



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

## HYDRAULICKÁ DRSNOST VODOVODNÍCH POTRUBÍ

HYDRAULIC ROUGHNESS OF WATER SUPPLY PIPES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Eva Náplavová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

BRNO 2018



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Eva Náplavová
Název	Hydraulická drsnost vodovodních potrubí
Vedoucí práce	Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

---

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

[1] Sophocleous, S. et. al.:Advances in Water Mains Network Modelling for Improved Operations, Procedia Engineering, Volume 119, 2015, pages 593-602, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.912>.

[2] Savic, D., Kapelan, Z.: Quo vadis water distribution model calibration?, Urban Water Journal. vol 6. pp 3-22., 2009, 10.1080/15730620802613380.

[3] Jandora, J. a kol.: Hydraulika a hydrologie, Akademické nakladatelství CERM, 2011, Brno, ISBN 978-80-7204-739-0

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

V úvodní části bakalářské práce bude zpracována literární rešerše v oblasti hydraulického modelování tlakových trubních sítí, přehled používaných výpočetních vztahů a různých přístupů při používání hydraulických drsností a drsnostních součinitelů v simulačních modelech. Druhou část práce bude tvořit případová studie, kdy bude proveden výpočet skutečné hydraulické drsnosti reálného úseku vodovodní sítě, kde v minulosti proběhlo velmi přesné měření hydraulických veličin.

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Jan Ručka, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá hydraulickou drsností vodovodních potrubí, jejím zohledněním při hydraulickém modelování a následnou kalibrací hydraulického simulačního modelu. V teoretické části práce je zpracována literární rešerše v oblasti současného přístupu k hydraulickému modelování vodovodních sítí a jeho možného budoucího směřování, dále je uveden přehled používaných drsností, výpočetních vztahů a možných přístupů ke kalibraci hydraulického modelu. V praktické části práce je sestaven matematický model příváděcího řadu vodovodní sítě obce Hvozdná a následuje jeho kalibrace. Ke kalibraci je jakožto účelová funkce použita vážená metoda nejmenších čtverců. K minimalizaci hodnoty účelové funkce, a tedy stanovení hydraulické drsnosti příváděcího řadu, slouží optimalizační metody.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

hydraulická drsnost, kalibrace, hydraulické modelování, metoda nejmenších čtverců, součinitel ztrát třením

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with hydraulic roughness of water pipelines, its consideration while making a hydraulic model and subsequent calibration of hydraulic simulation model. In the theoretical part literary review about current approach to hydraulic modeling of water mains and its possible future direction is carried out, as well as an overview of used roughness coefficients, computational formulas and possible approaches to calibration of the hydraulic model. In the practical part of the thesis, a mathematical model of the supply main of the water mains network of Hvozdná is compiled and is followed by its calibration. The method of weighted least squares is used as an objective function. Optimization methods are used to minimize the value of the objective function and thus to determine the hydraulic roughness of supply main.

## **KEYWORDS**

hydraulic roughness, calibration, hydraulic modelling, least squares method, friction factor

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

NÁPLAVOVÁ, Eva *Hydraulická drsnost vodovodních potrubí*. Brno, 2018. 48 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 5. 2018

---

Eva Náplavová  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu této práce, Ing. Janu Ručkovi, Ph.D., za rady a připomínky k řešené problematice, a za vstřícnost a trpělivost při konzultacích. Poděkování za cenné rady patří také Ing. Tomáši Sucháčkovi.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
1.1	Cíl práce.....	3
<b>2</b>	<b>HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ</b> .....	<b>4</b>
2.1	Kalibrace a verifikace hydraulického modelu.....	5
2.1.1	Kalibrace.....	5
2.1.2	Verifikace .....	7
2.2	Vývoj v oblasti hydraulického modelování.....	7
2.2.1	Rámec real-time modelu .....	7
2.2.2	Aplikace real-time modelu v praxi .....	10
<b>3</b>	<b>HYDRAULICKÁ DRSNOST VODOVODNÍCH POTRUBÍ</b> .....	<b>12</b>
3.1	Vliv drsnosti na tlakové ztráty .....	13
3.1.1	Součinitel ztrát třením.....	13
3.2	Výpočet tlakových ztrát.....	15
3.3	Terénní metody stanovení drsnosti potrubí.....	16
3.3.1	Metoda paralelních potrubí.....	16
3.3.2	Dvou-hydrantová metoda .....	17
3.4	Kalibrace hydraulického modelu .....	18
3.4.1	Praktický přístup ke kalibraci .....	20
<b>4</b>	<b>STANOVENÍ HYDRAULICKÉ DRSNOSTI PŘIVÁDĚCÍHO ŘADU VODOVODU OBCE HVOZDNÁ</b> .....	<b>22</b>
4.1	Zájmové území .....	22
4.2	Charakteristika spotřebiště.....	22
4.3	Vodovodní síť obce Hvozdná .....	23
4.4	Měrná kampaň.....	25
4.4.1	Měření průtoků .....	25
4.4.2	Měření tlaků.....	26
4.4.3	Zpracování měrné kampaně .....	27
4.5	Příprava dat pro kalibraci .....	27
4.5.1	Analýza spotřeby vody .....	27
4.5.2	Vyhodnocení měření tlaku a příprava dat pro kalibraci .....	30
4.5.3	Metoda nejmenších čtverců – stanovení vah .....	32
4.6	Kalibrace hydraulické drsnosti potrubí.....	33

---

<b>4.7</b>	<b>Výsledky kalibrace a diskuze .....</b>	<b>35</b>
4.7.1	Nejistoty výpočtu .....	37
4.7.2	Diskuze .....	39
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>42</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>44</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>46</b>
	<b>SUMMARY .....</b>	<b>48</b>

# 1 ÚVOD

Znalost tlakových a průtokových poměrů ve vodovodní síti je nezbytným podkladem pro provozování stávajících systémů i pro návrh zcela nových sítí. Informace o tlacích a průtocích v tlakovém trubním systému, tedy ve vodovodní síti, lze získat přímým měřením na síti, avšak toto měření by vyžadovalo osazení velkého množství měřidel, které je sice reálně proveditelné, z ekonomického hlediska je ale velmi nevýhodné. K zjišťování tlakových a průtokových poměrů tedy používáme hydraulickou analýzu – matematický model, kalibrovaný a verifikovaný pomocí hodnot změřených ve vhodně zvolených bodech skutečné sítě. [1]

Přesnost, s jakou hydraulický model odpovídá reálnému systému, je ovlivněna kvalitou vstupních parametrů. Mezi ně se řadí i hydraulická drsnost potrubí, která vstupuje do výpočtu součinitele ztrát třením (odporového součinitele) a dále tak ovlivňuje správnost stanovení tlakových ztrát, respektive hydrodynamického tlaku v trubní síti. Drsnost potrubí se řadí mezi dané parametry hydraulického modelu, tedy nezávislé proměnné, které jsou při prvním kroku optimalizace přiřazeny na základě tabulkových hodnot či vypočteny z měření na síti, a dále jsou postupně zpřesňovány. Proces zpřesňování hodnoty hydraulické drsnosti se nazývá kalibrací modelu.

## 1.1 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat rešerši v oblasti současného přístupu k tvorbě hydraulických modelů a jejich kalibraci, a také v oblasti jejich možného budoucího směřování. Práce se dále věnuje hydraulické drsnosti vodovodních potrubí, jejímu vlivu na velikost vznikajících tlakových ztrát a různými přístupy k jejímu vyjádření a zohlednění při výpočtu tlakových ztrát. Popsány jsou způsoby stanovení drsnosti potrubí z dat získaných měřeními v terénu. V neposlední řadě pak jsou zmíněny různé metody kalibrace modelu, zohledňující nejen samotnou drsnost potrubí, ale také změnu jeho dimenze.

V praktické části práce bylo cílem sestavit model přívaděčího řadu vodovodní sítě obce Hvozdná a stanovit hydraulickou drsnost tohoto přívaděče. Tento model byl sestaven v programu Microsoft Excel a kalibrován na základě výsledků uskutečněné měřné kampaně. Pro stanovení hydraulické drsnosti byla použita vážená metoda nejmenších čtverců, která sloužila jako cílová neboli účelová funkce. Výsledná kalibrace byla provedena pomocí modulu Řešitel, kde jako optimalizační nástroj byly použity dvě metody, a to gradientní metoda a evoluční algoritmus.

## 2 HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ

Hydraulická analýza nachází využití při řešení nejrůznějších úloh, ať už se jedná o hospodárný prvotní návrh dimenze potrubí, posouzení současného stavu sítě, odhalování a snižování ztrát, rekonstrukce sítě, analýzu parametrů jakosti vody a dalších.

Proces tvorby hydraulického modelu může být dle Ormsbeeho (1989) shrnut do několika následujících kroků, přičemž do tohoto procesu není uvažována samotná „fyzická“ stavba modelu, tzn. definování topologie sítě, dimenze a materiálu potrubí apod.: [2][3]

- 1) **stanovení účelu modelu** – dle Walskeho (1995) je nejdůležitějším krokem tvorby modelu právě definování jeho účelu, neboť je zřejmé, že jeden model nelze považovat za vhodný pro všechny účely. Například pro analýzu jakosti vody či pro provozní studie je zapotřebí provedení kvazi-dynamické analýzy, kdežto pro prvotní návrh dimenze dostačuje analýza statická,
- 2) **stanovení výchozích hodnot parametrů modelu** – zpravidla se jedná o hodnoty hydraulické drsnosti potrubí a hodnoty uzlových odběrů. Hodnotu hydraulické drsnosti lze určit buďto z tabulek, na základě materiálu a stáří potrubí, anebo z měřených dat. Hodnoty uzlových odběrů se schematizují s využitím metody redukovaných délek nebo metody dvou součinitelů – samostatně je zadávána pouze spotřeba význačných velkoodběratelů,
- 3) **sběr dat pro kalibraci** – pro kalibraci modelu se používají data z měření na síti. Zpravidla se jedná o stálá měření instalovaná na objektech sítě (vodojemy, čerpací stanice apod.) doplněná o krátkodobě instalovaná měření za účelem úplného popsání provozního stavu sítě,
- 4) **zhodnocení výsledků modelu** – výsledek simulace se hodnotí na základě relativní nebo absolutní odchylky kóty tlakové čáry, tlaku či průtoku, přičemž maximální přijatelná odchylka se pohybuje v rozmezí 5-10 %,
- 5) **kalibrace na makroúrovni** – v případě, že odchylka sledované veličiny výrazně překračuje požadovanou přesnost, jedná se pravděpodobně o chybu ve stanovení výchozích parametrů jiných, než hydraulická drsnost potrubí a uzlové odběry. Takto velké rozdíly mohou být způsobeny mimo jiné zcela nebo částečně uzavřenými uzavěry, nesprávně stanovenými hranicemi tlakových pásem, špatně zvolenými charakteristikami čerpadel, chybným zadáním dimenzí potrubí nebo jeho délek, a podobně. Pro odstranění této chyby je třeba důkladná kontrola všech vstupních hodnot modelu – například při podezření, že uzavěr, který byl považován za otevřený, je uzavřen, může být tato domněnka ověřena uzavřením daného uzavěru v modelu a srovnáním výsledných vypočtených tlaků s měřenými hodnotami. Další z možností, jak zjistit původ vzniklé odchylky, je provedení citlivostní analýzy, [4]
- 6) **citlivostní analýza** – podstatou citlivostní analýzy je stanovení vlivu jednotlivých vstupních parametrů na výsledky simulace – dává tedy lepší přehled o původu chyb, který se uplatní při následné mikro-kalibraci,

- 7) **kalibrace na mikroúrovni** – jakmile výsledek simulace dosahuje požadované přesnosti, je snahou docílit úplné kalibrace modelu – tzn. doladěním hodnot součinitelů hydraulické drsnosti a hodnot uzlových odběrů dosáhnout shody s časovým průběhem průtoků a kóty tlakové čáry získaných měření.

## 2.1 KALIBRACE A VERIFIKACE HYDRAULICKÉHO MODELU

### 2.1.1 Kalibrace

Kalibrace spočívá v určení fyzikálních a provozních charakteristik sítě. Od sedmdesátých let dvacátého století byl vyvinut bezpočet kalibračních metod, které lze obecně shrnout do tří kategorií: *iterační*, *explicitní* a *implicitní* [2].

#### Iterační metody

Iterační metody jsou založeny na metodě pokus/omyl, kdy neznámé parametry jsou zpřesňovány v každém kroku s užitím tlaků a/nebo průtoků získaných řešením sady rovnic vyjadřujících zákon zachování hmoty a zákon zachování energie (rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice). Jelikož použití iteračních metod je velmi neefektivní, jejich hlavní přínos je dnes spatřován v definování základních principů kalibrace modelu, které byly použity při vývoji sofistikovanějších metod implicitních a explicitních. [2]

#### Explicitní metody

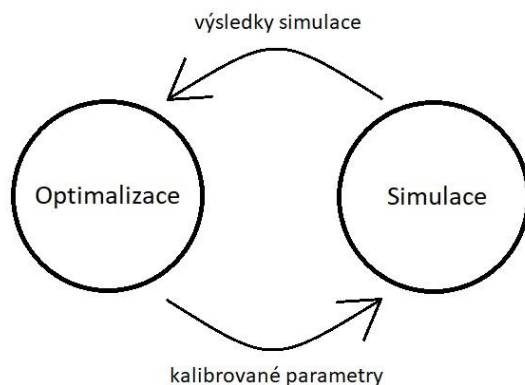
Explicitní (hydraulické) metody jsou založeny na řešení sady hmotnostních a energetických rovnic, rozšířené o rovnice odvozené z měření tlaků a průtoků (na jedno měření připadá jedna rovnice). Explicitní metody mají několik nevýhod, mezi něž patří například skutečnost, že počet neznámých musí odpovídat počtu dostupných měření, nepřesnosti měření nejsou brány v potaz a podobně, a proto v současnosti nemají velký význam. [2]

#### Implicitní metody

Implicitní (optimalizační) metody jsou v současnosti běžně používané. Jedná se o metody, které využívají kombinaci optimalizačních nástrojů a hydraulického řešení. Princip fungování optimalizačních metod je zřejmý z obr. 2.1.

V prvním kroku jsou vstupem pro optimalizaci počáteční odhady parametrů modelu (hodnoty hydraulické drsnosti zjištěné z tabulek a schematizované hodnoty uzlových odběrů). Optimalizační nástroj tyto hodnoty předá simulačnímu modelu, který provede hydraulický výpočet a výsledky (například hodnoty tlaků) předá zpět optimalizačnímu nástroji. Zde do procesu vstupuje takzvaně cílová či účelová funkce, která má za úkol minimalizovat rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami. [2]

Pro stanovení těchto rozdílů využíváme metody nejmenších čtverců. Na základě vypočtených odchylek optimalizační nástroj stanoví nové hodnoty kalibrovaných parametrů, které opět předá simulačnímu modelu, a popsany proces se opakuje, dokud není dosaženo požadované shody.



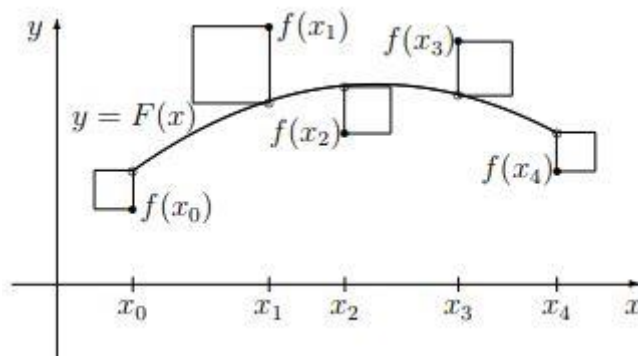
Obr. 2.1 Implicitní kalibrace

### Metoda nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců je matematická metoda sloužící k aproximaci řešení přeuročitých systémů lineárních rovnic. Jednoduchým příkladem jejího použití je prokládání naměřených dat přímkou. Všeobecně lze říci, že tato metoda slouží k nahrazení funkce  $f(x)$  jednodušší funkcí  $F(x)$ , v případě, kdy hodnoty funkce  $f(x)$  jsou v uzlech  $x_0, x_1, \dots, x_n$  dány nepřesně. Požadavek rovnosti těchto funkcí  $F(x_i) = f(x_i)$  pro  $i = 0, \dots, n$  proto nahradíme slabším požadavkem, aby součet kvadrátů odchylek mezi hodnotami funkcí  $f(x)$  a  $F(x)$  byl minimální: [5]

$$(F(x_0) - f(x_0))^2 + \dots + (F(x_n) - f(x_n))^2 = \min \quad (2.1)$$

Grafické znázornění této metody, od něž je odvozen i její název, je na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Grafické znázornění metody nejmenších čtverců [5]

Při kalibraci hydraulického modelu máme k dispozici soubor naměřených hodnot, které jsou v důsledku náhodných chyb měření rozptýleny kolem křivky. Cílem kalibrace je proložit tato rozptýlená data ideální křivkou. K jejímu nalezení použijeme účelovou funkci, tzn. najdeme minimální hodnotu součtu plochy čtverců odchylek měřených bodů od ideální křivky. [6]

Aby výsledky kalibrace co nejlépe korespondovaly se skutečností, využíváme tzv. váženou metodu nejmenších čtverců. Ta do výpočtu zavádí faktor vah, díky němuž je možné zohlednit míru vlivu vybraných dat na úkor jiných. Účelovou funkci v této podobě zapisujeme [2]:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^m w_i |y_i^{\text{měř}} - y_i^{\text{mod}}|^2, \quad (2.2)$$

kde:

$f(x)$  ... cílová neboli účelová funkce,

$x$  ... vektor neznámých parametrů,

$m$  ... počet měření,

$w_i$  ... váhy,

$y_i^{\text{měř}}$  ... hodnoty získané měřením,

$y_i^{\text{mod}}$  ... vypočtené (modelované) hodnoty.

Při kalibraci hydraulického modelu je tedy v rámci této práce použita vážená metoda nejmenších čtverců, v níž je pomocí vah zohledněna míra vlivu rychlosti proudění na vznikající tlakové ztráty.

### 2.1.2 Verifikace

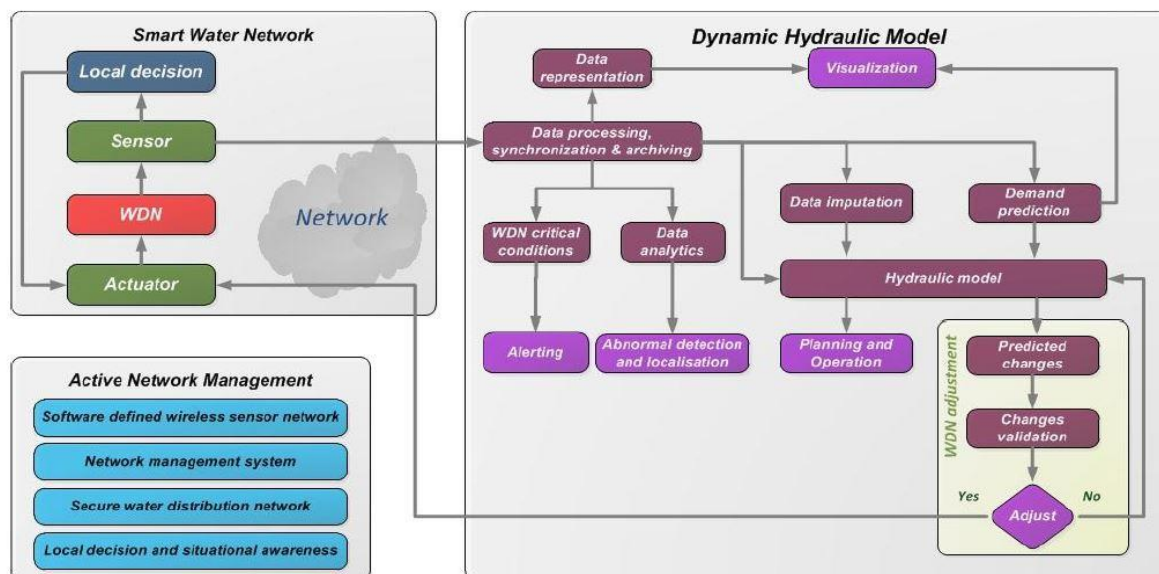
Verifikace je v zásadě totožná, jako kalibrace – ověřuje správnost vstupních parametrů na základě veličin reálně naměřených na síti. Verifikace slouží k ověření správnosti kalibrovaného modelu, z čehož plyne, že pro její správné provedení je zapotřebí použít jiný soubor naměřených tlaků a průtoku, než na který byla provedena kalibrace, případně je možné dvě třetiny dat z daného souboru použít pro kalibraci a zbývající třetinu využít pro verifikaci.

## 2.2 VÝVOJ V OBLASTI HYDRAULICKÉHO MODELOVÁNÍ

Hydraulické modelování je efektivním způsobem, jak analyzovat a rozpoznat provozní podmínky vodovodních sítí, nicméně většina v současnosti existujících modelů jsou off-line modely statické nebo kvazi-dynamické, které jsou primárně určeny pro projektování, posuzování jednotlivých zatěžovacích stavů a modelování jakosti vody. Statická povaha těchto modelů omezuje jejich spolehlivost a efektivnost – off-line modely na základě krátkodobých měření hydraulických veličin stanovují tisíce neznámých parametrů, nelze proto očekávat, že takto kalibrovaný model bude přesně reprezentovat celé rozmezí provozních stavů, které mohou nastat. Tyto modely jsou navíc vytvářeny k určitému datu a postupem času zastarávají. Jako řešení se nabízí modelování v reálném čase, jinými slovy real-time modelování, kdy hydraulický model je průběžně aktualizován na základě on-line přenášených měření, a poskytuje tak realističtější přehled o síti [7].

### 2.2.1 Rámec real-time modelu

Abu-Mahfouz a kol. ve své práci [7] navrhnul rámec pro dynamický hydraulický real-time model. Tento model používá data měřená v reálném čase k vyhodnocení aktuálního stavu sítě a automaticky odesílá kontrolní signály různým prvkům sítě, které přizpůsobí její výkonnost a tím učiní její provoz efektivnější. Funkční schéma navrhovaného řešení je patrné z obr. 2.3.



Obr. 2.3: Funkční schéma real-time modelu [7]

Navrhovaný systém se skládá ze tří hlavních složek – „chytré“ vodovodní sítě, dynamického hydraulického modelu a aktivního řízení sítě:

- 1) **chytrá vodovodní síť** – je síť, osazená velkým množstvím senzorů a armatur s elektropohony, která umožňuje monitorování a ovládání těchto armatur (např. průtokoměrů, tlakových čidel, redukčních ventilů, čerpadel atp.) v reálném čase.
- 2) **dynamický hydraulický model** – jak již bylo zmíněno, tento model v reálném čase přebírá data naměřená na síti, a s jejich pomocí dává realistické informace a předpovědi provozního stavu sítě. K jeho vytvoření je zapotřebí několik komponent:
  - a) *on-line synchronizace a integrace dat* – nepřesnosti v parametrech on-line hydraulického modelu mohou vést k velkému rozporu mezi výpočty modelu a reálným chováním vodovodní sítě. Pro správnost výpočtů je tedy nutná průběžná aktualizace a integrace měřených dat s pevně daným časovým krokem (například 10 minut, 1 hodina apod.),
  - b) *imputace dat* – pro spolehlivou funkci real-time modelu je třeba zajistit velké množství dat a jejich velkou přesnost. Tuto úlohu výrazně ztěžují výpadky senzorů, poruchy vysílačů, chyby měření, nedostatek měřicích zařízení instalovaných na síti atd. Využívá se proto imputace dat, což je proces nahrazení chybějících dat, a to například za pomoci dočasných měření. I po ukončení těchto měření je využíváno korelace mezi takto naměřenými daty a daty z trvalých měření pro výpočty modelu,
  - c) *predikce odběrů* – spotřeba vody má dynamický stochastický charakter (náhodně se mění) a kolísá v čase v závislosti na ekonomických, demografických a klimatických podmínkách. Pro efektivní hydraulickou analýzu tedy není vhodné používat historická data, neboť nemusí reflektovat aktuální stav vodovodní sítě. Použití přesných hodnot odběrů, stanovených na základě průběžně získávaných dat, je pro správnost dynamického hydraulického modelu a následné přizpůsobení funkce prvků vodovodní sítě kritické. Systém stanovení odběrů by proto měl

- sestávat ze dvou kroků – samotné predikce a následné korekce založené na měřených datech,
- d) *kalibrovaný off-line model* – stejně jako u statické či kvazi-dynamické hydraulické analýzy je i pro real-time modelování velmi důležitý kalibrovaný off-line model, který reprezentuje skutečný stav sítě. Model proto musí být kalibrován na základě tlaků a průtoků měřených na síti, a musí být stále aktuální (tzn. s každou další změnou v topologii sítě by měl být model nově kalibrován),
  - e) *algoritmus optimalizace vodovodní sítě* – tento optimalizační algoritmus je zapotřebí pro stanovení změn na síti nutných pro dosažení optimálního stavu. Pro zhodnocení a ověření stanovených změn by měla být hydraulická analýza provedena s vypočtenými průtoky a stanovenými změnami jako vstupními parametry, následně by měla být zhodnocena výkonnost sítě. Pokud je výkonnost uspokojivá, pak budou vyslány signály pohonům daných prvků (čerpadel, redukčních ventilů) a provozní stav sítě bude uzpůsoben modelovaným změnám. V případě, že výkonnost není přijatelná, dojde k modifikaci stanovených změn a proces se bude opakovat,
  - f) *optimalizace v reálném čase* – v návaznosti na algoritmus optimalizace vodovodní sítě bude vyvinut systém řízení tlaku, který bude automaticky řídit tlak napříč vodovodní sítí. Tento systém bude udržovat konstantní tlak u spotřebitele, namísto udržování konstantního vysokého tlaku u čerpadel. Redukční ventily budou navíc ovládány tak, aby reagovaly na aktuální spotřebu vody. Díky tomu bude hydraulický model šetřit vodu, energii a peníze a zároveň prodlužovat životnost potrubí,
  - g) *algoritmus detekce úniků* – většina v současnosti používaných algoritmů pro detekci a lokalizaci úniků vody byla testována pouze za použití simulačních nástrojů anebo v laboratorních podmínkách. Nedá se proto očekávat, že by tyto algoritmy byly efektivní při aplikaci u skutečných vodovodních sítí. Proto je zapotřebí vyvinout za tímto účelem algoritmus zcela nový,
- 3) **aktivní řízení sítě** – v současnosti jsou hydraulické modely používány především k analýze dat, a jejich výsledky nejsou aktivně implementovány do provozu sítě. Při provozování chytré vodovodní sítě, jakou popisuje Abu-Mahfouz a kol. [7], bude prakticky nemožné efektivně manuálně manipulovat se všemi aktivními prvky (šoupata, uzávěry, redukční ventily apod.). Pod pojmem aktivní řízení se proto rozumí automatizované řízení sítě senzorů a aktivních prvků vodovodní sítě v reálném čase, na základě výsledků hydraulického modelu. Toto řízení zajistí bezpečnost a efektivitu provozování chytré vodovodní sítě.

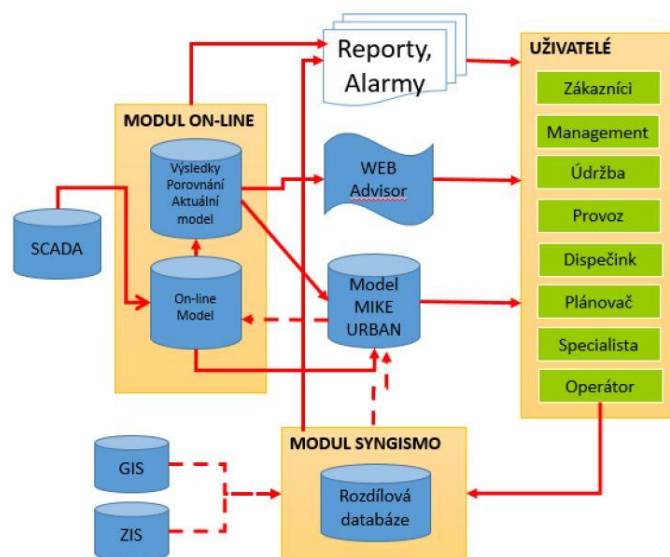
Rozsáhlé využití komunikačních technologií zvýší efektivitu provozování vodovodní sítě, avšak nese s sebou i rizika. Bezdrátové systémy jsou zranitelné, neboť neexistuje žádná fyzická ochrana komunikačního média, a je proto snadné je napadnout. Jelikož zajištění bezpečnosti vodovodní sítě je nezbytné, bude nutné do systému chytré vodovodní sítě implementovat také kvalitní zabezpečovací systém, který zabrání případným kybernetickým hrozbám. [7]

## 2.2.2 Aplikace real-time modelu v praxi

Hydraulické modelování a z něj vyplývající optimalizace aktivních prvků sítě v reálném čase tak, jak bylo popsáno v předcházející kapitole, je stále ještě hudbou budoucnosti. Používané on-line modely zatím neumožňují automatizované řízení sítě, jejich výhoda oproti off-line modelům však spočívá v zajištění aktuálnosti dat a z ní plynoucí důvěryhodnosti výsledků. Jsou proto efektivním nástrojem pro optimalizaci provozních parametrů sítě, zvyšování kvality poskytovaných služeb a zlepšování ekonomiky provozu.

### Matematický model vodovodní sítě města Písek

Mezi města, využívající on-line modelování v reálném čase, se v České republice řadí mimo jiné například město Písek. On-line matematický model je zde tvořen systémem vzájemně propojených aplikací, instalovaných na serveru provozovatele – jedná se o modul SynGISM0, modul ON-LINE, MIKE URBAN a aplikaci DHI Waternet Advisor, přičemž každá z těchto aplikací plní jinou funkci [8]. Funkční schéma systému je patrné z obr. 2.4.

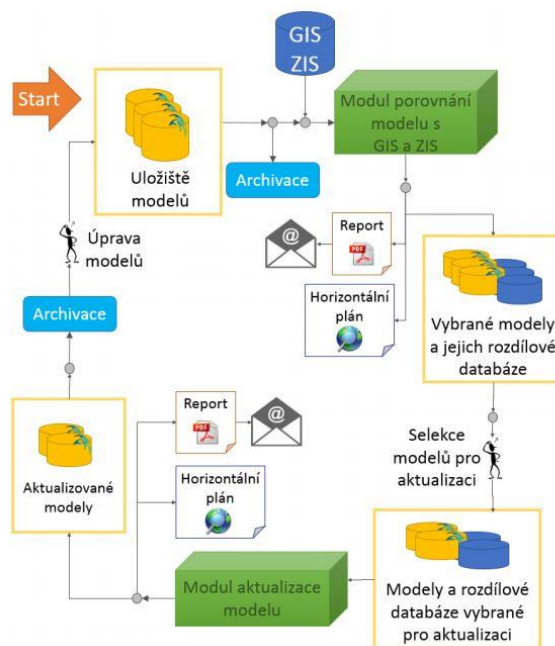


Obr. 2.4: Funkční schéma matematického modelu vodovodní sítě města Písek [8]

Modul **SynGISM0** (SYNchronizace GIS a MOdelu) má za úkol kontrolu aktuálnosti dat používaných v modelu a jejich případnou aktualizaci na základě aktuálních podkladních dat v GIS (geografický informační systém – informace o topologii sítě) a ZIS (zákaznický informační systém – informace o spotřebě odběratelů). V první fázi modul vyhodnotí míru odlišností datových setů v GIS/ZIS a modelu, a na základě stanovených limitů vytvoří report o potřebě aktualizace modelu. Tvorba reportů probíhá automatizovaně a je také možné nastavit odesílání reportů vybraným pracovníkům na e-mail. Operátor, který report obdrží, následně zvolí, které modely mají být aktualizovány, a modul tuto aktualizaci provede, přičemž, pokud operátor požaduje některé odlišnosti GIS a modelu ponechat, modul je nechá beze změny. Původní data, výsledky jejich porovnání i následnou aktualizaci je možné kontrolovat v aplikaci MIKE URBAN nebo ArcGIS. Hlavním přínosem modulu SynGISM0 je tedy významná úspora času operátora [8]. Pracovní postup při použití tohoto modulu je patrný z obr. 2.5.

Neustálou aktuálnost modelu zajišťuje modul **ON-LINE**, a to díky napojení na data dispečerského systému SCADA, odkud v reálném čase a ve zvoleném časovém kroku automaticky načítá okrajová a kontrolní data. Proces probíhá následovně: [8]

- modul se připojí na systém SCADA,
- načte data měřená na vodovodní síti,
- přizpůsobí a validuje vstupní data a následně je uloží do databáze,
- aktualizuje model,
- provede výpočet,
- výsledky výpočtu uloží do databáze,
- vyhodnotí kontrolní podmínky a nastavené limity,
- připraví data pro prezentaci výsledků, reporty a alarmy.



Obr. 2.5: Procesní schéma modulu SynGISM o [8]

Po dokončení výpočtu je model a jeho výsledky k dispozici ve výpočetním programu **MIKE URBAN**. Ten poskytuje množství nástrojů pro tvorbu a správu modelu a pro provádění analýz pro různé zatěžovací stavy. Zároveň umožňuje vizualizaci výsledků a tvorbu tiskových výstupů. [8]

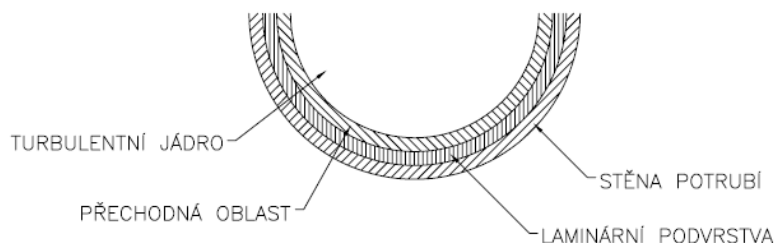
Základním prostředím pro prohlížení a práci s výstupy modulu ON-LINE je aplikace **Waternet Advisor**. Jedná se o webovou aplikaci, kde může každý uživatel vytvářet a sdílet s ostatními uživateli neomezené množství vlastních scénářů různých zatěžovacích stavů a k nim náležejících výpočtů. Mezi výpočetní možnosti aplikace patří například základní hydraulický výpočet, simulace kapacity hydrantů, simulace stáří vody, plánování odstávek, trasování dodávky z jednotlivých zdrojů a další. Výsledky je pak možné animovat v mapě. U této aplikace lze nastavit různá práva přístupu k datům pro jednotlivé uživatele a není problém ji otevřít i pro uživatele mimo vodárnu – například hasičský záchranný sbor tak může mít k dispozici výpočet kapacity hydrantů apod. Tato aplikace umožňuje i práci na mobilních zařízeních, což je výhodné při práci v terénu. [8]

### 3 HYDRAULICKÁ DRSNOST VODOVODNÍCH POTRUBÍ

Hydraulická drsnost je vyjádřením odporů reálné kapaliny při jejím proudění v potrubí, a tím vznikajících tlakových ztrát. Je dána nerovnostmi na stěně potrubí, změnami těchto nerovností v důsledku stárnutí potrubí i charakterem samotného potrubí (např. deformace vlivem uložení, deformace ve spojích apod.). Závisí nejenom na materiálu a způsobu výroby potrubí, ale také na vlastnostech dopravované kapaliny. Ta může při proudění působit otěr stěn, a tak drsnost zmenšovat, anebo vlivem koroze a usazování naopak zvětšovat. [9]

*Absolutní drsnost* potrubí je charakterizována délkovým rozměrem  $k$  (označováno též  $\Delta$ ), který udává střední výšku výstupků nerovností na stěnách potrubí. Tuto hodnotu lze však jednoznačně určit pouze u homogenních povrchů. Skutečný povrch technicky vyráběného potrubí je nehomogenní, výška a prostorové rozložení výstupků se nerovnoměrně mění, a proto není možné stanovit jednoznačnou hodnotu absolutní drsnosti. Zavádí se proto pojem *hydraulická drsnost*, která se určuje laboratorně – porovnáním ztrát třením  $z_{th}$  na homogenním potrubí se známou (umělou) pískovou drsností se ztrátami třením  $z_{tn}$  na nehomogenním technicky vyráběném potrubí. Pokus se provádí při stejném průtoku, na potrubí o totožných délkách a dimenzích. Jestliže ztráta  $z_{th}$ , vzniklá v potrubí s homogenní drsností o výšce výstupků  $k$ , je shodná se ztrátou  $z_{tn}$ , vzniklou v nehomogenním potrubí, přiřadí se tomuto potrubí hydraulická drsnost o výšce výstupků  $k$ . [10]

Pro stanovení vlivu povrchu potrubí na velikost ztrát třením však není rozhodující absolutní ani hydraulická drsnost, ale jejich vztah vůči rozměru potrubí. Zavádí se proto navíc pojem *relativní drsnost*, což je bezrozměrné číslo, dané jako poměr absolutní (hydraulické) drsnosti a průměru potrubí. [10]



**Obr. 3.1: Vznik vrstev při turbulentním proudění**

Dále je třeba definovat pojmy *hydraulicky hladké* a *hydraulicky drsné* potrubí. Těsně v okolí stěny potrubí vzniká při turbulentním proudění mezní vrstva, která se skládá z laminární podvrstvy a z přechodné oblasti, a teprve poté následuje turbulentní jádro proudu [8]. Pokud mezní vrstva je několikanásobně tlustší než výška výstupků na stěnách potrubí, považujeme toto potrubí za *hydraulicky hladké*. Platí [11]:

$$\delta > 5k, \quad (3.1.)$$

kde:

$\delta$  ... tloušťka mezní vrstvy [mm],

$k$  ... drsnost potrubí [mm].

Tloušťka mezní vrstvy se zmenšuje se zvětšující se rychlostí proudění. Pokud tloušťka mezní vrstvy klesne přibližně na  $\frac{1}{5}$  drsnosti potrubí, hovoříme o potrubí *hydraulicky drsném*. V případě, kdy se velikost mezní vrstvy pohybuje mezi pětinasobkem a jednou pětinou drsnosti, nastává proudění v přechodné oblasti. [12]

### 3.1 VLIV DRSNOSTI NA TLAKOVÉ ZTRÁTY

Tlakové ztráty, vznikající při proudění viskózních kapalin, jsou ovlivněny drsností potrubí  $k$ , jeho průměrem  $D$  a Reynoldsovým číslem  $Re$ . Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina, která je dána rychlostí proudění  $v$ , průměrem potrubí  $D$  a kinematickou viskozitou kapaliny  $\nu$ , a charakterizuje režim proudění v potrubí. [9]

$$Re = \frac{vD}{\nu} . \quad (3.2)$$

Při proudění viskózních kapalin rozlišujeme dva režimy pohybu – *laminární*, při němž se jednotlivé částice pohybují vzájemně rovnoběžně a mezi sebou se nemísí, a *turbulentní*, při němž se částice pohybují neuspořádaně a vzájemně se mísí. Mezi těmito režimy neexistuje pevně daná hranice, nachází se mezi nimi *přechodná oblast*, v níž může být pohyb laminární i turbulentní. Laminární proudění může při jakémkoliv vnějším popudu přejít v turbulentní, hranice tohoto přechodu je závislá na intenzitě, s jakou narůstá rychlost proudění, i na případném usměrňování proudění. [11]

Reynoldsovo číslo zároveň vyjadřuje vliv tření mezi částicemi kapaliny na celkový odpor. Platí, že čím je vyšší (čím větší je průměr potrubí a rychlost proudění), tím nižší tento vliv je.

#### 3.1.1 Součinitel ztrát třením

Výpočet **součinitele ztrát třením**  $\lambda$  (odporový součinitel) je různý v jednotlivých režimech proudění, neboť se v nich mění i míra vlivu jednotlivých veličin na velikost tlakových ztrát [11]:

- 1) ***laminární proudění*** – v tomto režimu tlakové ztráty nezávisí na drsnosti potrubí, jsou úměrné první mocnině rychlosti, viskozitě dopravované kapaliny a průměru potrubí. Závisí tedy pouze na hodnotě Reynoldsova čísla. Součinitel ztrát třením počítáme dle vzorce: [11]

$$\lambda = \frac{64}{Re} , \quad (3.3)$$

- 2) ***turbulentní proudění*** – v turbulentní oblasti dále rozlišujeme tři režimy proudění:
  - a) ***turbulentní proudění v hydraulicky hladkém potrubí*** – při turbulentním proudění vznikají u výstupků na stěnách potrubí víry. U hydraulicky hladkých potrubí, kde tloušťka mezní vrstvy je větší než pětinasobek výšky výstupků na stěnách, se tyto víry od stěn neodtrhávají, ale zůstávají u nich, v mezní vrstvě, a tak nemají vliv na odpory v potrubí. Součinitel ztrát třením tak závisí pouze na hodnotě Reynoldsova čísla a dle Prandtlůva-Kármánova výrazu se počítá: [11]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{Re\sqrt{\lambda}}{2,51} , \quad (3.4)$$

- b) **turbulentní proudění v přechodné oblasti** – v oblasti, kde se velikost mezní vrstvy pohybuje v rozmezí od pětinasobku k jedné pětina absolutní drsnosti, nastává proudění v přechodné oblasti a součinitel ztrát třením je funkcí Reynoldsova čísla i relativní drsnosti potrubí. Turbulentní proudění v přechodné oblasti nastává při běžném provozu u většiny v současnosti používaných potrubí, [10]
- c) **turbulentní proudění v hydraulicky drsném potrubí** – při proudění s plně vyvinutým turbulentním prouděním jsou ztráty úměrné druhé mocnině rychlosti, tuto oblast proto nazýváme kvadratickou oblastí ztrát třením. Zde se již neuplatňuje mezní vrstva, a ztráty nejsou závislé na hodnotě Reynoldsova čísla. Součinitel ztrát třením závisí pouze na relativní drsnosti potrubí a dle Nikuradseho vztahu se počítá: [11]

$$\lambda = \frac{0,25}{\left(\log \frac{3,7D}{k}\right)^2} . \quad (3.5)$$

Pro výpočet součinitele ztrát třením platí pro technická potrubí v celé oblasti turbulentního proudění **Colebrook-Whiteova** rovnice [11]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7D} \right) , \quad (3.6)$$

Pokud je hodnota Reynoldsova čísla malá (tzn. rychlost proudění je malá, velikost mezní vrstvy výrazně převyšuje hodnotu absolutní drsnosti potrubí a proudění probíhá v režimu hydraulicky hladkého potrubí), pak první člen v závorce bude dosahovat výrazně větších hodnot než druhý, a výsledek se přiblíží Prandtl-Kármánovu výrazu. Naopak při velké hodnotě Reynoldsova čísla, kdy rychlost proudění je vyšší a velikost mezní vrstvy je vůči hodnotě absolutní drsnosti zanedbatelná, proudění probíhá v režimu hydraulicky drsného potrubí a výsledek odpovídá Nikuradseově výrazu. [11]

Součinitele ztrát třením lze dále vyjádřit jako funkci *rychlostního součinitele*  $C$ . Ten charakterizuje vliv drsnosti potrubí a jeho tvar. Podle **Pavlovského vzorce** jej počítáme [11]:

$$C = \frac{R^y}{n} , \quad (3.7)$$

kde:

$R$  ... hydraulický poloměr [m],

$n$  ... drsnostní součinitel [-],

$y$  ... mocnitel [-],

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1) . \quad (3.8)$$

Dosazením rychlostního součinitele do Chézyho rovnice:

$$v = C\sqrt{Ri} , \quad (3.9)$$

kde:

$C$  ... rychlostní součinitel [ $m^{0,5} \cdot s^{-1}$ ],

$R$  ... hydraulický poloměr [m],

$i$  ... hydraulický sklon [-],

a následným dosazením Chézyho rovnice do vztahu Darcy-Weisbach a vyjádřením vzejde vztah pro stanovení součinitele ztrát třením:

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}. \quad (3.10)$$

Ve Spojených státech amerických se pro výpočet tlakových ztrát třením nejčastěji používá rovnice **Hazen-Williams**. Jedná se o empirický vztah, který byl původně odvozen pouze pro turbulentní proudění a platí pouze pro vodu [10]. Pro vyjádření drsnosti potrubí používá koeficient  $c$ , který není funkcí Reynoldsova čísla. Rovnice Hazen-Williams je podobná Chézyho rovnici, avšak exponenty byly přizpůsobeny tak, aby lépe odpovídaly reálným hodnotám z inženýrské praxe [9]:

$$v = 0,28 \text{ až } 0,36 c D^{0,63} i^{0,54}, \quad (3.11)$$

kde:

$c$  ... součinitel drsnosti [-],

$D$  ... průměr potrubí [m],

$i$  ... hydraulický sklon [-].

Po dosazení do vztahu Darcy-Weisbach a následném vyjádření opět získáme vztah pro určení součinitele ztrát třením [9]:

$$\lambda = \frac{25,51g}{c^2 D^{0,26} i^{0,08}} \text{ až } \frac{15,43g}{c^2 D^{0,26} i^{0,08}}. \quad (3.12)$$

## 3.2 VÝPOČET TLAKOVÝCH ZTRÁT

Pro výpočet tlakových ztrát se v našich podmínkách používá rovnice **Darcy – Weisbach**, která vyjadřuje ztrátu mechanické energie (tlakové výšky), způsobenou třením po délce, jako násobek pohybové energie (rychlostní výšky):

$$h_{zt} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (3.13)$$

přičemž velikost odporového součinitele  $\lambda$  počítáme dle vztahu Colebrook – White. Drsnost potrubí v této rovnici udáváme pomocí hodnoty hydraulické drsnosti  $k$ , která teoreticky může začínat na nule a jít do nekonečna, přičemž čím je tato hodnota vyšší, tím je potrubí drsnější [13]. Reálně pro nová potrubí nabývá hodnot v rozmezí cca 0,01 – 3 mm v závislosti na materiálu, přičemž se může i pro týž materiál u jednotlivých výrobců lišit.

Ve Spojených státech amerických je pro výpočet tlakových ztrát daleko častější použití rovnice Hazen – Williams. V ní se drsnost potrubí udává pomocí bezrozměrného drsnostního součinitele  $c$ , který dosahuje maximálně hodnoty 150. Na rozdíl od hydraulické drsnosti  $k$  pro

drsnostní součinitel  $c$  platí, že čím je jeho hodnota nižší, tím více je potrubí drsné. Třetí variantou stanovení tlakových ztrát je výpočet dle Chézyho rovnice, kde se uplatňuje Manningův drsnostní součinitel  $n$ . Tato metoda se však nejvíce uplatňuje pro výpočet ztrát při proudění s volnou hladinou. Srovnání hodnot součinitelů drsnosti dle zmíněných autorů pro nová potrubí z nejčastěji používaných materiálů je zřejmé z tab. 3.1.

**Tab. 3.1 Součinitele drsnosti pro nová potrubí z různých materiálů [14]**

Materiál	Hazen-Williams	Manning	Colebrook-White
	$c$ [-]	$n$ [-]	$k$ [mm]
PVC, PE	150	0.008	0.01
Tvárná litina	125	0.011	0.30
Litina s výstelkou	135	0.010	-
Sklolaminát	150	0.008	0.01

### 3.3 TERÉNNÍ METODY STANOVENÍ DRSNOSTI POTRUBÍ

Drsnost potrubí lze stanovit z měření v terénu, na rovném úseku potrubí obsahujícím minimálně tři požární hydranty. Použit lze dvě metody, a to *metodu paralelních potrubí* anebo *dvou-hydrantovou metodu*. U obou metod je nejprve třeba stanovit délku a průměr potrubí. Následně je zvolené potrubí izolováno a měří se průtok a pokles tlaku za použití buď diferenciálního manometru (metoda paralelních potrubí) anebo dvou samostatných manometrů (dvou-hydrantová metoda). Drsnost potrubí se poté stanoví výpočtem z rovnice Darcy-Weisbach. Všeobecně lze říci, že metoda paralelních potrubí je vhodná pro použití na krátkých úsecích potrubí a pro určování místních ztrát, zatímco dvou-hydrantová metoda je vhodná u delších úseků a je všeobecně preferována. [4]

#### 3.3.1 Metoda paralelních potrubí

Na obr. 3.2 je schéma sestavy při použití metody paralelních potrubí. Pracovní postup této metody lze shrnout následovně [4]:

- 1) změří se délka potrubí ( $L$  v metrech) mezi dvěma po sobě následujícími hydranty na zvoleném úseku potrubí,
- 2) stanoví se průměr potrubí ( $D$  v milimetrech). Obecně se používá jmenovitá světlost potrubí, přestože se skutečný vnitřní průměr může díky nerovnostem a nánosům na stěnách potrubí lišit – tato skutečnost se zohledňuje až při kalibraci modelu. Je však třeba brát v potaz, že ačkoliv tento přístup nemá velký vliv na distribuci průtoků a tlakových ztrát napříč systémem, může mít výrazný vliv na výpočet rychlosti proudění v potrubí, což ovlivňuje výsledky analýzy jakosti vody,
- 3) zvolené po sobě následující hydranty se propojí dvojicí paralelních potrubí (obvykle požární hadice), mezi něž se umístí diferenciální manometr,
- 4) otevřou se oba hydranty a zkontroluje se, že nikde v sestavě nedochází k úniku, který by zkresloval výsledky měření,
- 5) uzavře se šoupě následující po proudu za posledním hydrantem a otevře se tryska na průtokovém hydrantu, aby se v izolované části potrubí vytvořil konstantní průtok,

- 6) stanoví se průtok z hydrantu ( $Q$  v litrech za sekundu),  
7) stanoví se rychlost proudění vody v potrubí:

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}}, \quad (3.14)$$

- 8) z poklesu tlaku ( $h_z$  v metrech) změřeného na izolované části potrubí se stanoví sklon tlakové čáry  $i$  dle vzorce:

$$i = \frac{h_z}{L}, \quad (3.15)$$

- 9) pro spočtení skutečné drsnosti potrubí je třeba nejprve určit velikost součinitele ztrát třením  $\lambda$  dle vzorce:

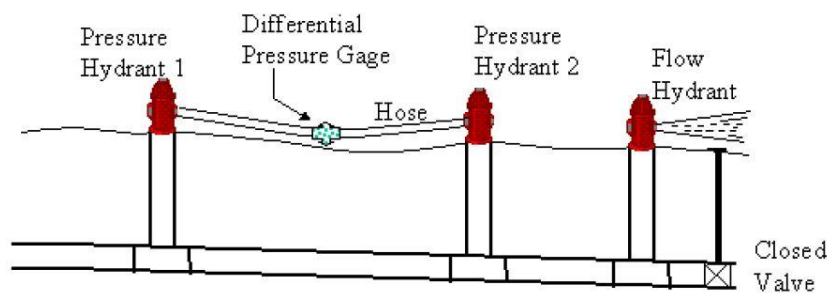
$$\lambda = \frac{g \cdot i \cdot D}{500 \cdot v^2}. \quad (3.16)$$

Následně se stanoví velikost Reynoldsova čísla  $Re$  (pro teplotu vody  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ze vzorce:

$$Re = 993 \cdot v \cdot D, \quad (3.17)$$

a drsnost potrubí se získá dosazením hodnot do rovnice Colebrook-White:

$$k = 3,7 \cdot D \cdot \left( e^{(-1,16 \cdot \sqrt{\lambda})} - \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right), \quad (3.18)$$



Obr. 3.2: Metoda paralelních potrubí [4]

### 3.3.2 Dvou-hydrantová metoda

Dvou-hydrantová metoda je v podstatě identická s metodou paralelních potrubí, jediným rozdílem je, že pokles tlaku se měří dvojicí manometrů. Tlaková ztráta se u této metody stanoví jako rozdíl tlakových výšek obou hydrantů. Abychom získali tlakové výšky, je zapotřebí k měřeným tlakům přičíst nadmořskou výšku vztažných bodů (trysek hydrantů, na kterých jsou osazena tlaková čidla). Tlaková ztráta se pak stanoví ze vzorce [4]:

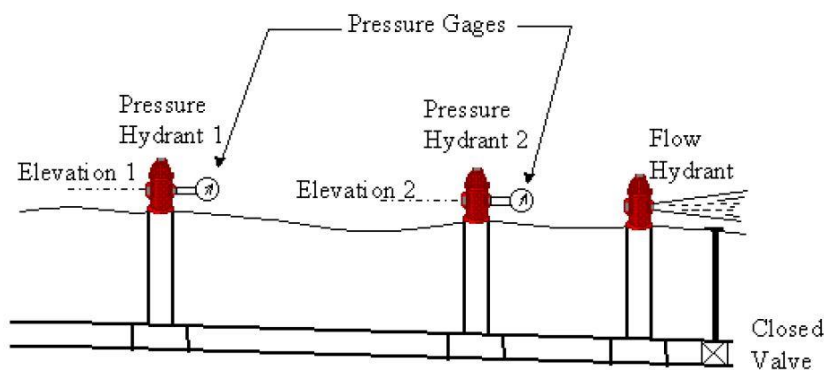
$$h_z = \frac{(p_2 - p_1)}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1), \quad (3.19)$$

kde:

$p_1, p_2$  ... měřené tlaky [Pa],

$z_1, z_2$  ... nadmořské výšky vztažných bodů [m].

Dále je již výpočet stejný, jako v případě metody paralelních potrubí. Schéma sestavy při použití dvou-hydrantové metody je vidět na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Dvou-hydrantová metoda [4]

### 3.4 KALIBRACE HYDRAULICKÉHO MODELU

Model vodovodní sítě, která obsahuje staré potrubí, vyžaduje ke stanovení drsnosti tohoto potrubí kalibraci.

Jak již bylo řečeno, drsnost starých potrubí závisí na věku, materiálu potrubí, kvalitě dopravované vody a některých dalších faktorech. Proces koroze a usazování, který se po výstavbě nového potrubí začíná postupně s časem uplatňovat, neovlivňuje pouze drsnost potrubí, ale zapříčiňuje i změnu vnitřního průměru potrubí. Jak vyplývá z některých studií, vrstva nánosu na stěnách se může zvětšovat i o 0,86 mm za rok [15]. Při tvorbě hydraulického modelu však nevíme, jak velký nános je na stěnách potrubí vytvořen, a proto potrubí přiřazujeme jeho jmenovitou světlost a velikost nánosu (zmenšení vnitřního průměru) kompenzujeme při tradičním přístupu ke kalibraci změnou drsnosti potrubí. V některých případech proto může být drsnost, stanovená pomocí optimalizačních metod na základě výsledků terénního měření, dost velká (např. 40 mm). Takové hodnoty jsou pro potrubí malých průměrů ( $D \leq 100$  mm) velmi nereálné. [15]

Správná kalibrace modelu, a tedy i znalost skutečných průměrů potrubí, je zároveň velmi důležitá při modelování jakosti vody. Jako příklad lze uvést téma, které je v současné době pro velká města Evropy velmi aktuální, a to jest řízení zabezpečení zásobování pitnou vodou – například pro stanovení rychlosti šíření kontaminace v případě úmyslného nebo i nechtěného chemického či biologického znečištění vody je správně určený průměr potrubí velmi důležitý, neboť rychlost proudění, a tedy i rychlost šíření kontaminace, je závislá na vnitřním průměru potrubí. [15]

Vzhledem k velkému počtu neznámých není možné určit přesnou hodnotu drsnosti každého potrubí, a tak hydraulický model vodovodní sítě nakalibrovat naprosto přesně. Dostačující je proto určitá přesnost shody mezi modelovanými a naměřenými hodnotami. Pro určení odchylky mezi skutečnými a simulovanými hodnotami se používá dříve vysvětlená *metoda nejmenších čtverců*.

Ve své studii porovnávali Annus a Vassiljev [15] pět kalibračních metod, založených na změně drsnosti potrubí, jeho průměru anebo obou těchto parametrů. Kritériem, pro srovnání přesnosti

těchto metod, byla velikost odchylky získaná pomocí metody nejmenších čtverců. V první fázi testovali tři varianty:

- a) **drsnost potrubí je funkcí času** – v této variantě předpokládali, že s časem se mění pouze drsnost. Zároveň je zde předpoklad, že drsnost se s věkem zvětšuje stejným tempem u potrubí různých průměrů, což může vést k nepřesným výsledkům. Závislost změny drsnosti na čase vyjádřili [15]:

$$k_i = k_{max} - (k_{max} - k_{min}) \cdot \left[ \left( \frac{age_{max} - age_i}{age_{max} - age_{min}} \right) \right]^b, \quad (3.20)$$

kde:

$k_i$  ... drsnost potrubí,

$k_{min}$  a  $k_{max}$  ... minimální a maximální drsnost potrubí, odpovídající minimálnímu a maximálnímu stáří potrubí, hledané pomocí optimalizace,

$age_{min}$  a  $age_{max}$  ... minimální a maximální stáří potrubí v systému,

$b$  ... koeficient hledaný pomocí optimalizace, v tomto případě  $b = 1$ ,

- b) **průměr potrubí je funkcí času** – zde předpokládali, že drsnost potrubí se s časem nemění – je rovna drsnosti nového potrubí, mění se pouze průměr potrubí, a to dle vzorce [15]:

$$D_i = D_i - D_i \cdot \frac{age_i - age_{min}}{age_{max} - age_{min}} \cdot coef_d, \quad (3.21)$$

kde:

$D_i$  ... průměr potrubí,

$age_{min}$  a  $age_{max}$  ... minimální a maximální stáří potrubí v systému,

$coef_d$  ... koeficient hledaný pomocí optimalizace,

- c) **drsnost i průměr potrubí jsou funkcí času** – u této metody předpokládali, že jak drsnost, tak i vnitřní průměr potrubí se nezávisle na sobě mění s časem, a to dle vzorců (3.20) a (3.21).

Ze srovnání odchylek získaných metodou nejmenší čtverců vyšla z těchto tří variant nejlépe varianta b). U metody a) je drsnost závislá pouze na stáří potrubí a průměr se nemění, což vede k velmi vysokým a nerealistickým hodnotám drsnosti. Jelikož u metody c) se mění jak drsnost, tak i vnitřní průměr potrubí, dává tato metoda nejvíce realistické výsledky. [15]

Kromě již zmíněných variant dále testovali další dvě metody:

- d) **drsnost potrubí je funkcí času a průměru potrubí** – u této varianty je drsnost potrubí závislá nejen na stáří potrubí, ale také na jeho vnitřním průměru, přičemž průměr potrubí se s věkem nemění. Hodnota drsnosti byla nejprve stanovena dle rovnice (3.20) a následně byla její výsledná hodnota přiblížena dle rovnice: [15]

$$k_i = k_i \cdot D_i \cdot coef_d, \quad (3.22)$$

kde:

$k_i$  ... drsnost potrubí,

$D_i$  ... průměr potrubí,

$\text{coef}_d$  ... koeficient hledaný pomocí optimalizace.

U této varianty byla suma čtverců výrazně menší v porovnání s předcházejícími variantami. [15]

- e) ***drsnost potrubí je funkcí času a průměrů potrubí*** – tato varianta vychází z varianty d), s tím rozdílem, že vnitřní průměr potrubí se mění. Drsnost potrubí se stanoví stejně, jako u předchozí varianty, nakonec se však navíc průměr potrubí zmenší o  $2k_i$ . [15]

Tato varianta dává oproti všem ostatním nejmenší sumu čtverců, avšak stejně jako v předchozím případě se u ní drsnost potrubí s časem nemění [15].

Na závěr je třeba zmínit, že autoři v první fázi při aplikaci výše popsanych metod nerozlišovali potrubí dle materiálu. Při další analýze bylo potrubí rozděleno do dvou skupin – kovové a plastové. U kovových potrubí při aplikaci všech variant drsnost narostla a průměr potrubí se lehce zmenšil. Výsledky u plastových potrubí byly lehce sporné – při aplikaci variant a) – c) došlo k velmi výraznému zvětšení drsnosti potrubí, při aplikaci variant d) a e) pak došlo k velmi výraznému zmenšení vnitřního průměru potrubí. Autoři zmiňují, že výsledky jsou velmi závislé na naměřených datech – pro nalezení čtyř parametrů (drsnost a změna průměru u potrubí dvou různých materiálů) byl počet měřených míst na síti v jejich studii příliš malý a pro zjišťování změny průměru potrubí je třeba zvýšit počet míst měření. Tato studie však potvrzuje, že hodnoty drsnosti potrubí jsou mnohem menší a realističtější, pokud se zároveň zmenšuje vnitřní průměr potrubí. Při kalibraci by tedy měl být proces stárnutí potrubí popsán nejen změnou drsnosti potrubí, ale i změnou jeho vnitřního průměru. [15]

Velký vliv na výsledky kalibrace má také dynamika odběrů, tzn. časové a prostorové rozložení průtoků v síti, avšak cílem této práce není zabývat se touto problematikou.

### 3.4.1 Praktický přístup ke kalibraci

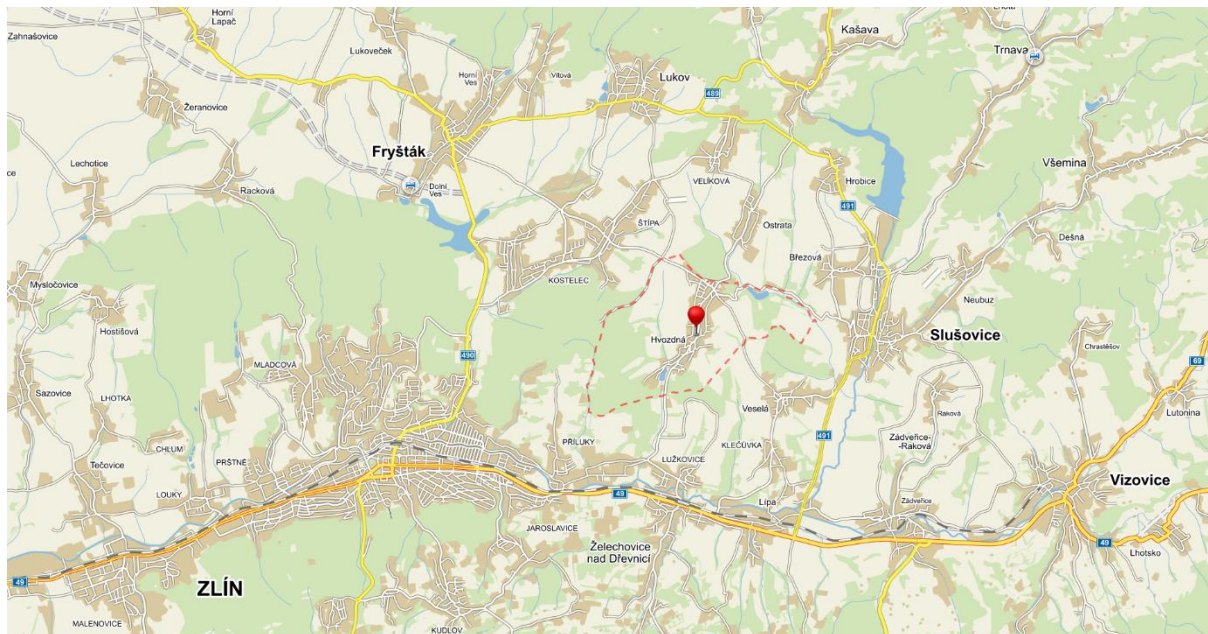
V současnosti používaný kalibrační přístup je pro přesnější úlohy, jako je například lokalizace úniků vody, příliš zevrubný. Předpokládá, že stav uzávěrů (otevřeno/uzavřeno) zanesený v geografických informačních systémech provozovatele, na jejichž základě je hydraulický model vystavěn, odpovídá skutečnému nastavení sítě, i když tato domněnka nemusí být pravdivá. Za účelem rozšíření sítě a zlepšení kvality dodávky vody docházelo v průběhu let k dostavbám, rekonstrukcím a změnám v zapojení potrubí, přičemž některý z uzávěrů mohl být náhodně ponechán uzavřen, aniž by došlo k odhalení tohoto problému. Dalším z předpokladů je, že odběry a úniky vody jsou v síti rozděleny rovnoměrně, což ne vždy odpovídá skutečnosti. Tento tradiční přístup, kdy pro kalibraci modelu je jako zatěžovací stav používán maximální hodinový odběr v pracovním dni, by mohl v budoucnu být nahrazen přístupem sofistikovanějším. Sophocleous a kol. navrhuje pro kalibraci modelu využít dvoufázového nočního testu požárních odběrů (hydrantového testu). Při něm jsou odběry vody domácnostmi a občanskou vybaveností nízké, takže se minimalizuje vliv nerovnoměrností, a zároveň

obsahuje odběr známé velikosti na přesně daném místě. Pokud test započne o půlnoci, měla by data, získaná před začátkem dalšího pracovního dne, být pro kalibraci dostatečná. Data z prvního měření by měla být použita pro prvotní kalibraci za účelem odhalení neznámých uzavřených/otevřených uzávěrů, a v případě nalezení takového uzávěru by týž den mělo dojít k ověření jeho pracovní pozice přímo na síti, a k případné korekci. Tento zásah by ovlivnil data z následného druhého měření, která by pak byla použita pro finální kalibraci modelu. [16]

## 4 STANOVENÍ HYDRAULICKÉ DRSNOSTI PŘIVÁDĚCÍHO ŘADU VODOVODU OBCE HVOZDNÁ

### 4.1 ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

Zájmovým územím je obec Hvozdná, nacházející se ve Zlínském kraji, v okrese Zlín, vzdálená od města Zlín přibližně 7 km. Ke dni 1. 1. 2017 bylo v obci evidováno 1285 obyvatel.



Obr. 4.1 Situace širších vztahů – obec Hvozdná, Zlínský kraj

Intravilán obce je rozprostřen od severu k jihu. Z hlediska morfologie lze obec rozdělit zhruba na třetiny – nejsevernější část obce leží v relativně rovinatém území na vrcholu kopce, střední část se nachází na území svažujícím se od severu k jihu a nejnižší část obce pak leží v mírném svahu na úpatí kopce.

Recipientem povrchových vod je vodní tok Hvozdenský potok, protékající z velké části extravilánem západně od obce. Intravilánem obce protéká pouze v její jižní části. Celý katastr obce se nachází v povodí řeky Dřevnice. Na severním okraji katastru obce je malá vodní nádrž Ostrata přehrazující tok Ostratky. V jižní části obce se pak nachází několik vodních ploch, mezi nimi také rybník Argaláška, přes který protékají veškeré dešťové vody z obce, a je aktivně používán k rekreaci a k rybolovu. V této části obce jsou také další tři soukromé rybníky.

Obcí prochází místní komunikace a také dvě silnice III. třídy, a to III/4913 (S-J orientace) a III/4915 (Z-V orientace). Tyto komunikace se kříží v severní části obce. Obec Hvozdná není napojena na železniční síť.

### 4.2 CHARAKTERISTIKA SPOTŘEBIŠTĚ

Charakter zástavby zájmového území je typicky venkovský. Většina nemovitostí připojených na veřejný vodovod jsou rodinné domy, které jsou nejvýše dvoupodlažní. V obci jsou čtyři bytové domy (každý dům čtyři byty), rovněž dvoupodlažní. Odběratelé vody charakteru

občanské vybavenosti jsou mateřská škola (kapacita cca 56 dětí), základní škola (kapacita cca 100 dětí), budova obecního úřadu, hasičská zbrojnice a sokolovna, dále provozovny KOVO s.r.o., Pohostinství U Janů, Pohostinství Osmek, RM GAS s.r.o., ELKO, TJ Sokol Hvozdná, Zámečník Zdeněk a Lebánek Ladislav. Výše uvedení odběratelé jsou drobné provozovny, či výrobní podniky. Ani jeden z nich netvoří významný podíl na celkové spotřebě vody v obci Hvozdná. Největší podíl na spotřebě vody tvoří spotřeba domácností.

### 4.3 VODOVODNÍ SÍŤ OBCE HVOZDNÁ

Vodovodní síť obce Hvozdná je rozdělena do tří tlakových pásem a byla vybudována ve dvou hlavních obdobích: v roce 1972 - tlakové pásmo T1, a v roce 2008 – tlaková pásma G1 a G2. Průměrné stáří sítě je tedy v době zpracování této práce 46 let u pásma T1 a 10 let u pásma G1 a G2. Převládající materiál potrubí je PE HD SDR 17 o vnějších průměrech potrubí 40, 63, 90, 110 a 125 mm. Vodovodní síť je dále systematicky rozšiřována s ohledem na Územní plán obce a Plán rozvoje VaK. Vlastníkem i provozovatelem tohoto vodovodu je Obec Hvozdná.



Obr. 4.2 Přehledné schéma topologie vodovodní sítě obce Hvozdná

Vodovod obce Hvozdná je napojen na skupinový vodovod Zlín, jehož provozovatelem je MORAVSKÁ VODÁRENSKÁ, a.s. (dále jen MOVO). Hlavním zdrojem vody tohoto skupinového vodovodu je vodní nádrž Slušovice (ÚV Klečůvka) a jímací území v Tlumačovském lese (ÚV Tlumačov), přičemž Hvozdná je pitnou vodou převážně zásobena z vodní nádrže Slušovice.

Napájecím uzlem pro vodovod obce Hvozdná je vodojem Hvozdná o zásobním objemu  $2 \times 250 \text{ m}^3$ . Do tohoto vodojemu je voda čerpána z čerpací stanice Štípa. Hladina ve vodojemu je udržována na úrovni horní provozní hladiny, tedy na kótě 347,10 m n. m.

Z VDJ Hvozdná je voda dopravována do obce Hvozdná přiváděcím řadem PE100 90x5,4 mm SDR17 (vodojem a přiváděcí řad provozuje MOVO). Toto potrubí má délku 1164 m a končí v objektu automatické tlakové stanice Hvozdná (ATS). Vystrojení ATS obsahuje také fakturační vodoměr pro celou obec Hvozdná, který je zároveň předávacím místem mezi MOVO a obcí Hvozdná. Za tímto vodoměrem se potrubí rozděluje na větev pro ATS (tlakové pásmo T1) a větev pro gravitační zásobování části obce (dvě gravitační tlakové pásma G1 a G2). ATS je tvořena dvěma čerpadly GRUNDFOS CRE 5-16 vybavenými frekvenčními měniči a nastaveným výstupním tlakem 0,46 MPa. Vnitřní dispozice objektu ATS a její vystrojení je patrné z obr. 4.3.



**Obr. 4.3 Objekt ATS Hvozdná pro tlakové pásmo T1**

Tlaková pásma G1 a G2 jsou zásobována gravitačně. Tlakové poměry ve vyšším tlakovém pásmu G1 jsou řízeny polohou hladiny ve VDJ Hvozdná. Vzhledem ke značným výškovým rozdílům terénu ve spotřebišti je zřízeno nižší gravitační tlakové pásmo G2, ve kterém je tlak regulován regulačním ventilem CLA-VAL DN 50 s nastaveným konstantním výstupním tlakem. Vnitřní dispozice a vystrojení šachty je patrné z obr. 4.4.



**Obr. 4.4** Armaturní šachta s regulačním ventilem CLA VAL DN 50

Celková délka vodovodní sítě provozována a vlastněna obcí Hvozdná (bez přivaděče z VDJ do ATS) je 11 176 m. Celková délka včetně přivaděče je 12 340 m. Délky jednotlivých dimenzí potrubí vodovodu (bez přípojek a vnitřních vodovodů) jsou uvedeny v následující tab. 4.1:

**Tab. 4.1:** Délka potrubí dle dimenzí

PEHD SDR 17	PE 125	PE 110	PE 90	PE 63	PE 40	Σ
L [m]	354	830	5817	5218	121	<b>12 340</b>

Na vodovodní síti jsou osazeny podzemní i nadzemní hydranty a sekční uzávěry pro případné uzavření jednotlivých řadů. Některé řady však není možné samostatně uzavřít. V severovýchodní části obce u jedné z bytových jednotek je osazena vodoměrná šachta s příslušnými uzavíracími armaturami, zpětnými klapkami, vodoměry a potrubím pro havarijní propojení veřejného vodovodu Hvozdná a vodovodu ZOD DELTA Štípa.

## 4.4 MĚRNÁ KAMPAŇ

Za účelem získání dat pro kalibraci modelu byla v období od 10. do 22. července 2015 provedena měrná kampaň, kdy probíhalo měření průtoků ve VDJ Hvozdná a současně měření tlaků tlakovými čidly na 6 vybraných místech vodovodní sítě. Dne 17. 7. 2015 probíhaly na vybraných hydrantech hydrantové testy, jejichž cílem bylo změření hydraulické kapacity hydrantu a vodovodní sítě. Měrná kampaň byla uskutečněna na celé vodovodní síti obce Hvozdná, pro účely této bakalářské práce bylo použito pouze měření na přivaděčím řadu.

### 4.4.1 Měření průtoků

Průtok byl zaznamenáván ve VDJ Hvozdná, který je jediným napájecím uzlem celého vodovodu, a to v období od 10. 7. 2015 11:30 do 22. 7. 2015 10:07. Na odtoku z vodojemu do spotřebiště bylo do stávajícího mechanického vodoměru MEINECKE – PREMA DN80 osazeno mechanické čidlo REED. Puls s hodnotou 100 litrů byl automaticky zaznamenáván do připojeného dataloggeru COSMOS CDL-2U.



Obr. 4.5 Měření průtoku ve VDJ Hvozdná – čidlo REED a připojený datalogger

#### 4.4.2 Měření tlaků

Souběžně s měřením průtoků probíhalo také měření tlaků. K měření byla použita tlaková čidla Sebalog Dx, která jsou vybavena automatickým záznamovým zařízením a zaznamenávaly hodnotu tlaku každých 15 sekund. Měřicí rozsah těchto čidel je 0-16 bar, čidla nejsou určena k měření podtlaku. Případný podtlak je zaznamenán jako nulový (= atmosférický) tlak.



Obr. 4.6 Měření tlaků v ATS Hvozdná – na konci příváděcího řadu z VDJ Hvozdná (A) a na výtlaku za čerpadly do tlakového pásma T1 (B)

### 4.4.3 Zpracování měrné kampaně

Hodnoty tlaků a průtoků, získané měřením na síti, byly následně statisticky vyhodnoceny.

Tlak, který byl naměřen tlakovými čidly, je udáván v barech. Hodnoty tlaku, který byl stanoven výpočtem při kalibraci modelu, jsou udávány v jednotkách metry vodního sloupce (m v. sl.). Pro převod mezi těmito jednotkami se používá následující vztah:

$\text{Tlak(Pa)} = \text{hustota vody } 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} * \text{tíhové zrychlení } 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} * \text{výška vodního sloupce (m)}$

Například tedy: **1 bar = 0,1 MPa = 10,19 m v. sl.**

## 4.5 PŘÍPRAVA DAT PRO KALIBRACI

### 4.5.1 Analýza spotřeby vody

Data získaná v rámci měrné kampaně byla zpracována a statisticky vyhodnocena. Použity byly pouze průtoky za celé měřené dny (celkem 10 dní) a byl vynechán pátek 17. 7. 2015, kdy na síti byly prováděny dynamické hydrantové testy. Výsledkem této analýzy je sada tří křivek průtoků, charakterizujících spotřebu vody ve spotřebišti, a to v pracovní dny, ve dny pracovního klidu, a nakonec společně ve všechny dny bez rozlišení. Vyhodnoceny byly také základní ukazatele nerovnoměrnosti odběru vody.

Hodinové průtoky byly vypočteny ze surových dat, vyexportovaných v časovém kroku 15 sekund, průměrováním těchto hodnot.

Průměrný průtok  $Q_p$  byl stanoven jako průměr hodinových průtoků, jelikož se ale v případě průměrného průtoku ve všechny dny bez rozlišení jedná o průměr množství celkově proteklého za celou dobu měrné kampaně, bylo by jej možné stanovit i přímo ze surových dat.

Z hodinových průtoků byly také stanoveny průměrné denní průtoky. Maximální denní průtok  $Q_d$  se pak rovná největšímu z nich.

Maximální hodinový průtok  $Q_h$  je stanoven jakožto největší hodnota z hodinových průtoků, obdobně minimální hodinový průtok  $Q_{min}$  se rovná nejmenší hodnotě v souboru získaných hodinových průtoků.

Ze statisticky zpracovaných dat je dále také možné stanovit koeficienty denní nerovnoměrnosti  $k_d$  a hodinové nerovnoměrnosti  $k_h$ , a to následovně [1]:

$$k_h = \frac{Q_h}{Q_d}, \quad (4.1)$$

$$k_d = \frac{Q_d}{Q_p}, \quad (4.2)$$

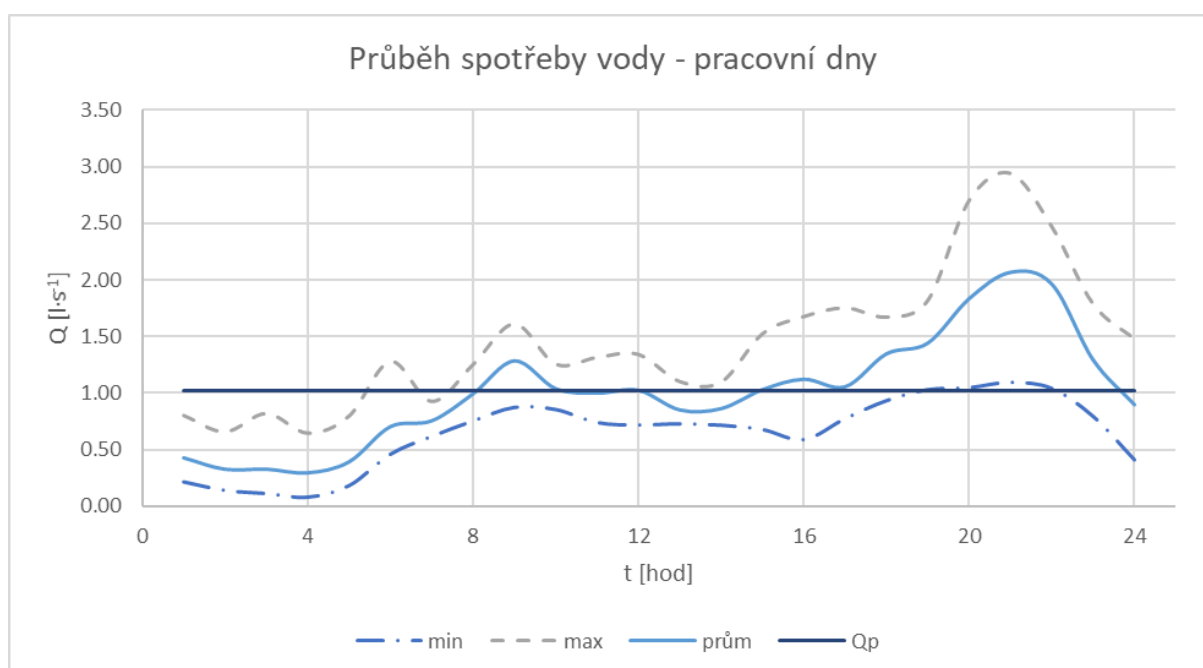
Stanovené koeficienty však nelze považovat za hodnoty charakterizující dlouhodobé nerovnoměrnosti v odběru vody, neboť měření na síti bylo uskutečněno ve velmi krátkém časovém období. Stanovené koeficienty jsou proto vypovídající pro letní období s vysokými teplotami vzduchu, což jsou podmínky, při kterých se konala měrná kampaň. Pro stanovení

koeficientů  $k_h$  a  $k_d$  by bylo vhodné provést měření v delším časovém úseku – řádově v délce měsíců, ideálně jednoho roku.

Podrobné výsledky analýzy jsou patrné z následujících grafů a tabulek.

**Tab. 4.2: Spotřeba vody v obci Hvozdná v pracovní dny**

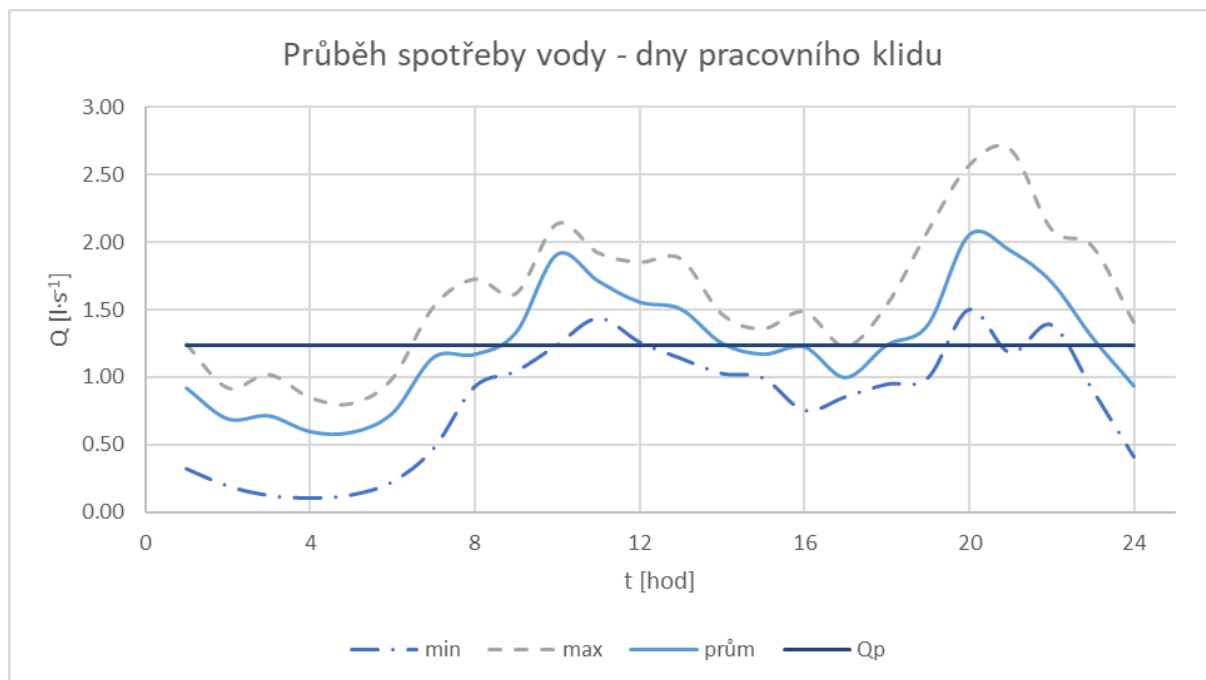
HVOZDNÁ		měření ve VDJ		
Pracovní dny				
$Q_p=$	$1.02 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	Koeficienty:		
$Q_d=$	$1.24 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} = 107.1 \text{ m}^3$			$k_h= 2.4$
$Q_h=$	$2.94 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$			$k_d= 1.2$
$Q_{\min}=$	$0.08 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$			



**Obr. 4.7: Průběh spotřeby vody v obci Hvozdná v pracovní dny**

**Tab. 4.3: Spotřeba vody v obci Hvozdná ve dny pracovního klidu**

HVOZDNÁ		měření ve VDJ		
Dny pracovního klidu				
$Q_p=$	$1.24 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	Koeficienty:		
$Q_d=$	$1.46 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} = 126.3 \text{ m}^3$			$k_h= 1.8$
$Q_h=$	$2.69 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$			$k_d= 1.2$
$Q_{\min}=$	$0.11 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$			

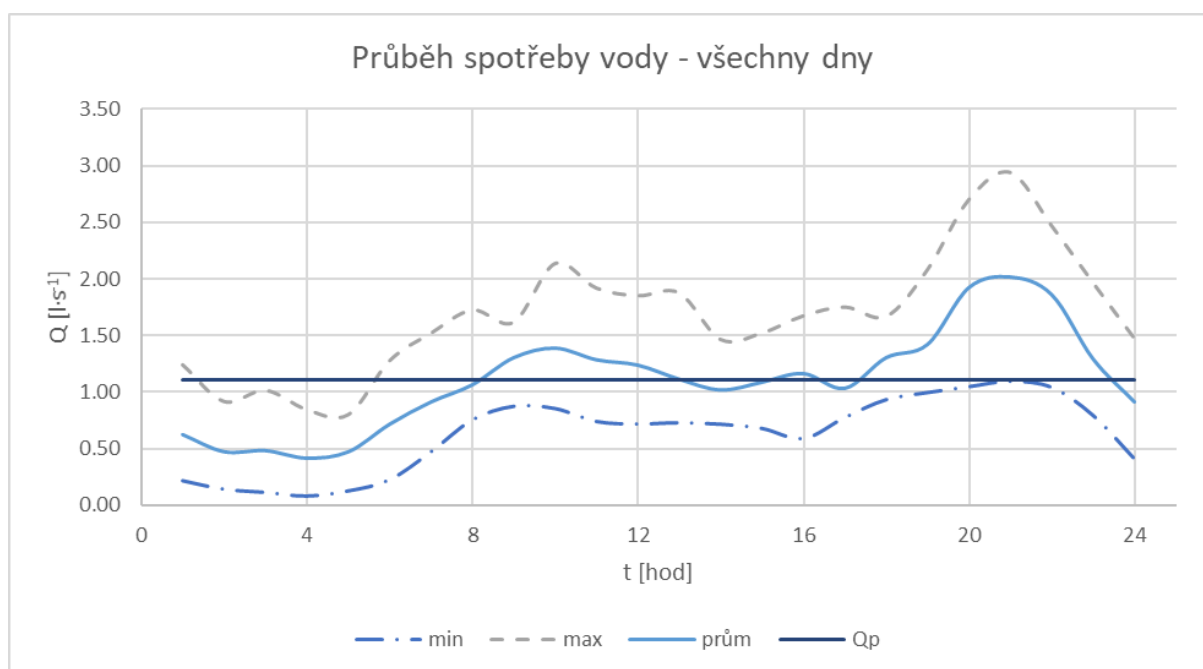


Obr. 4.8: Průběh spotřeby vody v obci Hvozdná ve dny pracovního klidu

Tab. 4.4: Spotřeba vody v obci Hvozdná bez rozlišení, zdali se jedná o pracovní či volné dny

HVOZDNÁ	měření ve VDJ	
Všechny dny		
$Q_p =$	$1.11 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	Koeficienty: $k_h = 2.0$ $k_d = 1.3$
$Q_d =$	$1.46 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} = 126.3 \text{ m}^3$	
$Q_h =$	$2.94 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	
$Q_{\min} =$	$0.08 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	

Zde je třeba zmínit, že hodnota maximálního hodinového průtoku je omezena nedostatečnou hydraulickou kapacitou příváděcího řadu z VDJ Hvozdná do ATS Hvozdná.



**Obr. 4.9: Průběh spotřeby vody v obci Hvozdná bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů**

Výše uvedené grafy potvrzují venkovský charakter spotřebiště bez velkoodběratelů průmyslového charakteru. Většinovým odběratelem vody je zde obyvatelstvo, což se promítá do grafů, které kopírují chování obyvatelstva a ve kterých jsou dobře patrné dvě denní špičky. První z nich nastává v dopoledních hodinách, konkrétně kolem jedenácté, druhá pak večer kolem jednadvacáté hodiny.

#### 4.5.2 Vyhodnocení měření tlaku a příprava dat pro kalibraci

Data z měření tlaku byla vyexportována stejně jako data z měření průtoku v časovém kroku 15 sekund. Cílem vyhodnocení měření tlaku bylo přiřadit naměřené hodnoty odpovídajícím hodnotám průtoku ve stanovených intervalech, a vytvořit tak uspořádané n-tice pro další výpočet.

##### Stanovení intervalů průtoku pro kalibraci

Intervaly pro kalibraci byly zvoleny na základě analýzy spotřeby vody. Jako počáteční byl vybrán interval  $0,00 - 0,10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jelikož nejmenší hodinový průtok dosahuje hodnoty  $0,08 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , byl v tomto intervalu stanoven nejvyšší tlak, jaký se v příváděcím řadu vyskytuje. Jedná se o tlak blížíící se tlaku hydrostatickému.

Jako následující byl zvolen interval  $0,11 - 0,50 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  a všechny další intervaly narůstají o hodnotu  $0,50 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Při zvyšujícím se průtoku dochází v příváděcím řadu z VDJ Hvozdná do ATS Hvozdná k postupnému poklesu tlaků na konci potrubí před čerpadly. Při průtoku nad  $2,50 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  již dochází k úplné ztrátě přetlaku. Tlaková čidla, která byla použita pro měrnou kampaň, nedokáží změřit tlak nižší, než atmosférický a je tedy možné, že v potrubí vzniká i podtlak a v měření se projevuje jako tlak nulový (atmosférický). Jelikož velikost podtlaku nebylo z podkladů

poskytnutých pro tuto bakalářskou práci možno určit, byl jako maximální průtok při kalibraci uvažován průtok  $2,50 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , ačkoliv je maximální hodinový průtok  $Q_h$  roven hodnotě  $2,94 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### Prvotní určení modelovaných hodnot tlaku

Pro všechny intervaly průtoku byly stanoveny střední hodnoty, pro něž byla následně vypočtena rychlost proudění. Dále byly určeny hodnoty Reynoldsova čísla (dle 3.2).

Z rovnice Colebrook – White (3.6) byly stanoveny hodnoty ztrátového součinitele  $\lambda$ . Pro první iteraci byla jeho hodnota stanovena na základě předešlých zkušeností jako  $\lambda = 0,013$  a v dalších krocích byla zpřesněna. Za dostačující byl považován výsledek, kdy odchylka mezi hodnotami stanovenými ve dvou po sobě jdoucích iteracích byla menší než jedna setina ve všech řešených intervalech.

Do rovnice Colebrook – White je třeba zadat i hodnotu drsnosti potrubí přívaděcího řadu, jejíž stanovení bylo samotným cílem této bakalářské práce. Jako výchozí hodnota tohoto parametru proto byla použita hodnota  $k = 0,01 \text{ mm}$ , což je drsnost udávaná pro nová plastová potrubí [11].

Velikost tlakových ztrát byla určena z rovnice Darcy – Weisbach (3.13). Tlak v potrubí byl následně vypočten jako rozdíl nadmořské výšky hladiny ve vodojemu Hvozdná, která je pomocí plovákového ventilu neustále udržována na úrovni horní provozní hladiny (tedy  $347,10 \text{ m n. m.}$ ), a nadmořské výšky, ve které bylo osazeno tlakové čidlo (tedy  $341,00 \text{ m n. m.}$ ), dále zmenšené o vypočtené tlakové ztráty.

### Přiřazení měřených hodnot tlaku a průtoku

V souboru naměřených průtoků byly vyhledány časové úseky, ve kterých byl průtok po dobu několika minut přibližně konstantní. Vybrána byla taková období, kdy průtok se pohyboval při dolní hranici, při horní hranici a také ve středu výpočtových intervalů, a to proto, aby zvolený vzorek dat byl reprezentativní pro celý výpočtový interval. Ze stejného důvodu bylo v každém výpočtovém intervalu zvoleno celkem 5 různých časových úseků.

Ke zvoleným časovým obdobím byly v souboru naměřených tlaků vyhledány odpovídající hodnoty a pro každý časový úsek byl vypočten jejich aritmetický průměr.

Pro jednotlivé intervaly průtoku tak byly sestaveny n-tice, tvořené jednou hodnotou tlaku vypočtenou, a pěti hodnotami měřeními.

Q (interval)		$p^{\text{mod}}$	$p_1^{\text{měř}}$		$p_2^{\text{měř}}$		$p_3^{\text{měř}}$		$p_4^{\text{měř}}$		$p_5^{\text{měř}}$	
MIN	MAX		[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]
[l·s <sup>-1</sup> ]		[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]
1.01	1.50	4.55	0.453	4.62	0.448	4.56	0.413	4.21	0.442	4.50	0.441	4.49

Obr. 4.10: Ukázka vytvořené n-tice hodnot

### 4.5.3 Metoda nejmenších čtverců – stanovení vah

Jak je známo, tlakové ztráty jsou přímo úměrné rychlosti proudění v potrubí [11]:

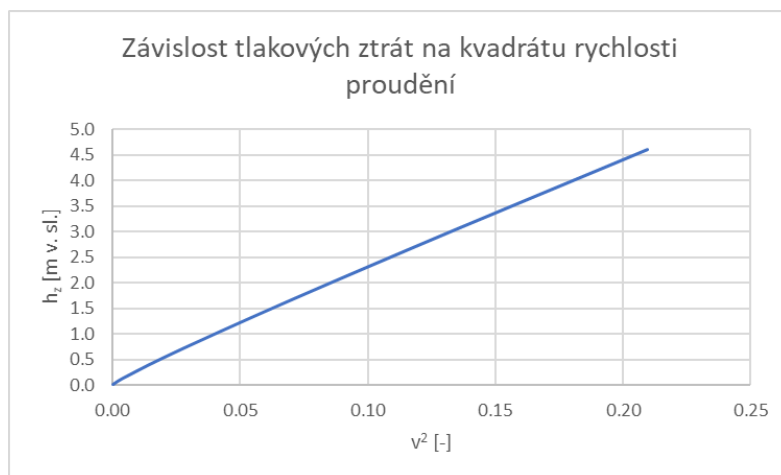
$$h_z = a \cdot v^m \quad (4.3)$$

Při laminárním proudění rostou ztráty za plynulého zvyšování rychlosti podle přímky o směrnici  $m = 1$ , při proudění turbulentním podle přímky o směrnici  $m = 1,75$  až  $2,0$  přičemž nejčastěji nabývá právě hodnoty  $m = 2$  [11].

Proudění v potrubí přívaděcího řadu je zpravidla realizováno v turbulentním režimu a ztráty jsou tedy úměrné kvadrátu rychlosti.



Obr. 4.11: Grafické znázornění závislosti tlakových ztrát na rychlosti proudění



Obr. 4.12: Grafické znázornění závislosti tlakových ztrát na kvadrátu rychlosti proudění

Tato skutečnost byla při aplikaci metody nejmenších čtverců zohledněna při zavedení vah. Váha náležející danému intervalu průtoku při výpočtu odchylky metodou nejmenších čtverců byla stanovena jako kvadrát střední rychlosti intervalu ku součtu kvadrátů středních rychlostí ve všech intervalech:

$$w_i = \frac{v_i^2}{\sum v_i^2}, \quad (4.4)$$

Zavedením těchto vah byla přiřazena vyšší důležitost ztrátám realizovaným při vyšších rychlostech proudění. Závislost tlakových ztrát vypočtených při kalibraci na rychlosti proudění je patrná z obr. 4.11, a jejich závislost na kvadrátu této rychlosti je pak patrná z obr. 4.12. Velikost vypočtených vah je pak patrná z tab. 4.5.

**Tab. 4.5: Stanovení vah**

Q (interval)		Střední hodnota průtoku $Q_{stř}$	Rychlost proudění $v$	Kvadrát rychlosti $v^2$	Reynoldsovo číslo $Re$	Typ proudění	Váha $w_i$
MIN	MAX						
[l·s <sup>-1</sup> ]		[l·s <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.00	0.10	0.05	0.01	0.0001	615	lamin.	0.0002
0.11	0.50	0.31	0.06	0.0038	3752	přechod.	0.0089
0.51	1.00	0.76	0.15	0.0235	9287	přechod.	0.0548
1.01	1.50	1.26	0.25	0.0649	15437	turb.	0.1514
1.51	2.00	1.76	0.36	0.1269	21587	turb.	0.2960
2.01	2.50	2.26	0.46	0.2095	27737	turb.	0.4887
$\Sigma =$							1.0000

Skutečnost, že v laminárním režimu proudění je závislost tlakových ztrát na rychlosti lineární, nikoliv kvadratická, byla při stanovení vah a následné kalibraci zanedbána, neboť jak je patrné z tab. 4.5 míra vlivu prvního intervalu, ve kterém se proudění odehrává v laminárním režimu, na výsledky kalibrace je minimální.

Stejného výsledku kalibrace by bylo dosaženo i v případě, kdy by jako váha byl použit samotný kvadrát rychlosti proudění. Upřednostněna však byla popsána metoda, neboť z vypočtené váhy je přímo zřejmá velikost podílu tlakových ztrát v daném intervalu na celkových ztrátách.

## 4.6 KALIBRACE HYDRAULICKÉ DRSNOSTI POTRUBÍ

Z připravených dat byly s použitím metody nejmenších čtverců pro jednotlivé intervaly stanoveny odchylky mezi vypočteným tlakem a hodnotami měřenými. Výsledná odchylka modelovaných a měřených hodnot pak byla spočtena jako suma odchylek dílčích.

Pro kalibraci modelu připraveného v programu Microsoft Excel, a tedy pro stanovení hodnoty hydraulické drsnosti, byl použit nástroj Řešitel.

Modul Řešitel je určen pro řešení lineárních i nelineárních úloh matematického modelování. S jeho pomocí lze najít maximální, minimální nebo konkrétní zvolenou hodnotu v cílové buňce s ohledem na omezující podmínky (limity) zadané jinými buňkami. Řešitel pracuje s buňkou nebo se skupinou *proměnných* buněk, vstupujících do výpočtu dle vzorce v cílové buňce. Upravuje hodnoty v těchto buňkách tak, aby byly splněny limity a aby došel k výsledku, který je v cílové buňce požadován. [17]

Modul Řešitel umožňuje hledání řešení pomocí různých metod. Pro stanovení hydraulické drsnosti potrubí byly vybrány dvě z nich, a to *evoluční algoritmus* a *gradientní metoda*. Cílem bylo tedy nejen stanovit drsnost potrubí ale také porovnat, která z použitých metod dosáhne lepších výsledků.

*Gradientní metoda* neboli metoda největšího spádu, je metoda, která při hledání řešení postupuje z bodu do bodu za pomoci gradientu – tedy jak už samotný název vypovídá největšího spádu. Ten se počítá buď analyticky (derivací cílové funkce) nebo numericky. Při startu řešení je vždy třeba zadat počáteční hodnotu, ze které se má prohledávání zahájit. Nevýhodou je, že tato metoda umožňuje pouze lokální optimalizaci – pokud má funkce lokální extrémy, gradientní metoda se v nich při průchodu zastaví a dál již nepokračuje. Proto musí mít optimalizovaná funkce pouze jeden extrém. [18]

*Evoluční algoritmus* používá k nalezení řešení daného problému techniky napodobující evoluční procesy – dědičnost, mutace, přirozený výběr a reprodukce. Každé možné řešení představuje jedince v populaci, tedy v množině řešení. Jak se populace vyvíjí, vymírají špatná řešení a nahrazují je lepší. Principem je tedy postupná tvorba lepších generací řešení, skládající se ze tří procesů: křížení, mutace a selekce. Pod pojmem křížení si můžeme představit tvorbu nového řešení průměrováním dvou již existujících, mutace je náhodná změna existujícího řešení a selekce znamená výběr vhodného řešení ke křížení. Evoluční algoritmy se díky svojí všestrannosti používají k řešení celé řady optimalizačních, klasifikačních a rozhodovacích problémů. [19]

Obr. 4.13: Ukázka nastavení parametrů modulu Řešitel

Na obrázku 4.13 je uveden příklad nastavení parametrů modulu Řešitel. Jak je z tohoto obrázku patrné, cílem kalibrace bylo minimalizovat účelovou funkci, tedy nalézt takovou hodnotu

drsnosti potrubí, při níž suma odchylek mezi měřenými a vypočtenými tlaky v jednotlivých výpočtových intervalech, bude co nejmenší, v ideálním případě nulová.

Z obrázku 4.13 je zároveň patrné nastavení omezujících podmínek řešení. První z nich je, že drsnost potrubí nemůže dosahovat záporných hodnot. Vzhledem k malému vnitřnímu průměru řešeného potrubí bylo v druhé podmínce stanoveno, že drsnost potrubí nesmí překročit hodnotu 5 mm. Kdyby při takto definované podmínce nedošel Řešitel k uspokojivému řešení, byla by nejprve vnitřní dimenze potrubí zmenšena o tloušťku nánosu, která by odpovídala definovaným 5 mm, a poté by se kalibrace drsnosti potrubí opakovala. Příklad kalibrace je patrný na obr. 4.14.

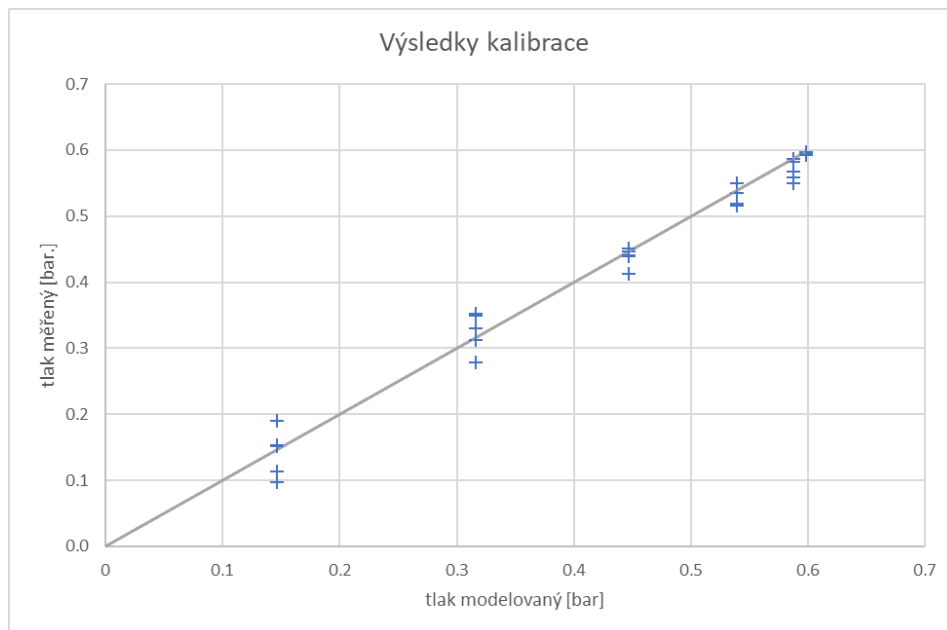
Q (interval)		p <sup>mod</sup>	p <sub>1</sub> <sup>měř</sup>		p <sub>2</sub> <sup>měř</sup>		p <sub>3</sub> <sup>měř</sup>		p <sub>4</sub> <sup>měř</sup>		p <sub>5</sub> <sup>měř</sup>		MNČ	w <sub>i</sub>	
MIN	MAX		[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]	[m v. sl.]	[bar]			[m v. sl.]
0.00	0.10	6.09	0.596	6.07	0.593	6.05	0.598	6.10	0.597	6.08	0.595	6.06	0.004	0.000	
0.11	0.50	5.98	0.561	5.71	0.569	5.80	0.583	5.94	0.589	6.00	0.551	5.61	0.236	0.009	
0.51	1.00	5.48	0.551	5.62	0.520	5.30	0.517	5.26	0.519	5.29	0.536	5.46	0.138	0.055	
1.01	1.50	4.55	0.453	4.62	0.448	4.56	0.413	4.21	0.442	4.50	0.441	4.49	0.120	0.151	
1.51	2.00	3.21	0.331	3.38	0.351	3.57	0.353	3.60	0.314	3.20	0.281	2.86	0.435	0.296	
2.01	2.50	1.48	0.192	1.96	0.155	1.58	0.153	1.56	0.098	1.00	0.114	1.16	0.570	0.489	
													Σ=	0.44	1.000

Obr. 4.14: Ukázka z kalibrace modelu

## 4.7 VÝSLEDKY KALIBRACE A DISKUZE

Jak již bylo zmíněno, ke kalibraci byly použity dvě různé metody – gradientní metoda a evoluční algoritmus. Jedním z cílů bylo posoudit, která z těchto metod je pro kalibraci vhodnější. Je nutno říci, že obě použité metody dospěly k totožnému výsledku. Lišily se však v počtu kroků nutných k nalezení správného výsledku, a tedy v trvání výpočtu. Zatímco při použití gradientní metody dospěl Řešitel ke správnému výsledku v několika krocích, s využitím evolučního algoritmu prošel při výpočtu několik desítek tisíc kroků, než našel optimální řešení. Nelze ovšem říci, že by gradientní metoda byla při kalibraci všeobecně výhodnější. Její použití bylo výhodné při řešení tohoto konkrétního a poměrně jednoduchého úkolu, ve kterém byla stanovována drsnost pouze pro jediný materiál.

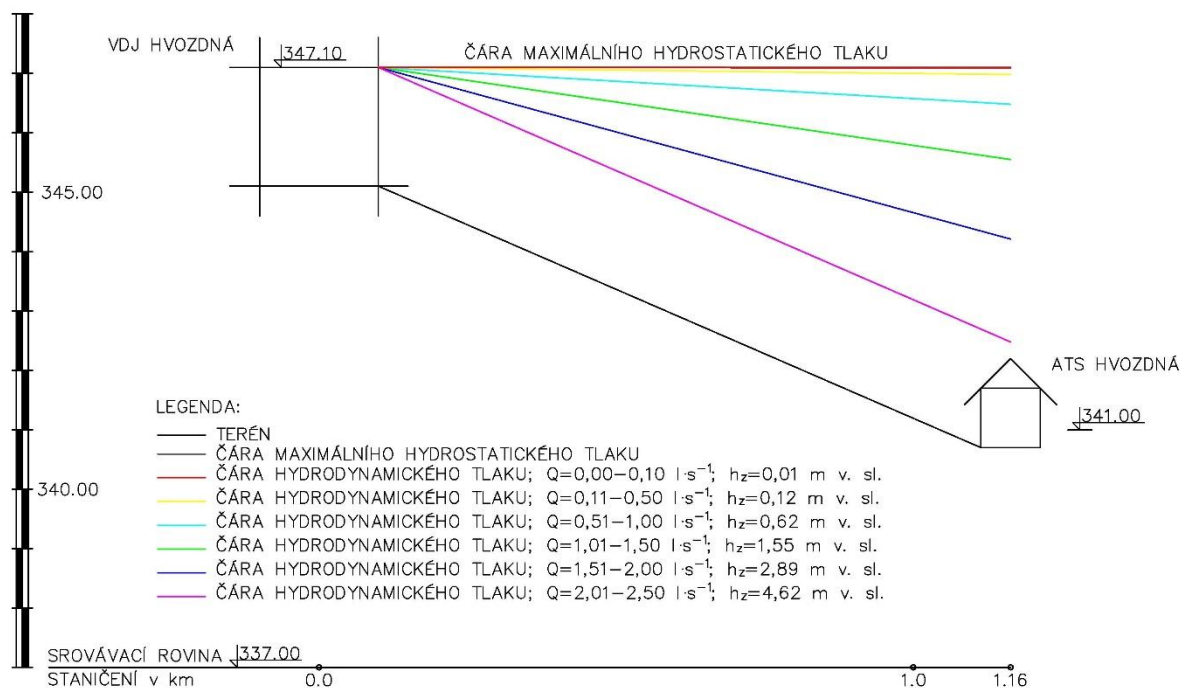
Cílem kalibrace bylo minimalizovat účelovou funkci, tedy nalézt takovou hodnotu drsnosti potrubí, při níž bude suma odchylek mezi vypočtenými a měřenými tlaky v přiváděcím řádu co nejmenší. Obě použité metody dospěly k výsledné hodnotě  $k = 0,20$  mm, přičemž tato hodnota hydraulické drsnosti platí v rozsahu rychlostí  $0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} - 0,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , který odpovídá intervalu průtoků  $0,00 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} - 2,50 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , pro nějž byla kalibrace provedena. Výsledná odchylka mezi měřenými a vypočtenými hodnotami získaná metodou nejmenších čtverců je rovna hodnotě 0,44. Velikost tlakových ztrát stanovených výpočtem při kalibraci modelu je graficky znázorněna na obr. 4.16. Výsledky kalibrace jsou patrné z obr. 4.15 a tab. 4.6.



Obr. 4.15: Grafické znázornění výsledků kalibrace

Tab. 4.6: Výsledky kalibrace

Q	$p^{mod}$			$p^{měř}$			Odchylka
	[l·s <sup>-1</sup> ]	[m v. sl.]	[bar]	[MPa]	[m v. sl.]	[bar]	
0.00-0.10	6.09	0.598	0.060	6.07	0.596	0.060	0.28%
				6.05	0.593	0.059	0.73%
				6.10	0.598	0.060	0.08%
				6.08	0.597	0.060	0.13%
				6.06	0.595	0.059	0.54%
0.11-0.50	5.98	0.586	0.059	5.71	0.561	0.056	4.38%
				5.80	0.569	0.057	3.00%
				5.94	0.583	0.058	0.53%
				6.00	0.589	0.059	0.39%
				5.61	0.551	0.055	6.12%
0.51-1.00	5.48	0.538	0.054	5.62	0.551	0.055	2.46%
				5.30	0.520	0.052	3.32%
				5.26	0.517	0.052	3.99%
				5.29	0.519	0.052	3.58%
				5.46	0.536	0.054	0.36%
1.01-1.50	4.55	0.446	0.045	4.62	0.453	0.045	1.55%
				4.56	0.448	0.045	0.35%
				4.21	0.413	0.041	7.32%
				4.50	0.442	0.044	0.94%
				4.49	0.441	0.044	1.16%
1.51-2.00	3.21	0.315	0.032	3.38	0.331	0.033	5.16%
				3.57	0.351	0.035	11.29%
				3.60	0.353	0.035	12.17%
				3.20	0.314	0.031	0.21%
				2.86	0.281	0.028	10.96%
2.01-2.50	1.48	0.146	0.015	1.96	0.192	0.019	31.93%
				1.58	0.155	0.015	6.27%
				1.56	0.153	0.015	4.95%
				1.00	0.098	0.010	32.38%
				1.16	0.114	0.011	21.54%



Obr. 4.16: Grafické znázornění vypočtených tlakových ztrát

Na základě výsledků byl stanoven koeficient korelace, který vyjadřuje míru lineárního vztahu mezi proměnnými, a je tedy měřítkem kvality provedené kalibrace. Tento koeficient se stanoví dle vzorce:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.5)$$

kde:

$x_i, y_i$  ... naměřená / vypočtená veličina

$\bar{x}, \bar{y}$  ... aritmetický průměr naměřené / vypočtené veličiny

Hodnota korelačního koeficientu je  $r = 0,99$  což značí silnou lineární korelaci.

#### 4.7.1 Nejistoty výpočtu

Z tab. 4.6 i obr. 4.15, je patrné, že zatímco při nízkých rychlostech proudění, a tedy vysokých hodnotách tlaku v potrubí jsou odchylky mezi vypočtenými a měřenými hodnotami malé, se zvětšující se rychlostí proudění, a tedy zmenšujícím se tlakem, odchylky narůstají. To může být způsobeno nepřesnostmi vzniklými při vyhodnocení naměřených dat, nepřesnostmi ve výpočtu, ale i chybami při samotném měření.

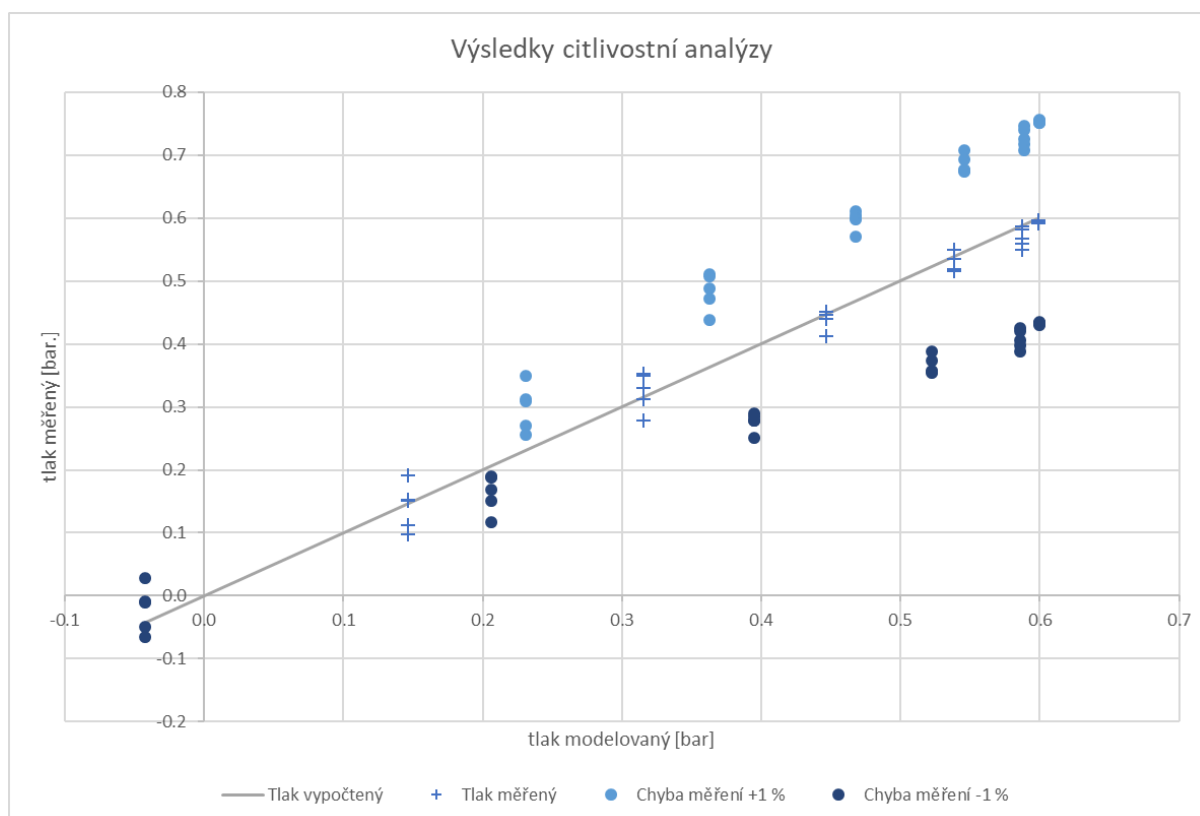
#### Chyby měření

Jak bylo zmíněno v kapitole 4.4.2, k měření tlaku bylo použito tlakové čidlo Sebalog Dx. Toto čidlo má měřicí rozsah 0-16 bar, přičemž výrobce deklaruje přesnost měření  $\pm 1\%$  měřicího rozsahu [20]. Použijeme-li vztah pro přepočítání mezi jednotkami uvedený v kapitole 4.4.3,

a vyjádříme tedy měřicí rozsah jako  $16 \text{ bar} = 163,04 \text{ m v. sl.}$ , zjistíme, že možná chyba vzniklá při měření je až  $1,63 \text{ m v. sl.}$  Při vyšších hodnotách tlaku tato chyba měření nemusí způsobovat neakceptovatelné odchylky mezi vypočtenými a naměřenými daty (tzn. odchylky jsou menší, než 5-10 %, viz kapitola 2). Avšak v tomto případě, kdy i hydrodynamický tlak v potrubí, odpovídající téměř tlaku hydrostatickému, dosahuje hodnoty pouze kolem  $6 \text{ m v. sl.}$ , a hydrodynamický tlak při vyšších rychlostech proudění dosahuje hodnoty rovnající se samotné velikosti možné chyby měření, může být výsledek kalibrace touto chybou silně zatížen.

Za účelem ověření vlivu chyb měření na výsledky kalibrace byla provedena citlivostní analýza. Při ní byly na základě deklarované přesnosti tlakového čidla z měřených hodnot tlaku vytvořeny nové sady kalibračních hodnot. V prvním případě byly měřené hodnoty tlaku zvětšeny o 1 % měřicího rozsahu tlakového čidla, tedy byl simulován stav, kdy skutečný tlak v potrubí byl vyšší než tlak změřený. Ve druhém případě pak byly měřené hodnoty naopak o 1 % měřicího rozsahu tlakového čidla zmenšeny, tedy byl simulován stav, kdy skutečný tlak byl nižší než tlak změřený.

V rámci provedené citlivostní analýzy se vypočtená hydraulická drsnost pohybuje v rozmezí od  $0,001 \text{ mm}$  do  $0,914 \text{ mm}$ . Z výsledků citlivostní analýzy, které jsou patrné na obrázku 4.17, však vyplývá, že provedené měření není zatíženo nikterak velkou chybou. Vliv nejistoty měření se nejvíce promítá v již zmiňované oblasti vysokých průtoků, a tedy nízkých tlaků. Pro dosažení přesnějších výsledků by bylo nutné k měření tlaku použít přesnější tlakové čidlo.



Obr. 4.17: Výsledky citlivostní analýzy

## Nepřesnosti vyhodnocení měřených dat a výpočtu

Dalším krokem v celém procesu, při němž mohlo dojít k chybě, je vyhodnocení naměřených dat. Zatímco v nočních hodinách se průtok měnil jen pomalu, a tedy i tlak byl přibližně konstantní po delší časové úseky, během dne se průtok kontinuálně měnil a s ním kolísala i tlak. Bylo proto náročné najít dostatečně dlouhé časové úseky, ve kterých by měřená hodnota tlaku měla vypovídající hodnotu pro daný výpočtový interval.

Možná chyba způsobená nepřesnostmi ve výpočtu je pak dána skutečností, že tlak v potrubí byl stanovován vždy pouze pro rychlost proudění odpovídající středu daného intervalu průtoku, zatímco měřené tlaky byly voleny napříč celým intervalem.

### 4.7.2 Diskuze

Jak již bylo zmíněno, výsledná hodnota hydraulické drsnosti je  $k = 0,20$  mm. Je však třeba rozlišovat mezi hydraulickou drsností potrubí a trubek. Při řešení hydraulicky dlouhých potrubí zanedbáváme vliv místních ztrát, neboť jsou oproti ztrátám třením po délce výrazně menší. Pod pojmem hydraulická drsnost potrubí tedy rozumíme potrubí jako celek, a to včetně armatur a tvarovek. Vypočtená hydraulická drsnost tak nevyjadřuje pouze drsnost trubek, ale je v ní zahrnut i vliv armatur a tvarovek, respektive místních ztrát.

Za účelem ověření vlivu místních ztrát na výsledky kalibrace byl výpočet proveden opětovně, a to se zohledněním podílu místních ztrát na celkové tlakové ztrátě.

Tab. 4.7: Výčet tvarovek a armatur osazených na příváděcím řadu [9, 11, 21]

ATS Hvozdná:				
typ	DN	počet	$\zeta$	Pozn.
vodoměr	90	1	7.00	
filtr	90	1	2.80	
šoupě	90	2	0.02	100% otevřené
T-kus	90	1	0.37	
koleno 90°	90	1	0.30	
VDJ Hvozdná:				
typ	DN	počet	$\zeta$	Pozn.
vodoměr	100	1	7.00	
redukce	100/250	1	0.20	
šoupě	250	2	0.02	100% otevřené
koleno 90°	250	2	0.30	
T-kus	250	1	0.37	
nátok	250	1	0.10	uvažováno potrubí zasahující do nádrže se zaoblenou hranou

Velikost místních ztrát vyjadřujeme jako násobek rychlostní výšky [11]:

$$h_{zm} = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (4.6)$$

Celkovou tlakovou ztrátu poté počítáme jako [11]:

$$h_z = h_{zt} + h_{zm} \quad (4.7)$$

Výčet armatur a tvarovek osazených na modelovaném přiváděcím řadu, včetně jim náležejících hodnot součinitelů místních ztrát  $\xi$ , je patrný z tab. 4.7, velikost vypočtených tlakových ztrát je pak patrná z tab. 4.8.

**Tab. 4.8: Velikost tlakových ztrát po zohlednění ztrát místních**

Q (interval)		Q <sub>stř</sub>	v	v <sup>2</sup>	Re	Proudění	h <sub>zt</sub>	h <sub>zm</sub>	h <sub>z</sub>
MIN	MAX								
[l·s <sup>-1</sup> ]		[l·s <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[m v. sl.]	[m v. sl.]	[m v. sl.]
0.00	0.10	0.05	0.01	0.0001	615	lamin.	0.01	0.00	0.01
0.11	0.50	0.31	0.06	0.0038	3752	přechod.	0.12	0.00	0.13
0.51	1.00	0.76	0.15	0.0235	9287	přechod.	0.60	0.02	0.62
1.01	1.50	1.26	0.25	0.0649	15437	turb.	1.50	0.06	1.56
1.51	2.00	1.76	0.36	0.1269	21587	turb.	2.78	0.12	2.90
2.01	2.50	2.26	0.46	0.2095	27737	turb.	4.41	0.20	4.61

Vypočtená hydraulická drsnost po zohlednění místních ztrát klesla na hodnotu  $k = 0,15$  mm.

Materiálem modelovaného přiváděcího řadu je HDPE. Jak již bylo zmíněno, drsnost udávaná pro nová plastová potrubí je  $k = 0,01$  mm, vypočtená hodnota hydraulické drsnosti se tedy od této hodnoty podstatně liší. Jelikož stáří přivaděče je v době zpracování této práce 10 let (byl rekonstruován společně s tlakovými pásmy G1 a G2 v roce 2008), nelze předpokládat, že by nárůst vypočtené drsnosti oproti původní byl způsoben nánosem na stěnách potrubí. Rozdíl mezi drsností vypočtenou a udávanou výrobcem lze pravděpodobně přičíst technologii použité při rekonstrukci, kdy do původního kovového potrubí bylo zataženo nové o menší dimenzi, přičemž jednotlivé úseky nového potrubí byly spojovány svařováním na tupo, kdy v místě svaru vzniká „lem.“



**Obr. 4.18: Svar vzniklý svařováním na tupo [22]**

Vzhledem k množství nejistot by bylo vhodné výsledky provedené kalibrace ověřit na dalším souboru měřených dat, jinými slovy provést verifikaci modelu. Další měření však nebyla k dispozici.

## 5 ZÁVĚR

Správná kalibrace má značný vliv na kvalitu výsledků celého hydraulického modelu. Jelikož tento model dává informace o tlakových a průtokových poměrech v síti, a tedy o chování sítě při různých provozních stavech, je jeho správnost nezbytná. Korektnímu stanovení hydraulické drsnosti je proto třeba věnovat patřičnou pozornost.

Úvodní část této práce se zabývá zevrubným popisem principu výstavby hydraulického modelu, metodami jeho kalibrace a budoucím směřováním hydraulického modelování. Pro kalibraci se v současné době používají implicitní neboli optimalizační metody, které využívají kombinaci optimalizace a hydraulického řešení. Pro účely optimalizace se při praktických aplikacích využívá matematicko-statistická metoda nejmenších čtverců.

Kalibrovaným parametrem je hydraulická drsnost potrubí, které je věnována samostatná kapitola. Drsnost potrubí má za následek vznik tlakových ztrát způsobených třením, přičemž je třeba rozlišit pojmy absolutní a relativní drsnost. Absolutní drsnost udává střední výšku nerovnoměrností na stěnách potrubí, zatímco relativní drsnost udává poměr absolutní drsnosti a průměru potrubí. Pro stanovení velikosti tlakových ztrát je rozhodující drsnost relativní, která vstupuje do výpočtu součinitele ztrát třením. Pro jeho stanovení používáme rovnici Colebrook – White, která platí v celé oblasti turbulentního proudění, ve které je zpravidla proudění v příváděcím řadu uskutečňováno. Laminární proudění se vyskytuje pouze v případě minimálních nočních průtoků. Velikost tlakových ztrát pak po dosazení součinitele ztrát třením získáme z rovnice Darcy – Weisbach. Při kalibraci hydraulického modelu je popsán proces v podstatě obrácen – ze známé velikosti tlakových ztrát se snažíme určit co nejpřesnější hodnotu drsnosti potrubí.

V poslední teoretické kapitole jsou popsány různé metody kalibrace modelu, které berou v potaz drsnost potrubí, jeho průměr nebo kombinaci obou faktorů. Jako nejpřesnější způsob kalibrace se jeví zohlednění nejen samotné drsnosti potrubí, která se mění v závislosti na čase, ale v případě, kdy dochází ke ztuhnutí potrubí, a hodnoty samotné drsnosti vycházejí s ohledem na průměr potrubí příliš velké, také zohlednění změny průměru potrubí v závislosti na čase.

V praktické části této práce byl vytvořen model příváděcího řadu vodovodní sítě obce Hvozdná v programu Microsoft Excel. Ze souboru naměřených dat získaných v rámci měrné kampaně byla provedena analýza spotřeby vody. Na jejím základě byly zvoleny výpočtové intervaly, pro něž byly sestaveny n-tice z navzájem si odpovídajících naměřených hodnot průtoků a tlaků. Pro tyto výpočtové intervaly byly pomocí výše popsaného postupu stanoveny modelované hodnoty tlaku (jako výchozí hodnota drsnosti potrubí byla použita hodnota udávaná pro nová potrubí). Pomocí metody nejmenších čtverců byla stanovena suma kvadrátů odchylek mezi modelovanými a měřenými hodnotami. Tento součet nazýváme účelovou nebo cílovou funkcí. Účelová funkce byla za pomoci optimalizačních metod minimalizována a díky tomu byla stanovena drsnost potrubí. Výsledná hodnota hydraulické drsnosti potrubí je  $k = 0,20$  mm.

Na závěr lze tedy říci, že všechny cíle vytýčené v úvodu této práce byly dosaženy.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TUHOVČÁK, L., ADLER, P., KUČERA, T., RACLAVSKÝ, J., *Vodárenství: B. Doprava vody*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2006.
- [2] SAVIC, Dragan A., KAPELAN, Zoran S., JONKERGOUW, Philip M. R., *Quo vadis water distribution model calibration?* Urban Water Jurnal. 2009, (6). DOI: 10.1080/15730620802613380.
- [3] INGEDULD, P., VYČÍTAL J., *Matematické modelování vodovodních sítí, část III. SOVAK* [online]. 1999, (05) [cit. 2017-08-18]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/ris/ais-ris-info-copy.nsf/da28f37425da72f7c12569e600723950/2e43169f17005ae2c1256a36006ae00e?OpenDocument>.
- [4] ORMSBEE, L., LINGIREDDY, S., *Calibration of Hydraulic Network Models* Journal of the American Water Works Association, Vol. 89, No. 2 (1997), s. 42-50.
- [5] DALÍK, J., *Matematika IV: Numerická analýza*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2010, s. 63, ISBN 978-80-7204-702-4.
- [6] FICKER, T., *Fyzikální praktikum I*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006, s. 16-23, ISBN 80-7204-459-1.
- [7] ABU-MAHFOUZ, A. M., HAMAM, Y., PAGE, P. R., DJOUANI, K., KURIEN, A., *Real-time dynamic hydraulic model for potable water loss reduction*, Procedia Engineering 154 (2016), s. 99-106
- [8] SVITÁK, Z., INGEDULD, P., KOLOVRAT, O., HONZÍK, R., *Matematický model vodárenské sítě města Písek v reálném čase s automatizovaným systémem kontroly a aktualizace dat z GIS a ZIS*, Sborník referátů konference Provoz vodovodů a kanalizací (2017), s. 78-84.
- [9] KOLÁŘ, V., VINOPAL, S., *Hydraulika průmyslových armatur (Příručka praktických výpočtů)*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [10] KOLÁŘ, V. a kol. *Hydraulika* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. Technický průvodce.
- [11] JANDORA, J., STARA, V., STARÝ, M., *Hydraulika a hydrologie*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2011, 186. s, ISBN 978-80-7204-739-0.
- [12] RYBNÍKÁŘ, J. *Hydraulika I* Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1993, ISBN 80-900590-5-8.
- [13] ROSSMAN, L. A., *Epanet 2 Users Manual* United States Enviromental Protection Agency US E.P.A. 2000, EPA/600/R-00/057.
- [14] *Drsnost potrubí* [online], Vodovod.info [cit. 2018-04-01], ISSN 1804-7157. Dostupné z WWW: <http://vodovod.info/index.php/extra/tabulky/196-drsnost-potrubu#.WsCpg4hubDc>.

- [15] ANNUS, I., VASSILJEV A., *Different approaches for calibration of an operational water distribution system containing old pipes*, Procedia Engineering 119 (2015), s. 526-534.
- [16] SOPHOCLEOUS, S., SAVIC, D., KAPELAN, Z., SHEN, Y., SAGE, P., *Advances in water mains network modelling for improved operations* Procedia Engineering 119 (2015), s. 593-602.
- [17] *Definování a vyřešení problému pomocí Řešitele* [online], [cit. 2018-04-01]. Dostupné z WWW: <<https://support.office.com/cs-cz/article/definov%C3%A1n%C3%AD-a-vy%C5%99e%C5%A1en%C3%AD-probl%C3%A9mu-pomoc%C3%AD-%C5%98e%C5%A1itele-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>>.
- [18] STARÝ, M., *Hydrologie*, Brno: Skripta byla vydána v el. podobě, 2005.
- [19] *Biologické algoritmy (1) – Evoluční algoritmy* [online], 2012 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z WWW: <<https://www.root.cz/clanky/biologicke-algoritmy-1-evolucni-algoritmy/>>.
- [20] SEBA KMT, *Návod k obsluze: Datalogger Sebalog DX*, 01 (06/2014), s. 15.
- [21] BLÁHA, J., BRADA, K., *Příručka čerpací techniky*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, ISBN 80-01-01626-9.
- [22] *Konečný svár potrubí pomocí svářecího stroje tzv. na tupo*, In: Elmoplast.cz [online], [cit. 2018-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://elmoplast.cz/svareci-stroje/>>.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Implicitní kalibrace .....	6
Obr. 2.2 Grafické znázornění metody nejmenších čtverců [5] .....	6
Obr. 2.3: Funkční schéma real-time modelu [7] .....	8
Obr. 2.4: Funkční schéma matematického modelu vodovodní sítě města Písek [8].....	10
Obr. 2.5: Procesní schéma modulu SynGISMo [8].....	11
Obr. 3.1: Vznik vrstev při turbulentním proudění.....	12
Obr. 3.2: Metoda paralelních potrubí [4] .....	17
Obr. 3.3: Dvou-hydrantová metoda [4].....	18
Obr. 4.1 Situace širších vztahů – obec Hvozdná, Zlínský kraj .....	22
Obr. 4.2 Přehledné schéma topologie vodovodní sítě obce Hvozdná.....	23
Obr. 4.3 Objekt ATS Hvozdná pro tlakové pásmo T1 .....	24
Obr. 4.4 Armaturní šachta s regulačním ventilem CLA VAL DN 50 .....	25
Obr. 4.5 Měření průtoku ve VDJ Hvozdná – čidlo REED a připojený datalogger.....	26
Obr. 4.6 Měření tlaků v ATS Hvozdná – na konci přiváděcího řadu z VDJ Hvozdná (A) a na výtlaku za čerpadly do tlakového pásma T1 (B).....	26
Obr. 4.7: Průběh spotřeby vody v obci Hvozdná v pracovní dny .....	28
Obr. 4.8: Průběh spotřeby vody v obci Hvozdná ve dny pracovního klidu .....	29
Obr. 4.9: Průběh spotřeby vody v obci Hvozdná bez rozlišení, zdali se jedná o pracovní či volné dny .....	30
Obr. 4.10: Ukázka vytvořené n-tice hodnot .....	31
Obr. 4.11: Grafické znázornění závislosti tlakových ztrát na rychlosti proudění .....	32
Obr. 4.12: Grafické znázornění závislosti tlakových ztrát na kvadrátu rychlosti proudění .....	32
Obr. 4.13: Ukázka nastavení parametrů modulu Řešitel.....	34
Obr. 4.14: Ukázka z kalibrace modelu .....	35
Obr. 4.15: Grafické znázornění výsledků kalibrace .....	36
Obr. 4.16: Grafické znázornění vypočtených tlakových ztrát.....	37
Obr. 4.17: Výsledky citlivostní analýzy .....	38
Obr. 4.18: Svar vzniklý svařováním na tupo [21] .....	40

---

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Součinitele drsnosti pro nová potrubí z různých materiálů [11].....	16
Tab. 4.1: Délka potrubí dle dimenzí.....	25
Tab. 4.2: Spotřeba vody v obci Hvozdná v pracovní dny .....	28
Tab. 4.3: Spotřeba vody v obci Hvozdná ve dny pracovního klidu .....	28
Tab. 4.4: Spotřeba vody v obci Hvozdná bez rozlišení, zdali se jedná o pracovní či volné dny .....	29
Tab. 4.5: Stanovení vah.....	33
Tab. 4.6: Výsledky kalibrace.....	36
Tab. 4.7: Výčet tvarovek a armatur osazených na přiváděcím řadu [9, 11, 21].....	39
Tab. 4.8: Velikost tlakových ztrát po zohlednění ztrát místních.....	40

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ATS ...	automatická tlaková stanice
c ...	drsnostní součinitel dle Hazen – Williamse [-]
C ...	Chézyho rychlostní součinitel [ $m^{0,5} \cdot s^{-1}$ ]
D ...	průměr potrubí [m]
DN ...	jmenovitá světlost
F(x), f(x) ...	funkce
g ...	gravitační zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
GIS ...	geografický informační systém
HDPE ...	vysokohustotní polyethylen
$h_z$ ...	tlaková ztráta [m]
$h_{zm}$ ...	místní ztráta [m]
$h_{zt}$ ...	ztráta třením [m]
i ...	hydraulický sklon [-]
k ...	absolutní drsnost [mm]
$k_d$ ...	koeficient denní nerovnoměrnosti [-]
$k_h$ ...	koeficient hodinové nerovnoměrnosti [-]
L ...	délka potrubí [m]
m ...	počet měření
m ...	směrnice
MOVO	Moravská vodárenská, a.s.
n ...	Manningův drsnostní součinitel [-]
p ...	tlak [Pa]
Q ...	průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
$Q_d$ ...	maximální denní průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]
$Q_h$ ...	maximální hodinový průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]
$Q_m$ ...	minimální hodinový průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]
$Q_p$ ...	průměrný denní průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]
r ...	koeficient korelace [-]
R ...	hydraulický poloměr [m]
Re ...	Reynoldsovo číslo [-]

---

SCADA ...	dispečerské řízení a sběr dat (Supervisory Control And Data Acquisition)
SDR ...	poměr průměru potrubí a tloušťky stěny (Standard Dimension Ratio)
$t$ ...	tloušťka stěny potrubí [mm]
ÚV ...	úpravna vody
$v$ ...	rychlost proudění [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
VaK ...	vodovody a kanalizace
VDJ ...	vodojem
$x$ ...	vektor neznámých parametrů
$w_i$ ...	váhy
$y$ ...	mocnitel [-]
$y_i^{\text{měř}}$ ...	hodnoty získané měřením
$y_i^{\text{mod}}$ ...	vypočtené (modelované) hodnoty
$z$ ...	nadmořská výška vztažného bod [m]
ZIS ...	zákaznický informační systém
$z_{\text{th}}$ ...	ztráta třením na homogenním povrchu [m]
$z_{\text{tn}}$ ...	ztráta třením na nehomogenním povrchu [m]
$\delta$ ...	tloušťka mezní vrstvy [mm]
$\Delta$ ...	absolutní drsnost [mm]
$\nu$ ...	kinematická viskozita [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$\lambda$ ...	součinitel ztrát třením [-]
$\xi$ ...	součinitel místní ztráty [-]

## SUMMARY

Correct calibration has considerable impact on quality of hydraulic model results. The hydraulic model provides information on pressure and flow in the water mains network and thus describes its operating conditions. It is therefore necessary to correctly determine hydraulic roughness value.

The introductory part of this work describes the main principles of building a hydraulic model, methods of its calibration and possible future direction of hydraulic modeling. Nowadays, the implicit calibration methods (also known as optimization methods) are used for calibration. These methods combine optimization and hydraulic solution. The method of least squares is practically used for calibration.

The calibrated parameter is the hydraulic roughness, which has its own chapter in this work. Pipe roughness results in head losses caused by friction. It is also necessary to distinguish absolute and relative roughness of the pipeline. Absolute roughness describes the height of protrusions on the pipe walls, while relative roughness is the ratio of absolute roughness and diameter of the pipe. For head loss estimation the relative roughness is important as it affects the friction factor. Colebrook – White formula is used to calculate the friction factor. This formula is valid through the whole range of turbulent flow that is usually found in the supply main of the Hvozdná water mains network. Laminar flow occurs only during minimal night flow. After determining the friction factor, the head loss value is calculated using the Darcy – Weisbach formula. Within calibration, the described process is reversed – the value of the hydraulic pipe roughness is calculated from known head loss value.

The last theoretical chapter describes different approaches to calibrating the hydraulic model. Some of the approaches take into account only pipe roughness, some only use pipe diameters and some combine both of these parameters. It seems that the most accurate method is the method that uses both parameters, which additionally change over time.

In the practical part of this thesis, a mathematical model of the supply main of the water mains network of Hvozdná was created using Microsoft Excel. Water consumption analysis was based on measured data obtained from field testing. Flow intervals for calibration were estimated based on the information obtained from the water consumption analysis. The measured pressure values were assigned to every calculation interval. The computed pressure values were estimated for the same calculation intervals using the previously described approach. Sum of the deviation squares between measured and calculated pressure values was estimated using the least squares method. This sum can also be called an objective function. To minimize the value of the objective function optimization methods were used. This led to the determination of the hydraulic roughness value, the result of which is  $k = 0,20$  mm.