich jednoduchost, poměrně nízká tlaková ztráta a lineární závislost průtoku na otáčkách rotoru. [1; 14]

Nevýhodou je, že průtok nemůžeme měřit od nuly. Další nevýhodou je opotřebení ložisek, které je nevyhnutelné a nutnost čistého média bez nečistot a abraziv. [1; 14]

3.5.1 Turbínkové průtokoměry s tangenciálním vtokem (lopatkové radiální průtokoměry)

V úvodu kapitoly jsme se zmínili o radiální a axiální poloze rotoru vůči ose potrubí. V případě turbínkových průtokoměrů s tangenciálním vtokem, však pravidlo o rozdělení průtokoměrů na turbínkové a lopatkové neplatí. I přes to, že máme rotor umístěn radiálně k ose potrubí, mluvíme o turbínkovém průtokoměru. Oběžné kolo (viz obrázek 17 pozice 1) je osazeno radiálními lopatkami, kdy osa rotace oběžného kola je kolmá na směr proudící tekutiny. [3]

Tento typ turbínkového průtokoměru je často využíván k měření průtoku užitkové a pitné vody. Vykazuje nejistoty měření okolo 1 %. [1]

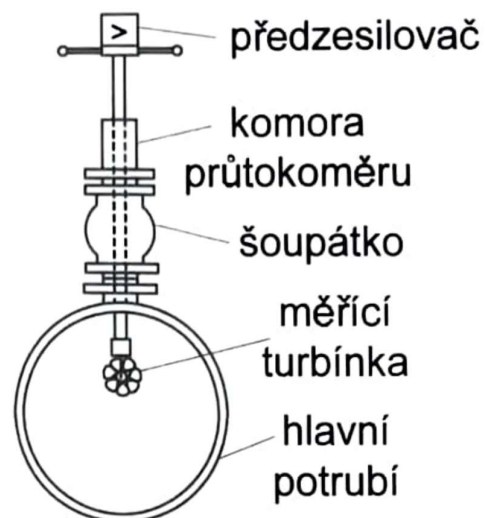


Obrázek 17 – Turbínkový průtokoměr s tangenciálním vtokem, 1...oběžné kolo s radiálními lopatkami, 2...vstupní hrdlo, 3... výstupní hrdlo [1]

3.5.2 Zásuvné turbínkové průtokoměry

Zásuvných turbínkových průtokoměrů se využívá především pro velké průměry potrubí, kde by ostatní průtokoměry nebylo možné použít (od DN 150 do DN 2000). Používají se k měření průtoků chladicích vod v elektrárnách, měření průtoku zemního plynu a stlačeného vzduchu. Turbínkový zásuvný průtokoměr lze vidět na obrázku (18). [15]

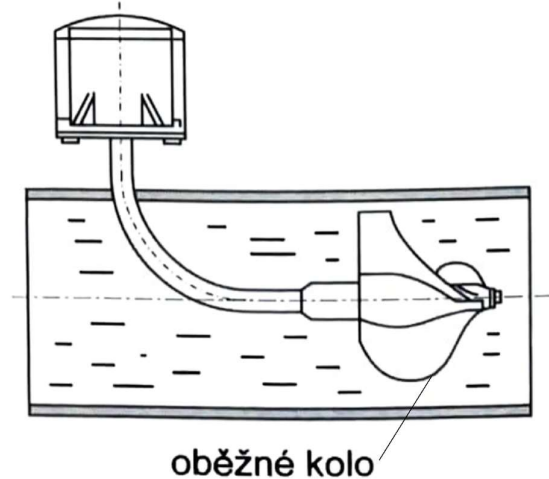
Zásuvné turbínkové průtokoměry vyžadují dlouhé uklidňovací délky potrubí a to od 10 do 40 DN před turbínkou a minimálně 3 DN za turbínkou. [15]



Obrázek 18 – Zásuvný turbínkový průtokoměr [1]

3.5.3 Šroubové průtokoměry

Proudící tekutina otáčí rotorem připomínajícím lodní šroub (viz obrázek 19). U tohoto průtokoměru opět měříme frekvenci otáček rotoru, která je přímo úměrná průtoku. Tento průtokoměr se používá například u zavlažovacích systémů, nebo při měření průtoku užitkové vody. Při malých průtocích tyto průtokoměry přestávají fungovat. [16]

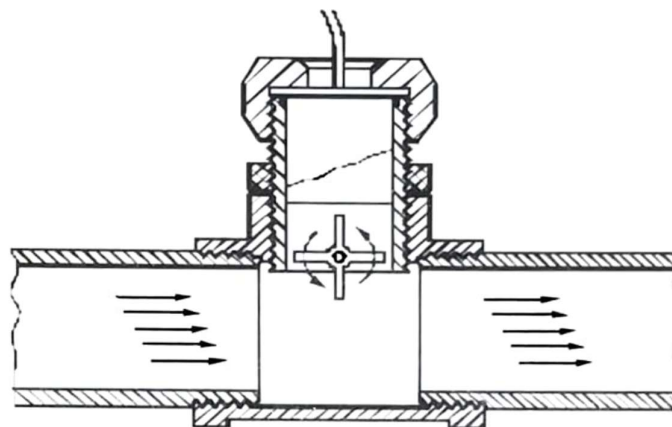


Obrázek 19 – Šroubový průtokoměr [1]

3.5.4 Průtokoměry s lopatkovými koly

Rotor osazený lopatkami (viz obrázek 20) je radiálně vložen do potrubí, tak aby se částečně brodil v proudícím médiu. Opět se otáčky mění s průtokem. Frekvence otáček bývá zjišťována pomocí Hallovy sondy. [1; 17]

Výhodou je, že měření je téměř nezávislé na přítomnosti tuhých látek rozpuštěných v tekutině, protože se lopatkové kolo brodí jen v malém objemu tekutiny. Mezi výhody můžeme zařadit i konstrukční jednoduchost (rotor nevyžaduje uložení do kuličkových ložisek). [17]



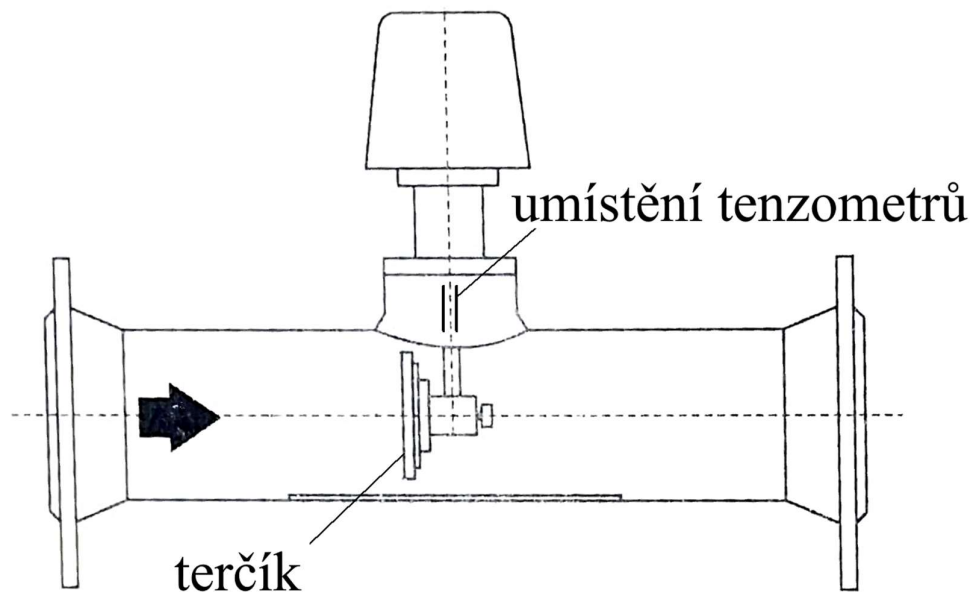
Obrázek 20 – Lopatkový průtokoměr [1]

3.6 Deformační průtokoměry

Deformační průtokoměr (viz obrázek 21) využívá kinetické energie proudící tekutiny, čímž vyvolává sílu působící na terčík. Tato dynamická síla ohýbá nosník osazený tenzometry. Odečtenou deformaci z tenzometrů přepočítáváme na objemový tok. Dynamickou sílu F_d působící na terčík určíme následujícím vztahem: [1]

$$F_d = K_c \cdot S \frac{\rho \cdot c^2}{2} \quad [N] \quad (17)$$

Kde K_c je součinitel odporu (závisí na tvaru terčíku), S je plocha terčíku, ρ je hustota tekutiny, c je rychlost tekutiny. [1]



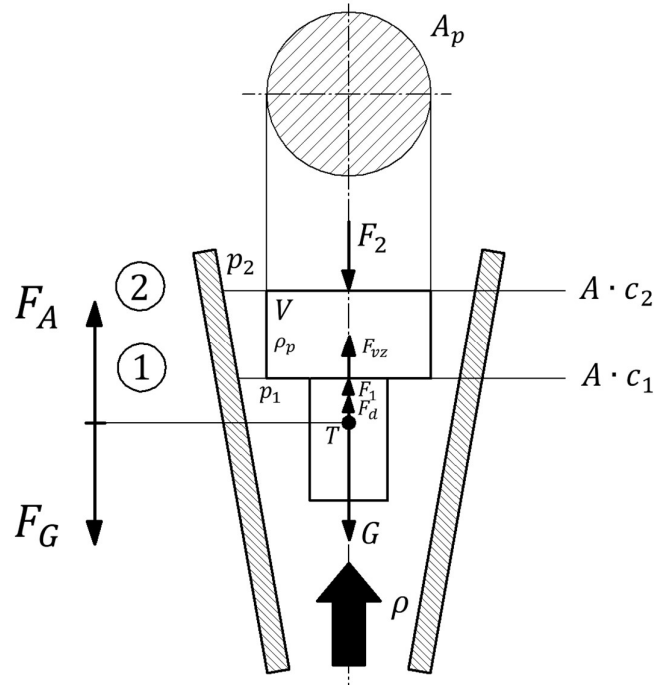
Obrázek 21 – Deformační průtokoměr [1]

Deformační průtokoměr je jedním z mála průtokoměrů, které jsou vhodné pro měření znečištěných, korozivních, horkých nebo žíravých tekutin. Nevhodný je pouze pro tekutiny, které by způsobovali usazeniny na terčíku, či abrazivní nečistoty, které by terčík opotřebily. Průtokoměr neobsahuje žádné pohyblivé části, proto vyniká svojí odolností však na úkor přesnosti měření. [1]

Deformační průtokoměry vykazují velké nejistoty měření (přibližně 5 %). V případě, že je terčík symetrický, je možné měřit průtok v obou směrech. [1]

3.7 Průtokoměry s proměnným průřezem

Průtokoměry s proměnným průřezem (viz obrázek 22) patří do skupiny průtokoměrů využívajících tlakovou diferenci. Závislost tlakové difference na rychlosti proudění média je v celém rozsahu konstantní, protože médium proudí skrze proměnlivý průřez, díky čemuž plováček ustavuje do rovnovážné polohy. [18]



Obrázek 22 – Schéma odvození funkce plováčkového průtokoměru [1]

Plováček o příčném průřezu A_p , hustotě ρ_p a objemu V je nadnášen v proudu tekutiny o hustotě ρ . Plováček se ustálí po vyrovnání síly F_A po proudu a síly F_G proti proudu. Sílu působící proti proudu tekutiny můžeme rozepsat následovně: [1]

$$F_G = F_2 + G = A_p \cdot p_2 + V \cdot g \cdot \rho_p \quad [\text{N}] \quad (18)$$

Kde F_2 je síla odpovídající statickému tlaku tekutiny v místě 2 (obrázek 22), G je tíhová síla plováčku. Sílu F_A můžeme rozepsat následovně: [1]

$$F_A = F_1 + F_{vz} + F_d = A_p \cdot p_1 + V \cdot g \cdot \rho + A_p \frac{\rho \cdot c_1^2}{2} \quad [\text{N}] \quad (19)$$

Kde F_1 je síla odpovídající statickému tlaku tekutiny v místě 1 (obrázek 22), F_{vz} je vztlaková síla plováčku, F_d je dynamická síla způsobená proudící tekutinou. Při rovnováze plováčku platí následující vztah: [1]

$$F_A = F_G \quad (20)$$

$$\text{Po dosazení: } A_p \cdot \left(p_1 + \frac{\rho \cdot c_1^2}{2} \right) + V \cdot g \cdot \rho = A_p \cdot p_2 + V \cdot g \cdot \rho_p$$

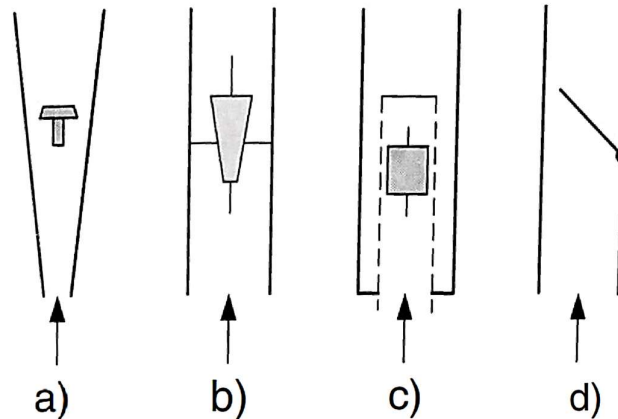
Úpravou rovnice 20 získáváme výsledný vztah pro objemový tok (viz rovnice 21): [1]

$$\dot{Q}_V = C_d \cdot A_2 \cdot c_2 = C_d \cdot A_2 \sqrt{\frac{2V \cdot g}{A_p \cdot \rho} (\rho_p - \rho)} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (21)$$

Opravný součinitel C_d se vyskytuje v rovnici z důvodu eliminace tlakových ztrát. [1]

3.7.1 Plováчковý průtokoměr

Konstrukční řešení plováчковých průtokoměrů může mít různé podoby. Nejčastější provedení je umístění plováčku v kuželovité trubici, kdy kuželovitost je do 2 %. Dalšími konstrukčními variantami jsou kuželový plováček, píst v děrovaném válci, nebo vychylovaná klapka (viz obrázek 23). Pro stabilizaci plováčku se využívá zářezů na jeho bocích, díky kterým dochází k rotaci plováčku, či vedení na centrální tyči, nebo struně. [18]



Obrázek 23 – Schématické znázornění konstrukce plováчковých průtokoměrů, a...kónická trubice, b...kuželový plováček, c...píst v děrovaném válci, d... vychylovaná klapka [1]

Plováčky se vyrábějí z plastů, skla, nebo korozivzdorné oceli pro agresivní prostředí. Materiály používané pro výrobu trubíc jsou pro menší tlaky většinou borosilikátová skla. Pro větší tlaky využíváme korozivzdorných ocelí. [18]

Vlastnosti plováчковých průtokoměrů

Mezi výhody plováчковého průtokoměru patří jeho jednoduchost a nízká cena. Díky použitým konstrukčním materiálům (sklo, nerezová ocel) jej lze uplatnit pro měření agresivních tekutin. Nevýhodou plováчковých průtokoměrů je nutnost instalace do svislé polohy, s tekutinou proudící směrem vzhůru (využívají gravitační sílu plováčku). To lze eliminovat použitím pružinového průtokoměru, kdy princip je totožný s plováчковým ale gravitační síla je nahrazena silou pružiny. Další nevýhodou je nemožnost použití pro znečištěné a viskózní kapaliny. [18]

3.8 Ultrazvukové průtokoměry

Ultrazvukové průtokoměry vyhodnocují objemový průtok na základě měření rychlosti proudícího média a znalosti kontrolního průřezu. Patří do skupiny rychlostních průtokoměrů. Princip měření spočívá ve sledování ultrazvukového signálu, který vysíláme do proudící tekutiny. [12]

Použití ultrazvukových průtokoměrů

Ultrazvukové průtokoměry lze využít pro měření kapalin, plynů i nasycených par, mohou pracovat v libovolné poloze a měřit proudění v obou směrech. Lze měřit malé i velké průtoky čistých, ale také znečištěných a agresivních kapalin, pulzujících průtoků, a v neposlední řadě k měření kalů a tavenin. Průtok můžeme měřit v potrubích o průměrech několika milimetrů až po jednotky metrů. Není vhodné měřit s ultrazvukovým průtokoměrem v oblasti přechodového proudění. [12]

Kalibraci průtokoměru musíme provést zvlášť pro laminární a zvlášť pro turbulentní oblast proudění. Průtokoměry pracující na Dopplerově jevu jsou obecně méně přesné a jsou vhodné pro znečištěné tekutiny, jako například kaly, odpadní tekutiny z provozů a kanalizací. Příložné snímače průtoků fungují nezávisle na materiálu potrubí za předpokladu, že materiál dobře vede zvuk. Nevhodná jsou především pro betonová, litinová, či plastová potrubí. [19]

Rozdělení ultrazvukových průtokoměrů

Ultrazvukové průtokoměry se rozdělují nejčastěji do dvou skupin: [19]

- Ultrazvukové průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu (transit-time).
- Ultrazvukové průtokoměry využívající Dopplerův jev.

Dále dělíme ultrazvukové průtokoměry podle konstrukčního provedení: [19]

- Konstrukce se smáčenými (zásuvnými) snímači (in-line), které jsou pevně zabudovány v kontrolní oblasti.
- Konstrukce s příloženými snímači (clamp-on), kdy snímače jsou přikládány na stěnu armatury.

3.8.1 Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu

Základními konstrukčními prvky ultrazvukového průtokoměru je vysílač a přijímač ultrazvukového vlnění. V praxi se nejčastěji setkáme s piezoelektrickými měniči, které mohou pracovat jak ve funkci vysílače, tak i přijímače ultrazvukového signálu. Frekvence ultrazvuku záleží na rezonanční frekvenci zmíněného piezoelektrického měniče a obvykle je 0,5 až 1 MHz. Konstrukční řešení tohoto ultrazvukového průtokoměru je provedeno následovně. V kontrolní oblasti (měřící trubici) je zabudován jeden nebo více párů ultrazvukových vysílačů a přijímačů (vysílače jsou na obrázku 24 označeny jako V_1 , V_2 , přijímače jako P_1 a P_2). Rovina, ve které ultrazvukové vysílače a přijímače leží, je sklopena od normály k ose potrubí o úhel α (viz obrázek 24). Průtokoměry jsou často konstruovány v diferenčním zapojení, kdy je ultrazvukový signál vysílán v obou směrech zároveň (opět viz obrázek 24). [19]

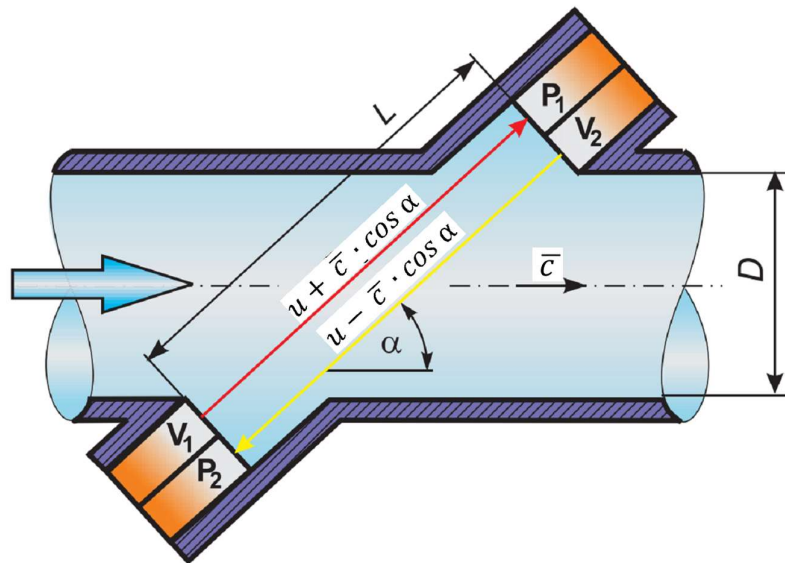
Vysílač V_1 vysílá impulzy ve směru proudu, vysílač V_2 vysílá impulzy proti směru proudu. Potom platí, že ultrazvukový impulz vysílaný vysílačem V_1 se šíří rychlostí $u + \bar{c} \cdot \cos \alpha$, kde u je rychlost ultrazvuku v daném prostředí a \bar{c} je střední rychlost proudící tekutiny. Rychlost šíření impulzů od vysílače V_2 je $u - \bar{c} \cdot \cos \alpha$. Doby mezi vysláním a přijmutím impulzu pro jednotlivé dvojice vysílače a přijímače jsou t_1 a t_2 dále popsány vztahy (22) a (23). [19]

$$t_1 = \frac{L}{u + \bar{c} \cdot \cos \alpha} \quad [\text{s}] \quad (22)$$

$$t_2 = \frac{L}{u - \bar{c} \cdot \cos \alpha} \quad [\text{s}] \quad (23)$$

Po úpravách a předpokladu, že rychlost ultrazvuku je mnohonásobně vyšší než rychlost proudící tekutiny ($\bar{c}^2 \ll u^2$), dostáváme výsledný vztah pro objemový tok tekutiny: [19]

$$\dot{Q}_V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \Delta t \cdot 2L}{4 \cdot (t_1 + t_2)^2 \cdot \cos \alpha} = \frac{\pi d^2 L \Delta t}{2 \cos \alpha \cdot (t_1 + t_2)^2} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (24)$$

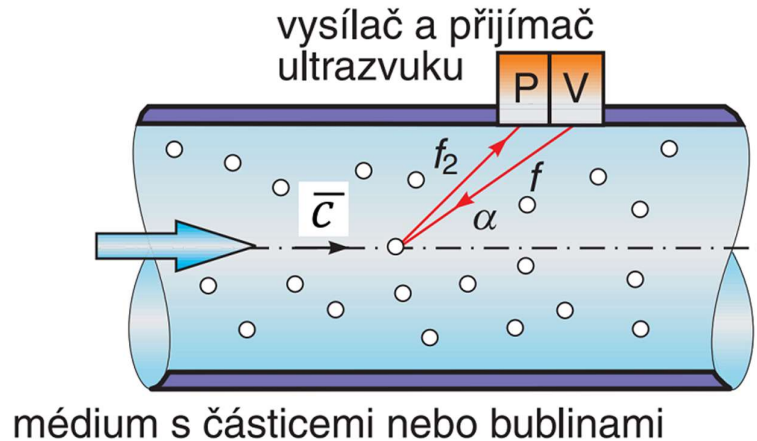


Obrázek 24 – Ultrazvukový průtokoměr s vyhodnocením doby průchodu signálu [19]

3.8.2 Průtokoměry využívající Dopplerův jev

Průtokoměr založený na Dopplerově jevu (viz obrázek 25) lze použít tam, kde proudící tekutina obsahuje částice, od kterých se může ultrazvuk odrazit, tj. pevné částice, či bubliny plynu v kapalině. S čistým médiem tento průtokoměr nemůže pracovat. Průtokoměr se opět skládá z kontrolní oblasti (měřící trubice), vysílače a přijímače, které mohou být připevněné na jedné nebo obou stranách potrubí. Ultrazvukový signál o frekvenci nejčastěji 1,2 MHz je vysílačem vysílán do proudící kapaliny. Signál se odráží od částíček rozptýlených v tekutině. Odražený signál je zachycen přijímačem, kde je vyhodnocována změna frekvence odraženého signálu. Rozdíl mezi oběma frekvencemi je úměrný rychlosti proudící tekutiny. [3]

Jak jsme již zmínili průtokoměry pracující na principu Dopplerova jevu potřebují koncentraci suspendovaných částic či bublin přibližně 30 μm . Přesnost měření závisí na rychlostním profilu proudící tekutiny, vhodnou kalibrací lze dosáhnout nejistoty měření $\pm 1\%$. [19]



Obrázek 25 – Princip Dopplerova průtokoměru [19]

Vlastnosti ultrazvukových průtokoměrů

Ultrazvukový průtokoměr má, ve srovnání s ostatními moderními průtokoměry (vírový, Coriolisův, viz kapitola 3.4, 3.3), významné přednosti. Oproti Coriolisovým průtokoměrům lze ultrazvukové využít pro libovolně velké průměry. Ultrazvukové průtokoměry lze použít i pro malé rozsahy průtoků, kde by již nebylo vhodné použít vírové průtokoměry. Ve srovnání s turbínkovými průtokoměry (viz kapitola 3.5) nemají ultrazvukové žádné pohyblivé části, které by se mohli zanést, či poškodit. Díky tomu vykazují minimální tlakovou ztrátu. [3; 19]

Výhody: [19]

- Použití pro vodivé i nevodivé kapaliny, agresivní média, výbušné plyny.
- Široké rozmezí měření rychlosti
- Minimální tlaková ztráta.
- Nenáročná údržba.
- Umožňují měření v obou směrech.
- Naměřené hodnoty nezávisí na vlastnostech měřené tekutiny.
- Široké rozmezí použitelných průměrů.
- Příložné snímače lze instalovat, či odjímat za provozu.

Nevýhody: [19]

- Při použití ultrazvukových průtokoměrů pracujících na Dopplerově jevu musí být v měřeném médiu rovnoměrně rozmístěné pevné částice, či bubliny plynů.
- Naopak u průtokoměrů s vyhodnocením doby průchodu signálu jakékoliv částice v médiu negativně ovlivňují měření.
- Měření je značně ovlivněno změnou tvaru rychlostního profilu, nedoporučuje se měřit v přechodové oblasti.
- Tekutina musí být akusticky propustná.
- Je požadováno dlouhé uklidňovací potrubí a to (10 až 20) DN před průtokoměrem a 5 DN za průtokoměrem.
- Potrubí musí být zaplněno v celém průřezu.

3.9 Indukční průtokoměry

Jelikož při návrhu vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů budeme využívat právě indukčních průtokoměrů, bude tato kapitola svým obsahem rozsáhlejší a problematika těchto průtokoměrů probrána hlouběji.

3.9.1 Historie

Indukční průtokoměry jsou využívány v průmyslu již více než 60 let. Často se v odborné literatuře setkáváme s různými názvy indukčních průtokoměrů, alternativy jsou magneto - indukční, elektromagnetický, či magnetický průtokoměr. [20]

Indukční průtokoměr vznikl na základě výzkumných prací dvou vědců. Anglický fyzik Michael Faraday (1791–1867) v roce 1821 při svých experimentech zjistil, že elektrický proud procházející vodičem vytváří magnetické pole. Deset let poté objevil, že změna magnetického pole vyvolává elektrický proud, což vedlo k objevu elektromagnetické indukce. Po více než sto letech se švýcarský vynálezce a benediktinský kněz Dr. Bonaventura Thürlemann (1909–1997) začal zabývat využitím elektromagnetické indukce v průmyslovém měření. V roce 1941 publikoval Thürlemann svou práci s názvem „Metody elektrického měření rychlosti v kapalinách“, kde popsal využití Faradayova zákona při měření objemového průtoku kapalin. [20]

Zajímavým faktem je také skutečnost, že vývoj indukčních průtokoměrů se odehrával v 50. letech minulého století v Československu. Indukční průtokoměry vyvíjel Výzkumný ústav pro stavbu lodí, známý také pod názvem Navika Praha. Předním odborníkem se stal Ing. Miroslav Kubiška, jehož nejstarší patentová přihláška týkající se indukčního průtokoměru byla podána v roce 1959. [20]

3.9.2 Konstrukce indukčního průtokoměru

Indukční průtokoměr se skládá ze tří základních komponent: měřicí trubice, elektromagnetu/permanentního magnetu, elektrod. [21; 22]

Měřicí trubice musí být vyrobena z nemagnetického materiálu (korozivzdorná ocel, keramika, plast). Materiál použitý pro výrobu měřicí trubice musí dále vykazovat odolnost proti změnám teploty, tlaku, chemickým účinkům a abrazi. [21; 22]

Elektromagnet slouží ke generování magnetického pole, obvykle je tvořen soustavou dvou cívek umístěných v elektricky a magneticky stíněném krytu. [21; 22]

Snímací elektrody měří indukované napětí a jsou v přímém kontaktu s proudící kapalinou. Na materiál elektrod jsou kladeny požadavky velmi dobré vodivosti, ale zároveň odolnosti proti abrazi a chemickým účinkům proudící kapaliny. Soustava elektrod bývá nejčastější poruchou indukčního průtokoměru, zdrojem závad může být právě koroze, abraze, či zanešení elektrod usazeninami. Tomuto problému lze předejít použitím kapacitních elektrod, které nejsou v bezprostředním kontaktu s proudící kapalinou. [21; 22]

3.9.3 Princip indukčního průtokoměru

K fyzikálnímu vysvětlení, jak vlastně indukční průtokoměr funguje lze přistupovat dvěma směry. Existuje vysvětlení na základě Faradayova zákona a na základě Lorenzova zákona. Podstatné je, že oba náhledy přinášejí stejný výsledek. Pro stručnost uvádíme pouze vysvětlení na základě Faradayova zákona, které je snáze uchopitelné. [21; 22]

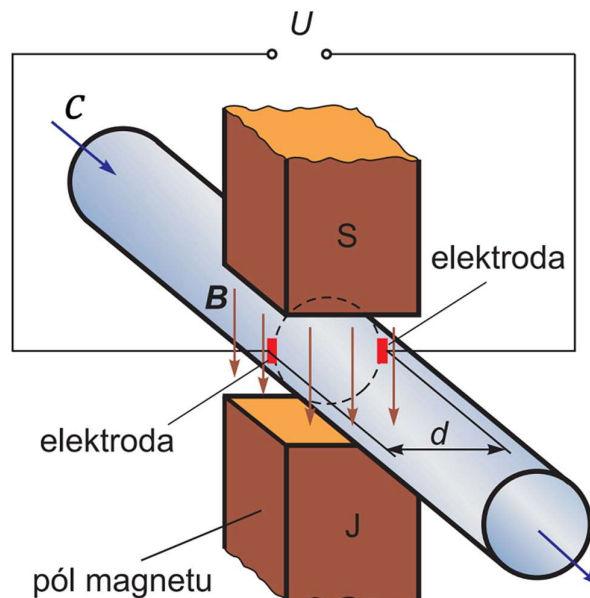
Vysvětlení na základě Faradayova zákona

Princip indukčního průtokoměru lze vysvětlit na základě Faradayova indukčního zákona, podle kterého se ve vodiči indukuje napětí jako důsledek časové změny magnetického pole. [20]

Na obrázku 26 je znázorněn princip indukčního průtokoměru, kdy vodič je nahrazen elektricky vodivou kapalinou proudící mezi dvěma elektrodami. Permanentní magnet nebo elektromagnet vytváří magnetické pole, které prochází potrubím i kapalinou. Úsek potrubí mezi magnety musí být z nemagnetického a nevodivého materiálu. Na vnitřním povrchu měřicí trubice jsou zabudovány dvě elektrody pro snímání indukovaného napětí. Tyto elektrody musí být umístěny kolmo na směr magnetických siločar. Pohybuje-li se kapalina napříč magnetickým polem o indukcii B rychlostí c , indukuje se na elektrodách napětí U , jehož velikost je podle Faradayova zákona dána vztahem: [20]

$$U = \mathbf{B} \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{c} = B \cdot d \cdot c \cdot \sin \frac{\pi}{2} = B \cdot d \cdot c \text{ [V]} \quad (25)$$

Kde d je délka vodiče (= vzdálenost elektrod – v kontrolovaném průřezu se jedná o průměr d). Úhel mezi siločarami magnetické indukce B a rovinou ve které se nacházejí elektrody svírá 90° ($\pi/2$), tudíž můžeme dále pokračovat s rovnicí ve skalárním tvaru. [20]



Obrázek 26 – Princip indukčního průtokoměru [20]

3.9.4 Výpočet objemového průtoku

Objemový průtok \dot{Q}_V lze spočítat jako součin průtočného průřezu A_d a rychlosti proudění c . [20]

$$\dot{Q}_V = A_d \cdot c = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot c \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (26)$$

Vyjádříme-li si z tohoto vztahu rychlost proudění c :

$$c = \frac{4 \cdot \dot{Q}_V}{\pi \cdot d^2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (27)$$

Po dosazení vyjádřené rychlosti c do vztahu 25 dostáváme výsledný vztah pro indukované napětí:

$$U = B \cdot d \cdot \frac{4 \cdot \dot{Q}_V}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot B}{\pi \cdot d} \cdot \dot{Q}_V \quad [\text{V}] \quad (28)$$

Finální úpravou získáme vztah pro objemový průtok \dot{Q}_V :

$$\dot{Q}_V = \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot B} \cdot U \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (29)$$

Ze vztahu (28), je patrné že indukované napětí snímané na elektrodách průtokoměru je lineární funkcí rychlosti proudění kapaliny, protože magnetická indukce bude konstantní (zajištěná buď permanentním magnetem nebo elektromagnetem) a průměr potrubí d v měřené oblasti se také nebude měnit. [20]

Při změně směru toku proudící kapaliny se změní polarita indukovaného napětí. [20]

3.9.5 Vliv měřené kapaliny na výsledky měření

Velice důležitým aspektem při měření indukčním průtokoměrem je minimální vodivost měřené kapaliny. U běžných indukčních průtokoměrů se minimální elektrická vodivost média pohybuje v rozmezí 1 až 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. U průtokoměrů vybavených kapacitními elektrodami pak 0,05 až 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Jak je vidět v tabulce 1, demineralizovaná voda požadavek na minimální vodivost nesplňuje, ale většina vodných roztoků díky rozpuštěným solím požadavku vyhoví. Požadované vodivosti nedosahuje většina organických látek a olejů (musíme volit jiný typ průtokoměru). Je také velice důležité, aby vodivost média v prostoru měřící trubice byla homogenní, je-li médium tvořeno směsí více tekutin, je nutné, aby v místě měřící trubice byla směs řádně promíchaná. U nehomogenní směsi bude výstupní signál vykazovat značný šum. [21; 22; 23]

Tabulka 1 – Měrné vodivosti vybraných látek [20]

Látka	Měrná vodivost [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Demineralizovaná voda	0,01
Pitná voda	200 až 800
Kyseliny	(1 až 8) $\cdot 10^5$
Mléko	200 až 300
Ovocné šťávy	400 až 1000
Ehanol	0,2
Benzin	10^{-8}

Bublanky plynu či pěny rozptýlené v tekutině vedou k nepřesnosti měření, vyvolání šumu na výstupním napětí a v případě velkých bublinek, řádově srovnatelných s velikostí elektrod až k přerušení signálu. [21; 23]

Usazeniny v měřící trubici (vodivé i nevodivé) zmenšují její průřez. Čímž nám vzniká chyba, protože přesný průřez nejsme schopni definovat, stále počítáme s tím původním. [21; 23]

Nevodivé usazeniny na elektrodách mohou měření zcela znemožnit. Nejsnazším způsobem, jak předejít usazeninám a zároveň opotřebení elektrod, je volit vhodnou rychlost průtoku tekutiny (přibližně 2 až 3 m/s). Při nižších rychlostech dochází k usazeninám, při vyšších rychlostech pak k abrazi elektrod. [21; 23]

3.9.6 Vlastnosti indukčního průtokoměru

Jelikož indukční průtokoměry disponují mnoha výhodami, ale i nevýhodami, shrnuli jsme toto hodnocení do následujících bodů.

Výhody: [20]

- Žádné překážky v kontrolním průřezu, malé tlakové ztráty.
- Vhodný průtokoměr pro měření korozivních a agresivních médií.
- Umožňuje oboustranné měření.
- Výsledky měření nejsou významně ovlivněny fyzikálními vlastnostmi média (významné potlačení vlivu změn teploty, tlaku, viskozity, hustoty)
- Vysoká přesnost a opakovatelnost.
- Průtokoměry jsou mechanicky odolné.
- Dostupnost pro vysoký rozsah průměrů od DN 2 až po DN 3000.
- Nízké náklady na obsluhu a údržbu.

Nevýhody: [20]

- Nutná minimální elektrická vodivost měřeného média.
- Indukční průtokoměr není vhodný pro měření plynů a par.
- Instalace průtokoměru tak, aby byl zaplaven celý průtočný průřez
- Nutnost minimální uklidňovacích úseků před (5 DN) a za (3 DN) průtokoměrem.
- Hrozí abraze, či znečištění elektrod a tím nevalidní měření průtoku.
- Indukční průtokoměr vyžaduje spolehlivé uzemnění.

4 Návrh vodní tratě pro testování a kalibraci průtokoměrů

V této kapitole budeme postupovat od výběru vhodných dílů, přes popis náležitostí, které trať musí splňovat, 3D vizualisaci konstrukce, tvorbu výkresové dokumentace, návrh uživatelského rozhraní v softwaru LabVIEW až po ekonomickou rozvahu.

4.1 Výběr typu průtokoměru

Nejdříve je nutné rozhodnout, jaký typ průtokoměrů pro vodní trať použijeme. Toto rozhodnutí je stěžejní pro další pokračování, od zvoleného typu průtokoměru se odvíjí design celé tratě. Je to kvůli tomu, že každý typ průtokoměru potřebuje odlišné uklidňovací délky před a za průtokoměrem, má rozdílné požadavky na umístění, instalaci atd.

V předchozí kapitole jsme popsali jednotlivé druhy průtokoměrů, jejich principy, vlastnosti, výhody, nevýhody a obecně jejich přesnost, která se ale může lišit dle konkrétního výrobce. Průtokoměr musí měřit s nízkou chybou a dosahovat vysoké míry opakovatelnosti měření. Dále je nutné přihlížet na hospodárnost celého návrhu a na dostupnost jednotlivých průtokoměrů. Jednotlivé aspekty jsou pro přehlednost shrnuty v tabulce (2). V tabulce jsou ohodnoceny jednotlivé druhy průtokoměrů číslicí od 1 do 5, kdy nejlepší vlastnost je ohodnocena 5 a nejhorší vlastnost 1.

Tabulka 2 – Hodnocení průtokoměrů

Kritérium/druh průtokoměru	Objemový	Škrťací orgány	Ultrazvukový	Indukční	Hmotnostní (Coriolisův)	Fluidikový	Turbínkový	Plovákový	Poznámka:
Přesnost měření	5	3	4	3	4	2	2	1	----
Cena	2	4	4	4	1	4	5	5	----
Uklidňovací délka	5	1	1	3	5	1	5	5	Nepotřebuje uklidňovací potrubí - 5, Potřebuje 20 DN před - 1
Individuální vlastnosti průtokoměrů, které je vhodné zohlednit.									----
Tlaková ztráta	1	2	5	5	4,5	3	3	2	----
Pulzace průtoku	1	5	5	5	5	5	5	5	----
Celkem	14	15	19	20	19,5	15	20	18	----

K tabulce (2), která shrnuje hodnocení jednotlivých průtokoměrů, je nutné dodat, že se jedná o subjektivní hodnocení. V tabulce byly všechny vlastnosti hodnoceny stejnou vahou, což v tomto případě není vhodné. Z toho důvodu vnímejme výsledky pouze jako orientační.

Dále je třeba přidat komentář k přesnosti průtokoměrů. Rozhodnout o přesnosti a opakovatelnosti měření pouze na základě katalogových listů je náročnou disciplínou, protože je možné, ať už záměrně či nikoli, že výsledky publikované výrobcem jsou zkršené. Skutečná přesnost a opakovatelnost měření se prokáže až po zapojení do dané technologie, nebo vlastní kalibraci.

Z tabulky vyplývá, že vhodné průtokoměry pro naši vodní trať jsou ultrazvukový, indukční, hmotnostní (Coriolisův) a turbínkový.

Turbínkový průtokoměr (viz kapitola 3.5) je méně přesný a opakovatelnost měření také není vysoká. Jelikož je to v našem případě nejdůležitější aspekt, tak jej z našeho výběru vyřadíme.

Hmotnostní (Coriolisův) průtokoměr (viz kapitola 3.3) vykazuje dobré hodnoty přesnosti i opakovatelnosti měření, můžeme s ním měřit i hustotu kapaliny (známe objemový i hmotnostní tok). Coriolisův průtokoměr vyřazujeme z důvodu vysoké pořizovací ceny.

Na výběr již zbývá jen ultrazvukový (viz kapitola 3.8) a indukční průtokoměr (viz kapitola 3.9). Při rozhodování mezi těmito průtokoměry byla stěžejní hospodárnost, protože Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky ve svých laboratořích často využívá indukční průtokoměry od společnosti ELIS Plzeň a.s.. Pro návrh vodní trati jsme se proto rozhodli pro použití indukčních průtokoměrů dostupných v laboratořích Ústavu Mechaniky tekutin a termodynamiky.

Na závěr výběru vhodného průtokoměru bychom rádi připojili komentář k průtokoměrům z tabulky, které není možné pro tento konkrétní případ využít a proč.

Objemový průtokoměr (viz kapitola 3.1) vykazuje velice přesné výsledky měření i jeho opakovatelnosti, ale pro naše použití není vhodný, protože by vytvořil nestacionární proudění v potrubí. Jelikož se bude jednat o trať pro testování a kalibraci průtokoměrů bylo by nestacionární proudění další komplikací, které je vhodné předejít.

Škrťací orgány (clony, dýzy, či Venturiho trubice) (viz kapitola 3.2). také není vhodné použít. Nevýhodou měření pomocí těchto škrťacích orgánů je dlouhé ukliďňovací potrubí, potřeba dvou převodníků tlaku a složité kalibrace.

Fluidikové a plováčkové průtokoměry (viz kapitola 3.4 a 3.7) pro naši trať vykazují příliš vysoké hodnoty chyb.

4.2 Výběr indukčního průtokoměru

Dle zadání je naším úkolem navrhnout vodní trať pro testování a kalibraci průtokoměrů od průměru potrubí DN 15 do DN 50. Budeme vybírat z indukčních průtokoměrů řady FLONET FN50XX.1 z katalogového listu společnosti ELIS Plzeň a.s.. Průtokoměry vybíráme podle jejich průměru. Je třeba pokrýt rozhraní od průměru DN 15 do průměru DN 50. Volíme obě krajní hodnoty.

Pro lepší citlivost měření průtoku ve střední oblasti zvolíme ještě jeden průtokoměr. Vybíráme z řad DN 20, DN 25, DN 32, DN 40. Ideálně bychom vybrali průtokoměr, který bude ležet svým průřezem uprostřed mezi průřezy průtokoměrů o průměru DN 15 a DN 50. Pro lepší přehlednost v tabulce 3 lze porovnat jednotlivé plochy kontrolního průřezu.

Tabulka 3 – Průřezy kontrolních oblastí indukčních průtokoměrů FLONET FN50XX.1

FLONET FN50XX.1						
DN [mm]	15,0	20,0	25,0	32,0	40,0	50,0
S [mm ²]	176,7	314,2	490,9	804,2	1256,6	1963,5

Třetí průtokoměr se volí podle střední plochy průřezu, protože tyto indukční průtokoměry mají omezený rozsah rychlosti průtoku tekutiny kontrolní oblastí, kdy jsou schopné měřit. Je stanovena minimální průtoková rychlost (u každého rozměru je rozdílná, ale blíží se nule) a maximální průtoková rychlost (u všech indukčních průtokoměrů FLONET FN50XX.1 10 m/s).

Střední průřez kontrolní oblasti jsme spočítali pomocí aritmetického průměru (vztah 30).

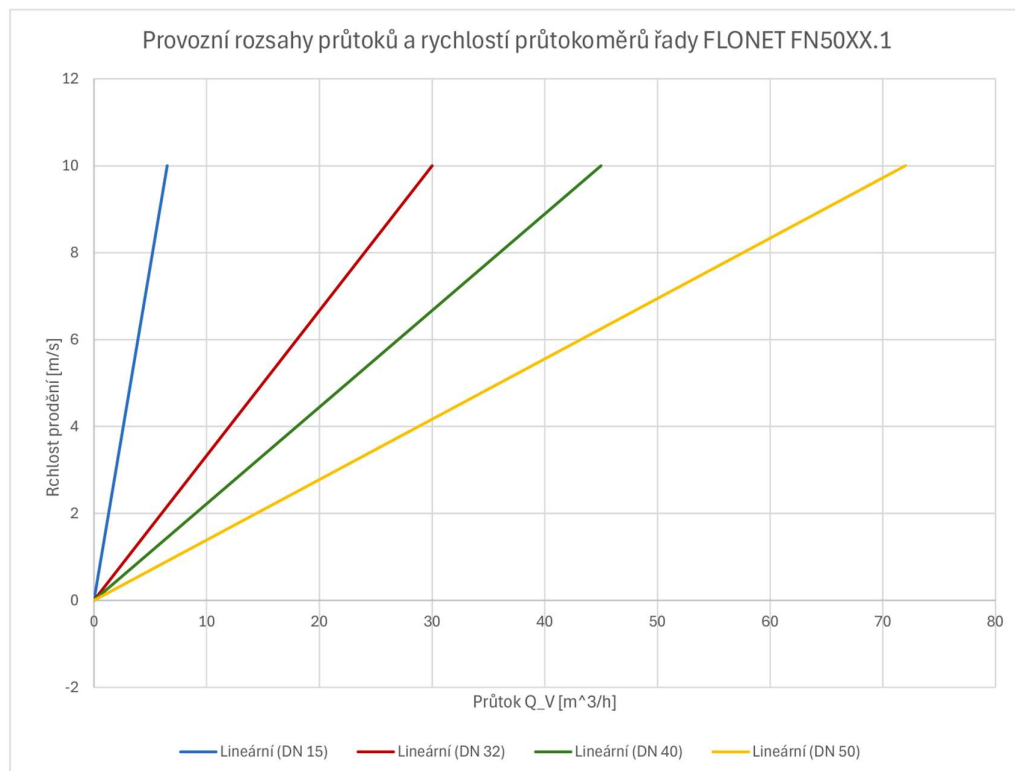
$$S_i = \frac{S_{DN50} + S_{DN15}}{2} = \frac{1963,5 + 176,7}{2} = \mathbf{1070,1 \text{ mm}^2} \quad (30)$$

Z tabulky (4) lze zjistit, že nejlépe odpovídá průtokoměr o průměru DN 40. V laboratoři Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky tento rozměr průtokoměru FLONET FN50XX.1 není k dispozici, proto volíme průtokoměr o průměru DN 32, který se svým rozdílem průměrné plochy průřezu a plochy průřezu konkrétních průtokoměrů liší v rozumných mezích.

Tabulka 4 – Porovnání průřezů jednotlivých velikostí průtokoměrů FLONET FN50XX.1

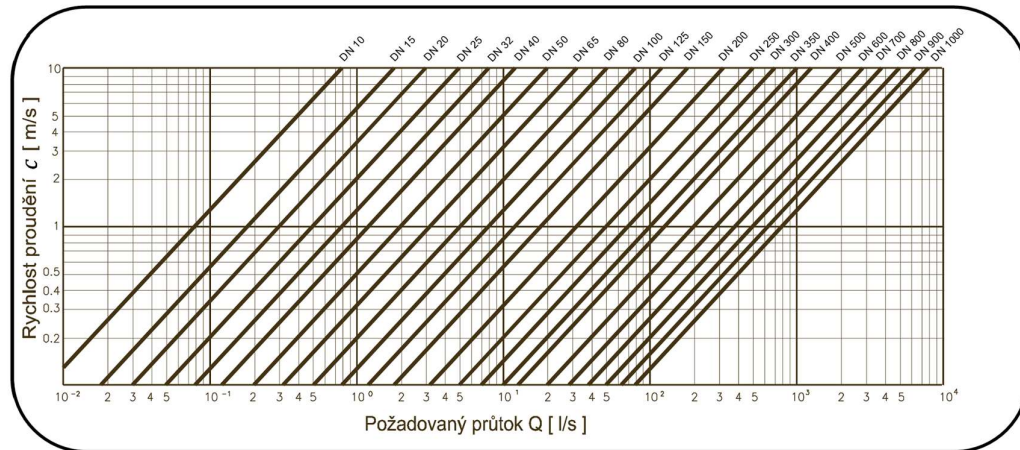
FLONET FN50XX.1						
DN [mm]	15	20	25	32	40	50
Si [mm ²]	1070,1					
S [mm ²]	176,7	314,2	490,9	804,2	1256,6	1963,5
ΔS = Si - S [mm ²]	893,4	755,9	579,2	265,9	-189,5	-893,4

Pro dovysvětlení volby průtokoměru DN 32 přikládáme graf (1). Zobrazuje závislost rychlosti proudění na průtoku. Podle něho lze určit rozsah měření jednotlivých průtokoměrů. V grafu (1) je vynesena i průtokoměr DN 40 a díky grafickému zobrazení vidíme, že volba průtokoměru DN 32 je rozumným řešením.



Graf 1 – Rozsah měření indukčních průtokoměrů řady FLONET FN50XX.1 [23]

Pro doplnění uvedeme i graf (2), který uvádí výrobce ve svém katalogovém listu. Jedná se opět o graf závislosti rychlosti proudění na průtoku. Obě osy jsou však v logaritmickém měřítku. Díky tomu dostáváme pro jednotlivé průměry průtokoměrů rovnoběžné charakteristiky, kde je názorněji vidět spodní hranice měřitelnosti. Pro určení přesahu jednotlivých charakteristik není vhodný, protože se z tohoto diagramu na první pohled jeví, že všechny tři průtokoměry měří na velmi podobném rozsahu.



Graf 2 – Provozní rozsahy průtoků a rychlostí v závislosti na dimenzi čidla – vyřazeno z katalogu [23]

Pro doplnění přidáváme tabulku.

Tabulka 5 – Rozsahy měření průtoku jednotlivých průtokoměrů dle DN – vyřazeno z katalogu [23]

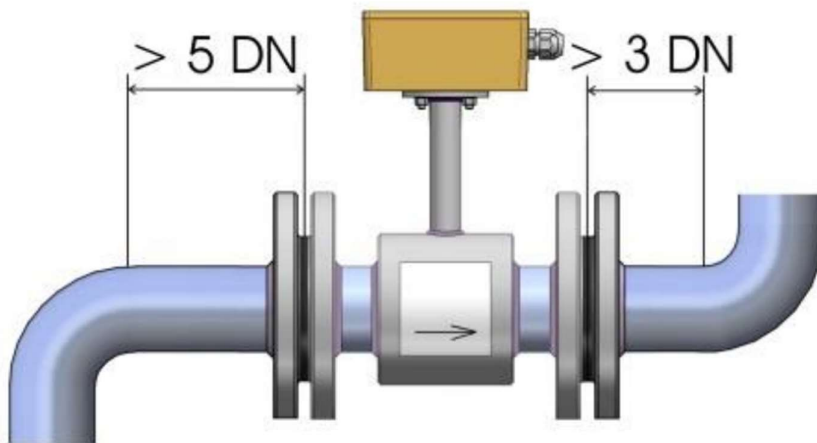
Jmenovitá světlost DN	Přetěžovací průtok Q_4 [m ³ /h]	Trvalý průtok Q_3 [m ³ /h]	Přechodový průtok Q_2 [m ³ /h]	Minimální průtok Q_1 [m ³ /h]	Necitlivost [m ³ /h] Q_1 35%	Necitlivost [m ³ /h] Q_1 50%	Rozsah měření Q_3/Q_1
15	6,5	5,2	0,0416	0,026	0,0091	0,013	200
20	12	9,6	0,0768	0,048	0,0168	0,024	
25	18	14,4	0,1152	0,072	0,0252	0,036	
32	30	24	0,192	0,12	0,042	0,06	
40	45	36	0,288	0,18	0,063	0,09	
50	72	57,6	0,4608	0,288	0,1008	0,144	
65	120	96	0,768	0,48	0,168	0,24	
80	180	144	1,152	0,72	0,252	0,36	
100	280	224	1,79	1,12	0,392	0,56	
125	430	344	2,75	1,72	0,602	0,86	
150	650	520	4,16	2,6	0,91	1,3	
200	1 150,0	920	7,36	4,6	1,61	2,3	
250	1 800,0	1 440,0	11,52	7,2	2,52	3,6	
300	2 520,0	2 016,0	16,13	10,08	3,528	5,04	
350	3 500,0	2 800,0	22,4	14	4,9	7	
400	4 500,0	3 600,0	28,8	18	6,3	9	
500	7 200,0	5 760,0	46,08	28,8	10,08	14,4	
600	10 000,0	8 000,0	64	40	14	20	
700	14 000,0	11 200,0	89,6	56	19,6	28	
800	18 000,0	14 400,0	115,2	72	25,2	36	

Je nutné vysvětlit snahu do naší vodní trati zakomponovat 3 stejné průtokoměry o rozdílných průměrech DN. Jak je popsáno v kapitole o indukčních průtokoměrech (viz kapitola 3.9), při průtoku tekutiny skrze kontrolní oblast se na elektrodách indukuje napětí. Toto napětí dále zpracováváme a používáme jako výstupní signál daného průtokoměru. Z diagramů výše je vidět, že všechny vybrané průtokoměry měří téměř od stejné hodnoty minimálního průtoku, ale citlivost jednotlivých průtokoměru při nízkých průtocích stejná není. Při nízkých hodnotách průtoků (použití při kalibrování malých průtokoměru) budou data z průtokoměru DN 15 mít výrazně menší chybu než z průtokoměru DN 32, nebo DN 50 (průtokoměr DN 15 je v oblasti malých průtoků výrazně citlivější). V opačném případě, při měření vysokých průtoků (použití při kalibrování velkých průtokoměru) budou hodnoty z průtokoměru DN 15 a DN 32 nepoužitelné, protože průtok vody bude mimo interval měřitelnosti těchto průtokoměru a budeme dostávat data jen z průtokoměru DN 50. Průtokoměr DN 32 pokryje oblast středních průtoků, kdy data z průtokoměru DN 15 již budou mimo měřící rozsah a průtokoměr DN 50 bude stále v oblasti s malou citlivostí. Použitím tří průtokoměru rozdílných průměrů si zajistíme schopnost testovat a kalibrovat průtokoměry od těch nejmenších až po průtokoměry DN 50 při dodržení malé chybovosti.

4.3 Zásady správné instalace indukčního průtokoměru

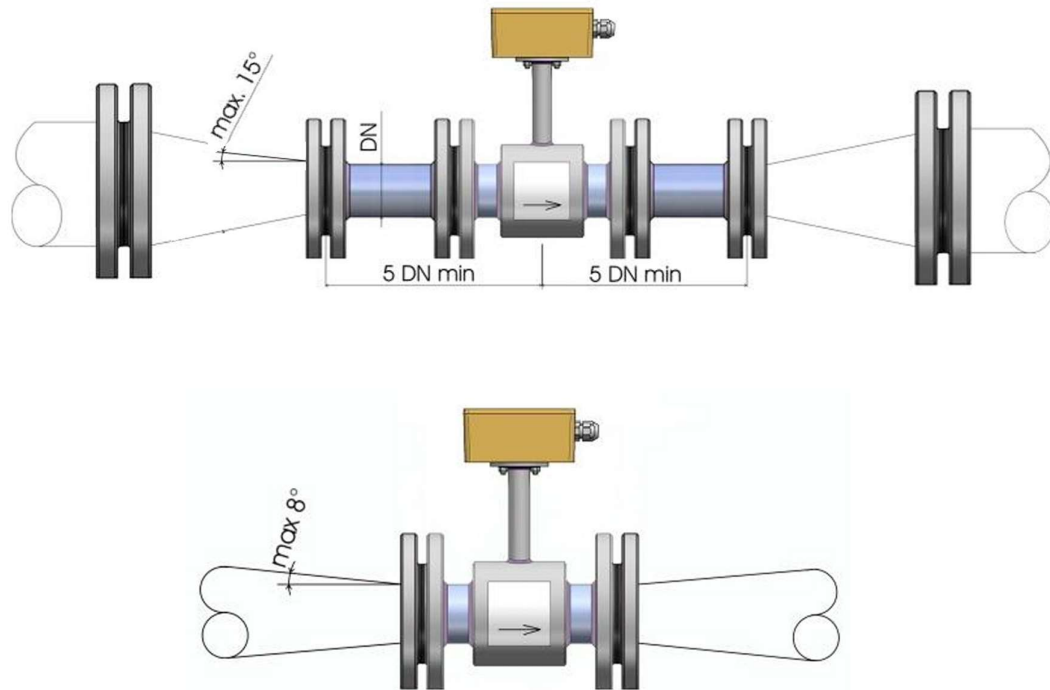
U indukčních průtokoměru musí být dodržena minimální vodivost média (minimálně 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$). V našem případě bude proudící médium užitková voda, jenž vykazuje vodivost 200 až 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Znamená to, že médium pro indukční průtokoměr vyhovuje. [23]

Velice důležité je také správné umístění průtokoměru. Minimální vzdálenost ukliďňovací části před průtokoměrem je 5 DN a za průtokoměrem 3 DN (viz obrázek 27). [23]



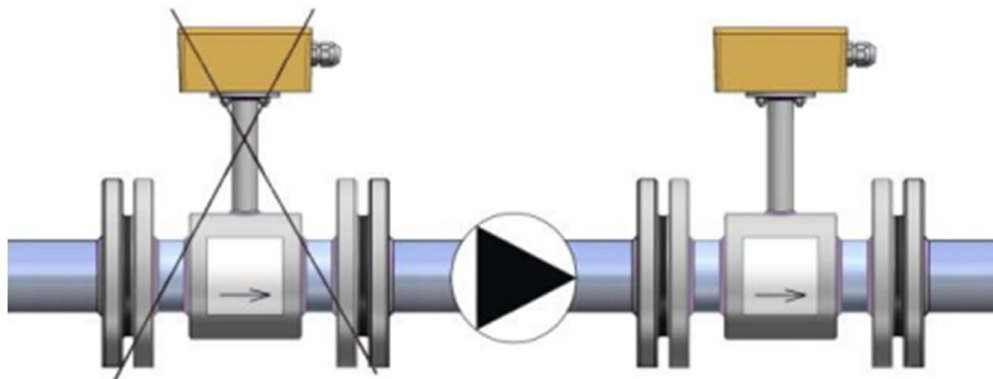
Obrázek 27 – Minimální ukliďňovací délky pro průtokoměr FLONET FN50XX.1 [23]

V případě redukce průměru před a za průtokoměrem, musíme dodržet i maximální rozevření difuzorového kužele do 30° , když necháme 5 DN před i za průtokoměrem. V případě, kdy požadujeme přechod difuzoru rovnou do průtokoměru, rozevření difuzoru může být pouze 16° (na obrázku zakótován poloviční úhel, viz obrázek 28). [23]



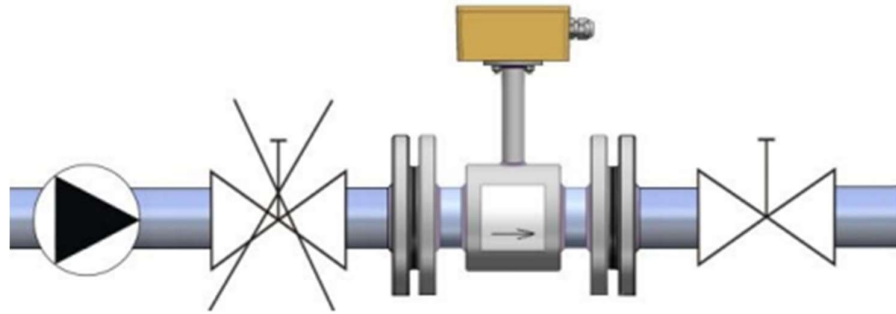
Obrázek 28 – Správná aplikace zúžení [23]

Čerpadlo se musí vždy umístit před průtokoměr (viz obrázek 29), aby nemohlo docházet ke kavitaci v oblasti čidla. Minimální uklidňovací délka za čerpadlem je 25 DN. Uklidňovací délky z příruček výrobce jsou minimální, a jestliže chceme kalibrační trať, měli bychom ještě volit vhodný koeficient, podle kterého jednotlivé uklidňovací délky prodloužíme. [23]



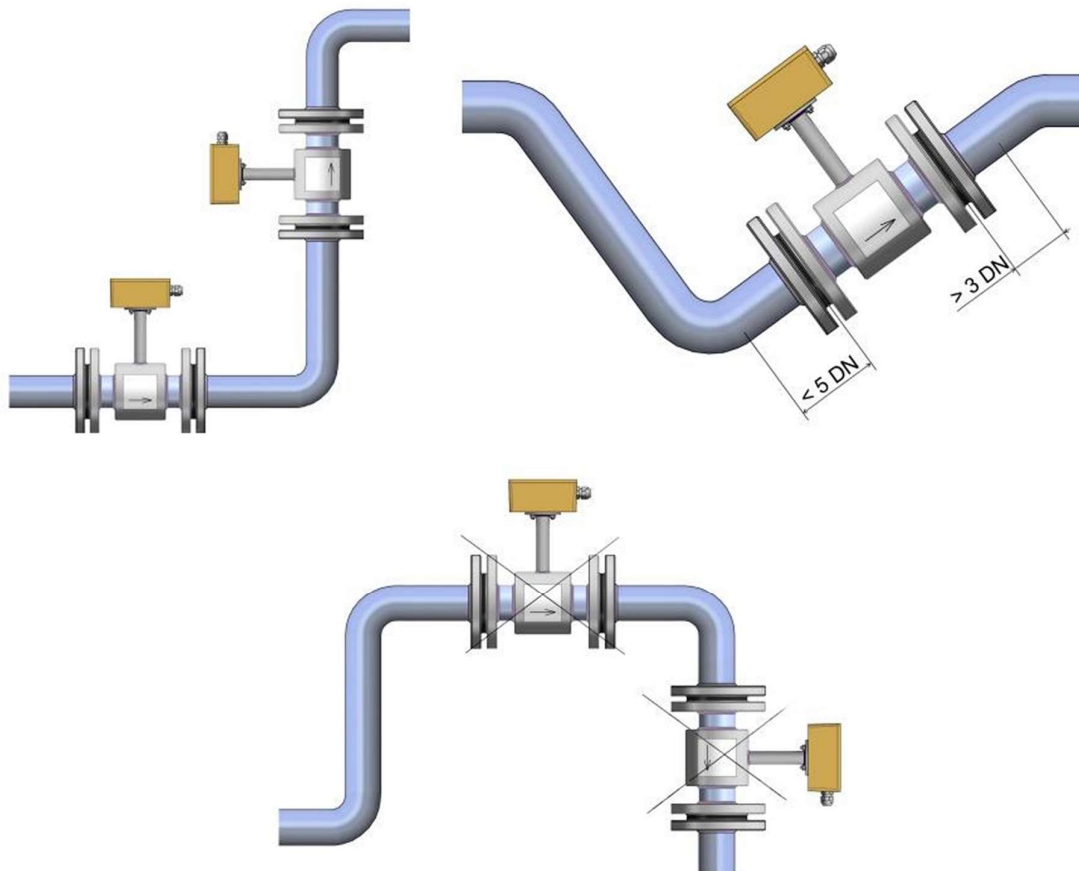
Obrázek 29 – Poloha čerpadla [23]

Uzavírací nebo škrťací člen by měl být umístěn za průtokoměrem (viz obrázek 30) ze stejného důvodu jako u umístění čerpadla. [23]



Obrázek 30 – Poloha uzavíracího / regulačního členu [23]

Dále je vhodné volit polohu indukčního průtokoměru v mírném náklonu, nebo umístění do sifonu (viz obrázek 31), aby byl neustále zaplaven celý průtočný průřez a nedocházelo zde ke koncentraci rozpuštěných plynů ve vodě. Tomuto problému budeme předcházet mírným náklonem armatur měřicí tratě a v nejvýše položených místech instalujeme odvzdušňovací ventily. [23]



Obrázek 31 – Zásady správné instalace [23]

Indukční průtokoměr musíme řádně uzemnit a chránit před bludnými proudy. Dále je důležité průtokoměr správně připevnit co nejbliž u těla průtokoměru, aby nedocházelo k vibracím, které by průtokoměr mohli poškodit. [23]

4.4 Výpočet uklidňovacích délek potrubí

Každý výrobce průtokoměrů ve svých katalogových listech uvádí minimální délky uklidňovacího potrubí. Jde ale o délky minimální a jelikož navrhujeme vodní trať pro kalibraci a testování průtokoměrů nebylo by vhodné, kdybychom se pohybovali na hranici intervalu minimálních uklidňovacích délek. Proto při návrhu volíme koeficient, díky kterému zvětšíme minimální uklidňovací délku. Hodnotu tohoto koeficientu jsme volili abychom plně využili prostor zvolený pro výstavbu trati a zároveň trať nebyla příliš dlouhá. Koeficient pro uklidňovací délky volíme 1,5, tj. jednotlivé minimální uklidňovací délky prodloužíme o 50 %.

Hodnoty minimálních uklidňovacích délek pro zvolené indukční průtokoměry FLONET FN50XX.1 čerpáme z katalogu [23]. Podle výrobce mají zvolené průtokoměry minimální uklidňovací délku před průtokoměrem 5DN a 3DN za průtokoměrem. V případě zúžení nebo rozšíření pomocí difuzoru jenž má rozevření kužele do 30° je nutné dodržet 5DN před i za průtokoměrem.

Uklidňovací délku potrubí bylo nutno volit i pro průtokoměr určený ke kalibraci. Jedny z nejdelsích uklidňovacích délek před i za čidlem požadují ultrazvukové průtokoměry a škrtkovací orgány (viz kapitola 3.2 a 3.8). Tamtéž je uvedeno, že minimální uklidňovací délka je 20 DN před a 10 DN za čidlem. Volené a spočítané uklidňovací délky jsme shrnuli do následující tabulky (6). Pro názornost je možné jednotlivé úseky vidět na výkrese Návrhové schéma vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů, číslo výkresu BP - 2023/2024-04-001, který je v přílohách této bakalářské práce.

Tabulka 6 – Vypočítané minimální délky vodní trati [23]

Velikost průtokoměru	Druh průtokoměru	Úsek	Poloha (vůči průtokoměru)	Min. uklidňovací délka	Koeficient	Délka [mm]
DN50	indukční průtokoměr	koleno	před	5DN	1,5	375
			za	3DN		225
		čerpadlo	před	25DN		1875
DN50 *	kalibrovaný průtokoměr	koleno/zúžení	před	20DN		1500
			za	10DN		750
DN32	indukční průtokoměr	koleno	před	5DN		240
			za	3DN		144
		zúžení	před	5DN		240
			za	5DN		240
DN15	indukční průtokoměr	koleno	před	5DN		112,5
			za	3DN		67,5
		zúžení	před	5DN		112,5
			za	5DN	112,5	

* Může mít vysoké požadavky na uklidňovací délku – počítáme ten nejhorší možný případ

4.5 Výběr materiálu potrubí

Dnes jsou konvenčním materiálem pro transport médií plastické hmoty. Součástí zadání je vybrat materiál, jenž bude možné lepit. Jelikož se bude vodní trať skládat převážně z potrubí o průměru DN 50, bylo by složité potrubí svařovat. Z tohoto důvodu jsme do výběru nezařadili materiály PE, PPr a PVDF, které jsou určeny ke svařování.

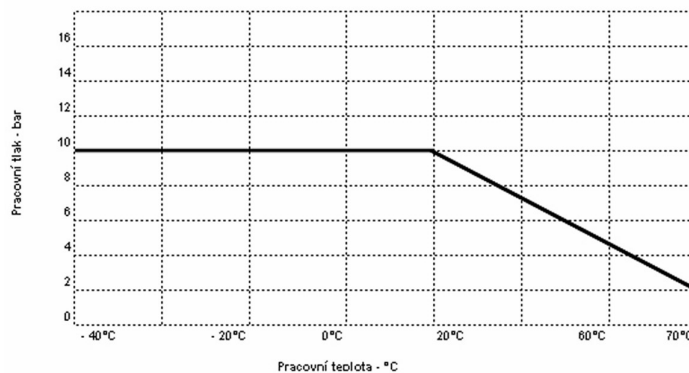
Ve výběru zůstávají materiály ABS, PVC-C, PVC-U.

Ke každému z materiálů stručně popíšeme jeho použití a vlastnosti.

ABS

Tento materiál vyniká především svojí houževnatostí (už od -40 °C). Využívá se téměř ve všech průmyslových odvětvích pro média jako je pitná, odpadní, mořská voda, solné roztoky, roztoky glykolů a ledové kaly. [24]

Provozní teplota je -40 °C až $+70\text{ °C}$. [24]

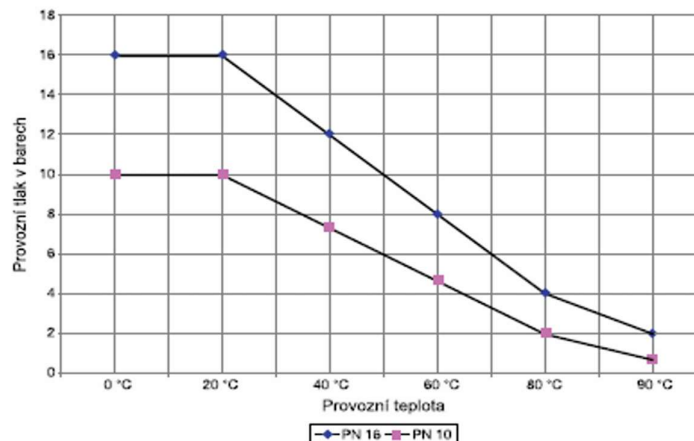


Graf 3 – Tlakově teplotní diagram pro ABS [24]

PVC-C

Materiál je běžně používán ve stavebnictví pro bytové domy, nemocnice, lázně, ale i potravinářský průmysl, nebo čističky odpadních vod. Využívá se pro transport studené a teplé vody, odpadní vody, anorganických kyselin a zásad a solných roztoků. [25]

Provozní teplota je 0 °C až $+90\text{ °C}$. [25]

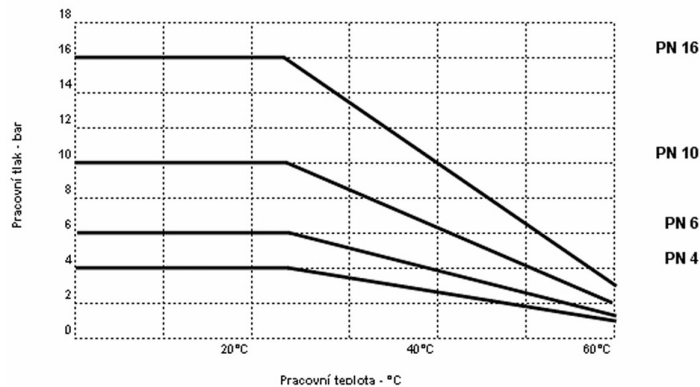


Graf 4 – Tlakově teplotní diagram pro PVC-C [25]

PVC-U

Materiál se využívá k transportu širokého spektra kyselin, zásad a chemických koncentrátů bez nebezpečí koroze, nebo poničení potrubí. Konkrétní média mohou být odpadní a kontaminovaná voda, pitná voda, kyseliny, zásady a ostatní chemické koncentráty. [26]

Provozní teplota je nižší než u předchozích materiálů a to od 0 °C až +60 °C. [26]



Graf 5 – Tlakově teplotní diagram pro PVC-U [26]

V laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky se budeme pohybovat v teplotním rozsahu od nejnižších teplot v zimním období 5 °C do 40 °C v letním období. Je patrné, že všechny materiály v tomto teplotním intervalu budou bez výrazné změny mechanických vlastností.

Při výběru materiálů pro měřicí trať budeme uvažovat hospodárně. Po konzultaci se společností KOWA spol. s.r.o. a Aliaxis Česká republika s.r.o. jsme došli k závěru, že volba materiálu PVC-U s požadavkem lepení potrubí je nejvhodnější. Díky dobrým vlastnostem a ceně volíme materiál PVC-U v tlakové třídě PN 16.

4.6 Komponenty měřicí trati

V této kapitole budeme popisovat návrh vodní trati a jejích konkrétních úseků. Návrh je zpracován na výkresu Návrhové schéma vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů, číslo výkresu BP-2023/2024-04-001, který je v přílohách k této bakalářské práci. Dle návrhového schématu jsme provedli 3D vizualizaci celé vodní trati. Tuto 3D vizualizaci jsme využili pro vytvoření výkresové dokumentace, kde je trať rozčleněná do více menších úseků, ze kterých jsme vytvořili výkresy sestav. Tyto výkresy sestav budou sloužit jako návod během případné výstavby vodní trati.

Nejprve musíme shrnout konstrukční prvky které jsou v laboratoři pevně dané a výběr potřebných komponent trati.

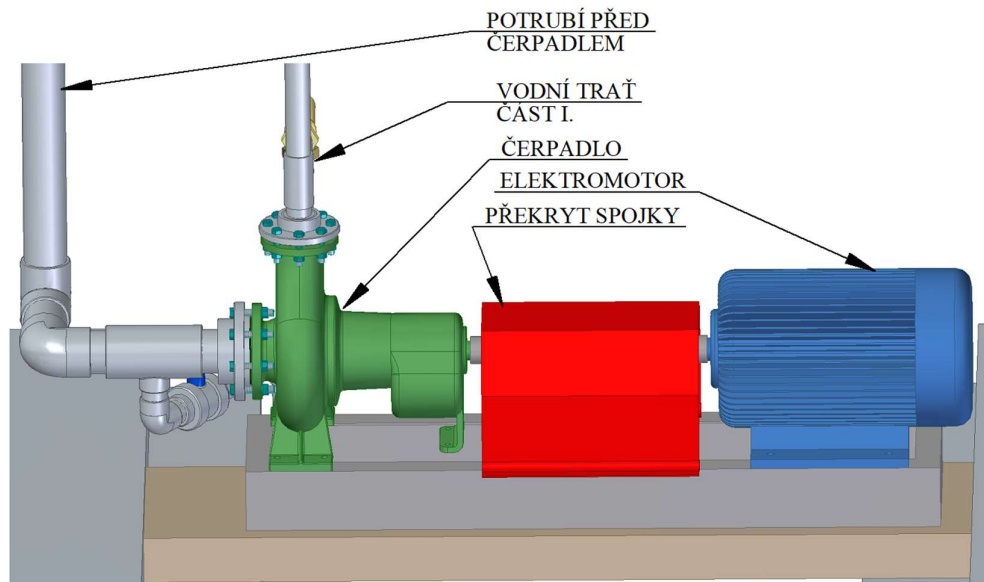
Nádrž

Vodní trať bude realizována v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky, kde je k dispozici několik nádrží s vodou. Jednu z nich použijeme pro napájení naší vodní trati. Jedná se o nádrž o rozměrech 3x6x1,4 m a objemu cca 25,2 m³. Je situovaná 3,5 m nad úroveň podlahy laboratoře. K výběru této nádrže (bazénu) došlo především z důvodů volného místa pod nádrží a možnosti použít odstředivé spirální čerpadlo nacházející se také v prostoru pod nádrží.

Čerpadlo

Další nedílnou částí je čerpadlo. Z dostupných čerpadel nacházejících se v laboratoři jsme i pro vhodnou pozici čerpadla vybrali horizontální odstředivé spirální čerpadlo ISH PUMPS Olomouc, typ BETA 125-80-NHJ-315-23-YC-050-101, o jmenovitém průtoku $22,2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ při otáčkách 1450 min^{-1} . Příkon čerpadla je $11,5 \text{ kW}$. Čerpadlo je poháněno třífázovým asynchronním motorem SIEMENS, typ 1LA0201K04 - 0351, o výkonu 30 kW , a jmenovitých otáčkách 1465 min^{-1} . Elektromotor je vybaven frekvenčním měničem. Díky tomuto měniči je možné plynule měnit otáčky čerpadla (regulovat průtok vodní trati).

Dle tabulky (5) od výrobce ELIS Plzeň a.s. průtokoměru vyčteme, že nejvyšší možný přetěžovací průtok průtokoměru FLONET FN50XX.1 DN 50 je $72 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Jmenovitý průtok čerpadla $22,2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, což je totéž jako $79,20 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Díky frekvenčnímu měniči je u čerpadla možné snižovat otáčky, a proto toto čerpadlo vyhodnocujeme jako vhodné. Vizualizaci čerpadla včetně elektromotoru můžeme vidět na obrázku (32).



Obrázek 32 – Snímek 3D vizualizace, zleva odstředivé spirální čerpadlo, překryt spojky, 3f asynchronní elektromotor

Potrubí před čerpadlem

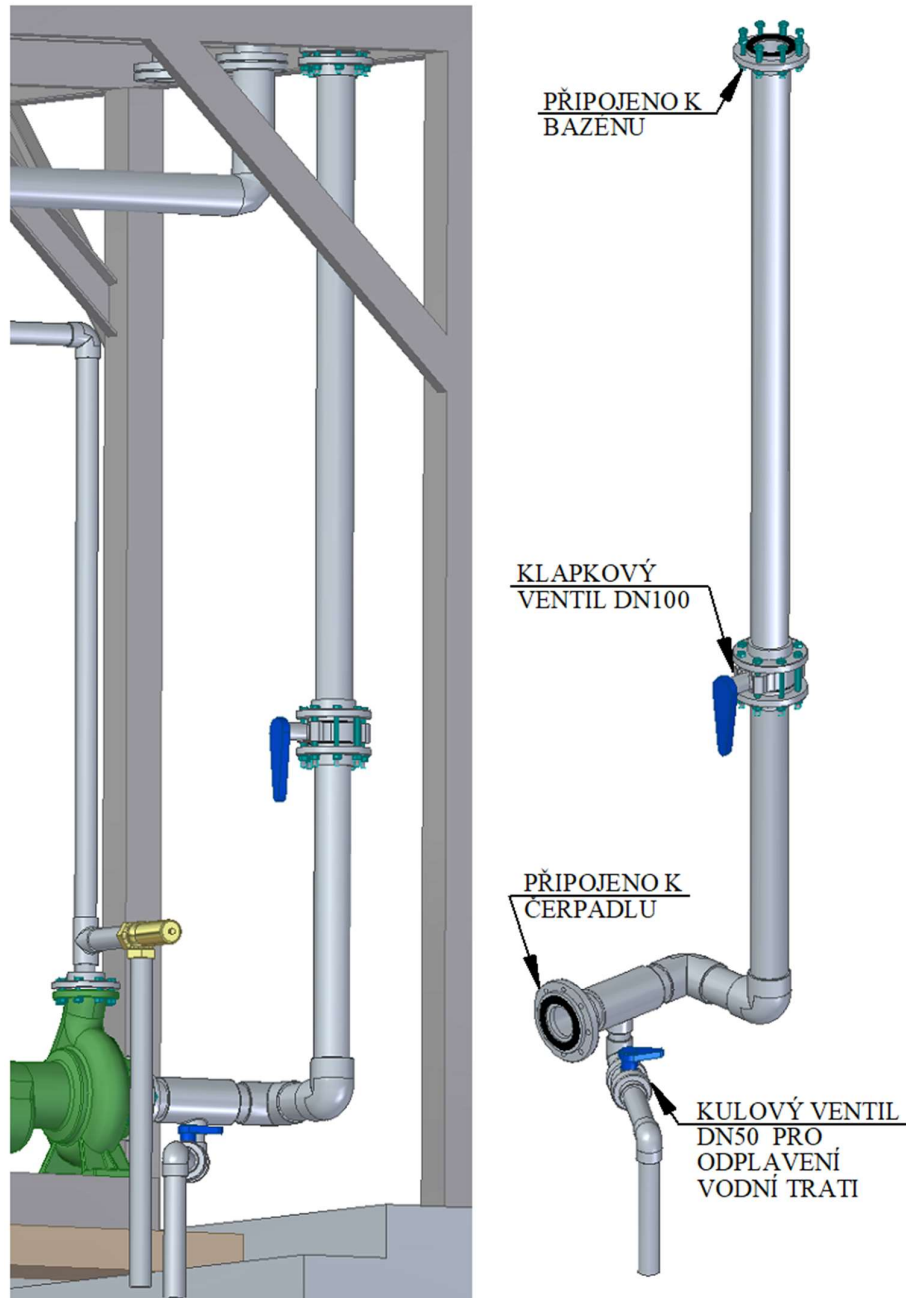
Vodní trať jsme se rozhodli popisovat systematicky po směru toku. První část naší vodní trati slouží k propojení bazénu a odstředivého čerpadla. Tomuto úseku se věnuje VÝKRES SESTAVY – POTRUBÍ PŘED ČERPADLEM, s číslem výkresu BP-2023/2024-04-02 v příloze. Z bazénu se využije jeden ze spodních vývodů o průměru DN 100. Příruba na čerpadle má DN 125. Vzhledem k hospodárnosti a omezenému prostoru je nejvýhodnější celé potrubí provést o průměru DN 100, a co nejbližší u čerpadla, průměr potrubí zvýšit na DN 125.

Osy vývodu z bazénu a čerpadla neleží v jedné rovině a je nutné užít kolena. Poloha čerpadla je dána rozmístěním experimentů v laboratoři a pro nenáročnost toto čerpadlo nebudeme přemísťovat.

Potrubí se osadí klapkovým ventilem, kterým bude možné celou trať oddělit od bazénu. Poloha ventilu je situovaná přibližně $1,5 \text{ m}$ nad úroveň podlahy laboratoře, aby bylo možné jej kdykoliv uzavřít.

V nejnižším bodě tohoto potrubí je umístěn T-kus z kterého odbočuje redukce na DN 50 vedoucí ke kulovému ventilu. Tato část potrubí bude sloužit k odplavení celé vodní trati pro případ výměny kalibrovaného průtokoměru FLONET FN50XX.1 DN32/DN15, nebo průtokoměru určenému ke kalibraci. Z toho vyplývá, že pro běžný provoz vodní trati bude kulový ventil DN 50 zavřen a otevírat se bude jen v případě zavřené klapkového ventilu DN 100 a nutnosti odplavení vodní trati (viz obrázek 33).

Průměr potrubí DN 50 byl volen z důvodu hospodárnosti (převážná část vodní trati bude právě z potrubí DN 50).



Obrázek 33 – Snímek z 3D vizualizace, potrubí před čerpadlem (vlevo zakomponované ve vodní trati, vpravo samostatné potrubí před čerpadlem)

Potrubí za čerpadlem část I.

V potrubí za čerpadlem je nutno dodržovat ukliďňovací délky potrubí a veškeré zásady doporučené výrobcem průtokoměrů. Ukliďňovací délky potrubí před jednotlivými průtokoměry vycházejí z tabulky (6).

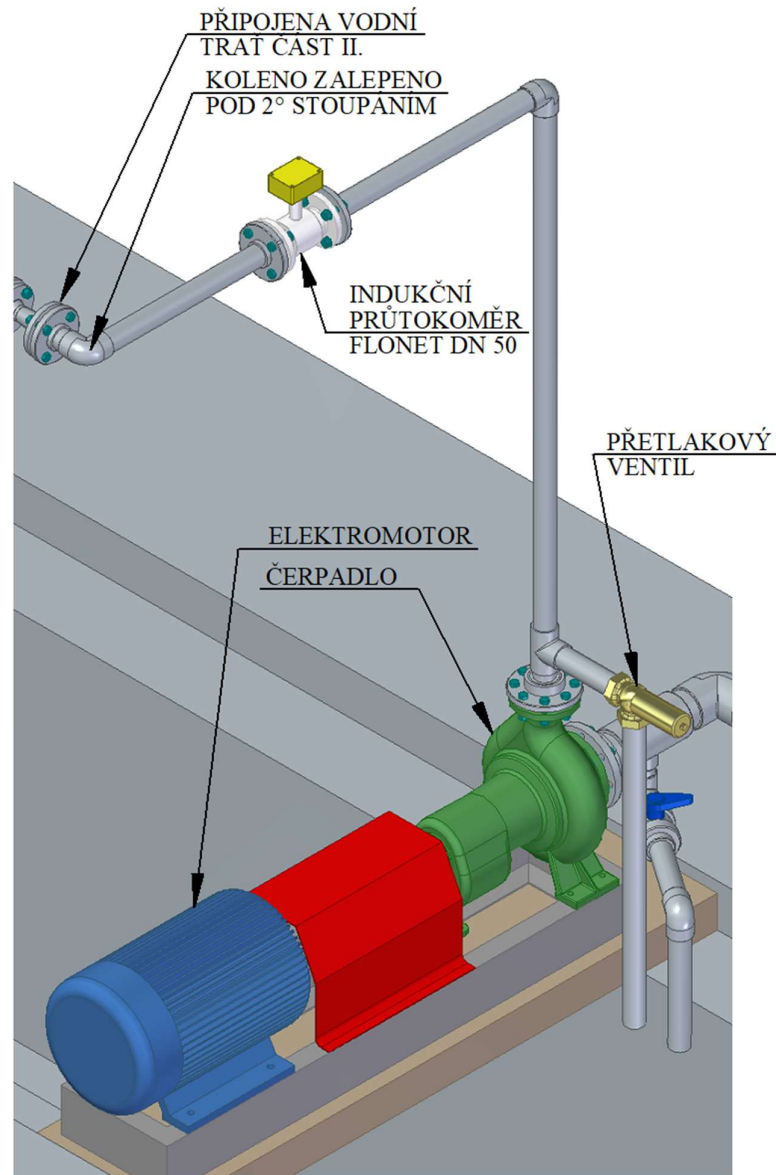
Konstrukci potrubí v prostoru laboratoře musíme přizpůsobit ostatním již vybudovaným armaturám. Z tohoto důvodu bude finální konstrukce rozměrnější. Vodní trať je proto situována přibližně 2,6 m nad úroveň podlahy laboratoře. Tomuto umístění vyhovuje i potrubí které jde za čerpadlem svisle vzhůru, což umožňuje dodržet i minimální ukliďňovací délku za čerpadlem. Tento kus tratě je rozkreslen na výkresu VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRATĚ ČÁST I., číslo výkresu BP-2023/2024-04-003 v příloze.

Na výstupu čerpadla je průměr DN 80. Vodní trať se realizuje s potrubím o průměru DN 50, a proto se hned za čerpadlem redukuje na DN 50. Pro případ přicpání trati, nebo nesprávného nastavení ventilů na výstupu, se zakomponoval do naší vodní trati přetlakový ventil, který je umístěn v blízkosti čerpadla a jeho přetlaková větev je svedena do kanálu pod bazénem (viz obrázek 34).

Po dodržení ukliďňovacích délek se může trať osadit zvoleným průtokoměrem FLONET DN 50. Největší průtokoměr bude na trati instalován permanentně a neuvažuje se o jeho vyjímání, proto jej instalujeme jako první.

Posledním významným konstrukčním prvkem tohoto úseku je koleno, které není zalepeno rovnoběžně s podlahou laboratoře, ale cca ve 2° stoupání. Tímto zajistíme doporučení výrobce průtokoměrů, aby byly průtokoměry umístěné v mírném náklonu a nemohlo docházet ke shromažďování bublin a rozpuštěných plynů v oblasti čidla. Toto není u největšího průtokoměru řešeno, konstrukční řešení by bylo komplikované bez výrazného přínosu (viz obrázek 34).

Pomocí přírubového spoje připojíme následující potrubí. Sestavu potrubí je možné vidět na obrázku (34).



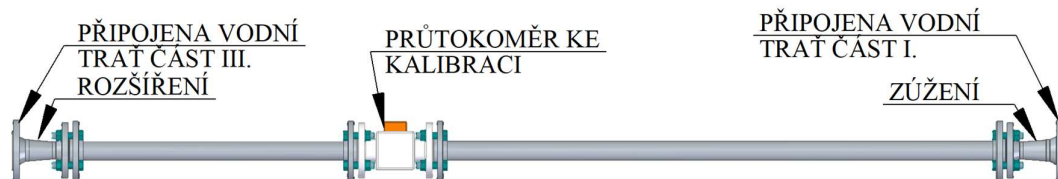
Obrázek 34 – Snímek z 3D vizualizace, potrubí za čerpadlem část I. (zakomponováno ve vodní trati)

Potrubí za čerpadlem část II.

Do této části vodní trati se budou umisťovat průtokoměry určené ke kalibraci. Jedná se o přímé potrubí v mírném náklonu 2°. Konstrukce a rozměry této části potrubí jsou navrženy tak, aby bylo možné kalibrovat libovolné průtokoměry (viz obrázek 35).

Je nutné dodržet minimální uklidňovací délka potrubí před i za čidlem i pro nejnáročnější průtokoměry (viz kapitola 4.4, tabulka 6), jako jsou například ultrazvukové průtokoměry, nebo škrťící orgány (viz kapitola 3.8 a 3.2).

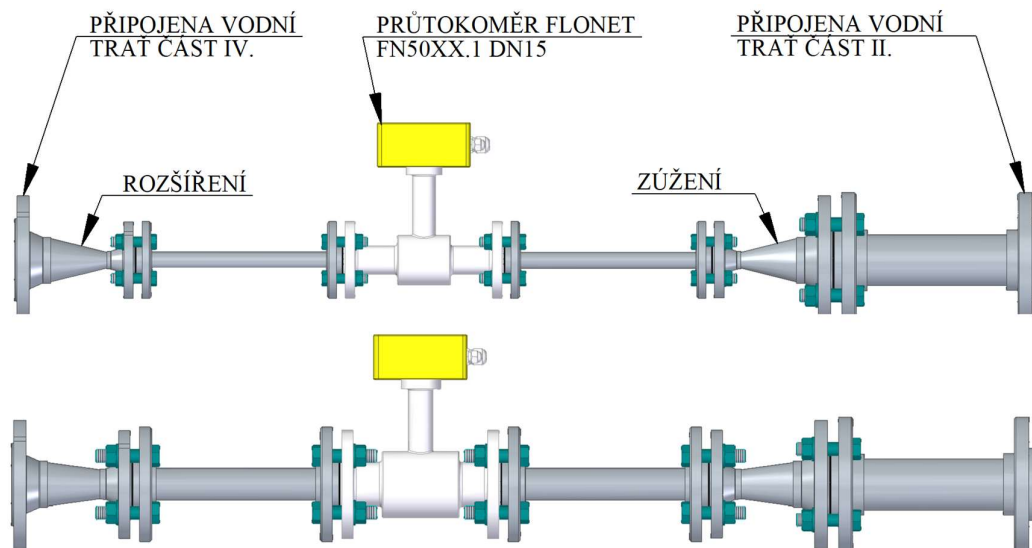
Dále je třeba dodržet maximální rozevření difuzorového kužele (do 30° když necháme 5DN před i za průtokoměrem) (viz kapitola 4.3, obrázek 28). Konstrukčně je tato úloha vyřešena tak, že budeme mít sadu redukcí/rozšíření, kde je dodrženo maximální rozevření kužele pro ten největší rozdíl průměrů (DN 15 na DN 50). Pro ostatní přechody průměrů už bude úhel rozevření vždy menší, protože zachováme celkovou délku rozšíření/redukce právě kvůli plné zaměnitelnosti. Redukce/rozšíření, která je vidět na výkrese VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ ČÁST II., č.v. BP-2023/2024-04-004 (viz přílohy), se skládá ze dvou přírub s krkem a plechovým difuzorem svařeným v jeden celek.



Obrázek 35 – Snímek z 3D vizualizace, potrubí za čerpadlem část II.

Potrubí za čerpadlem část III.

Tato část potrubí bude v případě potřeby vyměnitelná. V případě měření malých průtoků zde bude instalován vybraný zkalibrovaný průtokoměr FLONET DN 15. Jestliže se budou kalibrovat větší průtokoměry vyměníme průtokoměr FLONET DN 15 za FLONET DN 32. V případě kalibrace velkých průtokoměrů (mohly by být i větší než DN 50) by v tomto úseku mohla vznikat velká tlaková ztráta a nebylo by možné dosáhnout požadovaného průtoku. Z toho důvodu zde bude možnost tuto část vodní trati nahradit přímým potrubím DN 50. Redukce průměrů potrubí je řešena obdobným způsobem jako v předchozím potrubí, pomocí svařených přírub s krkem a difuzoru. Sestava této části potrubí je vidět na výkrese VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ ČÁST III. (DN15), č.v. BP-2023/2024-04-005 a VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRAŤ ČÁST III. (DN30), č.v. BP-2023/2024-04-006 (viz příloha), nebo na obrázku 36. Pro případ nahrazení této části rovným potrubím výkres není připojen, jednalo by se o přímé potrubí DN 50, délky 1800 mm zakončené přírubami.



Obrázek 36 – Snímek z 3D vizualizace, potrubí za čerpadlem část III. (horní obrázek s průtokoměrem FLONET FN50XX.1 DN 15, spodní DN 32)

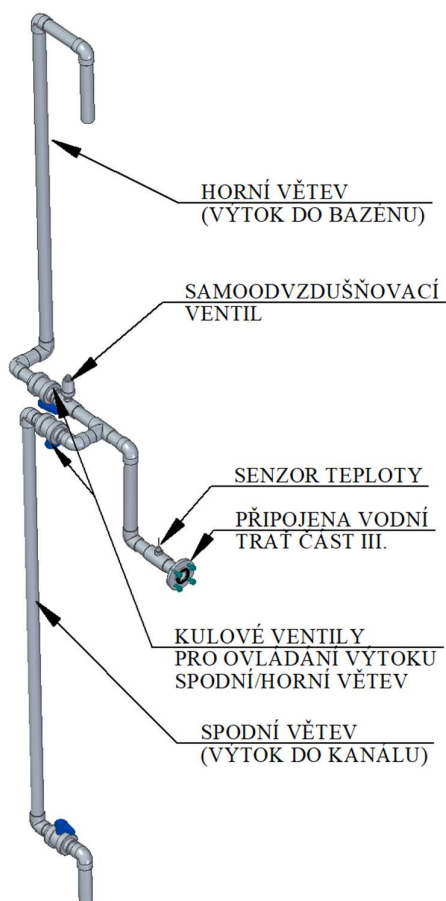
Původně bylo zamýšleno postavit vodní trať tak, aby obsahovala všechny již zkalibrované průtokoměry (tj. FLONET DN50, DN32, DN15). V tomto případě se počítalo s tím, že průtokoměr DN 50 by byl v trati trvale zařazen, jako je tomu při stávajícím návrhu, ale průtokoměry FLONET DN32 a DN 15 bychom připojovali pomocí obtoků dle potřeby. Tento návrh byl zbytečně složitý a nevhodný z důvodů většího počtu potřebných armatur, především ventilů. I přes to jej přidáváme do příloh této práce pod názvem NÁVRHOVÉ SCHÉMA VODNÍ TRATI PRO KALIBRACI PRŮTOKOMĚRŮ – NEREALIZOVANÉ, č.v. BP-2023/2024-03-001.

Potrubí za čerpadlem část IV.

Poslední část potrubí bude sloužit pro rozvod vody. Při běžném provozu vodní trati se bude voda vracet zpět do bazénu. Během první kalibrace vybraných průtokoměrů využijeme spodní větev potrubí. Z této větve budeme odebírat vodu například do odměrného válce, dle kterého provedeme první kalibraci. Tuto větev využijeme i v případě kalibrace velmi malých průtokoměrů, kdy nám poslouží rozdíl hladin pro samovolný průtok, aniž bychom měli čerpadlo v provozu.

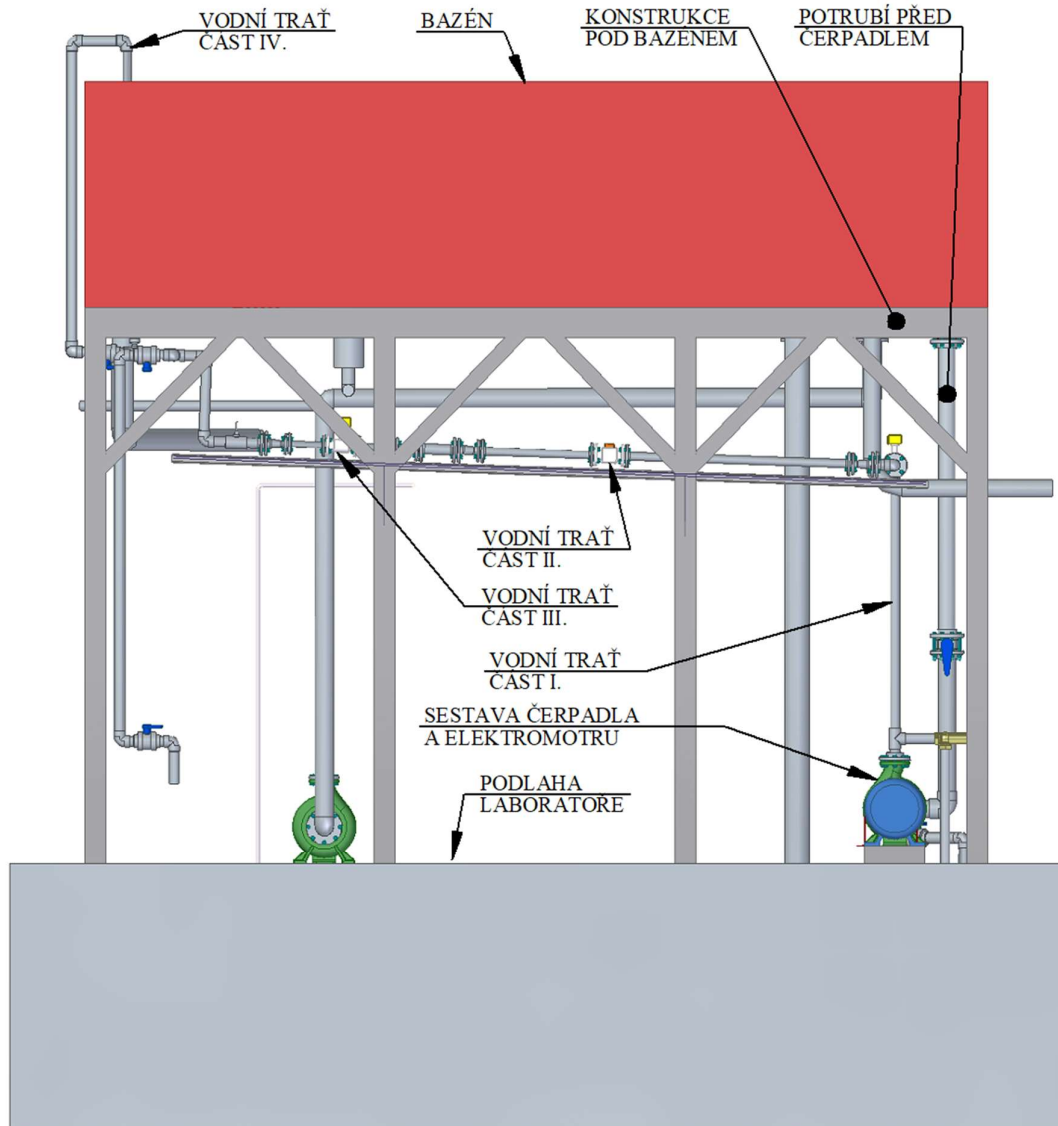
Potrubí je osazeno snímačem teploty, který je situován v místě, kde bude trvale zaplaven.

Při konfiguraci toku do bazénu se trať odvzdušní přirozeně sama, ale pro konfiguraci toku přes spodní větev je samoodvzdušňovací ventil umístěn do nejvyššího bodu užívaného potrubí IV. části (viz obrázek 37). Sestavu této části potrubí je opět možné vidět na výkrese VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRATĚ ČÁST IV., č.v. BP-2023/2024-04-007 v příloze.

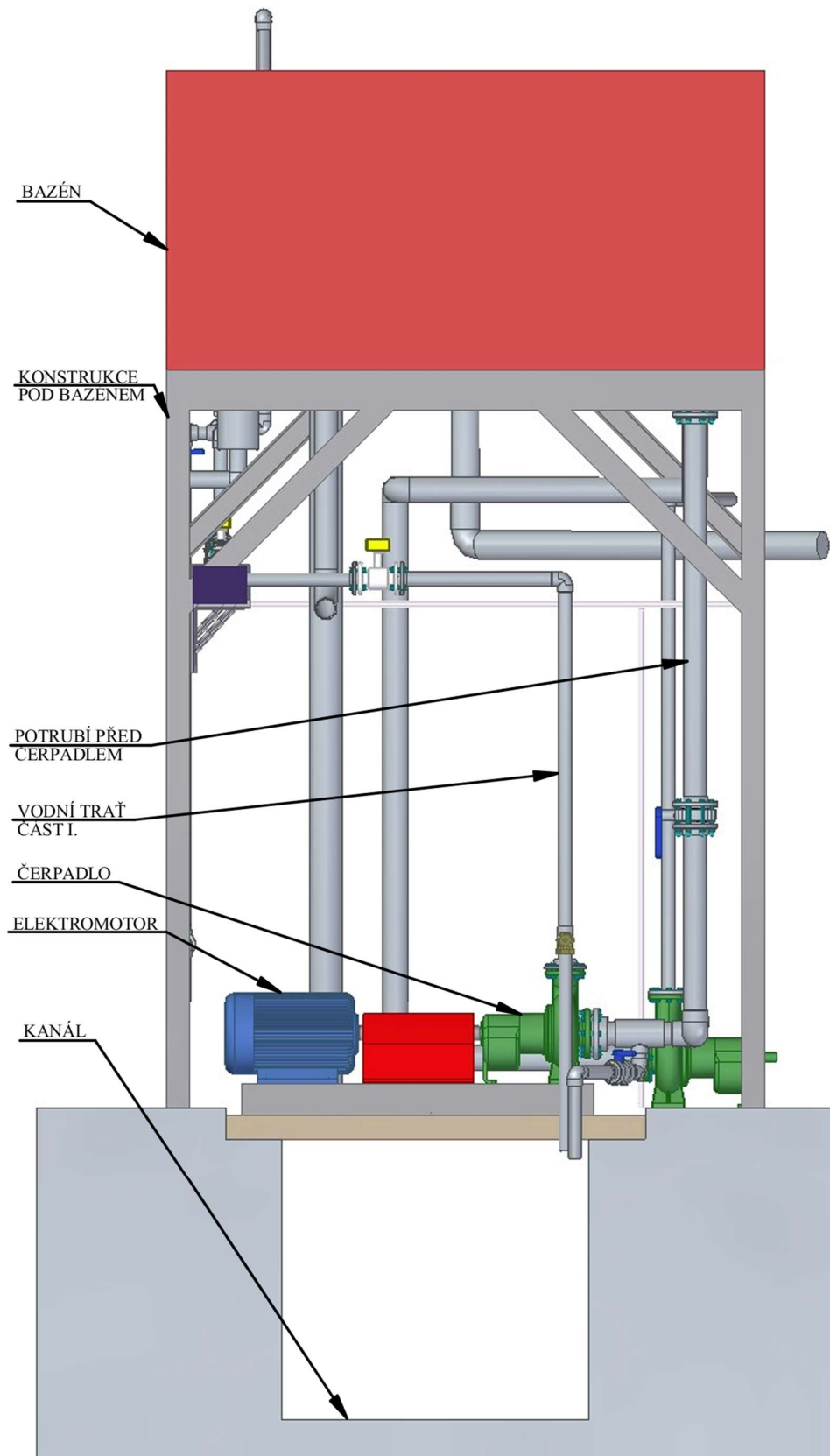


Obrázek 37– Snímek z 3D vizualizace, potrubí za čerpadlem část IV.

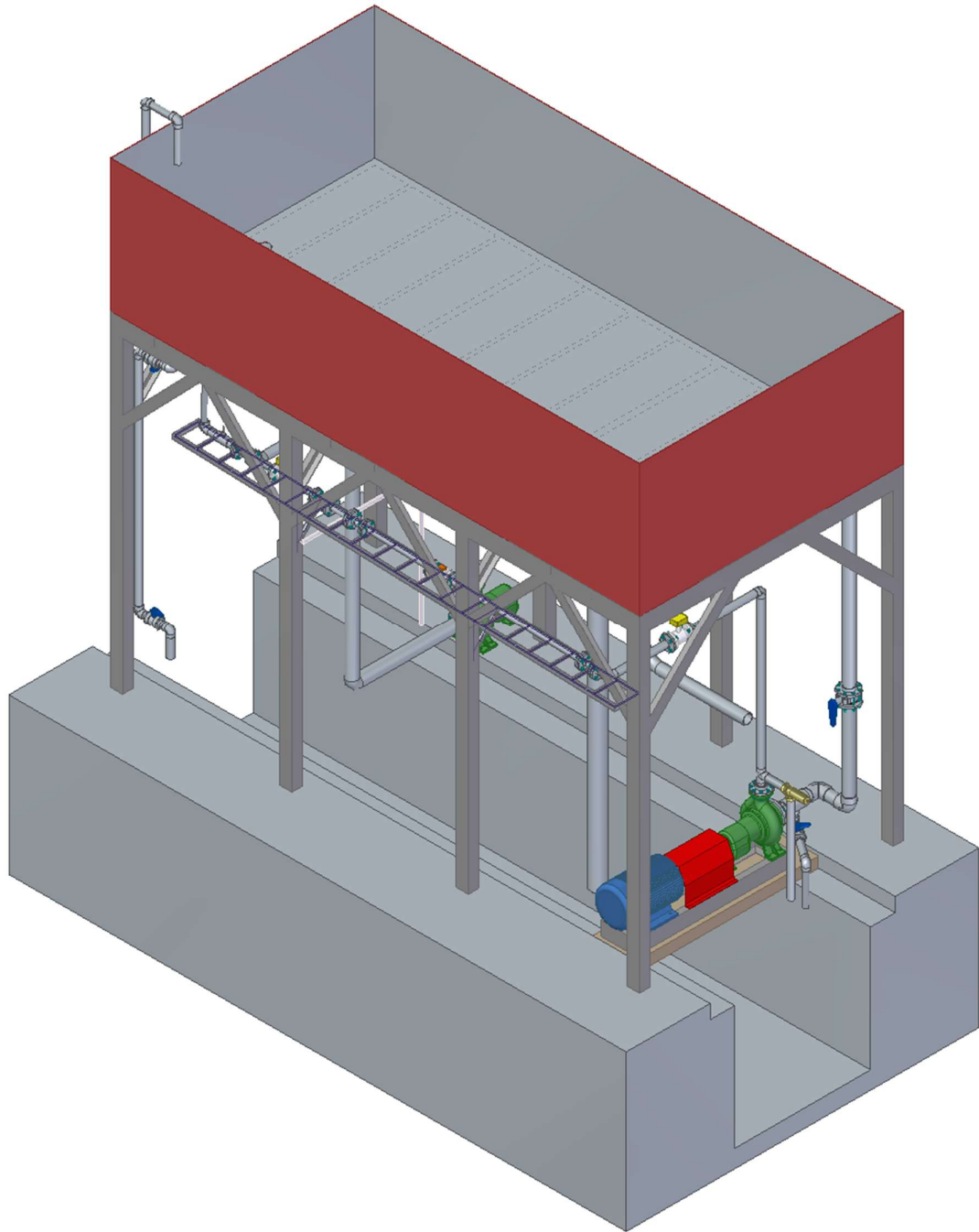
Po sestavení dílčích částí potrubí, odstředivého čerpadla, asynchronního elektromotoru, konstrukce bazénu a ostatních armatur v laboratoři získáváme kompletní sestavu návrhu vodní tratě, která je k dispozici v příloze pod názvem VÝKRES SESTAVY – VODNÍ TRATĚ V LABORATOŘI, č.v. BP-2023/2024-04-008. Jsou zde i snímky z 3D vizualizace, které demonstrují využití prostoru pod bazénem, jedná se o obrázky (38), (39) a (40).



Obrázek 38 – Snímek z 3D vizualizace, čelní pohled na vodní trať v laboratoři



Obrázek 39 – Snímek z 3D vizualizace, pohled zprava na vodní trať v laboratoři



Obrázek 40 – Snímek z 3D vizualizace, ISO pohled na vodní trať v laboratoři

4.7 Návrh uživatelského rozhraní v softwaru LabVIEW

V této kapitole popíšeme vytvořené uživatelské rozhraní v softwaru LabView.

Úvodem bychom zmínili, proč vytváříme jen uživatelské rozhraní (Front Panel) a nikoliv i blokové schéma (Block Diagram). Jelikož se jedná zatím jen o návrh vodní trati, trať ještě není v laboratoři Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky postavena. V tomto stádiu by bylo daleko složitější vytvářet blokové schéma, protože bez postavené vodní trati není možnost naměřit potřebná.

Z tohoto důvodu jsme vytvořili jen základní blokové schéma nutné pro uvedení uživatelského rozhraní do provozu. Budeme předpokládat, že použité indukční průtokoměry FLONET FN50XX.1 mají proudový výstup (4 až 20 mA). K měření teploty využijeme termočlánků, nebo snímače teploty Pt100. Výstup kalibrovaného průtokoměru může být v různých formách, a proto budeme počítat se všemi možnými výstupy (proudový, napěťový, frekvenční).

Jako jedinou vstupní proměnnou volíme nastavení frekvence frekvenčního měniče, jímž je osazen třífázový asynchronní motor. Regulací frekvence měníme otáčky asynchronního motoru společně s otáčkami čerpadla. Změnou otáček čerpadla se nám mění průtok vody v celé vodní trati.

Uživatelské rozhraní navrhujeme tak, aby bylo možné ho jednoduše a intuitivně ovládat. Je třeba zakomponovat ovládání čerpadla, respektive regulaci otáček 3f asynchronního motoru, pomocí frekvenčního měniče, přehledné zobrazení dat, možnost ovládání průtokoměrů (vypnout/zapnout), ukládání a export dat do softwaru Microsoft Excel, nebo textového souboru. Zpracování dat, tj. kalibraci průtokoměru budeme provádět za pomoci exportovaných dat v některém z dostupných programovacích jazycích Python, Matlab, nebo v softwaru Microsoft Excel. Předpoklad zpracování dat je takový, že metodou nejmenších čtverců dojde k proložení dat přímkou (drtivá většina výstupních signálů z průtokoměrů, které budeme kalibrovat, by měla mít lineární výstup). Tuto přímkou, respektive funkci se budeme snažit upravit tak, abychom ji co nejlépe připodobnili k výstupní přímce zkalibrovaných průtokoměrů FLONET FN50XX.1 DN 50, DN 32, nebo DN15.

Jelikož umístění veškerých ovládacích a zobrazujících prvků na jedné obrazovce by bylo nepřehledné, volíme rozdělení do jednotlivých záložek, které povede k systematickému oddělení dílčích úkonů a k celkové přehlednosti. Jednotlivé záložky si dále popíšeme.

První záložka – přehledové schéma vodní trati

Na první záložce uvádíme zjednodušené schéma vodní trati vycházející z výkresu Návrhové schéma vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů, číslo výkresu BP - 2023/2024-04-001, doplněné aktuálními hodnotami průtoku a teplot vody v bazénu a na konci vodní trati. Záložku je možné vidět v příloze 1.a – Snímky obrazovky uživatelského rozhraní LabVIEW, strana 2.

Hodnoty průtoku zkalibrovanými průtokoměry FLONET FN50XX.1 zde uvádíme v objemovém toku m^3/h .

Hodnoty průtokoměru určeného ke kalibraci uvádíme ve všech možných variantách jeho výstupu, tj. proudový výstup mA, napěťový výstup V a frekvenční výstup Hz. Objemový tok zde neuvádíme především z toho důvodu, protože jde o průtokoměr určený ke kalibraci, takže známe jen jeho výstupní data, nikoliv přímo objemový tok.

Ovládání pro změnu frekvence frekvenčního měniče jsme umístili do volného prostoru schématu v levé spodní části záložky. Toto ovládání je umístěno na každé ze záložek pro možnost rychlé změny a sledování aktuálních hodnot.

Druhá záložka – ovládání čerpadla

Tato záložka je přizpůsobená pro ovládání čerpadla, respektive pro ovládání elektromotoru, který je s čerpadlem napřímo spřažen. Pro názornost opět uvádíme snímek druhé záložky v příloze 1.a – Snímky obrazovky uživatelského rozhraní LabVIEW, strana 3.

Je zde umístěn vypínač čerpadla (elektromotoru), stejné ovládání změny frekvence frekvenčního měniče jako na předchozí záložce a otáčkoměry.

Otáčkoměry jsem zvolil pro zpestření záložky pro ovládání čerpadla. Jeden uvádí teoretické otáčky, závislé pouze na frekvenci měniče a druhý skutečné (naměřené) otáčky čerpadla (elektromotoru).

Skutečné otáčky bude možné měřit díky tomu, že na spojení mezi elektromotorem a čerpadlem je vložen snímací kroužek s indukčním senzorem, díky kterému budeme moci odečítat aktuální otáčky čerpadla.

Třetí záložka – aktuální data průtokoměrů

Jedná se o nejobsáhlejší záložku. Jsou zde veškerá aktuální data, která měříme, signalizace a důležitá ovládání. Třetí záložku je možné opět vidět v příloze 1.a – Snímky obrazovky uživatelského rozhraní LabVIEW, strana 4. V horní části této záložky se nachází vypínač, kterým se vypínají veškerá čidla. Dále je zde ovládání frekvence frekvenčního měniče jako na předchozích dvou záložkách a aktuální měřené teploty v bazénu a na konci vodní trati jak digitálně, tak i na grafickém teploměru.

Veškeré údaje týkající se průtokoměrů se nacházejí ve zbývajícím prostoru této záložky. Každý průtokoměr má svůj sloupec, ve kterém nalezneme veškerá data a ovládání. Sloupce s jednotlivými průtokoměry jsou seřazeny zleva doprava v tomto pořadí: průtokoměr FLONET DN 50, DN 32, DN 15 a poslední sloupec patří k průtokoměru určenému ke kalibraci.

Nad daty z průtokoměrů FLONET DN 32 a DN 15 je přepínač, kterým si lze zvolit, jaký průtokoměr je aktuálně nainstalován ve vodní trati. Nad průtokoměrem určeným ke kalibraci si nejprve volíme, jaký typ výstupních dat obdržíme.

V jednotlivých sloupcích je jako první vždy uvedena kontrolka oznamující provoz daného průtokoměru. Když svítí výraznou světlou zelenou barvou je v provozu, když svítí tmavou zelenou barvou není aktivní. Následuje hodnota aktuálního proudového výstupu (v případě průtokoměru určenému ke kalibraci dostáváme takový výstup jaký jsme zvolili výše – proudový, napěťový nebo frekvenční). A jako poslední je zde hodnota aktuálního průtoku [m³/h] včetně grafického zobrazení. Ve sloupci průtokoměru určenému ke kalibraci je zde navíc řádek, do kterého píšeme vztah přepočtu výstupních dat průtokoměru na aktuální objemový tok v [m³/h]. Je to především z toho důvodu, kdyby se jednalo jen o přezkoušení daného průtokoměru, a vztah mezi jeho výstupními daty a objemovým tokem bude známý, ověříme si jen jeho průtok v celém rozsahu měření.

Čtvrtá záložka – zpracování dat

Jak už název záložky napovídá, jedná se o záložku, která slouží ke zpracování naměřených dat. Záložku zpracování dat je opět možné vidět v příloze 1.a – Snímky obrazovky uživatelského rozhraní LabVIEW, strana 5. V levém horním rohu se nachází ovládací změny frekvence frekvenčního měniče, stejně jako v ostatních záložkách. Pod tímto ovládacím stále v levé části záložky jsou veškerá data, která budeme ukládat. Jsou to průtoky průtokoměrů FLONET FN50XX.1 DN 50, DN 32 a DN 15, výstupní data průtokoměru určenému ke kalibraci (ve všech možných výstupech – výstupy které nejsou aktivní se propíší do tabulky jako nulové) a teplota vody na konci vodní tratě.

V pravé části záložky se už dostáváme k samotnému zpracování dat. V horní části se nacházejí 3 tlačítka. První slouží k uložení aktuálních dat, které vidíme v levé části záložky do připraveného pole pod tlačítkem. V případě dostatku uložených dat, můžeme data exportovat druhým tlačítkem do softwaru Microsoft Excel nebo textového souboru. Pro případ, že jsme data změřili špatně, nebo potřebujeme měřit znovu je tu třetí tlačítko, kterým si smažeme data uložená v poli pod tlačítky.

Správný postup zaznamenávání dat:

1. Nastavíme požadovanou frekvenci.
2. Vyčkáme na ustálení hodnot v levé části záložky.
3. Stiskneme tlačítko ULOŽIT, data se propíší do pole pod tlačítky.
4. Nastavíme novou frekvenci a celý postup opakujeme až do chvíle kdy máme dostatek dat.
5. Po nasbírání dostatku dat exportujeme data pomocí tlačítka EXPORT do softwaru Microsoft Excel nebo textového souboru, který uložíme.
6. V případě chybného, nebo začátku nového měření použijeme tlačítko SMAZAT DATA a data v poli se vymažou.

4.8 Hospodárnost návrhu vodní trati pro kalibraci a testování průtokoměrů

V této kapitole jsme vyhotovili finanční rozvahu, která poslouží v případě realizace vodní tratě jako výchozí odhad potřebných prostředků.

Armatury celé vodní tratě jsme vybírali z katalogových listů společnosti Aliaxis ČR s.r.o. [27]. Zároveň jsme společnost Aliaxis ČR s.r.o. oslovili s prosbou o poskytnutí ceníků veškerých armatur a doplňků, které dodávají na trh [28].

Části vodní tratě, které nebylo možné zajistit od dodavatele Aliaxis ČR s.r.o., byli především normalizované součástky dostupné na běžném trhu. Jedná se konkrétně o příruby s krkem, které jsme dohledali u společnosti Feron a.s. [29]. Šrouby se šestihrannou hlavou, podložky a matice jsme vybrali u společnosti Prumex s.r.o. na internetových stránkách spojovací-materiál.net [30]. Jako poslední jsme vybírali přetlakový ventil dostupný od společnosti TOP-TREND shop s.r.o. na internetových stránkách PRO-TOPEŇ [31].

Průtokoměry FLONET FN50XX.1 DN 50, DN 32, DN 15, které budeme považovat po kalibraci pracovníky laboratoře Ústavu za přesné a sestavu čerpadla s elektromotorem a frekvenčním měničem, jsme do cenové rozvahy neuvažovali. Předpokládáme, že tyto komponenty jsou v laboratoři k dispozici a připravené pro použití.

Za pomoci 3D vizualizace vodní trati a výkresů sestav jsme byli schopni vytvořit přehlednou tabulku ve které jsme sečetli celkové náklady na výstavbu navržené vodní trati. Tabulka je obsahem přílohy 2.a – Finanční rozvaha vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů této bakalářské práce. V této tabulce ke každé položce uvádíme i společnost od které předpokládáme její odběr, objednávací kód, množství a cenu. Dostupné ceny v katalogích byli bez DPH, tudíž v tabulce připočítáváme i 21 % DPH. Celkový odhad výše prostředků potřebných pro nákup materiálu potřebného k výstavbě je 41 424 Kč včetně DPH.

Je nutné zmínit, že se jedná o ceny platné k dubnu 2024.

5 Závěr

V rámci této bakalářské práce byl vyhotoven návrh vodní trati pro testování a kalibraci průtokoměrů. Ze zadání vyplynula následující struktura práce.

V teoretické části práce byly popsány základní vztahy mechaniky tekutin potřebné k pochopení problematiky. Dále následuje podrobný přehled metod měření průtoku, včetně popisu jednotlivých senzorů průtoku.

V praktické části práce byl realizován návrh vodní trati.

Prvním a nezbytným krokem byl výběr vhodných průtokoměrů do vodní trati. Jednalo se o výběr typu průtokoměru a jeho velikosti, které po výstavbě trati zkalibrujeme a budeme je považovat za přesné (etalony).

Z několika důvodů byly zvoleny indukční průtokoměry FLONET FN50XX.1 od společnosti ELIS Plzeň a.s.. Indukční průtokoměry vykazují přesné výsledky a vysokou opakovatelnost měření. Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky tyto průtokoměry využívá ve svých experimentech, což přináší zkušenosti s těmito průtokoměry. Tato volba byla vhodná také z hospodárného hlediska, protože byly zvoleny takové průměry DN, které jsou v laboratoři k dispozici. Z důvodu dodržení hodnot dovolených chyb v celém měřicím rozsahu měřicí trati, jsme zvolili tři různé průměry průtokoměrů, jedná se o DN 15, DN 32 a DN 50.

Dále bylo nutné zvolit materiál potrubí. Požadavek Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky byl volit materiál potrubí z plastových hmot s možností lepení armatur, a to především z důvodu jednoduchosti (rozměrnější potrubí je složitější svařovat). S těmito požadavky a přihlédnutím k hospodárnosti byl zvolen materiál PVC-U.

Dalším krokem bylo rozhodnutí o umístění vodní trati v prostoru laboratoře. Jelikož se jedná o trať sloužící k testování a kalibraci průtokoměrů a nikoliv experiment, který bude v laboratoři po omezenou dobu, umístění tratě bylo zvoleno tak, aby co možná nejméně překážela. Pro naši trať byl zvolen prostor pod jedním z bazénů v laboratoři. Po výběru čerpadla z vybavení Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky byly zkompletovány veškeré potřebné podklady ke konstrukčnímu návrhu vodní trati. Byla vytvořena 3D vizualizace vodní trati situované v prostorách pod bazénem v laboratoři Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky a posléze byl tento 3D model použit pro vytvoření výkresové dokumentace celé vodní trati.

V návrhu konstrukce vodní trati byly dodrženy doporučené zásady instalace průtokoměrů dle výrobce. Lze zmínit například dodržení dostatečně dlouhých ukliďňovacích délek před a za průtokoměry, správnou polohu průtokoměru, nebo dodržení geometrie při změně průměru potrubí.

Součástí praktické části je i vytvoření uživatelského rozhraní v prostředí LabVIEW, které bude možné plně zprovoznit až po postavení vodní tratě. Nyní lze simulovat fungování trati pro kalibraci průtokoměrů, ale dokud nebudou k dispozici výstupní data jednotlivých čidel, tak software nelze plnohodnotně využít.

Poslední částí práce je přibližný odhad finančních nákladů na stavbu tratě. Finanční odhad je vyhotoven na základě katalogových ceníků od různých firem.

6 Seznam použité literatury

- [1] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-x.
- [2] TEYSSLEROVÁ – MIKYŠKOVÁ, Marcela. *Měření průtoku tekutin škrticími orgány: Manuál k výrobnímu programu společnosti MATTECH, s.r.o.* MATTECH, 2015.
- [3] FRENZEL, F., H. GROTHEY, C. HABERSETZER, M. HIATT a W. HOGREFE. *Industrial flow measurement: Basics and practice* [online]. ABB Measurement & analytics, 2017. Dostupné také z: https://library.e.abb.com/public/33c86515dd3f4e1e92cee87325194f6e/D184B075U02_I.pdf
- [4] JEŽEK, Jan, Blanka VÁRADILOVÁ a Josef ADAMEC. *Mechanika tekutin*. Třetí vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [5] AXIMA, SPOL. S.R.O. Průtokoměr s oválnými koly. *AUTOMA časopis pro automatizační techniku* [online]. Ústí nad Labem, 2016, **2016**(3) [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/prutokomer-s-ovalnymi-koly-2016_03_54589_7965/
- [6] ČSN ISO 5167-1 (257710). *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 1: Obecné principy a požadavky: určeno konstrukčním i provozním technickým kádrům středního a vyššího stupně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [7] ČSN EN ISO 5167-2 (257710). *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 2: Clony*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [8] ČSN EN ISO 5167-3 (257710). *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 3: Džyzy a Venturiho džyzy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [9] ČSN EN ISO 5167-4 (257710). *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 4: Venturiho trubice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [10] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika: Měření průtoku a proteklého množství* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm#k45>
- [11] KADLEC, Karel. Coriolisovy průtokoměry. *AUTOMA časopis pro automatizační techniku* [online]. Ústí nad Labem, 2016, **2010**(11) [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/web-clanky/coriolisovy-prutokomery-42308_05673/
- [12] STRNAD, R. *Trendy měření průtoku. Proudění, termodynamika, průtokoměry, legislativa*. Říčany u prahy: GAS, 2004.
- [13] KADLEC, Karel. Vírové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. *AUTOMA časopis pro automatizační techniku* [online]. Ústí nad Labem, 2016, **2014**(10) [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/virove-prutokomery-princip-vlastnosti-a-pouziti-2014_10_53030_7323/
- [14] MORTENSON, Ted. Turbine Flow Meter Explained | Operation and Calibration. *RealPars* [online]. 2021 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.realpars.com/blog/turbine-flow-meter>
- [15] SPIRAX SARCO. *Turbínové zásuvné průtokoměry: The RIM20* [online]. 2016 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.spiraxsarco.com/global/cs-CZ/products/flowmetering/turbine-flowmeters>
- [16] CZECH CALIBRATION STATION OF CURRENT METERS. Current meters. VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA. *VÚV TGM* [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://cksvv.vuv.cz/index.php/en/current-meters>

- [17] *Flow education series* [online]. KOBOLD. 2021 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://koboldusa.com/articles/flow-meters/paddle-wheel-flow-meters/>
- [18] ČSN 25 7830. *Plováčkové průtokoměry se skleněnou trubicí*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1964.
- [19] KADLEC, Karel. Ultrazvukové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. *AUTOMA časopis pro automatizační techniku* [online]. Ústí nad Labem, 2016, **2013**(7) [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/ultrazvukove-prutokomery-princip-vlastnosti-a-pouziti-2013_07_0_10538/
- [20] KADLEC, Karel. Indukční průtokoměr – princip, vlastnosti a použití. *AUTOMA časopis pro automatizační techniku* [online]. Ústí nad Labem, 2016, **2012**(10;) [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/indukcni-prutokomer-princip-vlastnosti-a-pouziti-2012_10_0_9933/s
- [21] ČSN EN ISO 6817. *Měření průtoku vodivých kapalin v uzavřených profilech - Metoda užívající indukční průtokoměry*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [22] ČSN EN ISO 20456 (257740). *Měření průtoku tekutin v uzavřených profilech - Pokyn pro použití indukčních průtokoměrů pro vodivé kapaliny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [23] ELIS PLZEŇ A. S. *Indukční průtokoměr FLONET FN50xx.1: Manuál pro projektování, montáž a servis* [k dispozici při nákupu průtokoměru].
- [24] ALIAXIS ČESKÁ REPUBLIKA. *Materiálový list ABS* [online]. 2020 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: https://www.aliaxis.cz/website/aliaxis-cz/downloads/technicke_listy/INDUSTRY/materialovy_list_ABS_2020.pdf
- [25] ALIAXIS ČESKÁ REPUBLIKA. *Materiálový list PVC-C* [online]. 2020 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: https://www.aliaxis.cz/website/aliaxis-cz/downloads/technicke_listy/INDUSTRY/materialovy_list_PVC_C_2020.pdf
- [26] ALIAXIS ČESKÁ REPUBLIKA. *Materiálový list PVC-U* [online]. 2020 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: https://www.aliaxis.cz/website/aliaxis-cz/downloads/technicke_listy/INDUSTRY/materialovy_list_PVC_U_2020.pdf
- [27] ALIAXIS ČESKÁ REPUBLIKA. *Technical catalogue: Pipe and fittings in PVC-U* [online]. 2020 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: https://www.aliaxis.cz/_default_upload_bucket/PVC_U_rucni_armatury.pdf
- [28] ALIAXIS ČESKÁ REPUBLIKA. *Dokumenty ke stažení* [online]. 2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.aliaxis.cz/cs/technicka-podpora/dokumenty-ke-stazeni?type=395088>
- [29] FERONA. *Příruby s krkem* [online]. 2017 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/vyhledavani/465>
- [30] PRUMEX S.R.O. *Spojovací materiál* [online]. 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <http://www.spojovaci-material.net/>
- [31] TOP-TREND SHOP S.R.O. *Přetlakový průmyslový ventil DN 50 - 2"* [online]. 2014 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.pro-topeni.cz/eshop-pretlakovy-prumyslovy-ventil-dn-50-2.html>