



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

KALIBRACE HYDRAULICKÉHO MODELU VODOVODNÍ SÍTĚ

CALIBRATION OF HYDRAULIC MODEL OF WATER SUPPLY NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Eva Náplavová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Eva Náplavová
Název	Kalibrace hydraulického modelu vodovodní sítě
Vedoucí práce	Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
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 práce bude provedena rešerše literatury v oblasti metod kalibrace hydraulických simulačních modelů. Pozornost bude věnována zejména parametrům, které se v modelech vodovodních sítí upravují, a také matematickým metodám, které se využívají pro nalezení optimálních hodnot těchto parametrů. Následně bude zvolen konkrétní postup kalibrace, který bude otestován na fiktivní vodovodní síti, kde jsou všechny parametry předem známy. V rámci praktické části bude tento postup otestován také na několika vybraných úsecích hydraulického simulačního modelu skutečné vodovodní sítě. Kalibrace bude prováděna v simulačním softwarovém nástroji Epanet 2.0 a budou pro ni využita data získaná měřeními tlaků a průtoků na skutečné vodovodní síti.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Jan Ručka, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá kalibrací hydraulických simulačních modelů, zejména metodami, které se pro kalibraci používají a dále parametry, které jsou při kalibraci upravovány. V teoretické části je zpracována literární rešerše v oblasti matematického modelování, základních principů, které se při hydraulickém modelování uplatňují a současného přístupu ke kalibraci a sběru dat. V praktické části práce je sestaven a následně kalibrován model skupinového vodovodu Horní Dunajovice. Kalibrace je provedena nejprve manuálně pro běžný zatěžovací stav a následně s použitím za tímto účelem vytvořeného kalibračního softwaru pro vysoké rychlosti proudění v síti.

KLÍČOVÁ SLOVA

hydraulické modelování, kalibrace hydraulických modelů, metoda nejmenších čtverců, kalibrační software, Epanet-Matlab-Toolkit

ABSTRACT

This diploma thesis deals with calibration of hydraulic simulation models, especially with methods used for calibration and parameters that are modified during calibration. The literature review in the field of mathematical modeling, basic principles applied in hydraulic modeling and the current approach to calibration and data collection is done in theoretical part. In the practical part of the thesis, a hydraulic model of the group water supply system Horní Dunajovice is built and subsequently calibrated. The calibration is first performed manually for the normal operational status and then using a calibration software created for this purpose for a load case with high velocity.

KEY WORDS

hydraulic modeling, calibration of hydraulic models, least squares method, calibration software, Epanet-Matlab-Toolkit

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

NÁPLAVOVÁ, Eva. *Kalibrace hydraulického modelu vodovodní sítě*. Brno, 2020. 65 s., 2 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Kalibrace hydraulického modelu vodovodní sítě* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 4. 1. 2020

Bc. Eva Náplavová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Kalibrace hydraulického modelu vodovodní sítě* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 4. 1. 2020

Bc. Eva Náplavová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu této práce, Ing. Janu Ručkovi, Ph.D., za vstřícnost a trpělivost, rady a připomínky k řešené problematice. Velké poděkování za ochotu, čas strávený konzultováním, a cenné podněty ke zlepšení patří Ing. Tomáši Sucháčkovi. V neposlední řadě pak poděkování náleží také RNDr. Otovi Příbylovi a Mgr. Davidovi Kadlecovi, za konzultace při tvorbě kalibračního nástroje v prostředí programovacího jazyka MATLAB.

OBSAH

1	ÚVOD	3
1.1	Cíl práce.....	3
2	HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ	4
2.1	Hydraulické modelování.....	4
2.1.1	Prvky hydraulického modelu	9
2.1.2	Typy hydraulické analýzy.....	12
2.1.3	Podmínky hydraulické analýzy.....	12
3	KALIBRACE HYDRAULICKÝCH MODELŮ	14
3.1	Kalibrované parametry	16
3.1.1	Hydraulická drsnost potrubí.....	16
3.2	Plánování a realizace měrné kampaně.....	18
3.2.1	Dvoufázová měrná kampaň a kalibrace	19
3.2.2	Dvoufázová kalibrace hydraulických modelů.....	20
3.3	Nástroje pro kalibraci.....	21
3.3.1	Metoda nejmenších čtverců	22
3.3.2	Genetické algoritmy.....	23
4	KALIBRACE HYDRAULICKÉHO MODELU SKUPINOVÉHO VODOVODU HORNÍ DUNAJOVICE	25
4.1	Charakteristika řešené lokality.....	25
4.1.1	Zájmové území	25
4.1.2	Charakteristika spotřebišť.....	26
4.1.3	Skupinový vodovod Horní Dunajovice.....	26
4.2	Měrná kampaň.....	29
4.2.1	Měření tlaku.....	30
4.2.2	Zpracování měrné kampaně.....	31
4.3	Analýza spotřeby vody	32
4.4	Kalibrace hydraulického modelu na běžný provozní stav vodovodní sítě	35
4.4.1	Proces kalibrace	36
4.4.2	Výsledky kalibrace	37
4.5	Kalibrace hydraulického modelu na vysoké rychlosti proudění v potrubí.....	40
4.5.1	Nástroj pro kalibraci hydraulického modelu.....	40
4.5.2	Využití kalibračního nástroje při kalibraci reálné vodovodní sítě	48
4.5.3	Výsledky kalibrace	50

5	DISKUZE	54
6	ZÁVĚR.....	56
7	POUŽITÁ LITERATURA.....	57
	SEZNAM TABULEK	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM GRAFŮ.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	62
	SEZNAM PŘÍLOH.....	64
	SUMMARY	65

1 ÚVOD

Hydraulické modely vodovodních sítí se v současnosti stávají stále vyhledávanějšími, a dá se říct i nezbytným nástrojem při provozu vodárenských systémů. Zprostředkovávají totiž informace o tlakových a průtokových poměrech v síti, jež jsou nepostradatelným podkladem pro provoz i projektování vodovodů. Data o průtocích a tlacích lze získat přímým měřením, avšak k popsání provozních poměrů u rozsáhlých vodárenských systémů je zapotřebí osazení velmi velkého množství měřicí techniky, což činí tento způsob neekonomickým, a tedy i málo využívaným. [1]

Velkou výhodou hydraulických modelů je také možnost pomocí nich simulovat scénáře, jež na síti mohou nastat, avšak nejsou při provozu běžné, a ověřit tak chování sítě v těchto situacích. Jedná se například o požární odběry či poruchy. Správně vytvořený hydraulický model může také pomoci při vyhledávání a minimalizování ztrát, plánování údržby a rekonstrukcí sítě a podobně.

Jako nevýhoda hydraulických modelů se může jevit jejich neúplná přesnost – tedy skutečnost, že při hydraulické analýze nikdy nedosáhneme stoprocentní shody se skutečným stavem vodovodní sítě, což je dáno nejistotou ve vstupních datech. Ta je způsobena např. přesností použité měřicí techniky, pohybem hladiny ve vodojemu, hloubkou uložení potrubí atd. Pokud pomineme správné definování topologie sítě, výškopisu atp., které jsou pro korektní modelování vodovodních sítí nezbytné, výslednou přesnost modelu také zásadně ovlivňují především správné rozložení spotřeby vody v čase a prostoru, a správné definování hydraulické drsnosti vodovodních potrubí, případně také stanovení skutečného vnitřního průměru potrubí. Při stanovování drsnosti potrubí se vychází z tabulkových hodnot nebo z hodnot drsnosti, které byly stanoveny na základě měření na síti, a tyto hodnoty jsou nadále zpřesňovány. Proces zpřesňování nazýváme kalibrací modelu.

Požadovaná míra přesnosti modelu se liší podle účelu modelu. Je zřejmé, že jiná přesnost je dostačující pro prvotní projekční práce a jiná například pro lokalizaci úniků vody na síti či simulaci mimořádných provozních stavů. Dle účelu modelu se tedy liší i příprava kalibračních dat a volba způsobu kalibrace.

1.1 CÍL PRÁCE

Cílem této práce bylo provést rešerši v oblasti tvorby hydraulických modelů, a především metod jejich kalibrace. Práce se věnovala zejména kalibrovaným parametrům a přístupům sloužícím k jejich nalezení.

V praktické části této práce bylo cílem zvolit konkrétní kalibrační metodu a za pomoci softwaru MATLAB a jeho nástavby Epanet-MATLAB-Toolkit vytvořit automatický kalibrační program, který usnadní kalibraci a zpřesní její výsledky. Tento program byl nejprve testován na fiktivní vodovodní síti, jejíž všechny parametry byly známy, a která sloužila k ověření jeho funkčnosti. Dále byl aplikován při kalibraci hydraulického simulačního modelu reálné vodovodní sítě, která byla provedena na základě dat získaných pomocí měřné kampaně na této síti.

2 HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ

Pod pojmem „model“ rozumíme účelově zjednodušené zobrazení skutečnosti – reálného objektu a na něm probíhajících jevů. V oblasti vodárenství využíváme modelování matematického, tedy popisujeme vodárenské systémy pomocí komplexních hydraulických rovnic, které matematicky reprezentují průtokové a tlakové poměry. [2]

2.1 HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ

Výpočetní jádro matematických (hydraulických) modelů je založeno na základních rovnicích mechaniky kapalin, která je částí mechaniky tekutin a spadá do obecné mechaniky.

Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity, známá také jako rovnice spojitosti, je diskrétním vyjádřením zákona zachování hmotnosti. Z něj vyplývá, že rozdíl mezi hmotností kapaliny vtékající do nekonečně malého elementu, vyjmutého z oblasti proudění, a hmotností kapaliny z tohoto elementu vytékající za určitý čas se rovná změně hmotnosti kapaliny obsažené v tomto elementu za stejný čas. Slovy laika lze říct, že hmota se nemůže nikam ztratit, a proto co do elementu přiteče z něj také musí odtéct. Tuto rovnici lze pro jednodimenzionální proudění zapsat jako: [2,3]

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Q)}{\partial x} = 0. \quad (2.1)$$

Jelikož při modelování vodovodních sítí uvažujeme jednodimenzionální ustálené proudění, a kapalinu idealizujeme jako nestlačitelnou, lze rovnici kontinuity zapsat také v jejím objemovém tvaru: [3]

$$Q = S_1 \cdot v_1 = \dots = S_i \cdot v_i = \dots = S_n \cdot v_n, \quad (2.2)$$

kde:

Q_i	... průtočné množství;
S_i	... průtočný průřez,
v_i	... průtočná rychlost.

Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování energie. Tento zákon není lehké formulovat, avšak zjednodušeně lze říct, že při všech dějích, které probíhají v izolované soustavě, zůstává celková energie této soustavy konstantní. Převedeno do řeči laika – energii nelze vyrobit ani zničit, pouze přeměnit na jiné formy energie. Bernoulliho rovnici lze pro ideální kapalinu zapsat následovně: [3,4]

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g}. \quad (2.3)$$

Při hydraulickém modelování skutečné kapaliny neznáme bodové rychlosti proudění u v jednotlivých průřezech, nahrazujeme je proto průřezovou rychlostí a nerovnoměrné rozdělení rychlostí v průtočném profilu zohledňujeme zavedením Coriolisova čísla α . To je poměrem skutečné energie v průřezu stanovené z bodových rychlostí a energie vyjádřené z průřezové rychlosti. [3]

Při pohybu kapaliny v potrubí dochází ke tření této vazké kapaliny o stěny potrubí a také ke vnitřnímu tření, čímž dochází k přeměně pohybové energie v její jiné formy. Tuto přeměnu označujeme za ztrátu mechanické energie h_z a zohledňujeme ji v Bernoulliho rovnici. [3]

Po zohlednění výše zmíněného nabývá Bernoulliho rovnice následujícího tvaru:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_z, \quad (2.4)$$

kde:

h_1, h_2 ... polohová (geodetická) výška těžiště průtočného průřezu nad zvolenou srovnávací rovinou,

$\frac{p_1}{\rho g}, \frac{p_2}{\rho g}$... tlaková výška,

$\frac{\alpha v_1^2}{2g}, \frac{\alpha v_2^2}{2g}$... rychlostní výška,

h_z ... ztráty mechanické energie.

Rovnice hybnosti

Jak už název napovídá, rovnice hybnosti vyjadřuje zákon zachování hybnosti. Ten říká, že celková hybnost izolované soustavy se působením vnitřních sil nemění. Soustavu lze považovat za izolovanou, pokud na ni nepůsobí žádné vnější síly nebo pokud výslednice vnějších sil na ni působících je nulová. [5]

Rovnice hybnosti má tvar: [2]

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{Dv_i}{Dt}, \quad (2.5)$$

kde:

σ_{ij} ... tenzor napětí,

$f_i(x, y, z, t)$... složky vektoru objemového zatížení,

$v_i(x, y, z, t)$... složky vektoru rychlosti.

Konstitutivní vztahy

Konstitutivní vztahy obecně vyjadřují závislost mezi tenzorem napětí a deformační rychlostí. Pro newtonovskou kapalinu vyjadřují tyto vztahy napětí v kapalině jako lineární funkci deformační rychlosti a tlaku. Konstitutivní vztahy zapisujeme následovně: [2]

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda(\rho, T)\dot{\epsilon}_v + 2\mu(\rho, T)\dot{\epsilon}_{ij}, \quad (2.6)$$

kde:

σ_{ij}	... tenzor napětí,
$\dot{\epsilon}_v$... tenzor rychlosti objemového přetvoření,
$p(x, y, z, t)$... tlak,
$\lambda(\rho, T)$... koeficient objemového přetvoření,
$\mu(\rho, T)$... koeficient dynamické viskozity,
$\dot{\epsilon}_{ij}$... tenzor deformační rychlosti.

Navier-Stokesovy a Eulerovy rovnice

Navier-Stokesovy rovnice jsou nejobecnější rovnice pohybu vazké nestlačitelné kapaliny. Tyto rovnice vyjadřují pro jednotku hmotnosti proudící kapaliny vztah mezi: [2]

- *objemovými silami*, které působí na každý hmotný bod daného objemu kapaliny, a jsou tedy úměrné hmotnosti kapaliny (např. tíha kapaliny, odstředivá síla),
- *tlakovými silami*, zvětšenými o příslušné složky plynoucí z vazkosti kapaliny,
- *setrvačnými silami*.

Navier-Stokesovy rovnice vznikají dosazením konstitutivních vztahů do rovnice hybnosti. Při užití rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu je lze zapsat: [2]

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (2.7)$$

kde:

$f_i(x, y, z, t)$... složky vektoru objemového zatížení,
$v_i(x, y, z, t)$... složky vektoru rychlosti,
$p(x, y, z, t)$... tlak,
ρ	... hustota kapaliny,
μ	... koeficient dynamické viskozity.

Výpočet tlakových ztrát

K tlakovým ztrátám dochází při proudění viskózních kapalin vlivem vnitřního tření, třením proudící kapaliny o stěny potrubí (ztráty třením) a také vlivem deformace rychlostního pole při proudění skrze armatury a tvarovky (místní ztráty). Vnitřní tření je v porovnání se

zbývajícími dvěma zanedbatelné. Při modelování vodárenských systémů také většinou zanedbáváme ztráty místní, které je vzhledem k množství armatur a tvarovek na síti velmi těžké kvantifikovat, a které jsou zároveň oproti ztrátám způsobeným třením po délce u vodárenských systémů, které lze označit za hydraulicky dlouhá potrubí, velmi malé. Při kalibraci hydraulických modelů se místní ztráty promítnou do výsledné hodnoty hydraulické drsnosti potrubí, která je v sobě zahrnuje.

Můžeme tedy říct, že tlakové ztráty jsou způsobeny hydraulickou drsností potrubí k , na jejich velikost však má vliv také průměr potrubí D a Reynoldsovo číslo Re . Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina, která charakterizuje režim proudění a zároveň také vyjadřuje vliv vnitřního tření na celkový odpor (lze říct, že čím je Reynoldsovo číslo vyšší, tedy čím větší je průměr potrubí a/nebo rychlost proudění, tím nižší tento vliv je). Reynoldsovo číslo je dáno rychlostí proudění v , průměrem potrubí D a kinematickou viskozitou kapaliny ν : [3]

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (2.8)$$

Dle hodnoty Reynoldsova čísla tedy rozlišujeme dva režimy proudění – *laminární*, kdy se jednotlivé částice pohybují vzájemně rovnoběžně a mezi sebou se nemísí, a *turbulentní*, kdy je pohyb částic neuspořádaný a vzájemně se mísí. Mezi těmito režimy nelze stanovit pevnou hranici, nachází se mezi nimi takzvaná *přechodná* oblast, v níž může být pohyb jak laminární, tak turbulentní. Laminární pohyb v této oblasti může při jakémkoliv vnějším popudu přejít v turbulentní. [3]

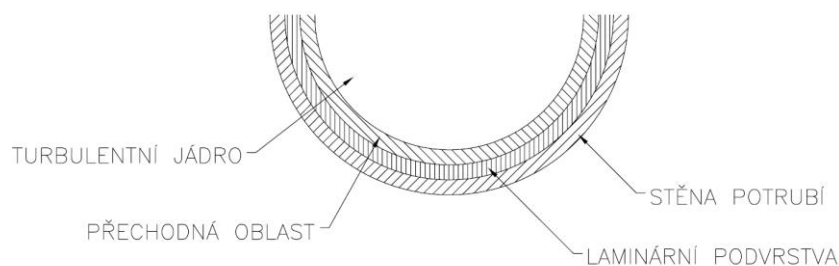
Na režimu, v jakém se proudění realizuje, dále závisí metoda, kterou se stanoví hodnota *součinitele ztrát třením* λ , neboť míra vlivu jednotlivých veličin na velikost tlakových ztrát se v těchto režimech různí.

Pro jednotlivé režimy proudění se součinitel ztrát třením λ stanoví:

- 1) *laminární proudění* – v režimu laminárního proudění závisí hodnota součinitele ztrát třením pouze na rychlosti proudění, průměru potrubí a viskozitě proudící kapaliny, tedy na hodnotě Reynoldsova čísla. Vliv hydraulické drsnosti potrubí se zde neprojevuje. Hodnotu součinitele ztrát třením se stanovuje dle vzorce: [6]

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (2.9)$$

- 2) *turbulentní proudění* – turbulentní režim proudění lze dále rozdělit na tři oblasti, ve kterých se způsob stanovení ztrátového součinitele také liší:
 - a) *hydraulicky hladké potrubí* – při turbulentním proudění vzniká v těsném okolí stěny potrubí mezní vrstva, složená z laminární podvrstvy a z přechodné oblasti, a až poté vzniká turbulentní jádro proudu. [6]



Obr. 1: Rozdělení proudu při turbulentním proudění

Pokud je tloušťka mezní vrstvy několikanásobně větší, než je výška výstupků na stěnách potrubí, lze potrubí považovat za *hydraulicky hladké*. Platí: [6]

$$\delta > 5k, \quad (2.10)$$

kde:

- δ ... tloušťka mezní vrstvy,
 k ... výška výstupků u stěn potrubí (drsnost potrubí).

Tloušťka mezní vrstvy se stanoví ze vzorce:

$$\delta = \frac{11,8\nu}{\sqrt{gRi}}, \quad (2.11)$$

kde:

- ν ... kinematická viskozita,
 g ... tíhové zrychlení,
 R ... hydraulický poloměr,
 i ... sklon čáry energie.

Při proudění kapaliny vznikají u výstupků na stěnách potrubí víry, avšak pokud je potrubí hydraulicky hladké, zůstávají tyto víry při stěně potrubí, uvnitř mezní vrstvy, a tak nezvětšují odpory v potrubí, a tedy ani nepřispívají k tlakovým ztrátám. Velikost součinitele ztrát třením je tedy opět funkcí pouze Reynoldsova čísla. Stanoví se například z Prandtlova-Kármánova výrazu: [6]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{\text{Re} \sqrt{\lambda}}{2,51}, \quad (2.12)$$

- b) *turbulentní proudění v přechodné oblasti ztrát třením* – jako proudění v přechodné oblasti můžeme označit takové proudění, kdy tloušťka mezní vrstvy je v rozsahu od jedné pětiny do pětinásobku výšky výstupků u stěn potrubí (drsnosti potrubí). Hodnota součinitele ztrát třením v této oblasti již závisí nejenom na hodnotě Reynoldsova čísla, ale i na drsnosti potrubí, [7]
- c) *turbulentní proudění v kvadratické oblasti ztrát třením* – v této oblasti proudění se již neuplatňuje mezní vrstva, jedná se tedy o proudění *hydraulicky drsným potrubím*. Turbulentní proudění je v této oblasti plně vyvinuté a ztráty jsou úměrné druhé mocnině rychlosti, proto tuto oblast nazýváme také kvadratickou

oblastí ztrát třením. Velikost součinitele ztrát třením již není závislá na hodnotě Reynoldsova čísla, závisí pouze na drsnosti potrubí. Stanoví se dle Nikuradseho vztahu: [6]

$$\lambda = \frac{0,25}{\left(\log \frac{3,7D}{k}\right)^2}. \quad (2.13)$$

Pro technická potrubí, a tedy i pro vodárenské systémy, se v praxi v celé oblasti turbulentního proudění při výpočtu součinitele ztrát třením uplatňuje **Colebrook-Whiteova** rovnice: [6]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7D} \right). \quad (2.14)$$

Tato rovnice při malých rychlostech proudění, a tedy i při malé hodnotě Reynoldsova čísla, přechází ve vztah Prandtl-Kármánův, neboť první člen v závorce výrazně převyšuje druhý. Naopak při velkých rychlostech proudění přechází rovnice Colebrook-Whiteova v rovnici Nikuradseho. [6]

Po vypočtení hodnoty součinitele ztrát třením se ke stanovení velikosti *ztrát třením* h_{zt} používá rovnice **Darcy-Weisbach**. Tato rovnice vyjadřuje ztrátu mechanické energie (tlakové výšky), způsobenou třením po délce, jako násobek součinitele ztrát třením a pohybové energie (rychlostní výšky): [6]

$$h_{zt} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.15)$$

kde:

h_{zt}	... tlakové ztráty způsobené třením,
λ	... součinitel ztrát třením,
L	... délka potrubí,
D	... průměr potrubí,
v	... rychlost proudění,
g	... tíhové zrychlení.

2.1.1 Prvky hydraulického modelu

Jak již bylo zmíněno, model je zjednodušeným zobrazením skutečnosti, a proto i vodovodní síť, která se ve skutečnosti skládá z potrubí, armatur, vodojemů a čerpacích stanic, musí být pro účely modelování schematizována.

Model vodovodní sítě se skládá z: [1]

- *úseků* – úsek je část sítě s konstantní dimenzí a hydraulickou drsností, ve které je konstantní průtok. Za úseky se však nepovažují pouze úseky vodovodního potrubí, ale také čerpadla a armatury,

- *uzlů* – uzly jsou krajní body úseků a úseky jsou jejich pomocí také ukončeny. Jako uzly jsou zároveň definovány i vodojemy. Do uzlů se zadávají veškeré přítoky a odběry ze sítě.

Dále můžeme definovat parametry modelu, které lze rozdělit na *dané* a *odvozené*:

- *dané parametry* – jsou parametry, které slouží jako vstup pro hydraulickou analýzu a podrobněji je lze rozdělit na:
 - parametry vodárenského systému jako celku (např. kinematická viskozita vody, topologické uspořádání sítě atp.),
 - úsekové parametry (dimenze a hydraulická drsnost potrubí, délka úseků),
 - uzlové parametry (odběry ve spotřebitelských uzlech, kóty hladiny ve vodojemech atp.).
- *odvozené parametry* – jsou parametry získané hydraulickou analýzou a lze je rozdělit:
 - uzlové parametry (tlakové výšky v uzlech),
 - úsekové parametry (průtoky jednotlivými úseky, ztrátové výšky, průtokové rychlosti atp.).

Vstupní data

Kvalita modelu je závislá na kvalitě vstupních dat a je zřejmé, že pokud získáme jen vágní popis modelovaného systému, ani úroveň výsledků provedené analýzy nebude nikterak závratná. Proto je důležité, aby data, na jejichž základě je model stavěn, byla co nejpřesnější. Vstupní data lze rozdělit do dvou kategorií [1]:

- *data pro tvorbu modelu* – jedná se o data, na jejichž základě vytvoříme nekalibrovaný model, tedy model, který již je schopen hydraulické analýzy, avšak jeho výsledky pravděpodobně nebudou odpovídat skutečnosti. Do této kategorie patří [1]:
 - topologie sítě – údaje polohové, směrové, délkové a výškové,
 - hydraulické parametry – dimenze, materiál a hydraulická drsnost potrubí,
 - údaje o objektech na síti – charakteristiky čerpadel, polohy hladiny ve vodojemech a přerušovacích komorách, nastavení regulačních ventilů, otevření/uzavření uzávěrů atp.,
 - hodnoty odběrů a vtoků do sítě – analýza spotřeby vody,
- *data pro kalibraci modelu* – na základě těchto dat dochází ke zpřesňování parametrů modelu (zpravidla se pracuje s hydraulickou drsností potrubí, ale je možné také „ladit“ rozložení spotřeby) tak, aby výsledky hydraulické analýzy co nejvíce odpovídaly skutečnosti. Jedná se o [1]:
 - data získaná měřením na vybraných prvcích sítě – hodnoty průtoku a tlaku.

Pravidlo „čím přesnější vstupní data, tím lépe“ však neplatí vždy. Vodárenské systémy zahrnují velký počet odběrných míst (přípojek), které z hlediska nároků na výpočetní kapacitu i náročnost přípravy modelu není možné zadávat jako samostatné uzly. Do samostatných uzlů se proto zadávají pouze odběry velkoodběratelů (jedná se například o objekty občanské vybavenosti či průmyslové objekty se spotřebou větší než $0,1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$), a odběry domácností se schematizují. Schematizace odběrů znamená, že se celková spotřeba řešeného spotřebiště (respektive měřicího okrsku), zmenšená o případnou spotřebu velkoodběratelů, rozdělí na základě určitých pravidel do jednotlivých úseků. Odběry, které se realizují v rámci jednoho trubního úseku, se poté stejným dílem rozdělí do jeho krajních uzlů. [1]

Ke schematizaci odběrů se používá dvou metod. Princip obou těchto metod je velmi podobný – u obou metod se každému úseku přiřadí jeden nebo více součinitelů, který ohodnocuje například hustotu či výšku zástavby nebo počet připojených obyvatel v daném úseku a tím vyjadřuje velikost odběru v tomto úseku. Celková spotřeba vody v síti se poté do jednotlivých úseků rozdělí poměrově na základě těchto součinitelů. Jedná se o následující metody: [1]

Metoda redukováných délek:

Výhodou metody redukováných délek je její relativní nenáročnost na úroveň znalostí o síti. Při jejím užití se každý úsek ohodnotí *součinitelem* C_1 ohodnocujícím hustotu a výšku zástavby v tomto úseku. Následně se vypočte redukováná délka úseku: [1]

$$L_r = C_1 \cdot L, \quad (2.16)$$

kde:

L ... skutečná délka úseku.

dále se vypočte *celková redukováná délka sítě* S_r : [1]

$$S_r = \sum_{i=1}^m L_{ir}, \quad (2.17)$$

následně se na základě *celkové spotřeby* Q_c a *redukové délky sítě* S_r pro každý úsek vypočte *specifická spotřeba vody* q_r : [1]

$$q_r = \frac{Q_c}{S_r}. \quad (2.18)$$

Velikost *spotřeby vody* Q_i v daném úseku se nakonec stanoví jako: [1]

$$Q_i = q_r \cdot L_{ir}. \quad (2.19)$$

Metoda dvou součinitelů:

Oproti předcházející metodě je metoda dvou součinitelů náročnější na vstupní data a vyžaduje podrobnější znalosti o síti, respektive přesnější informace o odběrech v jednotlivých úsecích řešené sítě. Jak už název napovídá, každý úsek se při užití této metody ohodnotí dvěma *součiniteli* C_1 a C_2 . *Součinitel* C_1 vychází z plochy zástavby v daném úseku, počtu bytových jednotek nebo dokonce počtu obyvatel v daném úseku. *Součinitel* C_2 pak

vyjadřuje specifickou potřebu vody na účelovou jednotku použitou při stanovení součinitele C_1 . Výsledné *ohodnocení úseku* P_i se stanoví jako součin obou koeficientů: [1]

$$P_i = C_1 \cdot C_2. \quad (2.20)$$

Redukovaná délka sítě S_r se stanoví jako: [1]

$$S_r = \sum_{i=1}^m P_i. \quad (2.21)$$

Následný postup už je stejný jako u metody redukovaných délek – *specifická potřeba vody* q_r pro daný úsek se vypočte dle rovnice 2.18 a velikost *spotřeby vody* Q_i v tomto úseku se stanoví násobením *specifické potřeby vody* q_r v daném úseku a jeho výsledného *ohodnocení* P_i : [1]

$$Q_i = q_r \cdot P_i. \quad (2.22)$$

2.1.2 Typy hydraulické analýzy

Požadavky na kvalitu vstupních dat jsou velkou měrou ovlivněny také zvoleným typem modelu. Obecně lze v hydrodynamice dělit modely dle různých kritérií – např. dle režimu proudění na laminární a turbulentní, dle rozměrovosti úlohy na jedno-, dvoj-, a trojrozměrné, dle povahy vstupních a hledaných veličin na deterministické a stochastické atd [2]. V oblasti modelování tlakových trubních systémů je nejdůležitějším dělením dělení dle časového režimu proudění, a to na modely statické, kvazi-dynamické a dynamické [1]:

- *statická analýza* – řeší ustálené proudění, tedy pouze jeden konkrétní okamžitý zatěžovací stav, který je v čase neměnný. Tímto zatěžovacím stavem může být například odběrová špička, kdy jsou tlaky v síti nejmenší, či naopak nejmenší noční průtok, kdy se tlaky v síti blíží tlaku hydrostatickému, [1]
- *kvazi-dynamická analýza* – je v podstatě posloupnost statických analýz. Tento typ analýzy se již více blíží skutečnosti, neboť ve vodovodní síti se průtok v čase mění. Simulovaný časový úsek bývá delší (dny, týdny) a časové intervaly, na jejichž rozhraní se mění fyzikální parametry, jsou zpravidla hodinové, [1]
- *dynamická analýza* – se zabývá řešením neustáleného proudění. Používá se např. při analýze vodního rázu, při kterém se fyzikální charakteristiky mění ve velmi krátkých časových intervalech, a tedy i časový interval této analýzy je krátký (obvykle v řádech sekund). [1]

V praxi je v současnosti nejvyužívanějším typem modelu kvazi-dynamická analýza.

2.1.3 Podmínky hydraulické analýzy

Při řešení hydraulických modelů je nutno dodržet několik základních podmínek, které vyjadřují základní fyzikální zákony, tedy již zmíněný zákon zachování hmoty, zákon zachování energie a konstitutivní vztahy.

Uzlová podmínka

Tato podmínka vyjadřuje zákon zachování hmoty. Uzlová podmínka tedy říká, že suma všech přítoků do daného uzlu se musí rovnat sumě všech odběrů z tohoto uzlu. Pro každý uzel musí platit: [1]

$$\sum Q = 0. \quad (2.23)$$

Okruhová podmínka

Okruhová podmínka vyjadřuje zákon zachování energie. Říká, že suma ztrátových výšek ve všech úsecích, které tvoří nezávislý okruh, musí být při zvolené okruhové orientaci rovna nule. Pro každý okruh tedy musí platit: [1]

$$\sum h_z = 0. \quad (2.24)$$

Hydraulická podmínka

Hydraulická podmínka jakožto konstitutivní vztah vyjadřuje závislost mezi tlakovou ztrátou a průtokem v daném úseku potrubí. Matematicky ji lze zapsat: [1]

$$h_z = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.25)$$

kde:

h_z	... tlaková ztráta (ztrátová výška),
λ	... součinitel ztrát třením,
L	... délka úseku potrubí,
D	... průměr potrubí,
v	... rychlost proudění,
g	... tíhové zrychlení.

3 KALIBRACE HYDRAULICKÝCH MODELŮ

Stejně jako všechny ostatní matematické modely, i hydraulické modely vodovodních sítí vyžadují k dosažení dobrých výsledků kalibraci. Kalibrace sestává ze stanovení fyzikálních a provozních charakteristik daného systému, jinými slovy jde o nalezení takových hodnot parametrů hydraulického modelu, aby bylo dosaženo požadované shody mezi simulovanými a změřenými hodnotami průtoku a tlaku v síti. [8]

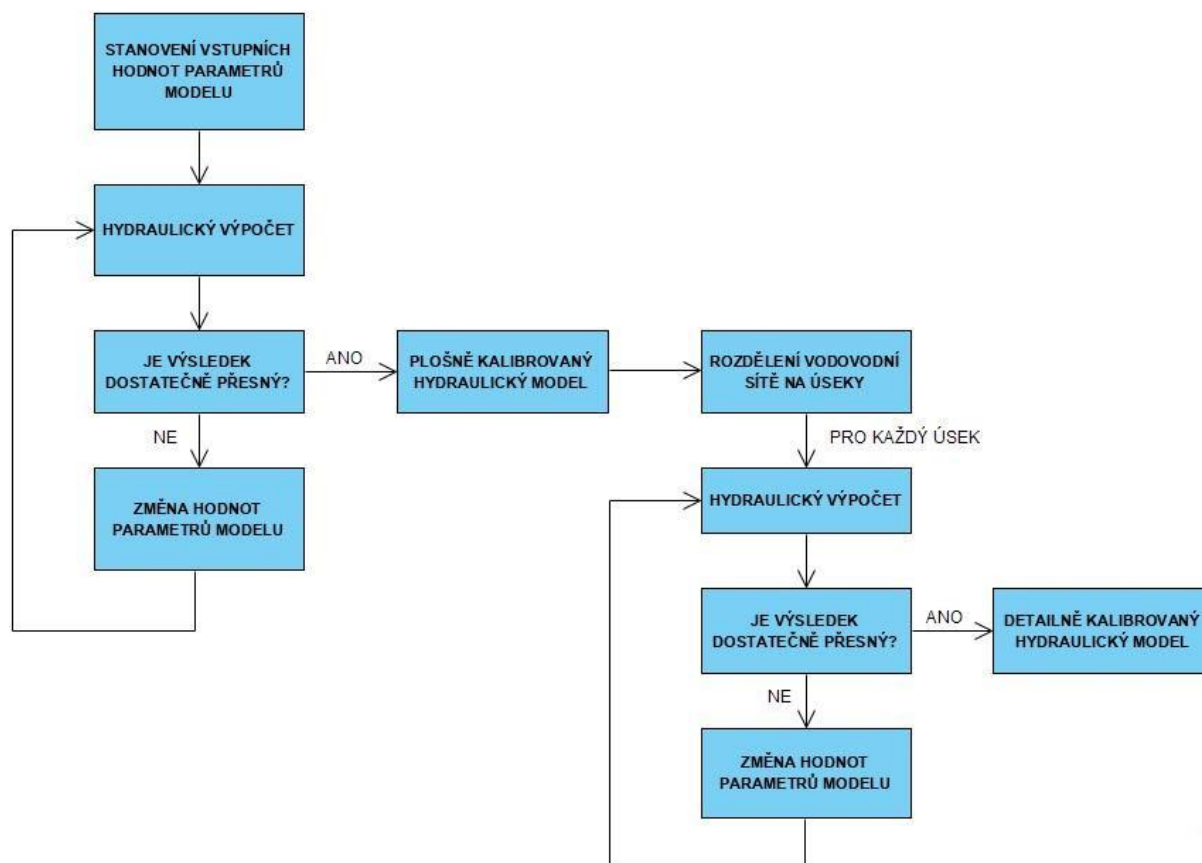
Dle Ormsbeeho lze proces kalibrace rozdělit na sedm kroků: [9]

1. *stanovení účelu modelu* – definování účelu modelu a s ním spojeného typu hydraulické analýzy (statická, kvazi-dynamická, dynamická) je jedním z nejdůležitějších kroků kalibrace, neboť lze předpokládat, že jeden model není vhodný pro všechny účely [8]. Je zřejmé, že například pro prvotní projektování dostačuje provedení statické analýzy pro zatěžovací stav odběrové špičky, kdy tato analýza je daleko méně náročná na vstupní data, zatímco například kvazi-dynamický model kvality vody vyžaduje daleko vyšší přesnost kalibrace a klade i vyšší nároky na množství a kvalitu vstupních dat,
2. *stanovení prvotních hodnot kalibrovaných parametrů modelu* – jedná se o hodnoty uzlových odběrů, a především hydraulické drsnosti potrubí. Uzlové odběry se rozdělí dle jedné z výše zmíněných metod, hodnoty hydraulické drsnosti je možné stanovit terénním měřením anebo dle tabulek,
3. *sběr kalibračních dat* – aby bylo možné model kalibrovat, je nutné provést měrnou kampaň a získat tak informace o skutečných průtocích a tlacích v síti. Měrná kampaň může zahrnovat pouze běžný provoz sítě, kdy se zpravidla stávající kontinuální měření průtoku na objektech sítě doplní o tlaková čidla ve vybraných bodech, ale může se jednat také o hydrantové testy naplánované za tímto účelem, které umožní kalibraci modelu pro větší rozsah zatěžovacích stavů,
4. *zhodnocení výsledků modelu* – po provedení hydraulické analýzy s prvotně stanovenými parametry se provede porovnání s daty získanými měrnou kampaní. Výsledky hydraulické analýzy lze hodnotit na základě absolutní nebo relativní odchylky průtoku, tlaku či kóty tlakové čáry. Neexistuje pevně stanovená hranice, která by udávala, kdy lze výsledky modelu považovat za dostatečně dobré, dle Ormsbeeho by však odchylka neměla překračovat 5-10 %, [10]
5. *kalibrace na makroúrovni* – pokud se stane, že výsledky hydraulické analýzy se od měřených hodnot významně liší (zpravidla o 20 % a více), je to pravděpodobně způsobeno hrubými chybami ve vstupních datech, tedy nikoliv špatně stanovenou hodnotou hydraulické drsnosti a rozdělením uzlových odběrů. Může se jednat o chybně zadané charakteristiky čerpadel či úrovně hladin ve vodojemech, dále o nesprávné dimenze a délky potrubí, špatně stanovené hranice tlakových pásem nebo mylně určené otevřené/uzavřené uzávěry. Kalibrací na makroúrovni se pak rozumí systematická kontrola vstupních dat s cílem nalezení a odstranění příčiny významné odchylky, [10]

6. *citlivostní analýza* – provedení citlivostní analýzy modelu poskytuje přehled o vlivu jednotlivých vstupních parametrů na výsledky simulace. Její provedení spočívá v aplikování různých hodnot parametrů modelu a sledování a vyhodnocování výsledků simulace. Přehled získaný díky citlivostní analýze se pak uplatní při následné mikrokalibraci, neboť je známo, které parametry mají největší vliv na velikost výsledné odchylky a je možné se na jejich „vyladění“ více zaměřit,
7. *kalibrace na mikroúrovni* – jakmile jsou z modelu odstraněny hrubé chyby, následuje kalibrace na mikroúrovni. V této fázi kalibrace jsou dvěma měněnými parametry hydraulická drsnost potrubí a rozložení spotřeby (uzlové odběry). Dle Ormsbeeho je vhodné rozdělit tuto fázi kalibrace na dvě části – statickou a kvazi-dynamickou kalibraci. Při provádění statické kalibrace by měly být modelované tlaky a průtoky porovnávány s daty získanými pomocí hydrantových testů. Výsledky této kalibrace jsou citlivější na změny v hodnotě drsnosti. Při kvazi-dynamické kalibraci by pak měly být simulované hodnoty porovnávány s časově proměnnými hodnotami tlaků a průtoků, změřenými během běžného provozu sítě. Tato část kalibrace je citlivější na změny v rozdělení spotřeby. Ormsbee tedy jako nejvhodnější kalibrační strategii navrhuje nejprve stanovit hodnoty hydraulické drsnosti na základě měření z hydrantových testů a následně jemně doladit rozdělení spotřeby pomocí měření z běžného provozu sítě. [10]

Definovat, kdy je model uspokojivě nakalibrován, není snadné. Uspokojivá „míra shody“ často závisí na kvalitě vstupních dat, jako je nadmožská výška hydrantů. Pokud je totiž nadmožská výška špatně stanovena, ani při kalibraci na základě tlaků změřených v daných hydrantech nebude možno dosáhnout shody. Kalibraci také komplikuje například fakt, že poloha hladiny ve vodojemu se může v čase výrazně měnit. Velmi důležité je i správné nastavení prvků, jako jsou čerpadla nebo redukční ventily. Závisí také na samotném tvůrci hydraulického modelu, kolik úsilí je do kalibrace schopen a ochoten vložit. V současné době platí obecný konsensus, že model je možno považovat za uspokojivě kalibrováný, pokud rozdíl mezi vypočtenými a měřenými hodnotami tlaků je ± 1 m vodního sloupce.

Na následujícím obrázku je patrné schéma, dle kterého byla provedena kalibrace v praktické části této diplomové práce. Zvolený postup vycházel z metodiky kalibrace navržené Kovářem a Ručkou v [11]. Proces byl rozdělen na dvě úrovně – v první fázi byla provedena *plošná* kalibrace hydraulického modelu, tedy kalibrace na běžný provozní stav. V této fázi byly kalibrovány především hrubé chyby jako poloha hladiny ve vodojemu nebo nastavení výstupních hodnot tlaku u redukčních ventilů. Kalibrace byla prováděna postupně vždy pro jedno tlakové pásmo. Ve druhé fázi pak byla provedena *detailní* kalibrace, při níž byl model kalibrován na vysoké rychlosti proudění. Zpřesňovány byly hodnoty hydraulické drsnosti a také dimenze potrubí. Vodovodní síť byla rozdělena na jednotlivé úseky a kalibrace byla prováděna postupně vždy pro jeden z těchto úseků – postupovala od vodojemu směrem k nejbližšímu bodu sítě.



Obr. 2: Schéma průběhu kalibrace

3.1 KALIBROVANÉ PARAMETRY

Jak bylo zmíněno výše, při mikrokalibraci neboli jemném ladění modelu, se zpravidla kalibrují dva parametry – hydraulická drsnost potrubí a rozdělení spotřeby.

Při rozdělování spotřeby vody se vychází z analýzy spotřeby vody, provedené na základě dlouhodobých měření provozovatele sítě (zpravidla se jedná o data za jeden kalendářní rok). Ze statisticky zpracovaných dat se pro jednotlivé měrné okrsky stanoví průměrný průtok Q_p a v případě kvazi-dynamické analýzy také křivky sestávající z hodinových koeficientů spotřeby vody. Odběry jsou do jednotlivých úseků potrubí rozdělovány na základě metod zmíněných v kapitole 2.1.1.

Problematictější je stanovení hodnoty hydraulické drsnosti potrubí, které s sebou nese velkou nejistotu. Tato práce se tedy proto dále nezabývá rozdělením spotřeby, nýbrž kalibrací modelu za účelem stanovení hydraulické drsnosti potrubí.

3.1.1 Hydraulická drsnost potrubí

Jelikož žádné potrubí nelze vyrobit dokonale hladké, zavádí se pojem drsnost potrubí. Pod ním se rozumí nerovnosti na stěně potrubí a také změny těchto nerovností v důsledku stárnutí materiálu, koroze, zanášení či deformací potrubí. Drsnost potrubí tedy záleží především na materiálu potrubí a způsobu jeho výroby, avšak určitý vliv má také charakter dopravované

kapaliny a charakter proudění, které mohou způsobovat například otěr potrubí nebo naopak jeho zanášení. [12]

Pokud hovoříme o drsnosti potrubí, představíme si výšku výčnělků na stěnách potrubí. Jedná se o *absolutní drsnost* potrubí k (někdy též označováno Δ) uváděnou v jednotkách délky, zpravidla milimetrech. Jelikož ale u skutečných potrubí se jednotlivé výčnělky liší svým tvarem, velikostí, hustotou či rozmístěním a poměrným zastoupením na stěnách potrubí, lze s hodnotou absolutní drsnosti uvažovat pouze u homogenního ostrohranného písku. V praxi se zavádí pojem *hydraulická drsnost* potrubí, kdy hodnota drsnosti k uvažovaného potrubí značí velikost homogenního ostrohranného písku, který by způsobil stejné ztráty, jako nehomogenní výčnělky v daném potrubí. [7]

Vodovodní síť považujeme za hydraulicky dlouhé potrubí, to znamená, že u něj ztráty třením po délce vysoce převyšují místní ztráty. Při kalibraci hydraulických modelů vodovodních sítí by navíc bylo neúměrně náročné zohledňovat místní ztráty na každé jedné armatuře či tvarovce, která se v síti nachází, a proto jsou do hodnoty hydraulické drsnosti při kalibraci hydraulického modelu promítnuty také tyto ztráty.

Ztráty třením však nejsou závislé na hodnotě absolutní ani hydraulické drsnosti. Pro určení vlivu povrchu potrubí na velikost ztrát je rozhodující *relativní drsnost* potrubí, což je bezrozměrné číslo, dané jako poměr absolutní (hydraulické) drsnosti k průměru potrubí. [7]

Z obrázku 3 a 4 je patrné, že k zanášení dochází jak u kovových, tak i u plastových potrubí. Dle Koláře a kol. [7] může hodnota drsnosti potrubí dosahovat hodnot od 0,001 až po 60 mm (viz tab. 1) v závislosti na materiálu a stáří potrubí. Při hydraulickém modelování je však třeba si uvědomit, že při navyšování hydraulické drsnosti do takto vysokých hodnot, aniž by se zmenšoval průměr potrubí, sice dochází ke zvyšování ztrát, avšak nemění se rychlost proudění, která závisí na dimenzi potrubí. Tím může docházet k velkým chybám například při modelování šíření znečištění ve vodovodní síti. Je proto otázkou, do jaké míry ještě zvyšovat hodnotu hydraulické drsnosti a kdy již přistoupit ke zmenšení průměru potrubí.



Obr. 3: Zanášení plastového potrubí [13]



Obr. 4: Zanášení kovového potrubí [14]

Tab. 1: Hodnoty součinitele hydraulické drsnosti potrubí k [7]

Povrch	k [mm]		
	min	střed	max
Potrubí mosazná, olovená, měděná, skleněná, z plastických hmot	0.001	0.002	0.003
Ocelová potrubí tažená nenatřená	0.015	0.03	0.09
Ocelová potrubí tažená s novým živičným nátěrem	0.002		0.006
Ocelová potrubí tažená slabě inkrustovaná	0.25		0.80
Ocelová potrubí tažená silně inkrustovaná		3.0	
Litínová potrubí nová nenatřená	0.15	0.30	0.60
Litínová potrubí v provozu		1.4	
Vodovodní potrubí stará, korodovaná nepatrně*	0.6	1.5	3.0
Vodovodní potrubí stará, korodovaná mírně*	1.5	3.0	6.0
Vodovodní potrubí stará, korodovaná značně*	6.0	15.0	30.0
Vodovodní potrubí stará, korodovaná velmi značně*	15.0	30.0	60.0
*Poznámka: Hodnoty min. platí pro stáří asi 20 let, střed pro 40-50 let a max. pro 80-100 let			

3.2 PLÁNOVÁNÍ A REALIZACE MĚRNÉ KAMPANĚ

Činností, která ke kalibraci hydraulických modelů neodmyslitelně patří, je terénní sběr dat neboli měrná kampaň. Provedení měrné kampaně však musí předcházet její naplánování.

Obecně lze říct, že cílem návrhu měrné kampaně pro potřebu kalibrace hydraulického modelu je stanovit, které parametry modelu je třeba měřit (tlak, průtok, jakost vody), kde v řešeném systému je měřit, kdy je měřit (ve smyslu délky a případně frekvence opakování měření) a za jakých podmínek je měřit (při hydrantových testech, zatěžovacím stavu odběrové špičky atp.). Snahou by mělo být naplánovat měrnou kampaň tak, aby získaná data umožňovala dosáhnout při kalibraci co největší shody se skutečným stavem sítě, ale zároveň aby cena měrné kampaně nebyla přehnaně vysoká. Toho by mělo být dosaženo například tím, že data nebudou sbírána v době, kdy je rychlost proudění a z ní vyplývající velikost tlakové ztráty v rozsahu chyby měření. Stejně tak je třeba se při plánování měrné kampaně vyhnout zbytečnému sběru dat, která jsou již obsažena v jiném měření. [8]

Prvním, kdo formuloval základní pravidla pro sběr dat byl Walski. Definoval následující: [15]

- a) měření tlaku by mělo být umístěno poblíž uzlů s vysokým odběrem,
- b) měření tlaku by mělo být umístěno v koncových částech sítě, vzdálených od uzlů se známým tlakem,

- c) ve zvolených hydrantech by měly být provedeny hydrantové testy, při nichž by mělo být dosaženo největšího možného průtoku,
- d) společně s měřením tlaku by měl být měřen také průtok.

Problematika návrhu měrné kampaně se stala předmětem zkoumání mnohých vědců, kteří k ní přistupují jako k multi-objektivní optimalizační úloze. Tato metoda by mohla umožnit nalezení vhodného kompromisu mezi výslednou přesností modelu a cenou sběru dat, avšak v praktických aplikacích není využívána, pravděpodobně kvůli absenci vhodných, uživatelsky přívětivých softwarových nástrojů. V praxi je návrh měrné kampaně založen spíše na znalostech, zkušenostech a citu řešitele. [8]

3.2.1 Dvofázová měrná kampaň a kalibrace

Stejně jako návrh měrné kampaně, i samotná kalibrace je v současnosti při praktických aplikacích prováděna na základě zkušeností řešitele, dá se říct metodou pokus-omyl. Při kalibraci dochází ke zvětšování drsnosti, případně zmenšování dimenze potrubí tak, aby modelované hodnoty hydrodynamického tlaku napříč vodovodní sítí co nejvíce odpovídaly hodnotám měřeným. Přitom se předpokládá, že skutečné nastavení sítě, tedy otevření či uzavření uzávěrů, odpovídá informacím zaneseným v geografických informačních systémech provozovatele. Sophocleous a kol. však upozorňují, že tento předpoklad je velmi často mylný, neboť v průběhu let docházelo k opravám poruch, rekonstrukcím či dostavbám vodovodní sítě, při nichž mohlo dojít k náhodnému ponechání například uzavřeného šoupěte, a tato skutečnost nebyla odhalena, natož zaznamenána. Tato nepřesnost pak vede k hrubým chybám v hydraulickém modelu. [16]

Sophocleous a kol. zdůrazňují velký význam těchto chyb především v souvislosti s vysoce přesnými modely, které mají sloužit k detekci úniků vody, u nichž je velmi důležité, aby jak modelované průtoky, tak i tlaky, co nejpresněji odpovídaly těm měřeným. [16]

Díky současnému přístupu ke kalibraci také není možné využít plný potenciál moderní měřicí techniky, kdy v případě některých přístrojů chyba měření dosahuje pouze hodnoty 0,1 % měřicího rozsahu, což například u tlakových čidel s rozsahem 10 bar představuje pouze $\pm 0,1$ m, avšak přesnost, se kterou se následně kalibruje hydraulický model je až o řád nižší. [16]

Sophocleous a kol. navrhuje kalibraci založenou na multikriteriální optimalizaci, jíž předchází dvofázová měrná kampaň. Tato měrná kampaň sestává ze dvoudenních hydrantových testů na vybraných hydrantech. Testy je třeba provádět v noci, neboť v době od půlnoci do přibližně páté hodiny jsou odběry obyvatelstva a občanské vybavenosti, které jsou značně proměnlivé v čase i prostoru, nejnižší. Při hydrantovém testu se realizuje odběr přesně známé velikosti na přesně známém místě, čímž se snižuje vliv nejistot. [16]

V první fázi dvoudenní měrné kampaně se sbírají data za účelem odhalení neidentifikovaných uzavřených/otevřených uzávěrů. Následující pracovní den jsou data vložena do hydraulického modelu, a pokud dojde k odhalení mylně identifikovaného uzávěru, ještě týž den se provede verifikace v terénu, jinými slovy se ověří, zdali je identifikace správná. Následně je možné

provést změnu nastavení daného uzávěru v modelu tak, aby odpovídal skutečnosti, nebo naopak manipulovat s daným uzávěrem přímo na síti tak, aby jeho nastavení odpovídalo stavu, který je zapsán v geografickém informačním systému provozovatele. Ve druhé fázi měrné kampaně se pak sbírají data pro samotnou kalibraci hydraulického modelu. [16]

Sběr dat za pomoci hydrantových testů má však také svá úskalí, se kterými je třeba počítat, pokud se rozhodneme pro jejich realizaci. Je třeba si uvědomit, že ve vodovodní síti dochází vlivem nízkých rychlostí proudění k sedimentaci jemných částic, tedy ke vzniku nepevněného sedimentu. Tento sediment může být rozlišného původu a složení. Často se jedná o částice vzniklé korozi kovových produktů, tvorbou a následným rozpadem biofilmu, doběhem chemických procesů úpravy vody jako jsou srážení a koagulace, vniknutím materiálu z vnějšího prostředí při opravách poruch nebo vlivem netěsností potrubí. Sediment může obsahovat například anorganické látky jako železo či mangan, organické látky nebo mikroorganismy (bakterie, viry, prvoky) a další. [17,18]

Při běžném provozu, který je charakterizován přibližně týdenní pravidelností odběrů vody v jednotlivých částech vodovodní sítě, se jemné částice průběžně usazují a znovu přecházejí do vzhledu, aniž by docházelo k ovlivnění jakosti vody. [18] Velikost sedimentované vrstvy je omezena maximálním hodinovým průtokem. Pro provádění hydrantových testů je však používán průtok, který vysoce převyšuje maximální hodinový průtok a dochází ke změně hydraulického režimu – zvýšení rychlosti proudění a s tím spojenému zvýšení hodnoty smykového napětí. Důsledkem toho je narušení sedimentované vrstvy a rozvíření sedimentů v proudu vody, spojené se zhoršením ukazatelů jakosti vody. Tento jev se nazývá zákalová událost.

Pokud tedy hydrantové testy mají posloužit jako měrná kampaň za účelem měření průtoku a tlaku ve vodovodní síti, je třeba důkladné naplánování této kampaně, aby se předešlo výše popsaným komplikacím, které by měly přímý dopad na spotřebitele. Možnými opatřeními jsou například provedení měrné kampaně v noci, kdy jsou odběry spotřebitelů minimální nebo spojení kampaně s provedením řízeného proplachu vodovodní sítě.

3.2.2 Dvofázová kalibrace hydraulických modelů

Jak již bylo zmíněno výše, hydraulické modely, od nichž se vyžaduje nejvyšší přesnost, jsou ty, jež mají sloužit k lokalizaci úniků vody. Na takovém modelu proto Sophocleous a kol. [19] porovnávali úspěšnost jednofázové a dvofázové kalibrační metody. Pro kalibraci zároveň využívali dat získaných pomocí dvofázového terénního měření.

Dvofázová kalibrace je definována jako nelineární optimalizační úloha s jedinou kriteriální funkcí – cílem je za pomoci vážené metody nejmenších čtverců minimalizovat rozdíl mezi měřenými a vypočtenými hodnotami hydraulických veličin. Jako optimalizační nástroj pak slouží genetický algoritmus NSGAI. [19]

Při kalibraci za účelem detekce úniku vody jsou kalibrovanými parametry uzávěry, jejichž stav může být potenciálně špatně identifikován, dále pak hydraulická drsnost potrubí a velikost koeficientu emitoru úniku vody, tedy koeficientu, který vyjadřuje závislost velikosti úniku na tlaku v síti. [19]

Před provedením samotné kalibrace je také vhodné zařazení analýzy topologie sítě spojené s citlivostní analýzou. Na základě analýzy topologie se vyloučí uzly a úseky, jejichž stav je znám, a proto není třeba je kalibrovat (například uzly a úseky, v nichž byl měřen průtok či tlak) nebo takové uzly a úseky, jejichž stav není možno na základě dostupných měření popsat (větvevnaté úseky sítě, na jejichž konci nebylo umístěno měření tlaku). Díky této předpřípravě je možné zmenšit počet parametrů pro kalibraci a vyhnout se simulaci řešení, která nemají žádný vliv na přesnost modelu, jinými slovy se významně zmenší prostor přípustných řešení. [19]

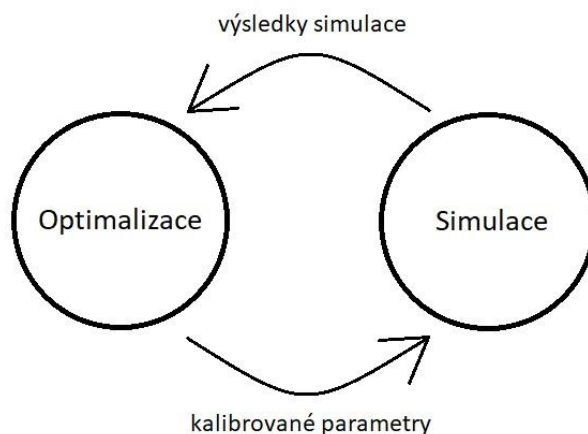
Při jednofázové kalibraci jsou všechny kalibrované parametry hledány současně. Dvoufázová kalibrace je pak rozdělena na dvě části, při nichž jsou řešeny dvě rozdílné optimalizační úlohy. V první fázi jsou na základě měřených hydraulických veličin kalibrovány pouze uzávěry s neznámým stavem, aby byl definován jejich skutečný stav – cílem je určit správnou topologii řešené sítě. Jakmile topologie řešeného hydraulického modelu odpovídá skutečnému stavu vodovodní sítě, přistoupí se ke druhé fázi kalibrace, v níž se optimalizují hodnoty koeficientů emitoru a hydraulické drsnosti potrubí. [19]

Ze studie [19] vyplývá, že při použití jednofázové metody jsou výsledky kalibrace falešně pozitivní. I přes zdánlivou minimalizaci hodnoty účelové funkce nebyl správně kalibrován stav uzávěrů, drsnost potrubí ani hodnoty koeficientu emitoru. Naopak dvoufázová metoda kalibrace dává výsledky dobré – stav uzávěrů byl stanoven bezchybně a hodnoty koeficientu emitoru se blížily skutečným, pouze hydraulická drsnost potrubí se lišila.

Dvoufázová metoda je tedy použitelná pro skutečné vodovodní sítě, avšak její přesnost závisí na počtu a umístění dostupných měření. Velký význam má také samotný sběr dat. Jelikož jsou díky vyšším tlakům ve vodovodní síti úniky největší během časového úseku s nejnižší spotřebou vody, sběr dat metodou popsanou výše, tedy pomocí hydrantových testů, způsobí zvýšení tlakových ztrát způsobených chybami v topologii nebo úniky, čímž dojde ke zvýraznění daných anomálií. To ve spojení s moderními optimalizačními metodami vede ke kvalitnější kalibraci hydraulických modelů. [19]

3.3 NÁSTROJE PRO KALIBRACI

Pro kalibraci hydraulických modelů se dnes začíná využívat optimalizačních metod. Pod pojmem optimalizace rozumíme postupnou modifikaci systému, která vede k nalezení nejlepšího možného řešení. Jinak řečeno se jedná o snahu nalézt takové hodnoty parametrů modelu, pro něž účelová funkce nabývá extrému (maxima nebo minima). Prakticky si lze proces optimalizace představit následovně: v prvním kroku přiřadíme hledaným parametrům počáteční hodnotu (například potrubí přiřadíme hodnotu hydraulické drsnosti stanovenou z tabulek) a provedeme simulaci. Simulační model předá výsledek zpět optimalizačnímu nástroji, který jej vyhodnotí, a pokud výsledek nedosahuje požadované přesnosti, stanoví nové hodnoty kalibrovaných parametrů, které jsou vstupem pro další simulaci. Tento cyklus se opakuje, dokud hodnota účelové funkce nedosáhne požadovaného extrému. Při kalibraci hydraulických modelů se jako účelová funkce zpravidla používá metoda nejmenších čtverců, jejíž pomocí se minimalizuje rozdíl mezi měřenými a simulovanými hodnotami. Princip fungování optimalizačních metod je schematizován na obr. 5. [8]



Obr. 5: Princip optimalizační metody kalibrace [20]

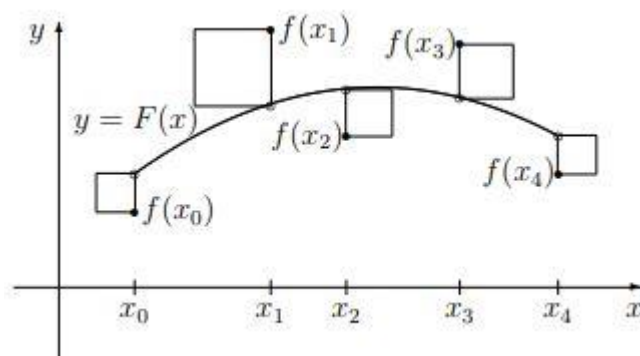
Pro optimalizaci v současnosti existuje celá řada optimalizačních metod. Následuje výčet některých z těch, jež byly v minulosti využity pro kalibraci hydraulických modelů.

3.3.1 Metoda nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců je matematická aproximační metoda, která slouží k řešení přeuročitých systémů rovnic. Nejjednodušším příkladem jejího použití je proložení naměřených dat přímkou, avšak data lze prokládat také parabolou, obecným polynomem daného stupně apod. Všeobecně lze říct, 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: [20]

$$(F(x_0) - f(x_0))^2 + \dots + (F(x_n) - f(x_n))^2 = \min \quad (3.1)$$

Grafické znázornění metody nejmenších čtverců je na obr. 6.



Obr. 6: Metoda nejmenších čtverců [21]

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 slouží účelová funkce, tedy metoda nejmenších čtverců, jejíž pomocí nalezneme minimální hodnotu součtu plochy čtverců odchylek měřených bodů od ideální křivky. [20]

3.3.2 Genetické algoritmy

Genetické algoritmy se používají především k řešení multi-kriteriálních optimalizačních úloh. K nalezení řešení daného problému využívají 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. Selekcce znamená výběr vhodného řešení ke křížení. Pod pojmem křížení si můžeme představit tvorbu nového řešení spojením dvou již existujících, to znamená, že si dva vybraní jedinci z populace vymění navzájem část svého kódu. Mutace je náhodná změna existujícího řešení – díky mutaci nejsou genetické algoritmy náchylné na uváznutí v lokálním optimu. Ohodnocení kvality daného jedince, tedy daného řešení, se provádí pomocí účelové funkce. Ta má tedy velký vliv na to, kteří jedinci zůstanou v populaci. Jako účelová funkce se používá již zmíněná metoda nejmenších čtverců. [20,22]

Non-dominated sorting genetic algorithm II

Genetický algoritmus NSGA-II je nástupcem algoritmu NSGA, který byl jedním z prvních multi-objektivních genetických algoritmů. Jeho nevýhodou byla zejména absence elitismu a velká výpočetní náročnost rozdělení populace do úrovní nedominovaných množin řešení. Tyto nedostatky byly opraveny v algoritmu NSGA-II. Ten již implementuje elitismus, tedy mechanismus genetického algoritmu, díky kterému je možné ponechat nejlepší nalezená řešení v dané generaci pro další generace, aniž by u nich došlo k selekci, křížení či mutaci. NSGA-II dále využívá soutěžní selekci, což znamená, že jedinci pro křížení jsou voleni z „listiny vítězů“ – množiny řešení, která byla vytvořena z náhodně zvolených jedinců, kteří mezi sebou soutěží o umístění v této listině. Jelikož jsou geny vybraných jedinců nadále děděny, je snaha, aby „listina vítězů“ byla složena z dobrých jedinců. [23]

Pojem *nedominovaný* genetický algoritmus se váže k vícerozměrovosti řešené úlohy. Pokud řešíme úlohu s více kriteriálními funkcemi, výsledkem by mělo být vícero vhodných řešení, která zároveň splňují všechny omezující podmínky. Neplatí však, že všechna vhodná řešení jsou optimální. Optimální řešení, tedy řešení, která jsou v něčem výjimečná, se dále dělí na *dominovaná* a *nedominovaná*. *Nedominované* řešení je takové řešení, které je ve všech hodnotách kriteriálních funkcí lepší než jiné řešení. Pokud však je řešení v hodnotě několika kriteriálních funkcí lepší než jiné řešení, ale alespoň v jedné je horší, nelze jasně určit, které z daných řešení je lepší. Výsledkem *nedominovaného* genetického algoritmu je tedy množina (populace) pareto-optimálních řešení pro než platí, že žádné řešení z nedominovaného souboru nemůže dominovat jiné řešení z tohoto souboru. [23]

Zjednodušený popis funkce algoritmu NSGA-II je tedy následující: v prvním kroku dojde k náhodnému vygenerování mateřské populace. Ta je následně seřazena podle

nedominovaných úrovní a každé řešení je ohodnoceno. Mateřská populace je dále podrobena selekci, křížení a mutaci, čímž je vytvořena populace potomků. Celý postup je opakován pro počet generací, který je předem daný. [23]

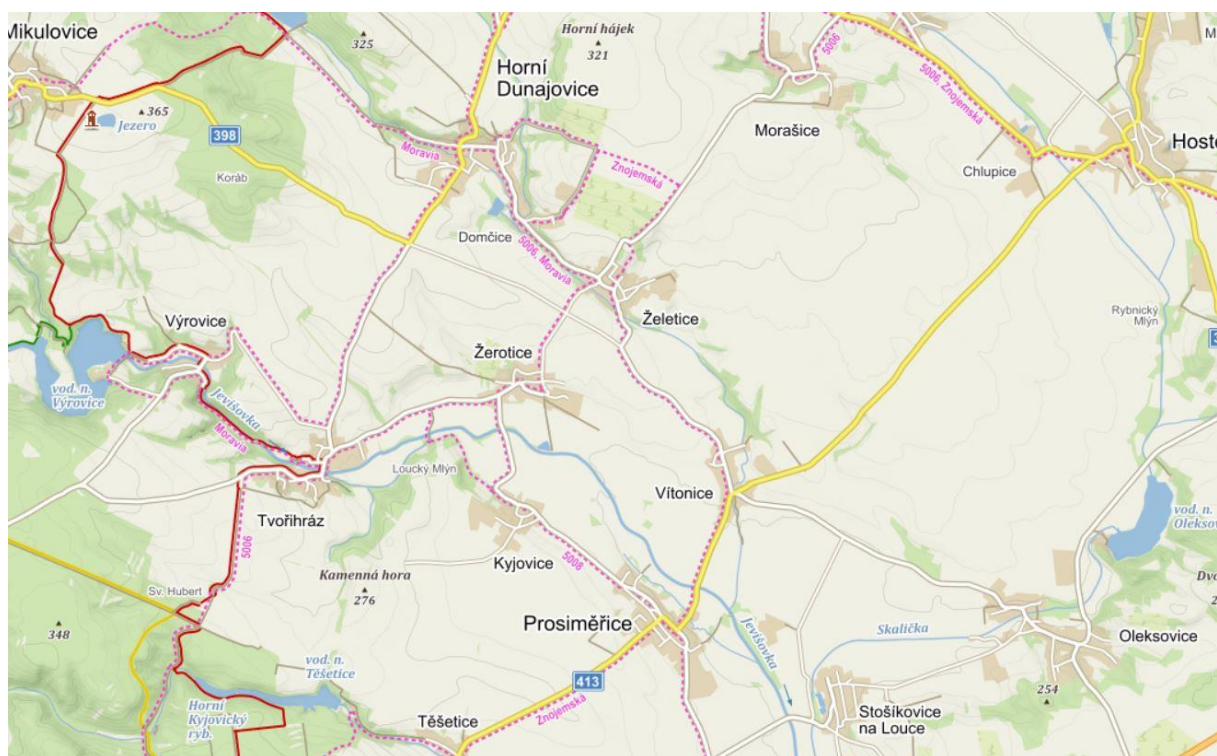
Genetický algoritmus NSGA-II byl pro kalibraci hydraulického modelu použit například zde [19] a je v současnosti pro kalibraci hydraulických modelů využíván asi nejčastěji.

4 KALIBRACE HYDRAULICKÉHO MODELU SKUPINOVÉHO VODOVODU HORNÍ DUNAJOVICE

4.1 CHARAKTERISTIKA ŘEŠENÉ LOKALITY

4.1.1 Zájmové území

Zájmovým územím jsou obce Horní Dunajovice, Želetice, Žerotice, Kyjovice a Vítonice, které jsou společně zásobovány pitnou vodou ze skupinového vodovodu Horní Dunajovice. Tyto obce se nacházejí v Jihomoravském kraji, v okrese Znojmo. Zájmová lokalita se nachází ve vzdálenosti přibližně 12 km severovýchodně od města Znojma. Ke dni 1. 1. 2019 žilo v těchto pěti obcích dle údajů Českého statistického úřadu celkem 1653 obyvatel.



Obr. 7: Situace širších vztahů – obce Horní Dunajovice, Želetice, Žerotice, Kyjovice a Vítonice

Obce se v území rozprostírají od severu k jihu. Morfologicky se jedná o členitou oblast, nadmořská výška terénu v lokalitě se pohybuje v rozmezí přibližně od 200,00 m n. m. do 275,00 m n. m.

Recipientem povrchových vod je vodní tok Křepička, protékající částečně intravilánem a částečně extravilánem obcí Horní Dunajovice, Želetice a Vítonice, který se dále vlévá do vodního toku Jevišovka. Ten je zároveň recipientem povrchových vod pro obce Žerotice a Kyjovice. Na jižním okraji intravilánu obce Horní Dunajovice se dále nachází Domčický rybník, který je využíván k rekreaci a rybolovu.

Obcemi prochází místní komunikace, několik silnic III. třídy a dále v obci Horní Dunajovice silnice II. třídy číslo II/398 a v obci Vítonice silnice II. třídy číslo II/413. Obce v zájmové lokalitě nejsou napojeny na železniční trať.

4.1.2 Charakteristika spotřebišť

Charakter zástavby v řešené lokalitě je typicky venkovský. Většina nemovitostí napojených na skupinový vodovod Horní Dunajovice jsou rodinné domy a dále se jedná o několik bytových domů, které jsou nejvýše dvoupodlažní. Odběratelé vody charakteru občanské vybavenosti jsou mateřská a základní škola Horní Dunajovice, základní škola Želetice, obecní úřady všech zásobovaných obcí a dále menší soukromé provozovny. V obcích se nenachází žádný velkoodběratel se spotřebou větší, než $0,1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, největší podíl na spotřebě vody tvoří spotřeba domácností.

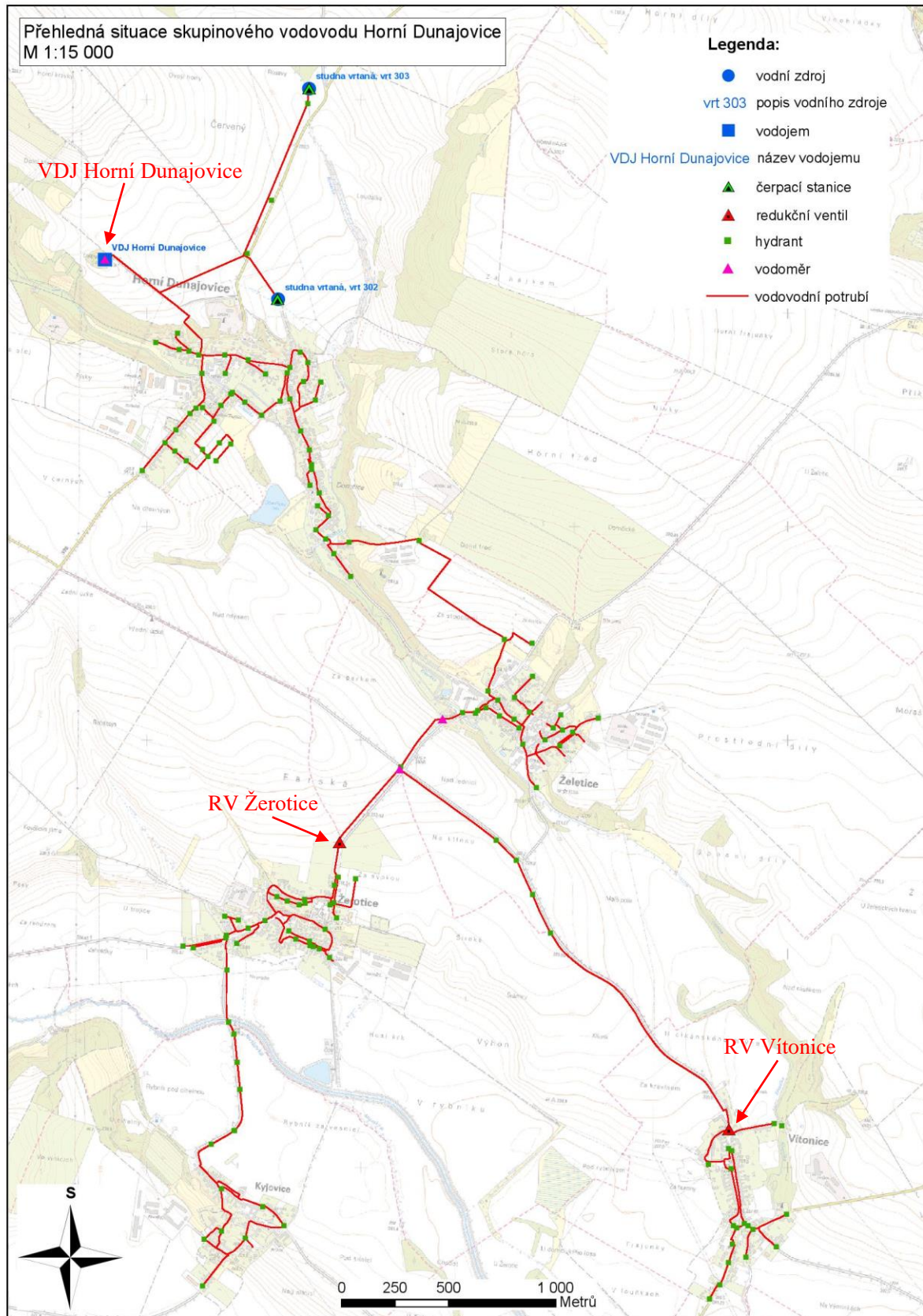
4.1.3 Skupinový vodovod Horní Dunajovice

Vodním zdrojem skupinového vodovodu Horní Dunajovice jsou vrty HV302 s vydatností $Q = 1,1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a HV303 s vydatností $Q = 6,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Tyto vrty leží severovýchodně od obce Horní Dunajovice. Jímaná voda z obou zdrojů se čerpá do zemního vodojemu Horní Dunajovice o objemu $2 \times 400 \text{ m}^3$, s horní provozní hladinou na kótě 285,22 m n. m.

Výtlačný řad, kterým je voda dopravována do VDJ Horní Dunajovice, byl vybudován v roce 1994 z potrubí PVC DN160 a jeho délka je 2,2 km. Z vodojemu je voda do sítě dopravována gravitačně. Skupinový vodovod byl budován postupně až do roku 2004, převládajícím materiálem je PVC o vnějších průměrech 225, 160, 110, 90, 63 a 50 mm. V malé míře je zastoupeno i PE potrubí.

Skupinový vodovod je rozdělen do tří tlakových pásem. První tlakové pásmo zásobuje obec Horní Dunajovice a Želetice, a tlakové poměry v něm jsou řízeny polohou hladiny ve VDJ Horní Dunajovice. Druhé tlakové pásmo je tvořeno obcemi Žerotice a Kyjovice, tlak v něm je regulován pomocí RV Žerotice. Jedná se o regulační ventil HAWIDO s nastaveným konstantním výstupním tlakem. Poslední, tedy třetí tlakové pásmo zásobuje obec Vítonice. Tlak je regulován pomocí RV Vítonice – regulačního ventilu CLA-VAL s nastaveným konstantním výstupním tlakem.

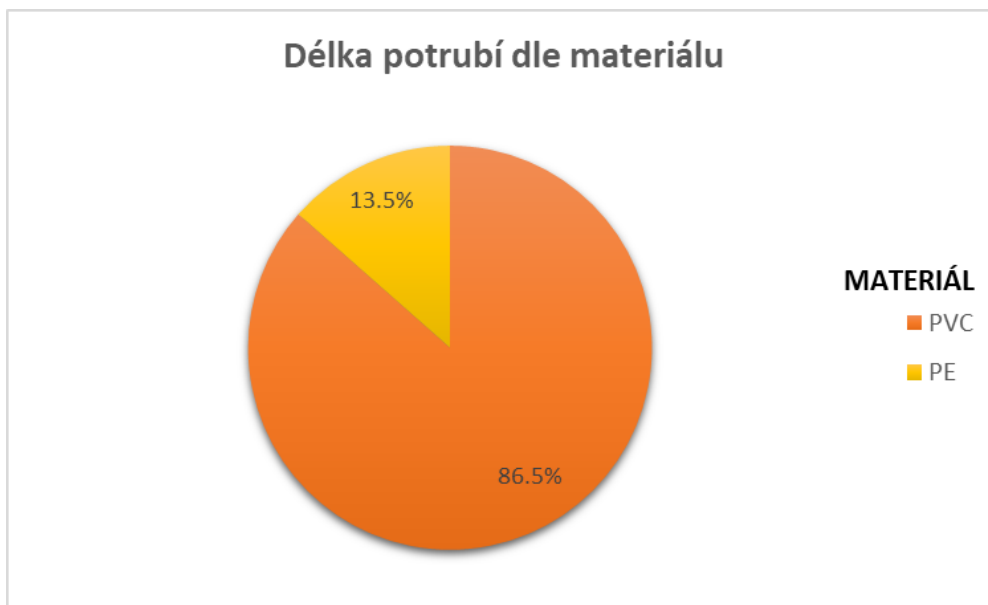
Celková délka vodovodní sítě včetně výtlačného řadu je 23 794 m. Délky jednotlivých dimenzí vodovodu dle materiálu (bez přípojek a vnitřních vodovodů) jsou uvedeny v tab. 2. Zastoupení jednotlivých dimenzí a materiálů je dále graficky reprezentováno v grafech 1 a 2. Na obrázku 8 je přehledná situace skupinového vodovodu. Situace skupinového vodovodu Horní Dunajovice je také odevzdána samostatně jako příloha 1.



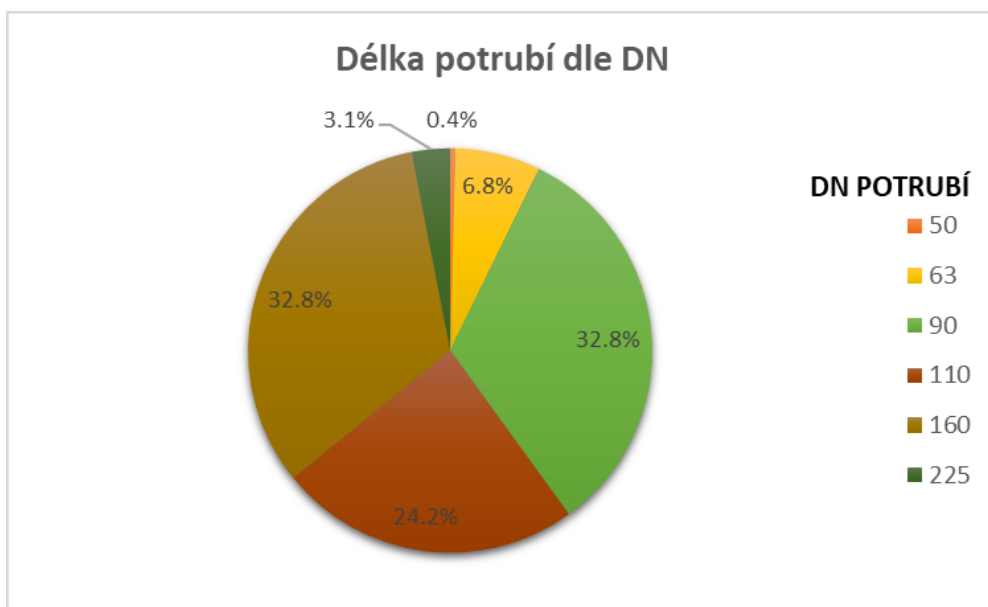
Obr. 8: Přehledná situace skupinového vodovodu Horní Dunajovice

Tab. 2: Délka potrubí dle dimenze a materiálu

Materiál / DN	225	160	110	90	63	50
PE	0	0	13	1771	1334	96
PVC	729	7800	5735	6022	294	0



Graf 1: Rozdělení potrubí dle jednotlivých materiálů

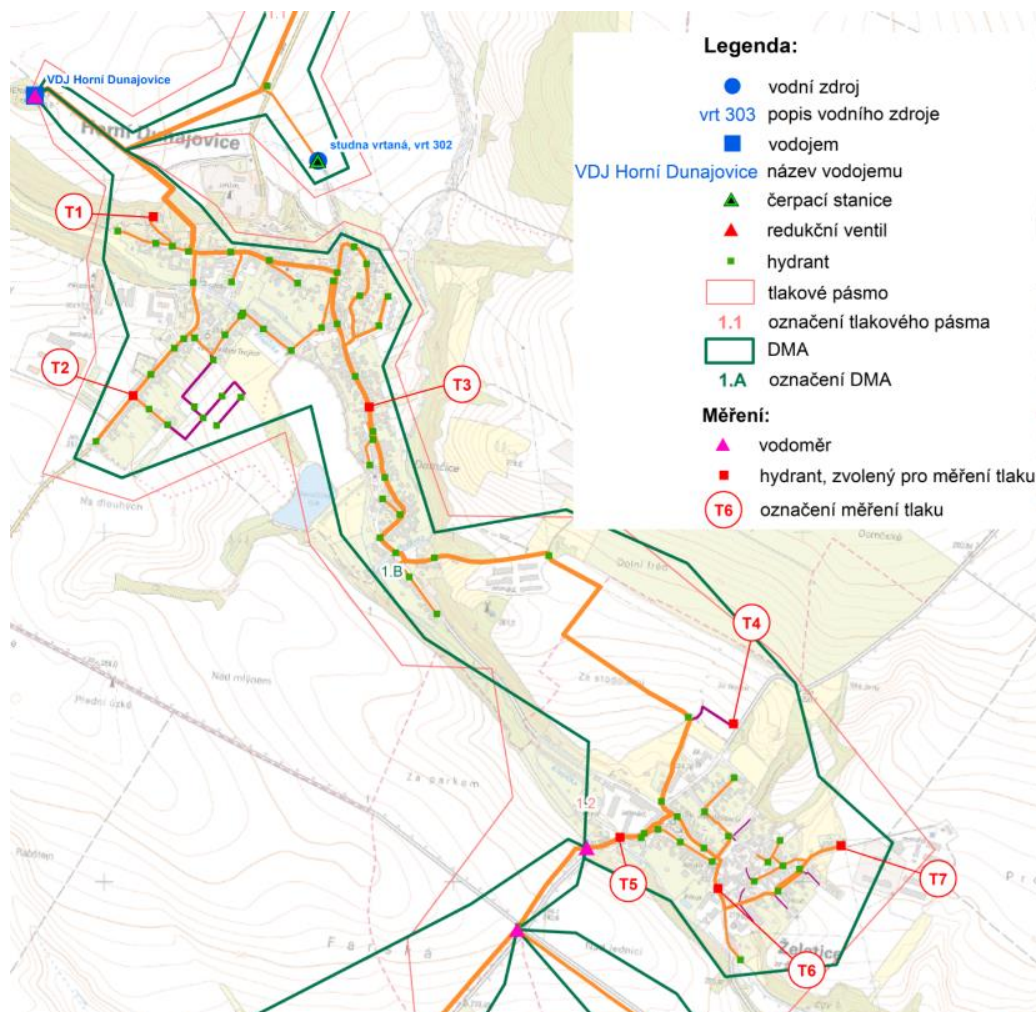


Graf 2: Rozdělení potrubí dle jednotlivých dimenzí

Na vodovodní síti jsou dále osazeny podzemní hydranty a sekční uzávěry pro případné uzavření jednotlivých řadů, a fakturační vodoměry pro odečet spotřeby vody v jednotlivých zásobovaných obcích.

4.2 MĚRNÁ KAMPAŇ

Za účelem získání dat pro kalibraci modelu na běžný provozní stav byla v období od 25. června 2019 do 4. července 2019 provedena měrná kampaň. Tato měrná kampaň byla rozdělena na dvě fáze, během nichž bylo za pomoci 9 tlakových čidel provedeno měření celkem na 15 vybraných místech vodovodní sítě. Jako informace o průtocích pro kalibraci posloužily údaje za celý kalendářní rok 2018, které byly poskytnuty provozovatelem vodovodní sítě. Na obrázku 9 je patrné rozmístění měrných míst v obci Horní Dunajovice. Celá měrná kampaň včetně výsledků je pak patrná z přílohy č. 2 Situace měrné kampaně.



Obr. 9: Rozmístění měrných míst v obci Horní Dunajovice

V termínu od 21. října 2019 do 5. listopadu 2019 se pak konal proplach skupinového vodovodu Horní Dunajovice. Činnosti prováděné při proplachu vodovodní sítě lze přirovnat k hydrantovým testům – je při nich stanovena hydraulická kapacita daného hydrantu, potažmo vodovodní sítě. K proplachu vodovodní sítě byl využíván hydrantový nástavec, na němž byl osazen digitální manometr Baroli. Na hadici, přes kterou byla vypouštěná voda odváděna do recipientu, byl osazen indukční průtokoměr. V rámci proplachu tak byl přímo v místě používaného hydrantu velmi přesně měřen průtok a tlak. Takto získaná sada dat posloužila

pro kalibraci modelu na vysoké rychlosti proudění (tedy rychlosti proudění dosahované při vysokých průtocích, které se v síti za běžných provozních podmínek nevyskytují).



Obr. 10: Osazení tlakového čidla Baroli na hydrantovém nástavci při proplachu vodovodní sítě

4.2.1 Měření tlaku

K měření tlaku byla použita tlaková čidla Sebalog P-3, která jsou vybavena záznamovým zařízením. Interval pro záznam hodnoty tlaku byl nastaven jako 1 sekunda. Měřicí rozsah těchto čidel je 0-25 bar, přičemž maximální chyba měření udávaná výrobcem tlakového čidla je $< 1\%$. Tato čidla nejsou určena k měření podtlaku, případný podtlak je zaznamenán jako nulový (= atmosférický) tlak.

Tlaková čidla Sebalog P-3 také kromě standardního měření tlaku umožňují měření tlakového rázu. Za tlakový ráz je považována každá náhlá změna tlaku, která se liší od předchozí naměřené hodnoty alespoň o 0,4 bar. V rámci měrné kampaně byla tato funkce dataloggeru využita, a tlakový ráz byl zaznamenán celkem 41krát.



Obr. 11: Tlakové čidlo Sebalog P-3 osazené v podzemním hydrantu

4.2.2 Zpracování měrné kampaně

Hodnoty tlaků a průtoků, získané měřením na síti, byly statisticky zpracovány. Ze surových dat, která byla vyexportována v časovém kroku 1 sekunda, byly stanoveny průměrné hodinové hodnoty tlaku v jednotlivých měrných místech.

Tlak, který byl naměřen tlakovými čidly, je udáván v barech. Hodnoty tlaku, který je stanoven výpočtem v hydraulickém modelu pomocí softwaru Epanet, jsou udávány v jednotkách metry vodního sloupce (m v. sl.). Aby bylo možné měřená data použít pro kalibraci, je třeba hodnoty převést. Pro převod mezi těmito jednotkami se používá následující vztah:

Tlak (Pa) = hustota vody * tíhové zrychlení * výška vodního sloupce

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

Po převedení jednotek byl z měřených dat vytvořen kalibrační soubor, který byl následně připojen k hydraulickému modelu v softwaru Epanet a na jehož základě byla provedena ruční kalibrace na běžný provozní stav. Příklad zápisu kalibračních dat je na obr. 12.

```

;Hodnoty tlaku pro kalibraci modelu
;Uzel      Čas (h)      Tlak (m v. s.)
;-----
;T1
1_4        0          30.71
           1          30.78
           2          30.85
           3          30.89
           4          30.88
           5          30.84
           6          30.80
           7          30.70
           8          30.69
           9          30.64
          10          30.69
          11          30.67
          12          30.66
          13          30.66
          14          30.56
          15          30.51
          16          30.46
          17          30.32
          18          30.19
          19          30.11
          20          30.22
          21          30.37
          22          30.54
          23          30.63
          24          30.71
    
```

Obr. 12: Zápis kalibračních dat

4.3 ANALÝZA SPOTŘEBY VODY

Skupinový vodovod Horní Dunajovice je pomocí tří průtokoměrů s dálkovým přenosem dat rozdělen na tři měrné okrsky (DMA). Ty téměř kopírují jednotlivá tlaková pásma. Jedná se tedy o DMA Horní Dunajovice a Želetice, DMA Žerotice a Kyjovice a DMA Vítonice.

Data z těchto průtokoměrů za celý rok 2018 byla ze SCADA systému provozovatele exportována v časovém kroku 1 hodina a následně statisticky vyhodnocena.

První z vodoměrů je osazen na odtoku z VDJ Horní Dunajovice, a měří tedy veškerý odtok z vodojemu. Druhý průtokoměr se nachází v armaturní šachtě na hlavním zásobním řadu za obcí Želetice, a jeho měření pokrývá jak spotřebu Žerotic a Kyjovic, tak i Vítonic. Poslední průtokoměr se nachází v armaturní šachtě na hlavním zásobním řadu vedoucím do obce Vítonice. Pro stanovení spotřeby v jednotlivých DMA je tedy třeba data z jednotlivých průtokoměrů mezi sebou odčítat.

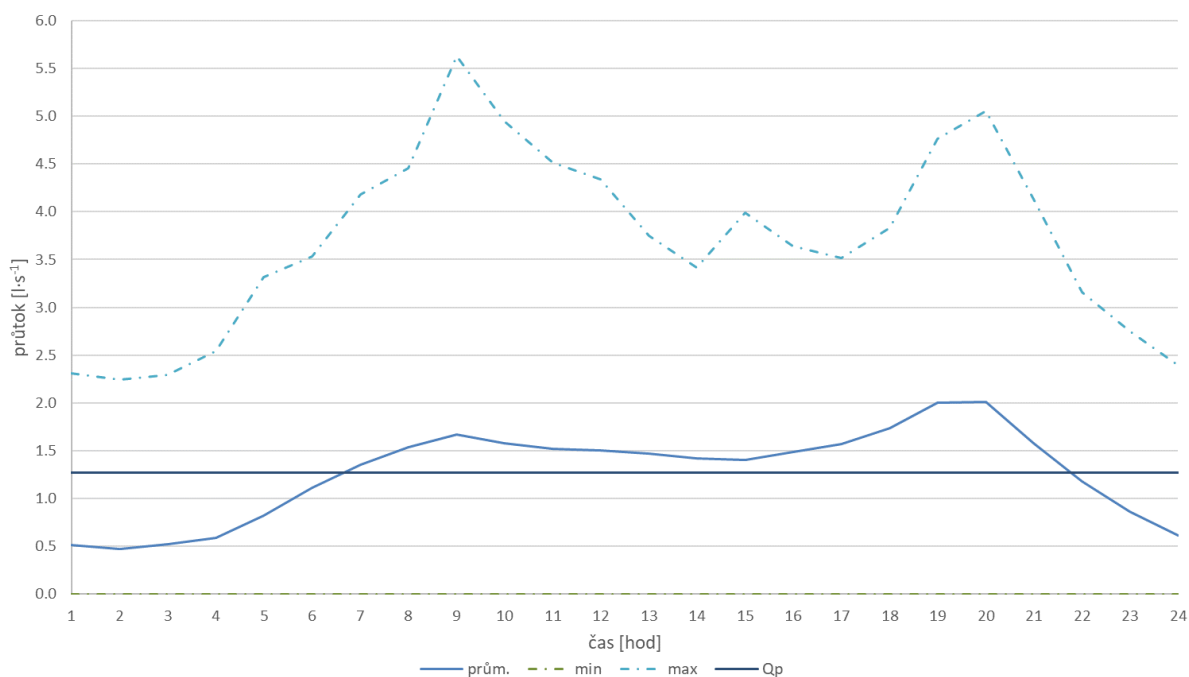
Průměrný průtok Q_p za rok 2018 byl stanoven jako průměr hodinových průtoků. Dále byly stanoveny průměrné denní průtoky, přičemž největší z nich se rovná maximálnímu dennímu průtoku Q_d . Maximální hodinový průtok Q_h je roven největší hodnotě z hodinových průtoků za celé sledované období, stejně tak minimální hodinový průtok Q_{min} odpovídá nejmenší hodnotě v souboru hodinových dat.

V následujících grafech a tabulkách jsou zpracovány výsledky analýzy spotřeby vody. Hodnoty byly stanovovány pro všechny dny v roce 2018 bez rozlišení, zdali se jedná o pracovní dny nebo dny pracovního klidu (tedy víkendy a státní svátky).

Tab. 3: Spotřeba vody v DMA Horní Dunajovice a Želetice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů

Horní Dunajovice a Želetice		všechny dny
Q_p	$[l \cdot s^{-1}]$	1.27
Q_d	$[l \cdot s^{-1}]$ $[m^3 \cdot d^{-1}]$	3.35 289.2
Q_{min}	$[l \cdot s^{-1}]$	0.0
Q_h	$[l \cdot s^{-1}]$	5.63

Průběh spotřeby - DMA Horní Dunajovice a Želetice - průměrný den v roce 2018

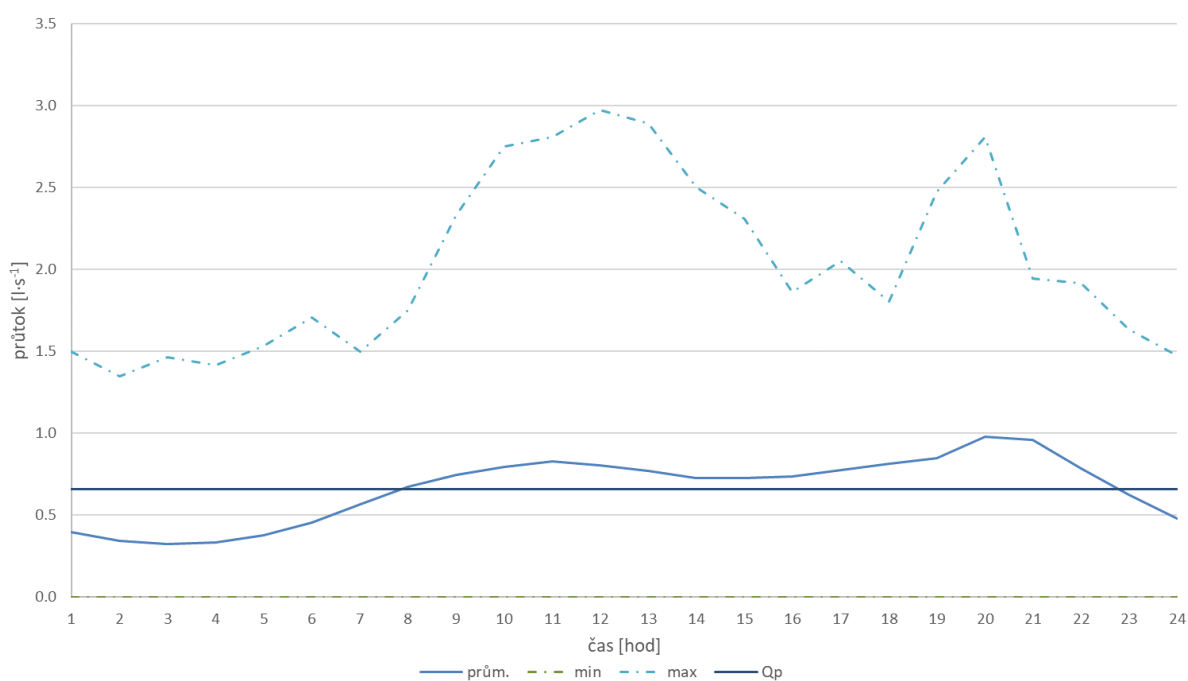


Graf 3: Průběh spotřeby vody v DMA Horní Dunajovice a Želetice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů

Tab. 4: Spotřeba vody v DMA Žerotice a Kyjovice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů

Žerotice a Kyjovice		všechny dny
Q_p	$[l \cdot s^{-1}]$	0.66
Q_d	$[l \cdot s^{-1}]$	1.45
	$[m^3 \cdot d^{-1}]$	125.6
Q_{min}	$[l \cdot s^{-1}]$	0.0
Q_h	$[l \cdot s^{-1}]$	2.97

Průběh spotřeby - DMA Žerotice a Kyjovice - průměrný den v roce 2018

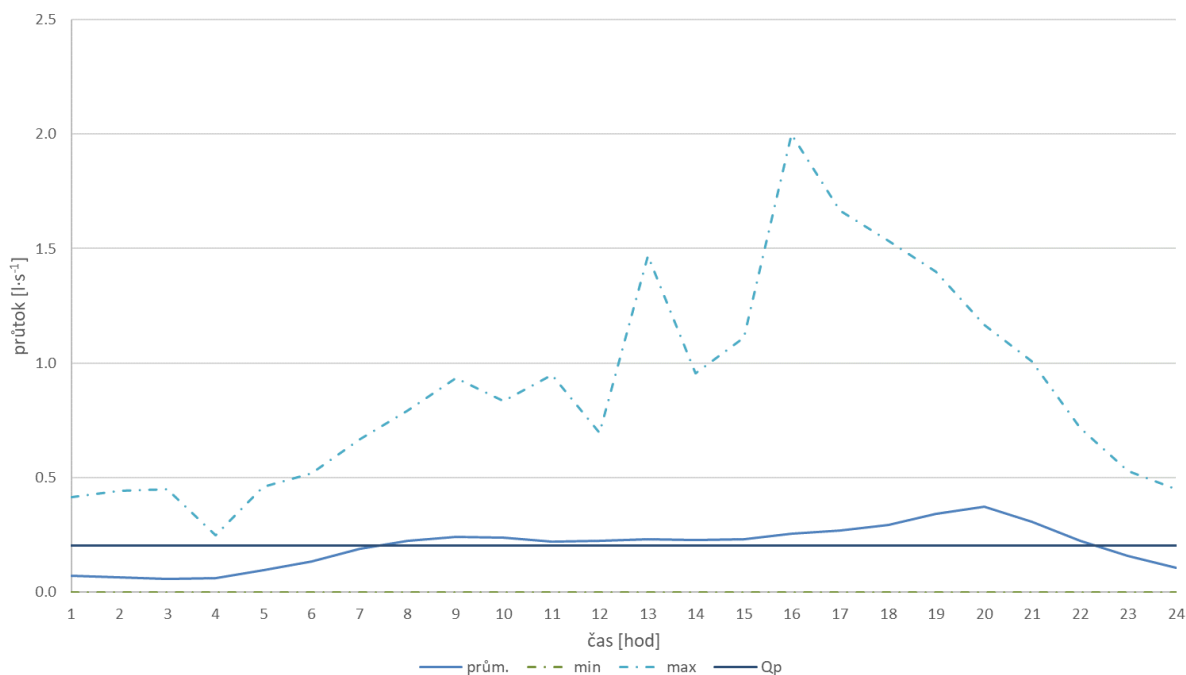


Graf 4: Průběh spotřeby v DMA Žerotice a Kyjovice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů

Tab. 5: Spotřeba vody v DMA Vítonice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů

Vítonice		všechny dny
Q_p	$[l \cdot s^{-1}]$	0.20
Q_d	$[l \cdot s^{-1}]$	0.64
	$[m^3 \cdot d^{-1}]$	55.1
Q_{min}	$[l \cdot s^{-1}]$	0.0
Q_h	$[l \cdot s^{-1}]$	2.00

Průběh spotřeby - DMA Vítonice - průměrný den v roce 2018



Graf 5: Průběh spotřeby vody v DMA Kyjovice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů

Na grafech je patrné, že minimální hodinové průtoky ve všech DMA a všech časových krocích jsou nulové. To je způsobeno faktem, že se u všech vodoměrů minimálně jednou během roku 2018 vyskytla porucha v přenosu dat a přenášené hodnoty tak byly nulové. Tato data nebyla při statistickém zpracování vyřazena ze souboru měřených dat.

Grafy dále potvrzují venkovský charakter spotřebiště s převažující spotřebou domácností bez velkooběratelů průmyslového charakteru – vyskytují se dvě odběrové špičky, ranní a večerní, které kopírují chování obyvatelstva.

4.4 KALIBRACE HYDRAULICKÉHO MODELU NA BĚŽNÝ PROVOZNÍ STAV VODOVODNÍ SÍTĚ

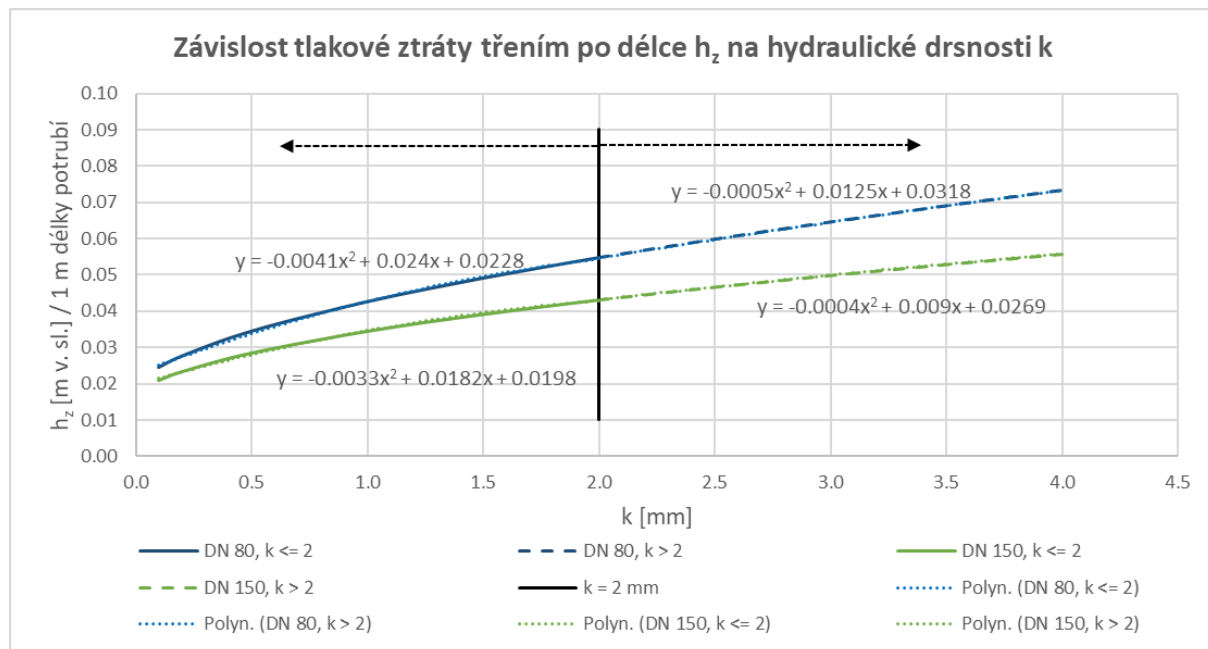
Před kalibrací bylo třeba vytvořit samotný hydraulický model. Ten vzniknul na základě podkladů získaných od provozovatele vodovodní sítě. Mezi ně se řadí například topologie sítě vyexportovaná z geografického informačního systému, která posloužila pro tvorbu kostry modelu, výškopis, dále množství vody fakturované na přípojkách, na jejímž základě byly rozděleny odběry vody do jednotlivých uzlů apod. Křivky získané analýzou spotřeby vody, které popisují průběh spotřeby vody, posloužily pro nastavení kvazi-dynamické analýzy. Model byl nejprve vytvořen v softwaru MikeUrban a následně vyexportován do softwaru Epanet, ve kterém byla provedena kalibrace. Jelikož však předmětem této diplomové práce je kalibrace hydraulického modelu, nikoli jeho tvorba, nebude zde dopodrobna popsána.

4.4.1 Proces kalibrace

Mezi kalibrované parametry modelu se řadí změna drsnosti potrubí, změna dimenze potrubí, změna polohy hladiny ve vodojemu, změna nastavení výstupního tlaku na regulačním ventilu a změna polohy uzávěrů (šoupat). Kromě posledního jmenovaného bylo všech těchto úkonů při kalibraci hydraulického modelu skupinového vodovodu Horní Dunajovice na běžný provozní stav, která byla prováděna manuálně, využito.

Kalibrace byla provedena na základě dat získaných měrnou kampaní. Aby výsledky hydraulického modelu korespondovaly se skutečným stavem sítě, bylo třeba polohu hladiny ve vodojemu nastavit na úroveň $h_{hl} = 2,7$ m, což odpovídá kótě 283,47 m n. m. Výstupní tlak u regulačního ventilu Žerotice byl nastaven na hodnotu 2,59 bar, tedy 26,4 m v. sl. a výstupní tlak u regulačního ventilu Vítonice byl nastaven na hodnotu 3,47 bar, tedy 35,4 m v. sl.

Dále byly zvětšovány hydraulické drsnosti potrubí vedoucích k jednotlivým měrným místům. Tento proces probíhal postupně od vodojemu směrem do sítě. Jako maximální hodnota drsnosti byla stanovena hodnota $k = 2$ mm. Volba hodnoty $k = 2$ mm jako limitní vyplynula z analýzy závislosti jednotkové tlakové ztráty na drsnosti potrubí. Podstatou analýzy bylo stanovení velikosti tlakové ztráty třením při různých hodnotách hydraulické drsnosti k na jednom metru délky potrubí a snaha určit, do jaké hodnoty má ještě smysl hydraulickou drsnost zvyšovat, a od jaké hodnoty je to již dále neefektivní. Tato analýza byla provedena pro DN 80 a DN 150, které reprezentují dimenze potrubí zastoupené v hydraulickém modelu. V rámci analýzy byly posouzeny tlakové ztráty při rychlosti proudění $v = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $v = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Výsledky analýzy pro $v = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou prezentovány v grafu 6.



Graf 6: Výsledky analýzy závislosti tlakové ztráty na drsnosti potrubí při rychlosti proudění $v = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

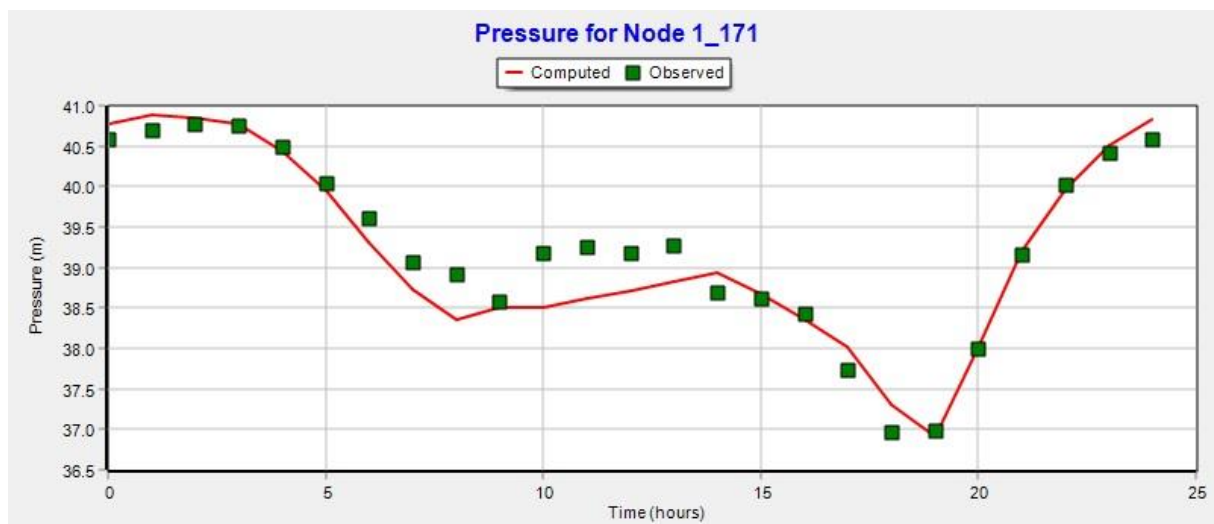
Křivky zobrazující závislost tlakové ztráty na hodnotě hydraulické drsnosti k byly proloženy polynomičnou spojnicí trendu, která nejlépe reprezentuje jejich průběh (v grafu se jedná o tečkovanou čáru). V grafu 6 jsou zobrazeny rovnice spojnic trendu v jednotlivých oblastech,

tedy při $k < 2$ mm a při $k > 2$ mm pro obě analyzované dimenze potrubí. Celkem se tedy jedná o 4 rovnice. Z nich je patrné, že do hodnoty $k = 2$ mm jsou hodnoty koeficientů kvadratického a lineárního členu rovnice o řád vyšší, než při hodnotě $k > 2$ mm, tedy v této oblasti tlakové ztráty narůstají daleko rychleji než při hodnotě drsnosti potrubí $k > 2$ mm. Závěrem, který z analýzy vyplynul, bylo rozhodnutí, že pokud při kalibraci nebyly ani při hodnotě hydraulické drsnosti $k = 2$ mm dosaženy odpovídající hodnoty tlaku v síti, byly následně zmenšovány dimenze potrubí.

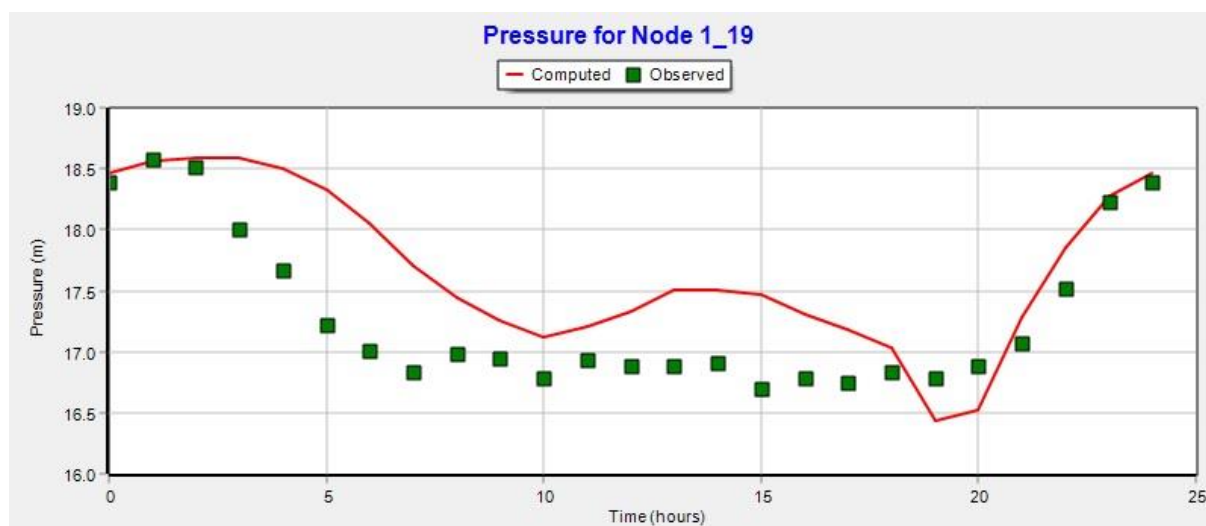
Toto rozhodnutí bylo podstatné i z jiného, již dříve zmíněného důvodu – pokud by byla hydraulická drsnost zvyšována do vysokých hodnot, aniž by byla snížena hodnota dimenze potrubí, pravděpodobně by se podařilo model kalibrovat tak, aby simulované tlaky odpovídaly těm měřeným, avšak rychlost proudění, která závisí na průměru potrubí, by se nezměnila. To by pak mohlo mít negativní vliv na správnost výsledků, pokud by byl model dále využíván například k simulaci chloru či jiných chemických látek nebo šíření znečištění ve vodovodní síti apod.

4.4.2 Výsledky kalibrace

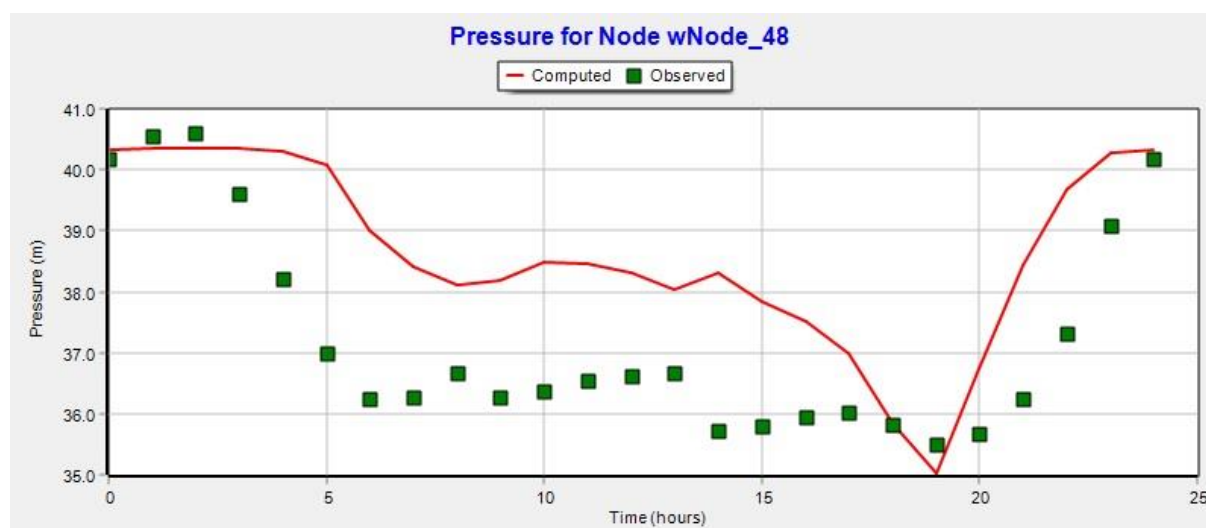
Výsledky kalibrace jsou prezentovány na následujících obrázcích. Pro každé tlakové pásmo bylo zvoleno jedno reprezentativní měrné místo. Kde na síti se jednotlivá měrná místa nachází je možné zjistit v příloze 2. Situace měrné kampaně. Z následujících obrázků je patrné, že nej přesnější byla kalibrace v tlakovém pásmu Horní Dunajovice a Želetice. V tlakovém pásmu Žerotice a Kyjovice a tlakovém pásmu Vítonice nekopíruje vypočtená křivka přesně měřená data, což může být způsobeno například tím, že výstupní tlak regulačních ventilů nemusí být ve skutečnosti naprosto konstantní. Kalibraci lze přesto považovat za dostatečně kvalitní, neboť se hodnoty vypočteného tlaku pohybují v intervalu hodnot získaných měřením.



Obr. 13: Výsledky kalibrace pro měrné místo T4 v TP Horní Dunajovice a Želetice



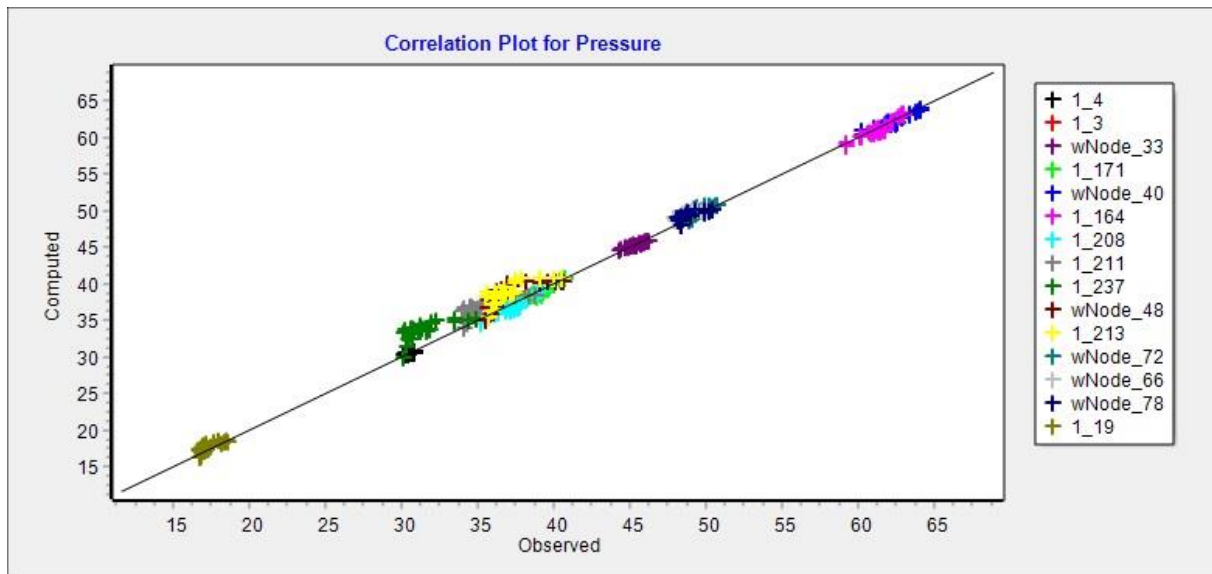
Obr. 14: Výsledky kalibrace pro měrné místo T15 v TP Žerotice a Kyjovice



Obr. 15: Výsledky kalibrace pro měrné místo T10 v TP Vítonice

Celková úspěšnost kalibrace je patrná z následujícího grafu a tabulky. Na grafu 7 je vidět korelace mezi měřeným a vypočteným tlakem. Černá přímka je tvořena vypočtenými hodnotami tlaku. Kolem ní rozprostřené body reprezentují odpovídající měřené hodnoty tlaku. Každému měrnému místu odpovídají body jedné barvy, a pro každé měrné místo je v grafu 24 bodů, neboť se jedná o kvazi-dynamický hydraulický model s časovým krokem 1 hodina, přičemž hydraulický výpočet byl proveden pro 24 časových kroků, tedy jeden den. Z grafu je patrné, že velká část měřených hodnot leží na přímce nebo v její bezprostřední blízkosti, což dokládá úspěšnost kalibrace. V tab. 6 je pak patrný rozdíl mezi středními hodnotami měřeného (Observed Mean) a vypočteného tlaku (Computed Mean). Koeficient korelace mezi středními hodnotami měřených a vypočtených dat je 0,998. Střední kvadratická chyba, tedy odchylka druhých mocnin rozdílů měřených a vypočtených hodnot (RMS Error) je 1,092 m². Celková odchylka středních hodnot vypočtených při hydraulické simulaci od měřených dat (Mean Error) je 0,717 m. Při kalibraci hydraulického modelu tedy byla splněna podmínka, že

rozdíl vypočtených a měřených hodnot má být menší, než ± 1 m v. sl. a model lze považovat za uspokojivě kalibrovaný.



Graf 7: Výsledky kalibrace hydraulického modelu – korelace mezi vypočtenými a měřenými daty

Tab. 6: Výsledky kalibrace hydraulického modelu na běžný provozní stav

DESCRIPTION

Calibration Statistics for Pressure

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
1_4	24	30.60	30.60	0.124	0.144
1_3	24	37.76	37.74	0.146	0.172
wNode_33	24	45.41	45.42	0.215	0.246
1_171	24	39.23	39.13	0.226	0.300
wNode_40	24	62.53	62.44	0.247	0.299
1_164	24	61.48	61.43	0.258	0.324
1_208	24	37.59	37.27	0.326	0.427
1_211	24	35.62	37.02	1.468	1.668
1_237	24	31.70	33.81	2.128	2.342
wNode_48	24	37.12	38.56	1.519	1.748
1_213	24	37.22	39.06	1.854	2.069
wNode_72	24	49.41	49.93	0.563	0.650
wNode_66	24	48.60	49.25	0.692	0.784
wNode_78	24	48.81	49.22	0.530	0.603
1_19	24	17.25	17.65	0.453	0.542
Network	360	41.35	41.90	0.717	1.092

Correlation Between Means: 0.998

Takto kalibrovaný kvazi-dynamický model následně posloužil jako vstup pro kalibraci statického hydraulického modelu na vysoké rychlosti proudění, která již byla provedena automaticky, za použití pro tento účel vytvořeného kalibračního softwaru.

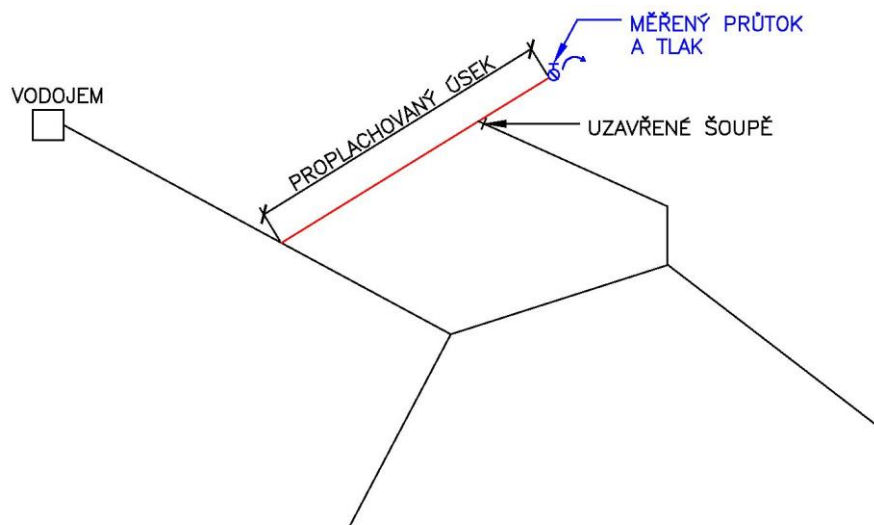
4.5 KALIBRACE HYDRAULICKÉHO MODELU NA VYSOKÉ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ V POTRUBÍ

Model lze považovat za kalibrovaný pouze pro takové zatěžovací stavy, pro které byla kalibrace provedena. V případě kalibrace popsané v předešlé kapitole je tedy rozsah platnosti v intervalu od minimálního nočního průtoku po maximální hodinový odběr od obyvatelstva, a tomu odpovídajícím rychlostem. Takto kalibrovaný model však nelze použít pro simulaci zatěžovacích stavů s vyššími hodnotami průtoku, a tedy vyššími rychlostmi proudění jako jsou například požární odběr, porucha na síti apod. Pro tyto podmínky je model nutno kalibrovat zvláště, respektive je třeba k jeho kalibraci použít soubor odpovídajících dat. Jak již bylo zmíněno, data pro kalibraci hydraulického modelu na vysoké rychlosti proudění byla získána v rámci proplachu skupinového vodovodu, kdy vybrané hydranty byly zatíženy nejvyšším možným průtokem, který byl zároveň regulován tak, aby v každém místě vodovodní sítě byl ponechán přetlak minimálně 5 m v. sl.

4.5.1 Nástroj pro kalibraci hydraulického modelu

Způsob, jakým byla data pro kalibraci získávána, poskytnul ideální podmínky pro vytvoření automatického kalibračního softwaru, který značně usnadňuje, a především zpřesňuje kalibraci.

Proplach skupinového vodovodu Horní Dunajovice byl proveden na základě předem vytvořeného proplachovacího plánu – vodovodní síť byla rozdělena na 72 úseků, přičemž bylo jasně definováno, který hydrant bude pro proplach daného úseku použit a jak bude manipulováno s uzávěry na síti, aby bylo zajištěno jednosměrné proudění vody. To znamená, že každý proplachovaný úsek je možné si představit jako jakousi konfiguraci hydraulického modelu, pro kterou je přesně definován stav uzávěrů na síti, směr proudění vody a v přesně daném uzlu je díky terénnímu měření znám hydrodynamický tlak a průtok. Každý proplachovaný úsek přitom byl zpravidla tvořen potrubím stejné dimenze a stejného materiálu. Popsaný princip řízeného proplachu je zjednodušeně vysvětlen na obrázku 16.



Obr. 16: Schéma řízeného proplachu vodovodní sítě

Snahou tedy bylo vytvořit automatický kalibrační software, který za pomoci matematického aparátu popsaného v předcházejících kapitolách, tedy metody nejmenších čtverců, umožní nalezení optimálních hodnot drsnosti a dimenze potrubí. K vytvoření tohoto nástroje posloužil programovací jazyk MATLAB a jeho nástavba Epanet-MATLAB-Toolkit.

Epanet-MATLAB-Toolkit

Epanet lze využívat nejen jako samostatný simulační software, ale také jako sdílenou knihovnu objektů. Díky tomu může být „volán“ prostřednictvím externího softwaru, napsaného v programovacích jazycích jako jsou C/C++, Python, Visual Basic nebo právě MATLAB. Skrze tento externí software je možné zadávat příkazy, které mohou v Epanetu měnit parametry modelu, časové řady nebo nastavení simulace. [24]

MATLAB je programovací prostředí využívané pro zpracování a analýzu dat. Umožňuje vývoj aplikací na různých platformách a má vestavěné velké množství sofistikovaných aplikací pro optimalizaci a řízení. MATLAB lze také propojit s externími softwarovými knihovnami, což umožňuje použití nástrojů vyvinutých v jiných programovacích jazycích. Programovací prostředí MATLAB je vědci běžně používáno k návrhu a zhodnocení metod a nástrojů pro analýzu vodovodních sítí. [25]

Epanet-MATLAB-Toolkit je open-source software, vytvořený v KIOS Research Center for Intelligent Systems and Networks of the University of Cyprus. Tento software pracuje v prostředí MATLAB a vytváří programovací rozhraní pro nejnovější verzi Epanetu. Nabízí sadu nástrojů, které umožňují jednoduchou editaci, simulaci a vykreslování výsledků vytvořených knihovnami Epanetu. [26]

Pro propojení prostředí MATLAB a Epanet je využíván objektově orientovaný přístup. V objektově orientovaném programování je základním konstrukčním prvkem *třída*. Ta slouží jako předpis pro vznik *objektu*, který je její instancí. Třída definuje vlastnosti a funkce objektů, které při běhu programu vzniknou. V MATLABu byla definována třída *epanet*, která poskytuje standardizovaný způsob pro práci se strukturou sítě, volání příkazů, nebo provádění procedur obsahujících více funkcí, jako je například provedení hydraulické analýzy. [24]

Třída *epanet* je složena z následujících částí: 1) vlastností vstupujícího modelu sítě, 2) statických vlastností, 3) veřejných funkcí, které jsou běžně používány v MATLABu, 4) interních funkcí, které Epanet-MATLAB-Toolkit využívá pro zadávání přímých příkazů Epanetu. [24]

Objekt *epanet* je instance třídy *epanet*. Tento objekt je definován jako soubor sestávající z topologie sítě, parametrů a nastavení modelu. Když je objekt vytvořen, Epanet-MATLAB-Toolkit přečte vstupní soubor a načte více než 300 parametrů objektu. Pomocí Toolkitu je možné tyto parametry upravovat, nebo provádět příkazy, jako například provést hydraulickou či kvalitativní analýzu. Na následujícím obrázku je příklad vytvoření objektu *epanet*, který se uloží do proměnné *G*. Dále jsou patrné operace, které je možné s načteným objektem provádět. [24]

```
G = epanet('Net2.inp') % Load network and use the EPANET library

properties(G) % Lists all available parameters
diameters = G.LinkDiameter % Link diameters from parameters
elevations = G.NodeElevations % Node elevations from parameters
elevations = G.getNodeElevations([2 5]) % Node elevations for Nodes 2 & 5
diameters = G.getLinkDiameter % Link diameters from library
diameters(2)=18 % Change Link 2 diameter from 14 to 18
G.setLinkDiameter(diameters) % Set new link diameter
G.getLinkDiameter(2) % Confirms that Link 2 diameter is 18

H = G.getComputedHydraulicTimeSeries % Solve hydraulics in library
Q = G.getComputedQualityTimeSeries % Solve quality dynamics in library
```

Obr. 17: Příklady použití Epanet-MATLAB-Toolkitu [24]

Princip funkce kalibračního nástroje

Při tvorbě kalibračního nástroje se vycházelo z postupu při sběru dat při měření na síti. Od první chvíle bylo jasné, že bude třeba kalibrovat hydraulický model po úsecích – postupně tak, jak byla vodovodní síť proplachována. Uživatel tedy musí v Epanetu pro každý kalibrovaný úsek vytvořit manuálně danou konfiguraci sítě – nastavení uzávěrů, a do zdrojového kódu, který bude představen dále, zadat číslo uzlu, respektive hydrantu, ve kterém byl realizován odběr a měřen tlak, a čísla úseků potrubí, které mají být v daném kroku kalibrovány.

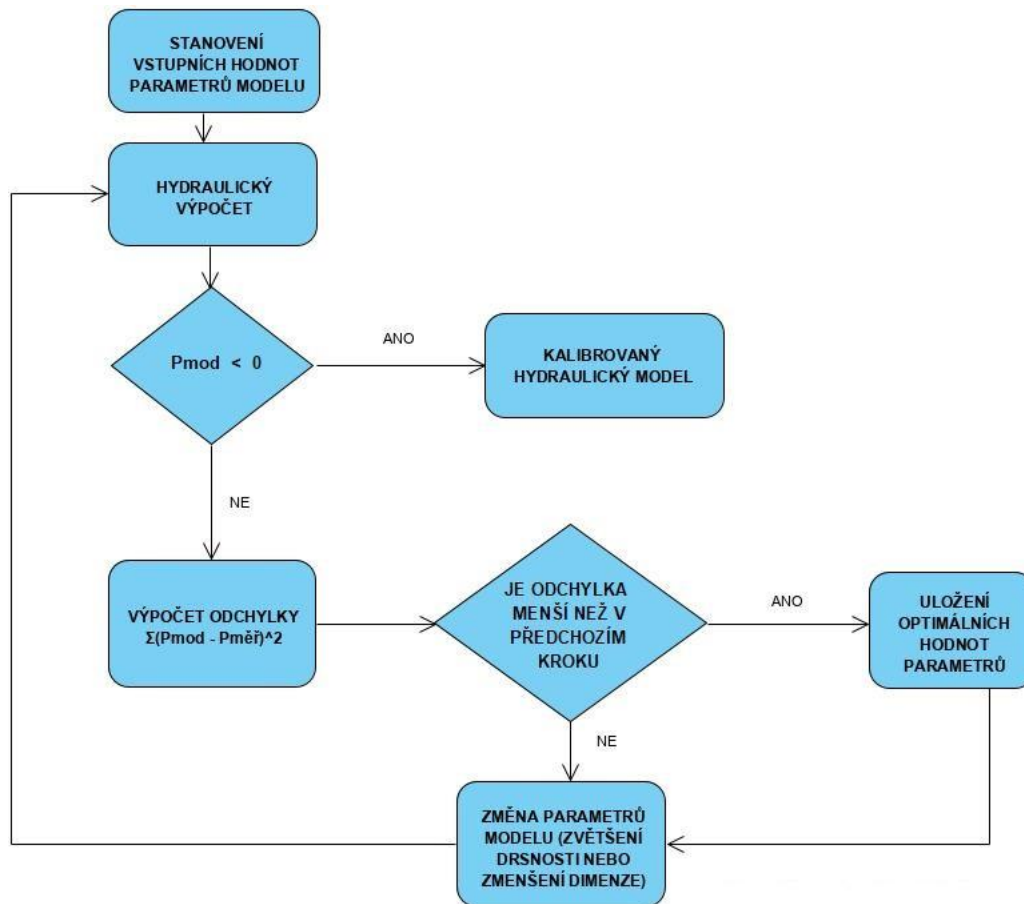
Pro každý kalibrovaný úsek bylo třeba nejprve vytvořit dva soubory (jeden pro průtok a druhý pro tlak) ve formátu .xlsx, které obsahovaly referenční, tedy měřené, hodnoty průtoku a tlaku. Každému úseku byly přiřazeny dvě dvojice hodnot průtok – tlak, a to nulový průtok hydrantem a jemu odpovídající tlak, a maximální průtok hydrantem a jemu odpovídající tlak. Tyto hodnoty se potom automaticky načítaly do definovaného uzlu a na jejich základě byla prováděna simulace a kalibrace.

Průběh samotné kalibrace pro jeden úsek je patrný z obrázku 18 a detailněji je popsán v následujících odstavcích. Pro přehlednost jsou v tabulce 7 uvedeny jednotlivé proměnné, které byly při kalibraci použity, a je vysvětlen jejich význam.

Tab. 7: Proměnné používané v kalibračním nástroji

Proměnná	Použití
Qref	proměnná, do níž se načítají měřené hodnoty průtoku
Tref	proměnná, do níž se načítají měřené hodnoty tlaku
output	proměnná, do níž se ukládají vypočtené hodnoty tlaku
R	proměnná, do níž se načítá hodnota hydraulické drsnosti potrubí pro daný krok výpočtu
D	proměnná, do níž se načítá hodnota průměru potrubí pro daný krok výpočtu
chyba	proměnná, do níž se načítá hodnota odchylky mezi měřenými a vypočtenými hodnotami tlaku, stanovená metodou nejmenších čtverců, pro daný krok výpočtu

Proměnná	Použití
Ropt	proměnná, do níž se ukládá optimální hodnota hydraulické drsnosti potrubí
Dopt	proměnná, do níž se ukládá optimální hodnota průměru potrubí
chybaopt	proměnná, do níž se ukládá minimální hodnota odchylky mezi vypočtenými a měřenými hodnotami tlaku, stanovená metodou nejmenších čtverců
roughness	proměnná, do níž se načítá matice hydraulických drsností všech úseků potrubí v řešené vodovodní síti – s pomocí této proměnné je při výpočtu definováno, ve kterých úsecích se má měnit hydraulická drsnost potrubí
diameter	proměnná, do níž se načítá matice průměrů všech úseků potrubí v řešené vodovodní síti – s pomocí této proměnné je při výpočtu definováno, ve kterých úsecích se má měnit průměr potrubí
demand	proměnná, do níž se načítá matice všech uzlových odběrů v řešené vodovodní síti – pomocí této proměnné je při výpočtu definováno, ve kterém uzlu se má realizovat známý odběr



Obr. 18: Schéma detailní kalibrace

Na začátku procesu kalibrace byla provedena inicializace kalibračního nástroje. Ta je vidět na obr. 19. Do proměnných Q_{ref} a T_{ref} byly načteny referenční hodnoty průtoku a tlaku, dále byla definována matice $output$, do které se později zapisovaly vypočtené hodnoty tlaku a byl

vytvořen objekt *epanet*, do kterého byla načtena síť s konfigurací pro daný úsek, vytvořená v Epanetu, exportovaná do formátu .inp. Dále byly definovány proměnné R (drsnost potrubí), D (průměr potrubí), R_{opt} (optimální drsnost potrubí), D_{opt} (optimální průměr potrubí) a $chyba_{opt}$ (nejmenší dosažená odchylka mezi měřenými a vypočtenými daty). Hodnoty nastavené proměnným R , D , R_{opt} , D_{opt} a $chyba_{opt}$ při inicializaci nejsou pro výpočet podstatné, slouží pouze pro definování proměnné.

```
Qref = readmatrix('usek_20_Qref.xlsx');  
Tref = readmatrix('usek_20_Tref.xlsx');  
  
output = zeros(2,1);  
  
G = epanet('usek_20.inp');  
  
R = 0.25;  
D = 141;  
  
Ropt = 0;  
Dopt = 0;  
chybaopt = 1000;
```

Obr. 19: Inicializace kalibračního nástroje před provedením kalibrace

Průběh samotné kalibrace byl následující: jako nejvyšší možná hodnota dimenze byla zvolena velikost vnitřního průměru potrubí, zaokrouhlená na celé milimetry směrem dolů (např. pro PE 100 DN110×6,6 SDR17 se jednalo o hodnotu 96 mm). Toto zaokrouhlení není z matematického hlediska zcela správné, ale nebylo možné uvažovat, že dimenze potrubí bude větší než skutečně vyráběná. Kalibrace pak fungovala na principu postupného prohledávání prostoru přípustných řešení. V první fázi byla zvětšována drsnost potrubí. Jako počáteční hodnota drsnosti byla zvolena hodnota $k = 0,05$ mm. Tato hodnota byla zvolena, neboť pro nová plastová potrubí bývá udávána hodnota drsnosti $k = 0,01$ mm, avšak vodovodní síť SV Horní Dunajovice je již v provozu několik desítek let, proto s nejnižší možnou hodnotou nebylo uvažováno a byla zvolena hodnota o něco vyšší. Hodnota drsnosti byla následně zvyšována s krokem 0,05 mm až do hodnoty $k = 2$ mm. Volba tohoto limitu již byla vysvětlena dříve. Pokud ani při dosažení maximální hodnoty hydraulické drsnosti k nebylo docíleno dostatečně přesné shody mezi měřenými a vypočtenými hodnotami tlaku, byla následně zmenšena dimenze potrubí. Hodnota odchylky, počítané metodou nejmenších čtverců, při níž by došlo k zastavení výpočtu, byla záměrně zvolena jako velmi nízká, a to 0,01, neboť cílem bylo dosáhnout co největší přesnosti kalibrace. Dimenze byla zmenšována s krokem 1 mm až do teoretické hodnoty 1 mm, té však nebylo při výpočtu nikdy dosaženo, neboť byla nastavena podmínka, že výpočet se zastaví, pokud hodnota vypočteného tlaku bude menší než nula. Po snížení dimenze o 1 mm byla opětovně zvyšována hydraulická drsnost potrubí, stejně, jako v předcházejícím kroku, a pokud opět nebylo dosaženo dostatečné shody, dimenze se dále snížila. Tento proces se opakoval až do chvíle, kdy byla otestována všechna možná řešení, bylo dosaženo odchylky menší než 0,01 anebo jak už bylo zmíněno, kdy byl vypočtený tlak záporný.

Na obr. 20 je patrné nastavení kalibrace a také způsob, jakým bylo definováno, ve kterých úsecích potrubí má být kalibrována drsnost, respektive dimenze – nejprve byla do proměnné *roughness*, respektive *diameter*, načtena matice drsností, respektive průměrů všech úseků

potrubí obsažených v modelu, následně byla kalibrovaným úsekům (definovaným pomocí jejich pozice v matici) přiřazena aktuálně testovaná hodnota proměnné R , respektive D a v posledním kroku byla nově upravená matice hodnot uložena.

```
for D = 141:-1:1
    for R = 0.1:0.05:2

        roughness = G.getLinkRoughnessCoeff;
        roughness([61 80 109 140 147 192])=R;
        G.setLinkRoughnessCoeff(roughness);

        diameter = G.getLinkDiameter;
        diameter([61 80 109 140 147 192])=D;
        G.setLinkDiameter(diameter);
```

Obr. 20: Nastavení kalibrace

Pro každou zadanou kombinaci proměnných R a D byla ve dvou krocích provedena statická hydraulická analýza – nejprve s nulovým a poté s maximálním možným referenčním průtokem. Vypočtené hodnoty tlaku byly ukládány do proměnné *output* a následně byla metodou nejmenších čtverců stanovena odchylka mezi vypočtenými a referenčními hodnotami, která se ukládala do proměnné *chyba*. Pokud takto stanovená odchylka byla menší než odchylka stanovená v předcházejících krocích, uložila se zároveň do proměnné *chybaopt*, a daná drsnost a průměr potrubí se uložily jako proměnné *Ropt* a *Dopt*. Výsledkem kalibrace tak byla taková kombinace drsnosti a průměru potrubí, při nichž byla hodnota kritériální funkce (odchylky měřených a vypočtených hodnot stanovených pomocí MNČ) minimální. Na obr. 21 je vidět výše popsany postup – tedy vložení referenčního průtoku do daného uzlu, provedení hydraulické simulace a následný výpočet odchylky.

```
for index = 1:2
    demand = G.getNodeBaseDemands;
    demand{1}(24) = Qref(index);
    G.setNodeBaseDemands(demand);
    H = G.getComputedHydraulicTimeSeries;
    output(index) = H.Pressure(1,24);
end

chyba = sum((output - Tref).^2);
if chyba < chybaopt
    chybaopt = chyba;
    Ropt = R;
    Dopt = D;
end
```

Obr. 21: Provedení hydraulické simulace a výpočet odchylky

V posledním kroku byly výsledné optimální hodnoty drsnosti a průměru potrubí vloženy finálně do kalibrovaných úseků potrubí a takto nastavený model byl opět vyexportován ve formátu .inp. Tento model pak sloužil jako vstup pro kalibraci dalšího úseku potrubí, bylo však nutno manuálně provést manipulaci s uzávěry, jak již bylo zmíněno výše.

```
roughness = G.getLinkRoughnessCoeff;
roughness([61 80 109 140 147 192])=Ropt;
G.setLinkRoughnessCoeff(roughness);

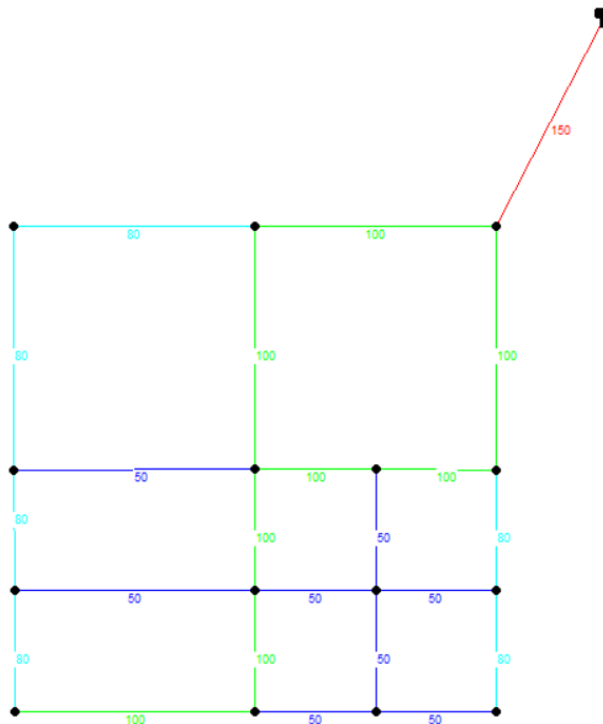
diameter = G.getLinkDiameter;
diameter([61 80 109 140 147 192])=Dopt;
G.setLinkDiameter(diameter);

G.saveInputFile('usek_20_kalib.inp');
G.unload
```

Obr. 22: Zadání optimálních hodnot drsnosti a průměru potrubí a export modelu

Testování kalibračního nástroje na fiktivní vodovodní síti

Aby bylo možné kalibrační nástroj použít pro kalibraci skutečné sítě, bylo nejprve nutné jeho funkčnost prokazatelně ověřit. Za tímto účelem byla v softwaru Epanet vytvořena fiktivní vodovodní síť. Tato síť je jednoduchého čtvercového tvaru a skládá se z jediného vodojemu o objemu 800 m³ se dnem na kótě 272,50 m n. m. a úrovní hladiny $h_{hl} = 3$ m, dále 15 uzlů a 23 úseků. Celková délka fiktivní sítě je 4 050 m. V síti byly zadány uzlové odběry o celkové hodnotě 0,38 l·s⁻¹. Tato síť simuluje malé spotřebiště venkovského charakteru.



Obr. 23: Fiktivní vodovodní síť – dimenze potrubí

Jednotlivým úsekům potrubí byly přiřazeny dimenze a drsnosti. Jako původní byly uvažovány dimenze od DN 50 do DN 150 a hodnoty drsnosti potrubí $k = 0,01$ mm pro plastové potrubí a $k = 0,10$ mm pro litinové potrubí (jedná se o hodnoty, které jsou v tabulkách běžně udávány pro nová potrubí). Dále byl zohledněn faktor času, a proto byly dimenze fiktivně zmenšeny a drsnosti potrubí zvětšeny – tyto hodnoty jsou považovány za skutečný stav sítě. Hodnoty udávané pro nová potrubí pak posloužila jako startovní hodnoty pro kalibraci. Dimenze potrubí uvažované v nekalibrovaném modelu jsou znázorněny na obr. 23. Všechny zmíněné parametry jsou pak patrné v tab. 8.

Tab. 8: Parametry fiktivní vodovodní sítě

Úsek	Délka	Materiál	Stáří	Skutečné		Výchozí pro kalibraci		Stanovené kalibrací	
				DN _{skut}	k _{skut}	DN	k	DN _{kal}	k _{kal}
	[m]	[-]	[rok]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	300	TLT	1969	140	2.00	150	0.10	140	2.00
2	250	TLT	1975	92	2.00	100	0.10	92	2.00
3	250	TLT	2000	80	0.50	80	0.10	80	0.50
4	250	TLT	2000	80	0.50	80	0.10	80	0.50
5	250	TLT	1975	92	2.00	100	0.10	92	2.00
6	250	PE	2005	100	0.15	100	0.01	100	0.15
7	125	PE	2005	100	0.15	100	0.01	100	0.15
8	125	PE	2005	100	0.15	100	0.01	100	0.15
9	250	TLT	1975	44	2.00	50	0.10	44	2.00
10	125	TLT	2000	80	0.50	80	0.10	80	0.50
11	125	TLT	2000	80	0.50	80	0.10	80	0.50
12	125	TLT	1975	92	2.00	100	0.10	92	2.00
13	125	TLT	1975	92	2.00	100	0.10	92	2.00
14	125	PE	2005	50	0.15	50	0.01	50	0.15
15	125	PE	2005	50	0.15	50	0.01	50	0.15
16	125	PE	2005	80	0.15	80	0.01	80	0.15
17	125	PE	2005	80	0.15	80	0.01	80	0.15
18	125	PE	2005	50	0.15	50	0.01	50	0.15
19	125	PE	2005	50	0.15	50	0.01	50	0.15
20	250	TLT	1975	92	2.00	100	0.10	92	2.00
23	125	PE	2005	50	0.15	50	0.01	50	0.15
24	125	PE	2005	50	0.15	50	0.01	50	0.15
25	250	TLT	1975	44	2.00	50	0.10	44	2.00

Na síti se „skutečnými“ hodnotami drsnosti a průměru potrubí byla dále provedena fiktivní měrná kampaň, která simulovala řízený proplach vodovodní sítě – to znamená, že bylo vytvořeno celkem 9 konfigurací modelu neboli 9 proplachovaných úseků. Síť byla rozdělována do jednotlivých proplachovaných úseků tak, aby jeden úsek byl vždy tvořen potrubím stejné dimenze a stejného materiálu.

Při měrné kampani byl v softwaru Epanet postupně pro jednotlivé úseky v přesně daných uzlech realizován přesně daný odběr a zaznamenáván hydrodynamický tlak. Takto vytvořená data poté posloužila jako referenční pro kalibraci modelu.

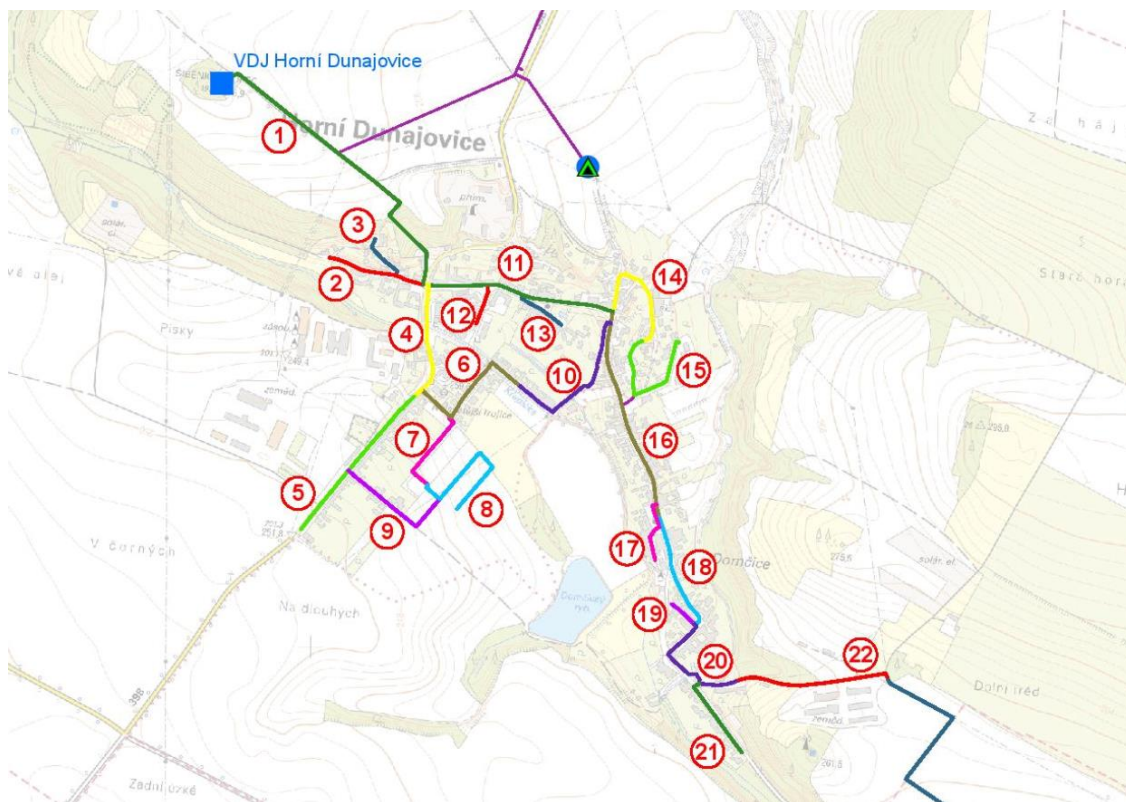
Kalibrace modelu probíhala úsek po úseku, od vodojemu směrem k nejbližšímu uzlu sítě. Jak již bylo zmíněno, hodnoty nastavené jako vstupní v nekalibrovaném modelu byly hodnoty drsnosti a průměru potrubí udávané pro nová potrubí. Z tab. 8 je patrné že hodnoty drsnosti i dimenze potrubí byly při kalibraci stanoveny naprosto přesně. Této přesnosti nebude u skutečné vodovodní sítě pravděpodobně nikdy dosaženo a je způsobena tím, že data z měrné kampaně, která byla provedena fiktivně, nebyla zatížena žádným šumem a nejistotami – v modelu, který byl kalibrován, byly naprosto přesně zadány nadmořské výšky jednotlivých hydrantů, poloha hladiny ve vodojemu i uzlové odběry, při měření nedocházelo k realizaci místních tlakových ztrát na hydrantu, data z měrné kampaně nebyla zatížena chybou měřidel atd. Přesto lze spolehlivě konstatovat, že vytvořený kalibrační nástroj je funkční, a je možné jej využít pro kalibraci hydraulického modelu skutečné vodovodní sítě.

4.5.2 Využití kalibračního nástroje při kalibraci reálné vodovodní sítě

Po ověření funkčnosti kalibračního nástroje bylo možné přistoupit ke kalibraci hydraulického modelu skutečné vodovodní sítě. Jako vstup posloužil model SV Horní Dunajovice kalibrovaný manuálně na běžný provozní stav – tedy model, ve kterém již byla kalibrována poloha hladiny ve vodojemu a výstupní tlak regulačních ventilů.

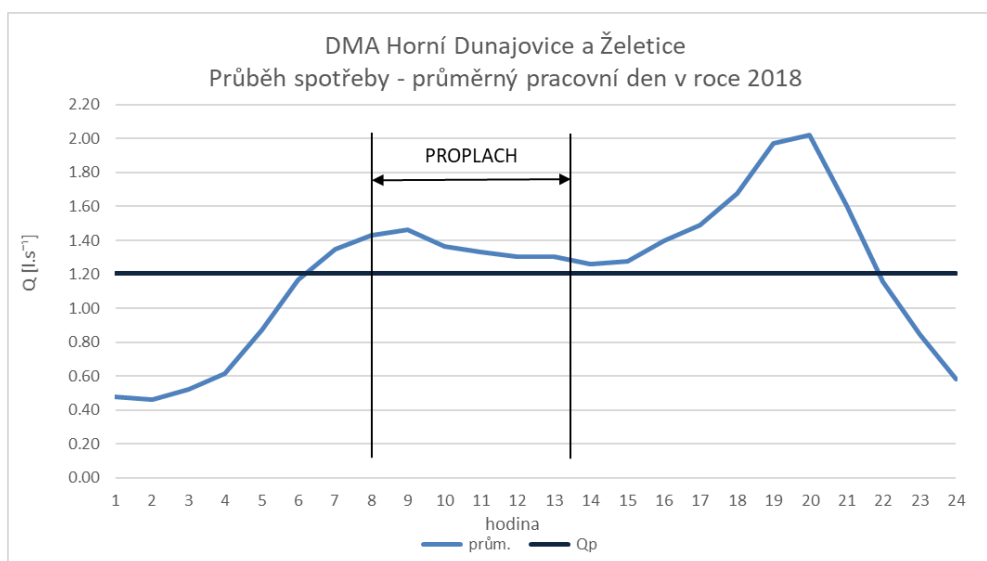
Vzhledem k časové náročnosti kalibrace bylo z celkového počtu 72 úseků kalibrováno prvních 22 úseků, které kompletně pokrývají vodovodní síť v obci Horní Dunajovice – mezi nimi byly jak úseky tvořené hlavním zásobním řadem, tak i rozváděcí řady. O které úseky se jedná je patrné z obr. 24. V těchto úsecích byly zastoupeny dimenze od DN 90 do DN 225. Jelikož veškeré potrubí v síti je plastové, nebylo při kalibraci rozlišováno mezi jednotlivými materiály.

Před samotnou kalibrací bylo nutné zpracovat data získaná při proplachu vodovodní sítě a připravit je pro další použití. Tato data byla ve formě protokolu pro každý proplachovaný úsek. Protokol obsahoval mimo jiné informace o celkovém objemu vody použité k propláchnutí daného úseku, zákalu vypouštěné vody, době trvání proplachu, ale především v něm byl zapsán hydrodynamický tlak při nulovém průtoku hydrantem a dále maximální dosažený průtok a jemu odpovídající tlak. Hodnoty tlaku byly měřeny v barech, jelikož však software Epanet počítá v jednotkách metry vodního sloupce, bylo třeba je taktéž přepočítat na metry vodního sloupce. Z takto upravených hodnot bylo následně vytvořeno celkem 44 referenčních souborů – 2 soubory pro každý kalibrováný úsek – jeden pro hydrodynamický tlak a jeden pro průtok.



Obr. 24: Kalibrované úseky

Dále je také třeba zmínit, že proplach probíhal vždy v pracovní dny, v čase od 8:00 do 13:30. V tomto časovém úseku se nevyskytuje odběrová špička a lze očekávat, že průtok bude přibližně průměrný. Tento předpoklad potvrdila i analýza spotřeby vody, což je patrné z následujícího grafu, na němž je průběh spotřeby vody v DMA Horní Dunajovice a Želetice v průměrném pracovním dni v roce 2018. Zatímco tedy zvolené hydranty byly při kalibraci zatěžovány maximálním dosaženým průtokem, ve zbytku sítě byly realizovány průměrné uzlové odběry.



Graf 8: Průběh spotřeby vody v DMA Horní Dunajovice a Želetice v průměrném pracovním dni v roce 2018

Jako vstup pro kalibraci prvního úseku posloužil již zmiňovaný model kalibrovaný pro běžný provozní stav. V tomto modelu byla nastavena konfigurace uzávěrů odpovídající manipulaci na síti před proplachem prvního úseku potrubí. Dále bylo nutné ve zdrojovém kódu kalibračního nástroje nastavit správné referenční, vstupní a výstupní soubory, číslo uzlu, v němž byl realizován odběr a čísla kalibrovaných úseků. Samotná kalibrace pak byla provedena automaticky za pomoci kalibračního nástroje. Výstupem kalibrace byl model, v němž byly nastaveny nové hodnoty hydraulické drsnosti a případně i průměru potrubí. Tento model posloužil jako okrajová podmínka pro kalibraci dalšího úseku, opět však bylo nutné v něm manuálně nastavit správnou konfiguraci uzávěrů odpovídající danému proplachovanému úseku. Totožně bylo nutné také provést nastavení zdrojového kódu pro daný kalibrovaný úsek. Stejný postup byl opakován až do chvíle, kdy byly kalibrovány všechny zvolené úseky.

4.5.3 Výsledky kalibrace

Všech 22 zvolených úseků se podařilo úspěšně kalibrovat. V rámci kalibrace bylo zjištěno, že při řízeném proplachu vodovodní sítě došlo u úseku č. 9 pravděpodobně ke špatné manipulaci s uzávěry a tento úsek proto nebylo možné kalibrovat samostatně. Jelikož se však tato chyba promítla i při proplachu úseku č. 8, a voda při něm proudila i úsekem č. 9, byla kalibrace těchto dvou úseků provedena společně. K tomuto řešení bylo možno přistoupit, neboť oba úseky jsou tvořeny potrubím stejné dimenze, materiálu i stáří.

Výsledky kalibrace jsou prezentovány v tab. 9. Pro přehlednost byly zachovány názvy veličin tak, jak byly pojmenovány proměnné v kalibračním nástroji. Pro každý úsek jsou patrné hodnoty vnějšího průměru potrubí DN , vnitřního průměru potrubí $D_{vnitř}$, dále hodnoty hydraulické drsnosti R_{opt} a průměru potrubí D_{opt} stanovené kalibrací, referenční průtok Q_{ref} , referenční tlak T_{ref} a modelovaný tlak $output$. Tabulku pak uzavírá $chyba_{opt}$, což je hodnota odchylky mezi referenčními a vypočtenými hodnotami tlaku, stanovená metodou nejmenších čtverců při kalibraci daného úseku, dle vzorce:

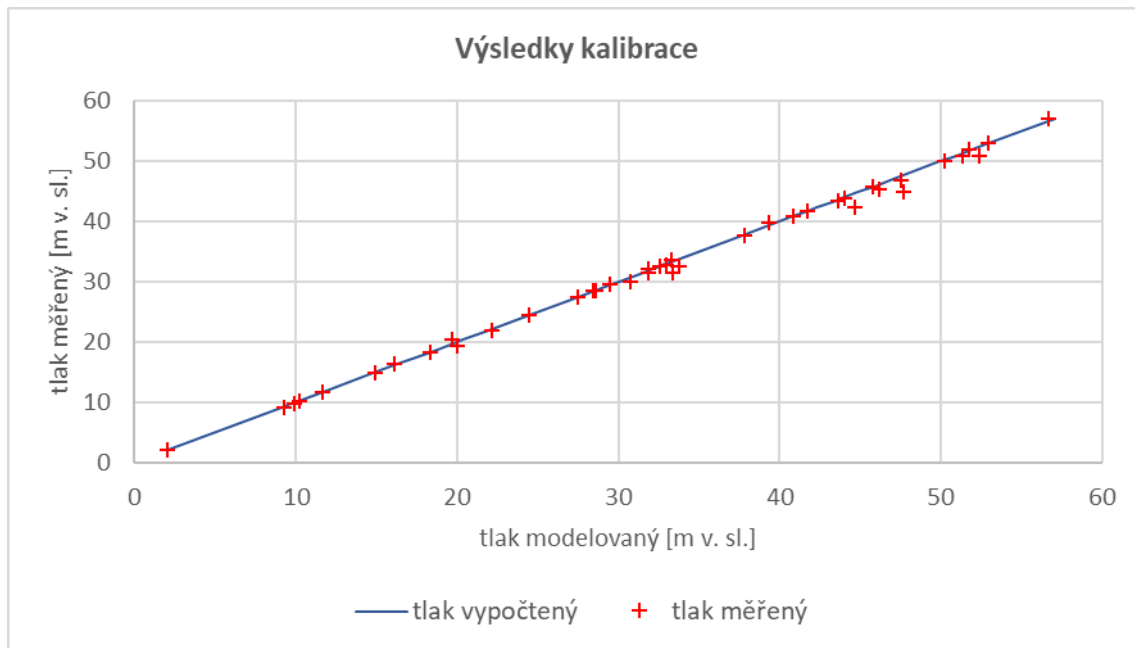
$$chyba_{opt} = \sum (output - T_{ref})^2 \quad (4.1)$$

Tab. 9: Výsledky kalibrace pomocí kalibračního nástroje

ÚSEK	DN	$D_{vnitř}$	D_{opt}	R_{opt}	Q_{ref}	T_{ref}	$output$	chyba _{opt}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[l·s ⁻¹]	[m v. sl.]	[m v. sl.]	
1	225	198.0	198.0	1.90	0.0	19.3	20.0	0.8
					22.0	20.4	19.7	
2	90	79.2	79.0	0.15	0.0	42.3	44.7	6.0
					8.3	32.7	33.0	
3	90	79.2	79.0	0.40	0.0	30.0	30.7	0.5
					8.9	18.3	18.3	
4	110	96.8	96.0	0.60	0.0	44.8	47.7	8.4
					11.2	28.5	28.6	
5	110	96.8	96.0	0.10	0.0	31.6	33.4	3.3
					12.0	9.2	9.3	

ÚSEK	DN	D _{vnitř}	Dopt	Ropt	Qref	Tref	output	chybaopt
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[l·s ⁻¹]	[m v. sl.]	[m v. sl.]	
6	160	141.0	141.0	0.65	0.0	52.0	51.8	0.1
					8.3	43.8	44.0	
7	90	79.2	79.0	0.95	0.0	43.5	43.7	0.1
					8.3	14.8	14.9	
8+9	90	79.2	79.0	0.20	0.0	45.8	45.8	0.0
					9.3	10.2	10.2	
10	160	141.0	141.0	0.35	0.0	40.7	40.8	0.1
					8.5	31.6	31.9	
11	160	141.0	118.0	1.85	0.0	39.7	39.3	0.1
					11.8	11.7	11.7	
12	90	79.2	79.0	0.40	0.0	50.9	51.4	0.2
					8.3	41.8	41.7	
13	90	79.2	79.0	0.10	0.0	49.9	50.3	0.2
					9.0	37.7	37.9	
14	110	96.8	96.0	0.15	0.0	33.6	33.3	0.1
					11.6	16.3	16.1	
15	110	96.8	84.0	1.95	0.0	32.6	33.8	1.5
					7.3	2.0	2.1	
16	160	141.0	127.0	0.15	0.0	45.3	46.2	0.8
					10.7	29.5	29.5	
17	90	79.2	79.0	0.15	0.0	49.9	50.2	0.2
					8.5	32.1	31.9	
18	160	141.0	114.0	2.00	0.0	53.0	52.9	0.1
					11.0	21.9	22.2	
19	90	79.2	78.0	1.40	0.0	50.9	52.4	2.2
					8.3	32.6	32.6	
20	160	141.0	107.0	0.10	0.0	46.9	47.6	0.5
					8.0	24.4	24.5	
21	90	79.2	78.0	1.10	0.0	57.1	56.7	0.1
					7.3	27.5	27.5	
22	160	141.0	119.0	1.85	0.0	28.5	28.5	0.1
					6.8	9.7	9.9	

Z grafu 9 je patrná korelace mezi vypočtenými a měřenými hodnotami tlaku. Stejně jako v případě kalibrace na běžný provozní stav, i zde je modrá přímka tvořena vypočtenými hodnotami tlaku a kolem ní jsou rozloženy hodnoty měřené. Koeficient korelace mezi těmito dvěma soubory dat je 0,999. Celková odchylka hodnot vypočtených při simulaci od měřených dat je 0,444 m v. sl. a model tak lze považovat za uspokojivě kalibrovaný.



Graf 9: Výsledky kalibrace s využitím kalibračního nástroje

Z tab. 9 je vidět, že při kalibraci nedošlo k častému zmenšování dimenze potrubí, zpravidla rostla pouze drsnost, což napovídá, že u plastových potrubí nedochází k nijak výraznému zanášení, a tedy zmenšování průtočného profilu. Je třeba si také uvědomit, že vodovodní síť považujeme za hydraulicky dlouhé potrubí a v hodnotě hydraulické drsnosti jsou zahrnuty i místní ztráty, způsobené armaturami a tvarovkami osazenými na potrubí, což může mít za následek zvýšení této hodnoty. Samostatným koeficientem místní ztráty byly zohledňovanými pouze ztráty na hydrantech, což bude více vysvětleno v kapitole 5.

Z tabulky je také patrné, že k výraznému snížení dimenze potrubí došlo u úseku 15 a dále u úseků 11, 16, 18, 20 a 22. V případě úseku 15 může výrazné snížení průměru potrubí signalizovat hydraulický problém, jako například částečně uzavřený uzávěr v tomto úseku. Stejně tak se mohlo stát, že používaný hydrant nebyl při proplachu vodovodní sítě naplno otevřen. Zvláštností je výrazné snížení průměru potrubí u úseků 11, 16, 18, 20 a 22, které na sebe navazují a jsou tvořeny hlavním zásobním řadem. V případě, že by důvodem výrazného snížení dimenze byl hydraulický problém vyskytující se v některém z těchto úseků, projevil by se snížením dimenze pouze v daném úseku. Jelikož se však jedná o několik úseků, které tvoří jeden řad, je zde možnost, že dimenze potrubí uvedená v geografickém informačním systému provozovatele není správná, a v zemi je ve skutečnosti uloženo potrubí menší dimenze. Hlavní zásobní řad je vystavěn z PVC potrubí, mohlo by se tedy jednat například o potrubí PVC DN 140×7,5. Výsledné dimenze, které byly u těchto úseků kalibrovány, se pohybují v intervalu od 107 mm do 127 mm. Důvody, které mohly způsobit, že se od sebe jednotlivé hodnoty takto liší, budou dále rozvedeny v kapitole 5.

Další zvláštností při kalibraci byly úseky 6 a 10, které na sebe také navazují. Dle podkladů z GIS provozovatele se jedná o potrubí PVC DN 90×5,4. Když však byly v modelu při kalibraci těchto úseků zadány odpovídající hodnoty průměru potrubí, a model byl zatížen průtokem změřeným při proplachu vodovodní sítě, výsledkem byly velmi vysoké záporné

hodnoty hydrodynamického tlaku. To napovídá, že potrubí uložené v zemi má ve skutečnosti výrazně větší průměr, než jaký je uveden v podkladech. Pro správnou kalibraci tedy bylo nutné nejprve stanovit, o jaké potrubí se jedná a až poté provést finální kalibraci. Hodnoty průměru potrubí byly nejprve manuálně nastavovány dle rozměrové řady vyráběných PVC potrubí a bylo testováno, zdali vypočtené hodnoty tlaku alespoň řádově odpovídají změřeným hodnotám. Uspokojivé shody bylo dosaženo u potrubí PVC DN 160×9,5. Následně byla provedena detailní kalibrace, jejíž výsledky jsou patrné v tab. 9.

Při tvorbě kalibračního nástroje byl aplikován předpoklad, že dimenze potrubí uváděné v podkladech provozovatele vodovodní sítě, jsou správné. Jako maximální hodnota průměru potrubí tedy vždy byla nastavena hodnota vnitřního průměru nového potrubí dané dimenze a při prohledávání prostoru přípustných řešení se průměr vždy zmenšoval. Ukázalo se však, že zaznamenané informace ne vždy odpovídají skutečnosti. Kalibrační software bez potíží dokáže určit menší průměr potrubí, avšak není nastaven pro hledání průměrů větších. Zde se tedy ukázal prostor pro další zlepšení kalibračního nástroje, který by měl být v praxi pro kalibraci běžně využitelný. Toto zlepšení by vyžadovalo změnu optimalizační metody. Namísto postupného prohledávání prostoru přípustných řešení by bylo vhodné použití genetických algoritmů, které jsou dnes v akademické sféře pro kalibraci již používány, avšak vytvoření takového algoritmu je velmi náročné.

5 DISKUZE

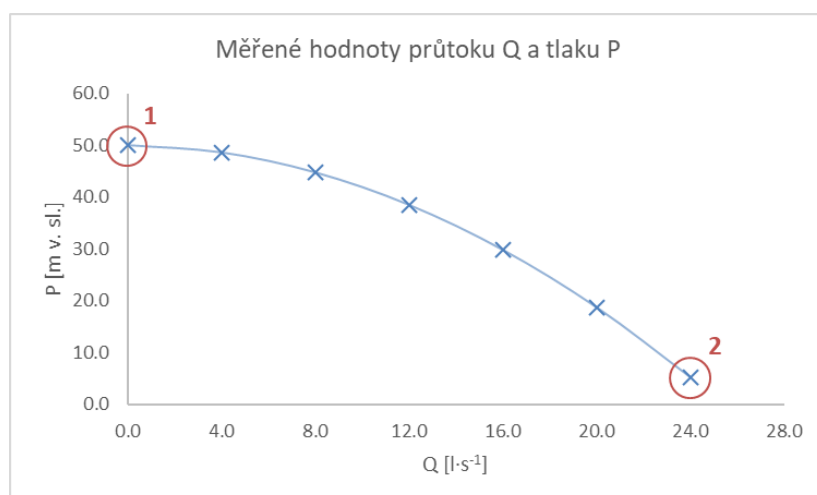
Přestože bylo jak při plošné kalibraci modelu na běžný provozní stav prováděné manuálně, tak i při kalibraci na vysoké rychlosti proudění prováděné automaticky za použití kalibračního nástroje dosaženo uspokojivých výsledků, je třeba brát v potaz nejistoty a omezení, které při kalibraci máme. Mezi ně se řadí například chyby ve vstupních datech, chyby měření, otázka zohlednění místních ztrát a mnohé další.

Problematická mohou být už samotná vstupní data. Například nadmořské výšky uzlů se zpravidla zadávají na základě údajů obsažených v geografickém informačním systému provozovatele, ty však nemusí být přesné a řádově se mohou lišit i o metry. Jelikož ale skutečnou nadmořskou výšku uzlu neznáme, není možné ji při kalibraci měnit. Vliv těchto nepřesností je například vidět u úseku 2 nebo 4 v tab. 8, kdy při průměrném průtoku vody v síti, respektive nulovém průtoku hydrantem se od sebe měřený a vypočtený tlak zásadně liší. Tato skutečnost tedy vede k otázce, nakolik přesná kalibrace je, i přesto, že rozdíl mezi tlakem měřeným a vypočteným při vysokém průtoku je minimální.

Dalším faktorem, který v přesnosti kalibrace může hrát roli, je chyba měření. Tlaková čidla použitá pro měrnou kampaň – Sebalog P-3, vyráběná společností SebaKMT, mají rozsah měření 0-25 bar a maximální chybu měření deklarovanou výrobcem $< 1 \%$. Podobně jsou na tom i tlaková čidla Baroli od společnosti BD Sensors. Vyjádříme-li měřicí rozsah jako 25 bar = 254,75 m v. sl., pak zjistíme, že maximální možná chyba vzniklá při měření, je až 2,55 m v. sl. Teoreticky tak chyba měření může vysoce převyšovat podmínku, která říká, že aby bylo možné model považovat za uspokojivě kalibrovaný, musí být rozdíl mezi měřenými a vypočtenými tlaky menší než ± 1 m v. sl. Jedná se však o maximální možnou chybu a v katalogovém listu výrobku na webových stránkách výrobce se lze dočíst, že běžná přesnost senzoru je $\pm 0,1 \%$, tedy o řád menší [27].

Při analýze spotřeby vody se také ukázalo, že problematické může být i měření průtoku, respektive dálkový přenos dat z průtokoměru do SCADA systému, kdy v některých dnech byly přenášeny hodnoty průtoku nulové. Pokud by se takové dny vyskytovaly často, tato skutečnost by mohla ovlivnit správnost statisticky zpracovaných průtoků, kterými byl následně hydraulický model zatěžován. V případě dat přenášovaných z průtokoměrů osazených na SV Horní Dunajovice se však jednalo pouze o výjimečný jev.

Přestože vstupní data použitá pro kalibraci na vysoké rychlosti proudění byla získána velmi přesným měřením, a výsledek kalibrace tak lze považovat za kvalitní, i zde by mohlo dojít k vylepšení, neboť pro každý kalibrovaný úsek byly k dispozici pouze dvě dvojice hodnot – nulový průtok hydrantem (kdy ve zbytku sítě se předpokládají průměrné odběry) a maximální tlak v daném uzlu a maximální průtok hydrantem a minimální tlak v daném uzlu. Jedná se o body 1 a 2 na ilustračním grafu 10. Pro zlepšení přesnosti kalibrace by však bylo přínosné, kdyby ideální křivku, prokládanou měřenými daty za pomoci metody nejmenších čtverců, bylo možné ladit na základě změřených hodnot rovnoměrně rozdělených v intervalu od nulového po maximální průtok, respektive od maximálního po minimální tlak.



Graf 10: Ideální rozložení hodnot při měření za účelem získání kalibračních dat

Nepřesnosti mohou vznikat také díky tomu, že při proplachu vodovodní sítě dochází ke vzniku velké místní tlakové ztráty na hydrantu a tuto skutečnost bylo nutné u kalibrace zohlednit. To bylo možné, díky přímému měření, které bylo v minulosti provedeno vedoucím této diplomové práce. Zmiňované měření bylo provedeno velmi podobně, jako v případě sběru dat pro kalibraci hydraulického modelu v rámci této diplomové práce – při proplachu vodovodní sítě byl měřen průtok hydrantem a tlak na hydrantovém nástavci. Navíc však také bylo osazeno měření tlaku na vodovodní síti bezprostředně za proplachovaným úsekem na potrubí velké dimenze, kde rychlost proudění byla minimální, a tak i tlakové ztráty byly zanedbatelné. Díky tomuto měření byly přesně známy průtok a tlaková ztráta na hydrantu, a bylo tedy možné stanovit Q-H charakteristiku hydrantu. Z té byl s pomocí rovnice 5.1 a metody nejmenších čtverců následně stanoven koeficient κ pro výpočet tlakové ztráty na hydrantu.

$$h_{zm} = \kappa \cdot Q^2 \quad (5.1)$$

Hodnota koeficientu κ byla stanovena jako $\kappa = 0,017$. Díky znalosti tohoto koeficientu bylo možné na základě změřeného průtoku pro každý proplachovaný úsek předem stanovit hodnotu tlakové ztráty na hydrantu, a z rovnice 5.2 následně stanovit velikost koeficientu místní tlakové ztráty, která byla před kalibrací zadána do modelu v Epanetu.

$$h_{zm} = \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5.2)$$

Vzhledem ke skutečnosti, že se různé hydranty na síti liší svým stářím, mírou koroze, hloubkou uložení atd., nelze takto stanovený koeficient místní ztráty považovat za naprosto přesný. Vyjádření místní ztráty na hydrantu však bylo pro úspěšné provedení kalibrace nezbytné, a míra nejistoty, která byla společně s tímto koeficientem do kalibrace vnášena, byla považována za přijatelnou.

6 ZÁVĚR

Hydraulické modely jsou výborným nástrojem pro provozování vodovodních sítí, na jejich základě je možné posuzovat aktuální stav sítě, testovat její chování při nejrůznějších zatěžovacích stavech, které se běžně nevyskytují, plánovat koncepci dalšího rozvoje sítě a mnohé další. Jelikož však spoléháme na správnost informací o tlakových a průtokových poměrech, které nám tyto modely dávají, je jejich správná kalibrace nezbytná, neboť má přímý vliv na kvalitu výsledků celého modelu.

V teoretické části této práce jsou popsány základní principy hydraulického modelování, tedy výpočetní jádro, které je tvořeno základními rovnicemi mechaniky tekutin, dále vztahy pro stanovení součinitele ztrát třením a ztrátové výšky. Vysvětleno je také, z čeho se hydraulický model skládá, jaké jsou vstupy potřebné pro jeho tvorbu, jaké typy hydraulické analýzy je možno provést a jaké podmínky musí splňovat. Dále jsou vysvětleny principy kalibrace hydraulických modelů – jaké jsou kroky v procesu kalibrace a jaké parametry je možno kalibrovat. Teoretická část se také zabývá moderním přístupem k terénnímu měření pro potřeby kalibrace hydraulických modelů. S velkou výhodou začínají být využívány dvoufázové měrné kampaně založené na hydrantových testech, spojené s vícefázovou kalibrací, kdy v první fázi měrné kampaně nejprve dojde k odhalení chyb v nastavení modelu, a dále se sbírají data pro samotnou kalibraci. Pozornost je také věnována nástrojům pro kalibraci, které jsou v současnosti založeny na optimalizačních metodách.

Praktická část se zabývá samotnou kalibrací hydraulického modelu skupinového vodovodu Horní Dunajovice. Na vodovodní síti byla provedena měrná kampaň, která posloužila k získání dat pro kalibraci kvazi-dynamického hydraulického modelu na běžný provozní stav. Kalibrace byla prováděna manuálně – byla upravena poloha hladiny ve vodojemu, změněno nastavení regulačních ventilů a následně byly zvětšovány drsnosti, případně zmenšovány dimenze potrubí. Výsledná odchylka mezi tlaky změřenými při měrné kampani a vypočtenými hydraulickou simulací byla 0,717 m v. sl. a model tedy byl kalibrován s uspokojivou přesností. Kromě měrné kampaně byl na vodovodní síti také proveden řízený proplach, při němž bylo možné získat data pro kalibraci statického hydraulického modelu na vysoké průtoky, které se v síti běžně nevyskytují (mohlo by se jednat například o požární odběr a podobně). Pro účely této kalibrace byl vytvořen kalibrační nástroj v programovacím jazyce MATLAB. Tento kalibrační nástroj funguje na principu optimalizace – jako kritériální funkce posloužila metoda nejmenších čtverců, s jejíž pomocí byl minimalizován rozdíl mezi měřenými a vypočtenými hodnotami hydrodynamického tlaku, kalibrovanými proměnnými byly hydraulická drsnost a dimenze potrubí. Funkčnost kalibračního softwaru byla nejprve ověřena na fiktivní síti, a poté, co byla prokázána, byl tento software použit pro kalibraci hydraulického modelu skutečné vodovodní sítě. Při kalibraci hydraulického modelu vodovodní sítě v obci Horní Dunajovice bylo dosaženo odchylky mezi měřenými a vypočtenými tlaky pouze 0,444 m v. sl. a model lze proto také považovat za uspokojivě kalibrováný.

Na závěr lze tedy říct, že všechny cíle, které byly stanoveny v zadání a v úvodu této diplomové práce, byly dosaženy.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TUHOVČÁK, L., ADLER, P., KUČERA, T., RACLAVSKÝ, J., *Vodárenství: B. Doprava vody*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2006.
- [2] ŘÍHA, J., *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0827-8.
- [3] 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.
- [4] REICHL, J., VŠETIČKA, M., *Zákon zachování energie* [online]. MEF, 2012 [cit. 2019-08-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/50-zakon-zachovani-energie>.
- [5] REICHL, J., VŠETIČKA, M., *Zákon zachování hybnosti* [online]. MEF, 2012 [cit. 2019-08-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/33-zakon-zachovani-hybnosti>.
- [6] JANDORA, J., ŠULC, J., *Hydraulika: modul 01*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [7] KOLÁŘ, V. a kol. *Hydraulika* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. Technický průvodce.
- [8] SAVIC, D. A., KAPELAN, Z. S., JONKERGOUW, P. M. R., *Quo vadis water distribution model calibration?* Urban Water Journal. 2009, (6). DOI: 10.1080/15730620802613380.
- [9] ORMSBEE, L. E., *Implicit network calibration*, Journal of Water Resources Planning and Management. 1989, 115 (2), s. 243-257.
- [10] ORMSBEE, L. E., LINGIREDDY, S., *Calibration of Hydraulic Network Models* Journal of the American Water Works Association, 1997, 89 (2), s. 42-50.
- [11] KOVÁŘ, J., RUČKA, J., *Software Tool for Calibration of Hydraulic Models of Water-Supply Networks*. In Mechatronics 2013 Recent Technological and Scientific Advances. 1. London: Springer, 2013. s. 253-258. ISBN: 978-3-319-02293-2.
- [12] KOLÁŘ, V., VINOPAL, S., *Hydraulika průmyslových armatur (Příručka praktických výpočtů)*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [13] *Můžou vznikat usazeniny i v plastových rozvodech vody?* [online], 2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <http://cistavodazvodovodu.blogspot.com/2019/02/muzou-vznikat-usazeniny-i-v-plastovych.html>.
- [14] NOVÁK, P., *Koroze kovů* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>.
- [15] WALSKI, T., *Technique for Calibrating Network Models*, Journal of Water Resources Planning and Management 1983, 109 (4), s. 360-372.

- [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] VREEBURG, J., *Discolouration in drinking water systems: a particular approach*, Enschede: Gildeprint BV, 2007. ISBN 978-90-74741-91-0.
- [18] RAJNOCHOVÁ, M.; RUČKA, J.; SUCHÁČEK, T., *Význam a dlouhodobý účinek řízeného proplachu na vodovodní síť* [online]. Vodovod.info, 2019 [cit. 2020-01-02]. ISSN: 1804-7157. Dostupné z: <http://vodovod.info/index.php/clanky/423-vyznam-a-dlouhodoby-ucinek-rizeneho-proplachu-na-vodovodni-sit#.XhBD70dKhPb>.
- [19] SOPHOCLEOUS, S., SAVIC, D., KAPELAN, Z., GIUSTOLISI, O., *A two-stage calibration for detection of leakage hotspots in a real water distribution network*. Procedia Engineering 186 (2017), s. 168-176.
- [20] NÁPLAVOVÁ, E., *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.
- [21] DALÍK, J., *Matematika IV: Numerická analýza*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2010, s. 63, ISBN 978-80-7204-702-4.
- [22] *Biologické algoritmy (1) – Evoluční algoritmy* [online], 2012 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/biologicke-algoritmy-1-evolucni-algoritmy/>.
- [23] MAREK, M., *Toolbox pro vícekriteriální optimalizační problémy*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 81 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Kadlec, Ph.D.
- [24] ELIADES, D., KYRIAKOU, S., VRACHIMIS, S., POLYCARPOU, M., *EPANET-MATLAB Toolkit: An Open-Source Software for Interfacing EPANET with MATLAB*. Proc. 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI), The Netherlands, 2016, s. 8.
- [25] *MATLAB & SIMULINK* [online], [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/matlab/details/>.
- [26] *Epanet-Matlab Toolkit* [online], [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://github.com/OpenWaterAnalytics/EPANET-Matlab-Toolkit>.
- [27] *Sebalog P-3 – Logger tlaku pro přímé měření ve vodovodní síti* [online], [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: https://www.sebakmt.com/files/downloads/datasheets/cz/LFT_SebalogP-3_cz_2013_02.pdf.

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hodnoty součinitele hydraulické drsnosti potrubí k [7].....	18
Tab. 2: Délka potrubí dle dimenze a materiálu	28
Tab. 3: Spotřeba vody v DMA Horní Dunajovice a Želetice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů.....	33
Tab. 4: Spotřeba vody v DMA Žerotice a Kyjovice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů.....	34
Tab. 5: Spotřeba vody v DMA Vítonice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů.....	34
Tab. 6: Výsledky kalibrace hydraulického modelu na běžný provozní stav.....	39
Tab. 7: Proměnné používané v kalibračním nástroji.....	42
Tab. 8: Parametry fiktivní vodovodní sítě.....	47
Tab. 9: Výsledky kalibrace pomocí kalibračního nástroje.....	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Rozdělení proudu při turbulentním proudění.....	8
Obr. 2: Schéma průběhu kalibrace	16
Obr. 3: Zanášení plastového potrubí [12] Obr. 4: Zanášení kovového potrubí [13].....	17
Obr. 5: Princip optimalizační metody kalibrace [19].....	22
Obr. 6: Metoda nejmenších čtverců [20].....	22
Obr. 7: Situace širších vztahů – obce Horní Dunajovice, Želetice, Žerotice, Kyjovice a Vítovice	25
Obr. 8: Přehledná situace skupinového vodovodu Horní Dunajovice	27
Obr. 9: Rozmístění měrných míst v obci Horní Dunajovice.....	29
Obr. 10: Osazení tlakového čidla Baroli na hydrantovém nástavci při proplachu vodovodní sítě	30
Obr. 11: Tlakové čidlo Sebalog P-3 osazené v podzemním hydrantu	31
Obr. 12: Zápis kalibračních dat	32
Obr. 13: Výsledky kalibrace pro měrné místo T4 v TP Horní Dunajovice a Želetice.....	37
Obr. 14: Výsledky kalibrace pro měrné místo T15 v TP Žerotice a Kyjovice	38
Obr. 15: Výsledky kalibrace pro měrné místo T10 v TP Vítovice	38
Obr. 16: Schéma řízeného proplachu vodovodní sítě	40
Obr. 17: Příklady použití Epanet-MATLAB-Toolkitu [23].....	42
Obr. 18: Schéma detailní kalibrace	43
Obr. 19: Inicializace kalibračního nástroje před provedením kalibrace.....	44
Obr. 20: Nastavení kalibrace	45
Obr. 21: Provedení hydraulické simulace a výpočet odchylky	45
Obr. 22: Zadání optimálních hodnot drsnosti a průměru potrubí a export modelu.....	46
Obr. 23: Fiktivní vodovodní síť – dimenze potrubí	46
Obr. 24: Kalibrované úseky	49

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Rozdělení potrubí dle jednotlivých materiálů.....	28
Graf 2: Rozdělení potrubí dle jednotlivých dimenzí.....	28
Graf 3: Průběh spotřeby vody v DMA Horní Dunajovice a Želetice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů.....	33
Graf 4: Průběh spotřeby v DMA Žerotice a Kyjovice bez rozlišení pracovních a nepracovních dnů.....	34
Graf 5: Průběh spotřeby vody v DMA Kyjovice bez rozlišená pracovních a nepracovních dnů.....	35
Graf 6: Výsledky analýzy závislosti tlakové ztráty na drsnosti potrubí při rychlosti proudění $v = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	36
Graf 7: Výsledky kalibrace hydraulického modelu – korelace mezi vypočtenými a měřenými daty.....	39
Graf 8: Průběh spotřeby vody v DMA Horní Dunajovice a Želetice v průměrném pracovním dni v roce 2018.....	49
Graf 9: Výsledky kalibrace s využitím kalibračního nástroje.....	52
Graf 10: Ideální rozložení hodnot při měření za účelem získání kalibračních.....	55

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$C_1, C_2 \dots$	součinitele pro ohodnocení úseku potrubí
$D \dots$	průměr potrubí [m]
DMA...	měrný okrsek
DN...	jmenovitá světlost (Diameter Nominal)
$f_i \dots$	vektor objemového zatížení
$f(x), F(x) \dots$	funkce
$g \dots$	gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
GIS...	geografický informační systém
$h \dots$	geodetická výška [m]
$h_{hl} \dots$	výška hladiny [m]
$h_z \dots$	tlaková ztráta [m]
$h_{zm} \dots$	místní ztráta [m]
$h_{zt} \dots$	ztráta třením [m]
$k \dots$	drsnost potrubí [mm]
$L \dots$	délka potrubí [m]
MNČ...	metoda nejmenších čtverců
NSGA...	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
$p \dots$	tlak [Pa, bar]
$P_i \dots$	ohodnocení úseku [-]
PE...	polyetylen
PN...	jmenovitý tlak (Pressure Nominal)
PVC...	polyvinylchlorid
$q \dots$	specifická spotřeba vody [$m^2 \cdot s^{-1}$]
$Q \dots$	průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$]
$R \dots$	hydraulický poloměr [m]
Re...	Reynoldsovo číslo [-]
RV...	redukční ventil
$S \dots$	plocha [m^2]
SCADA...	dispečerské řízení a sběr dat (Supervisory Control And Data Acquisition)
SDR...	poměr průměru potrubí a tloušťky stěny (Standard Dimension Ratio)

SV...	skupinový vodovod
TP...	tlakové pásmo
u...	bodová rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v...	průřezová rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
VDJ...	vodojem
α ...	Coriolisovo číslo
δ ...	tloušťka mezní vrstvy [mm]
$\dot{\epsilon}_{ij}$...	tenzor deformační rychlosti
$\dot{\epsilon}_v$...	tenzor rychlosti objemového přetvoření
σ_{ij} ...	tenzor napětí
ρ ...	objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
μ ...	dynamická viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
ν ...	kinematická viskozita [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
λ ...	součinitel ztrát třením [-]
ξ ...	součinitel místní ztráty [-]

SEZNAM PŘÍLOH

1. Situace skupinového vodovodu Horní Dunajovice
2. Situace měrné kampaně

SUMMARY

Hydraulic models are an excellent tool for the operation of water supply networks. Based on them it is possible to assess the current state of the network, test its behavior under various load cases that do not commonly occur, plan the concept of further network development and so on. However, as we rely on the accuracy of the pressure and flow given by these models, correct calibration is essential as it directly affects the quality of the resulted model.

The theoretical part of this diploma thesis is describing basic principles of hydraulic modeling, ie. computational core, which is formed by basic equations of fluid mechanics, as well as relations for determination of friction losses. It also explains what the hydraulic model consists of, what inputs are needed for its creation, what types of hydraulic analysis can be performed and what constraints it must meet. Furthermore, the principles of calibration of hydraulic models are explained – what are the steps in the calibration process and which parameters can be calibrated. The theoretical part also deals with modern approach to field measurement for calibration of hydraulic models. Two-phase field measuring campaigns based on hydrant tests are being used, in combination with a multi-phase calibration. The accuracy of model setup is checked in the first phase of the measurement campaign, and data for the calibration itself are collected in the second phase. Attention is also paid to calibration tools, which are currently based on optimization methods.

The practical part of this diploma thesis deals with the calibration of the hydraulic model of the group water supply system Horní Dunajovice. A measuring campaign was carried out on the water supply network to obtain data for calibrating the extended period hydraulic model for normal operating conditions. The calibration was then performed manually – the water level in the water reservoir was adjusted, the pressure reducing valves settings were changed and the roughnesses of pipes were increased and/or the dimensions of pipes were reduced. The resulting deviation between the pressures measured during the measuring campaign and the pressures calculated during hydraulic simulation was $0.717 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and so it can be said that the model was calibrated with satisfactorily accuracy. In addition, a controlled flushing was also performed on the water supply network to obtain data for calibrating the static hydraulic model for high flow rates that are not commonly found in the network (such as fire flow etc.). For this purpose a calibration tool was created in the MATLAB programming language. This calibration tool uses the least squares method as a criterion function to minimize the difference between the measured and calculated hydrodynamic pressure values. The calibrated variables were hydraulic roughness and piping dimensions. The functionality of the calibration software was first verified on a fictive water supply network. After proving its functionality, it was used to calibrate the hydraulic model of the actual water supply network. When calibrating the hydraulic model of the water supply network in the village of Horní Dunajovice, the deviation between the measured and calculated pressures was only 0.444 m and the model can therefore also be considered satisfactorily calibrated.