



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

# HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ SÍDLIŠTĚ BRNO - BYSTRC

HYDRAULIC ANALYSIS OF THE BRNO - BYSTRC WATER SUPPLY SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

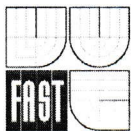
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LENKA HOFMANNOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Lenka Hofmannová

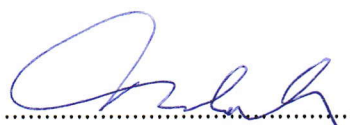
**Název** Hydraulická analýza vodovodní sítě sídliště  
Brno - Bystrc

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

**Datum zadání  
bakalářské práce** 30. 11. 2013

**Datum odevzdání  
bakalářské práce** 30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

  
.....  
doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.  
Vedoucí ústavu



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

## **Podklady a literatura**

[1] INGEDULD, P., 2003: Modeling of Water Distribution Systems with MIKE NET, DHI Water & Environment, 2003

[2] Rossman, A. L., 2000: EPANET 2 Users Manual, United States Environmental Protection Agency US E.P.A., USA, 9/2000

[3] National Research Council of the national academies, 2006: Drinking Water Distribution Systems – Assessing and reducing Risks, the National Academic Press, Wasington D.C., ISBN: 0-309-10306-1, 2006

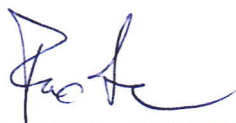
## **Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)**

V rámci bakalářské práce bude vytvořen hydraulický model vodovodní sítě sídliště Brno - Bystrc. K tvorbě modelu budou využity simulační softwarové nástroje Epanet 2.0 resp. MikeNet. Studentka provede simulaci několika základních zatěžovacích stavů, které charakterizují hydraulický režim vodovodní sítě. Součástí práce bude také stanovení teoretické hydraulické kapacity jednotlivých požárních hydrantů ve vodovodní síti.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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



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

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na hydraulickou analýzu spotřebiště Brno - Bystrc. Struktura je rozdělena do tří částí. První část je věnována rešerši používaných postupů, uplatňovaných principů a dostupných softwarových prostředků, zejména pak programu EPANET 2.0, který byl při řešení dané problematiky využit. Dále se práce zabývá popisem měrné kampaně, která je nedílnou součástí prováděné analýzy, a samotnou hydraulickou analýzou, postupem a interpretací získaných výsledků. V poslední části se věnuji metodice stanovení hydraulické kapacity vybraných hydrantů, které nejsou primárně určeny pro požární účely, vzhledem k požadavkům daných normou ČSN 73 0873 - Požární bezpečnost staveb - Zásobování požární vodou.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

hydraulická analýza, vodovodní síť, tlakové poměry, hydrant, hydraulická kapacita

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis is focused on the hydraulic analysis of water storage Brno – Bystrc. The structure is divided into three parts. The first part is devoted to the research of used and applied methods and all available software tools, especially to the EPANET 2.0 programme, which was used during solving of given issue. The thesis also deals with description of specific campaign, which is the integral part of conducted analysis, and with the very hydraulic analysis, process and with the interpretation of acquired results outcome. The last part is dedicated to methodology of determining of the hydraulic capacity in chosen selected hydrants, which are not primarily intended for the fire protection, in the view of the CSN 73 0873 - Fire protection of buildings- Equipment for fire-water supply.

## **KEY WORDS**

hydraulic analysis, water network, pressure ratios, hydrant, hydraulic capacity

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

HOFMANNOVÁ, Lenka. *Hydraulická analýza vodovodní sítě sídliště Brno - Bystrc*. Brno, 2014. 68 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne .....

.....  
podpis autorky

Lenka Hofmannová

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych vyjádřila poděkování panu Ing. Janu Ručkovi, Ph.D., vedoucímu této bakalářské práce, za rady a věcné připomínky týkající se řešené problematiky a také za ochotu a vstřícnost, se kterými konzultace probíhaly. Dále děkuji zástupcům Brněnských vodáren a kanalizací, a.s. za poskytnuté informace a spolupráci při řešení praktické části této práce.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
1.1	POPIS SOUČASNÉHO STAVU.....	3
1.2	CÍL PRÁCE.....	4
<b>2</b>	<b>MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ</b> .....	<b>5</b>
2.1	MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SOUSTAV S TLAKOVÝM REŽIMEM PROUDĚNÍ.....	5
2.1.1	Princip matematického modelu.....	5
2.1.2	Zjednodušující předpoklady.....	10
2.1.3	Modely ustáleného tlakového proudění v trubních sítích.....	11
2.1.4	Kalibrace a verifikace modelu.....	15
2.2	DOSTUPNÉ SOFTWARE NÁSTROJE.....	17
2.3	EPANET 2.0.....	17
2.3.1	Princip výpočtu.....	18
2.3.2	Základní charakteristika.....	19
<b>3</b>	<b>HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ</b> .....	<b>21</b>
3.1	ZÁJMOVÁ LOKALITA BRNO - BYSTRC.....	21
3.1.1	Popis městské části.....	21
3.1.2	Zásobování pitnou vodou.....	21
3.2	TERÉNNÍ PRŮZKUM A MĚRNÁ KAMPAŇ.....	27
3.2.1	Předmět měření.....	27
3.2.2	Měřicí technika.....	28
3.2.3	Vyhodnocení měrné kampaně.....	29
3.3	STAVBA MODELU.....	35
3.4	VERIFIKACE MODELU.....	36
3.5	VÝSLEDKY HYDRAULICKÉ ANALÝZY.....	38
3.6	POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ NA VODOVODNÍ SÍTI.....	40
<b>4</b>	<b>HYDRAULICKÁ KAPACITA HYDRANTŮ</b> .....	<b>41</b>
4.1	ZÁSOBOVÁNÍ POŽÁRNÍ VODOU.....	41
4.1.1	Vnější odběrní místa.....	41
4.2	HYDRANTOVÁ SÍŤ BRNO - BYSTRC.....	43
4.3	SIMULACE ZATĚŽOVACÍCH STAVŮ V HYDRAULICKÉM MODELU SÍTĚ.....	44
4.4	METODIKA STANOVENÍ HYDRAULICKÉ KAPACITY HYDRANTŮ.....	45
4.4.1	Stanovení kapacity výpočtem.....	45



4.4.2	Hydrantový test pro stanovení kapacity hydrantu .....	48
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>60</b>

# 1 ÚVOD

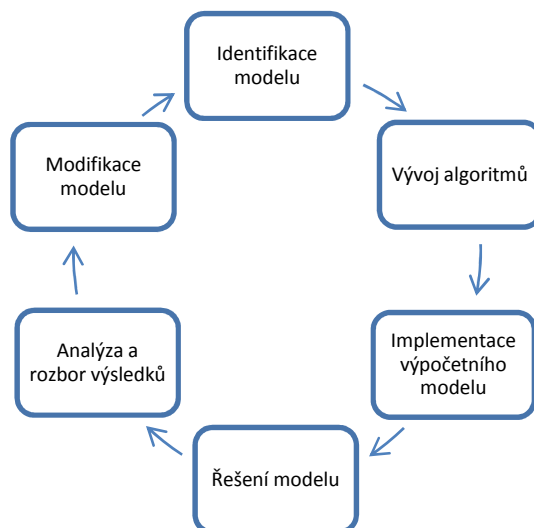
V úvodní části práce je shrnut současný stav problematiky matematického modelování a jeho postupů společně se stanovením cílů práce.

## 1.1 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Matematické modelování proniklo do mnohých oborů přírodních, technických, ekonomických věd a je důležitým pomocníkem při simulacích systémů, analýzách a předvídání různých procesů, jevů a chování obecně.

Základním kamenem každého modelování je matematický model. Jedná se o popis určitého výseku vnějšího prostředí do řeči matematiky tak, abychom mohli relativně jednoduchou řečí čísel a znaků provádět výpočetní operace [1]. Mezi těmito jednotlivými prvky studovaného systému existují podstatné vztahy, které jsou modelem propojeny a jejich chování je napodobováno. Použití matematického modelu poskytuje řadu možností, patří mezi ně zjištění informací o chování systému, usnadňuje proces poznání zpřehledněním a zjednodušením reality [2]. Umožňuje variantní řešení propočtem celé řady různých scénářů, využít ho můžeme pro optimalizaci jakéhokoli řídicího nebo výrobního procesu. Významnou roli může hrát i při snižování investičních nákladů, co se týče např. snížením spotřeby el. energie, snížení množství potřebného materiálu apod. Je schopen rozpoznat vznik chybného kroku při řešení, na rozdíl od experimentů prováděných na reálném systému. Při samotném vkládání dat potřebných k uskutečnění simulace není ovšem možné popsat celý reálný systém v plné podobě z důvodu jeho možné komplikovanosti. Proto je vhodné nejdříve identifikovat nejdůležitější části systému, který chceme modelovat, ostatní prvky pak můžeme pro jejich zanedbatelnost buď úplně vyloučit, nebo značně zjednodušit [3].

Při samotném procesu modelování hrají významnou roli zásady, které lze uplatnit. Proces sestává z několika kroků, které na sebe vzájemně navazují a mohou se několikrát opakovat. Nejprve je potřeba ujasnit cíle, kterých je potřeba dosáhnout s přesností, která bude požadována. Následující schéma zobrazuje vzájemnou návaznost:



Obr. 1.1 Postup při matematickém modelování

Při identifikaci modelu se jedná o stanovení jednotlivých složek. Vychází se z analýzy systému a jeho chování pro sestavení prvků, vazeb, funkcí a procesů. Následuje sestavení modelu, které, pojmeme-li problém zjednodušeně, spočívá ve vývoji a správném výběru matematických rovnic a algoritmů. Při implementaci modelu dochází k jeho naprogramování v příslušném programovacím jazyce, upřesnění, ověření. Řešením modelu je myšleno zadání konkrétních parametrů a dat do již naprogramovaného modelu. Následná analýza a rozbor získaných výsledků slouží ke kontrole, zda výsledky souhlasí s reálným chováním objektů. Cílem tohoto kroku je ověření správné struktury modelu, kvalitativních vlastností a odstranění formálních chyb. Zbývá už jen modifikace modelu, tedy jeho vylepšení, a to v případě, kdy dosažené řešení není v dostatečném souladu s objektivní realitou. Postupuje se pak znovu od prvního kroku opakováním celého předešlého postupu do té doby, dokud nedosáhneme uspokojivých výsledků [3].

Přistoupíme-li přímo k problematice matematického modelování v oblasti vodního hospodářství, a to přímo k simulaci systémů vodovodních sítí, kterými se bakalářská práce zabývá, je důležité specifikovat jaká data a veličiny jsou zapotřebí. Vyžadována jsou data o uzlech, potrubích, vodojemech, čerpadlech a ostatních objektů, které se na síti mohou vyskytovat. Mezi potřebná data tedy patří geometrie řešené sítě, fyzikální parametry sítě, kterými jsou profily, délky a drsnosti potrubí, fyzikální parametry objektů, kam patří kóty hladin, plochy akumulčních nádrží, funkce závislosti výšky hladiny na ploše, charakteristiky čerpadel, uzávěry.

Z popisu postupu při modelování a výčtu potřebných veličin tedy vyplývá, že pro sestavení funkčního modelu je vyžadována znalost hodnot hydraulických veličin, které lze při provozování vodovodu naměřit a dlouhodobě monitorovat. Jsou jimi průtok a tlak vybraných prvků sítě a hodnoty odběrů a vtoků do sítě.

## 1.2 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření hydraulického modelu vodovodní sítě sídliště Brno - Bystrc prostřednictvím softwarového programu Epanet 2.0 a následné provedení hydraulické analýzy. Simulací zatěžovacích stavů, které jsou pro danou síť charakteristické, byla stávající distribuční síť posouzena vzhledem k platným předpisům daných normou. V rámci práce jsem také stanovila hydraulickou kapacitu vybraných hydrantů, záměrně těch, které nejsou primárně určeny k požárním účelům. Takto stanovená kapacita byla porovnána s hodnotami naměřenými přímo na síti.

## 2 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ

Následující kapitola má za cíl podrobněji popsat problematiku matematického modelování soustav s tlakovým režimem proudění, charakterizovat dostupné a v dnešní době využívané softwarové nástroje pro modelování a přiblížit jeden z těchto nástrojů, a to aplikaci EPANET 2.0.

### 2.1 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ SOUSTAV S TLAKOVÝM REŽIMEM PROUDĚNÍ

Pro tlakový trubní systém, který vodovodní síť představuje, můžeme využít výhod matematického modelování. Získáme tak cenné informace o tlakových a průtokových poměrech v síti, které můžeme dále využít pro potřeby provozování a řízení stávajících distribučních systémů, pro projekci nových rozvodných řadů a v neposlední řadě pro rekonstrukce, rozšiřování nebo napojování nových odběratelů na systém. Aby byly získané hodnoty co možná nejpřesnější a zahrnovaly informace o celé řešené síti, využíváme také měření realizovaná na posuzované síti. Takto získané informace nám sice pomohou vytvořit představu o poměrech na síti, ale pouze v daných místech měření, objektivně posoudit celou síť můžeme až pomocí kalibrovaného a verifikovaného modelu [4]. Právě pro tuto kalibraci a verifikaci využijeme zmiňovaná data získaná uskutečněným měřením. Před objasněním samotného modelování tlakového proudění je žádoucí vysvětlit principy a pravidla, kterých je využíváno.

#### 2.1.1 Princip matematického modelu

Matematický model jako takový je vždy tvořen soustavou rovnic, ať už algebraických, diferenciálních nebo integrálních. Ty jsou doplněny počátečními a okrajovými podmínkami. Při sestavování těchto modelů vycházíme ze základních zákonů mechaniky kontinua a ze stavových rovnic. Jde o zákon zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Stavové rovnice pak vážou stavové veličiny a doplňují tak počet rovnic na počet neznámých. Díky počátečním a okrajovým podmínkám můžeme získat jednoznačné řešení. Počáteční podmínky určují stav na počátku, v čase  $t = 0$ , okrajové podmínky předepisují stav na hranici oblasti, tedy hodnoty neznámých funkcí.

Přesnost modelu je ve výsledku dána přesností, s jakou matematický popis vystihuje reálné vztahy stavových veličin, a mírou, do jaké se nám podaří přiřadit hodnoty parametrům modelu (např. drsnost stěn apod.) [1]. Nutno podotknout, že po celou dobu pracujeme s kapalinou ideální. Taková kapalina má ideální vlastnosti, kterými je myšlena dokonalá nestlačitelnost a absence vnitřního tření. Dalším používaným prvkem je „elementární objem kapaliny“, takový objem je velmi malý vzhledem k rozměrům oblasti proudění a zároveň dostatečně velký vzhledem k délce dráhy molekul.

### ***Zákon zachování hmotnosti***

Ze zákona zachování hmotnosti proudící kapaliny vyplývá, že rozdíl hmotnosti kapaliny, která do elementu vtéká a kapaliny z elementu vytékající během časového intervalu  $dt$  se musí rovnat hmotnosti kapaliny, která je v tomto elementu obsažená. V hydraulice je tento zákon uváděn jako rovnice kontinuity [5]:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

kde:  $\rho$  ( $p(x,y,z,t), T(x,y,z,t)$ ) ... hustota kapaliny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$v_i(x,y,z,t)$  ... vektor rychlosti [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$x_i(t)$  ... prostorová souřadnice, která je funkcí času  $t$

Pro naše účely modelování vodovodních sítí ovšem využíváme jednodimenzionálních modelů a pracujeme s nestlačitelnou kapalinou ( $\rho = \text{konst.}$ ), získá rovnice kontinuity následující tvar [1]:

$$(2.2)$$

kde:  $v_x(x,t)$  ... složka vektoru rychlosti [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$x(t)$  ... prostorová souřadnice

### ***Zákon zachování hybnosti***

Na základě druhého pohybového zákona platí, že hybnost celé izolované soustavy těles se nemění. Tato izolovaná soustava hmotných těles (bodů) je soustava, na kterou nepůsobí žádné vnější síly, popř. v ní výslednice všech vnějších sil, které na soustavu působí, je nulová [6]. Znamená to, že se zachovává směr i velikost celkové hybnosti a součet hybností všech těles v soustavě je stálý. Dle [5] nabývá rovnice hybnosti tvaru:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{Dv_i}{Dt} \quad (2.3)$$

kde:  $\sigma_{ij}$  ... tenzor napětí

$\rho$  ... hustota kapaliny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$f_i(x,y,z,t)$  ... složky vektoru objemového zatížení  $f$  vztaženého na jednotku hmotnosti

$v_i(x,y,z,t)$  ... složky vektoru rychlosti  $v$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

### ***Stavové rovnice***

Stavové rovnice neboli konstitutivní vztahy navzájem propojují první a druhý pohybový zákon. Stavové rovnice vyjadřují závislost mezi tenzorem napětí  $\sigma_{ij}$  a tenzorem rychlosti přetvoření (deformační rychlosti)  $\varepsilon_{ij}$ . Tenzor napětí  $\sigma_{ij}$  je zde vyjádřen jako lineární funkce rychlosti přetvoření  $\varepsilon_{ij}$  a tlaku  $p$ . Mase vyjadřuje obecný tvar stavové rovnice jako [5]:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda(\rho, T)\varepsilon_v + 2\mu(\rho, T)\varepsilon_{ij} \quad (2.4)$$

kde:  $\sigma_{ij}$  ... tenzor napětí

$p(x, y, z, t)$  ... tlak [Pa]

$\lambda(\rho, T)$  ... koeficient objemového přetvoření

$\mu(\rho, T)$  ... koeficient dynamické viskozity [Pa·s]

$\varepsilon_v$  ... tenzor rychlosti objemového přetvoření

$\delta_{ij}$  ... Kroneckerovo delta

Tenzor rychlosti přetvoření  $\varepsilon_{ij}$  je vyjádřen jako lineární kombinace prvních parciálních derivací složek vektoru rychlosti  $v_i$  [1]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

kde:  $v_i(x, y, z, t)$  ... složky vektoru rychlosti  $v$  [m·s<sup>-1</sup>]

$x_i(x, y, z, t)$  ... prostorové souřadnice

Tenzor rychlosti objemového přetvoření je definován jako [1]:

$$\varepsilon_v = \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

kde:  $v_i(x, y, z, t)$  ... složky vektoru rychlosti  $v$  [m·s<sup>-1</sup>]

$x_i(x, y, z, t)$  ... prostorové souřadnice

### ***Navier-Stokesovy rovnice***

Tyto diferenciální rovnice nezávisle na sobě odvodili v roce 1827 a poté roku 1845 pánové Claude L. M. H. Navier a George G. Stokes. Rovnice vyjadřují pro jednotku hmotnosti protékající kapaliny vztah mezi silami objemovými obecného silového pole, kde působí každý hmotný bod v daném objemu a jsou tak úměrné hmotnosti kapaliny (např. tíha kapaliny, odstředivá síla). Dále síly tlakové, které zvětšíme o příslušné složky vazkosti kapaliny. Posledními jsou síly setrvačné [1].

Rovnici získáme dosazením rovnic stavových (2.4) do rovnice hybnosti (2.3), následně obdržíme obecný tvar:

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

kde:  $f_i(x, y, z, t)$  ... složky vektoru objemového zatížení  $f$  vztaženého na jednotku hmotnosti

$p(x, y, z, t)$  ... tlak [Pa]

$x_i(x, y, z, t)$  ... prostorové souřadnice

$v_i(x, y, z, t)$  ... složky vektoru rychlosti  $v$  [m·s<sup>-1</sup>]

$\rho$  ... hustota kapaliny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$\mu(\rho, T)$  ... koeficient dynamické viskozity [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

Pro ideální kapalinu, kde nepůsobí smyková napětí  $\mu = 0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , získáme tvar [1]:

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2.8)$$

kde:  $f_i(x, y, z, t)$  ... složky vektoru objemového zatížení  $f$  vztaženého na jednotku hmotnosti

$p(x, y, z, t)$  ... tlak [Pa]

$x_i(x, y, z, t)$  ... prostorové souřadnice

$v_i(x, y, z, t)$  ... složky vektoru rychlosti  $v$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\rho$  ... hustota kapaliny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

### ***Zákon zachování energie***

Zákon patřící k nejdůležitějším přírodním zákonům říká, že při všech dějích v soustavě těles se mění jedna forma energie v jinou, nebo přechází na energii jiného tělesa, celková energie soustav se při tom však nemění [6]. Pro naše účely můžeme tohoto faktu využít při modelování neizotermických dějů. Takové děje jsou opakem izotermických dějů, při kterých nedochází ke změně teploty  $T$  v soustavě, měnit se může pouze tlak nebo objem. Rovnice má tvar [5]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + v_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \lambda \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i^2} + S_\Phi \quad (2.9)$$

kde:  $\Phi$  ... energie (tepelná  $T$ , kinetická turbulentní  $k$ , apod.)

$\lambda$  ... difúze

$S_\Phi$  ... objemový zdroj

### ***Bernoulliho rovnice***

Na závěr výčtu používaných rovnic uvádím tu nejznámější, Bernoulliho rovnici. Je vyjádřením výše zmíněného zákona zachování energie. Diferenciální tvar rovnice pro neustálý pohyb vazké nestlačitelné kapaliny v silovém poli gravitace má podobu [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\tau}{\rho g} \frac{dO}{dA} = 0 \quad (2.10)$$

kde:  $z$  ... geodetická výška osy potrubí [m]

$x$  ... prostorová souřadnice ve směru osy potrubí [m]

$p$  ... tlak [Pa]

$\rho$  ... hustota kapaliny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$v$  ... průřezová rychlost kapaliny [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\tau$  ... tečné napětí kapaliny [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$O$  ... omočený obvod potrubí [m]

$A$  ... průtočná plocha [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  ... Coriolisovo číslo

Modelování využívá častěji ustálené proudění kapaliny, což znamená neměnnost rychlosti v čase ( $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ ), rovnice pak dostaneme ve tvaru:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + h_z = konst. \quad (2.11)$$

Druhý člen rovnice je vyjádřením tlakové výšky [m], třetí člen potom značí rychlostní výšku [m] a  $h_z$  ztrátovou výšku [m]. Ztráty zde mohou vznikat třením po délce nebo v místních odporech, vyjádřeno ve tvaru rovnice:

$$h_z = h_t + h_m \quad (2.12)$$

kde:  $h_z$  ... celková ztrátová výška [m]

$h_t$  ... ztrátová výška třením [m]

$h_m$  ... ztrátová výška v místních odporech [m]

Dle Darcy-Weisbacha můžeme určit ztrátovou výšku třením následovně:

$$h_t = \lambda \frac{L}{D} \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (2.13)$$

kde:  $\lambda$  ... součinitel tření

$L$  ... délka potrubí [m]

$D$  ... vnitřní průměr potrubí [m]

Pro výpočet odporového součinitele  $\lambda$  můžeme vybírat z celé řady vztahů, v trubních sítích počítáme nejčastěji s turbulentním prouděním a pro výpočet součinitele  $\lambda$  můžeme pomocí iterace aplikovat nejčastěji používaný vztah Colebrook-White [7]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left( \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,71 \cdot D} \right) \quad (2.14)$$

kde:  $\lambda$  ... součinitel tření

$Re$  ... Reynoldsovo kritérium

$\Delta$  ... absolutní drsnost stěn [mm]

$D$  ... vnitřní průměr potrubí [m]

Místní ztráty  $h_m$  můžeme určit buď nahrazením za ekvivalentní délky potrubí, která se připočítá ke skutečné délce potrubí, nebo pomocí následujícího vztahu:

$$h_m = \sum \xi \cdot \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (2.15)$$



kde:  $\Sigma\zeta$  ... součet místních odporových součinitelů v jednotlivých úsecích

### **2.1.2 Zjednodušující předpoklady**

Různé typy matematických modelů lze s přehledem a jednoduše využívat za použití řady předpokladů, které zjednoduší např. popis proudění kapaliny, omezí počet parametrů stavových rovnic, sníží počet parametrů modelu.

#### ***Vlastnosti kapaliny***

Uvažovaným médiem při proudění je kapalina, v našem oboru konkrétně voda. Mezi vlastnosti, které u tohoto dopravovaného média předpokládáme, patří její homogenita. Tedy to, že voda je systém dvou složek, mezi kterými nemůžeme jasně definovat jejich rozhraní a vlastnosti jsou v celém jejím objemu stejné. Kapalinu dále uvažujeme izotropní, tzn. se stejnými vlastnostmi ve všech směrech, nestlačitelnou, beze změn objemu při proudění a s konstantní hustotou, která není ovlivněna teplotou ani rozpuštěnými látkami.

#### ***Předpoklad stacionarity***

Stacionární, v čase neměnný režim proudění můžeme předpokládat tam, kde jsou změny parametrů modelu v čase malé a nijak podstatně neovlivní charakter proudění. Oprávněně ho můžeme použít také v případě nedostatku dat z měření pro spolehlivou kalibraci a verifikaci.

Konkrétně pro náš případ proudění v trubní síti uvažujeme řešení časově nezávislé, protože není možné zajistit dostatečně přesné údaje, které se týkají krátkodobých změn odběrů a vtoků v čase. Postačující je známý průběh u jistých stacionárních stavů. Z tohoto důvodu tedy můžeme zanedbat i vliv vodních rázů.

#### ***Snížení rozměrnosti úlohy***

Jedná se o zanedbání změny hledaných veličin v některém ze směrů s ohledem na předpokládaný charakter a směr proudění. Toto zjednodušení vede ke stavbě dvourozměrných až jednorozměrných modelů proudění. Jednosměrné schematizace využíváme v hydrodynamice zejména pro řešení soustav vodotečí a trubních sítí, kde lze zanedbat složky vektoru rychlosti kolmé na podélnou osu toku [1].

#### ***Tvar a rozměry náhradní oblasti***

Tvary oblastí, které řešíme, jsou ve většině případů geometricky složité a je nemožné je jednoduše specifikovat. V závislosti na použité metodě modelování můžeme tento složitý tvar převést na geometricky jednodušší obrazec. Zjednodušení spočívá v počtu částí, na které je oblast dělena a na počtu uzlů.

### 2.1.3 Modely ustáleného tlakového proudění v trubních sítích

Než se ponoříme do samotné problematiky daného typu modelování, upřesníme některé důležité pojmy a vztahy.

Celá trubní síť je tvořena soustavou jednotlivých potrubí, které označujeme jako úseky. Úseky mohou být ve svých krajních bodech navzájem propojeny, tyto body označujeme jako uzly. Pro úplnost uvedu i definice ostatních používaných pojmů, dle [1]:

- Úsekem sítě rozumíme část potrubí s konstantním profilem a drsností. Můžeme ho využít i pro znázornění pro místní odpor, které uvažujeme jako samostatné prvky (např. čerpadlo).
- Uzlem uvažujeme krajní body úseku, ve kterých může docházet ke vzájemnému propojení. Odběry a přítoky sítě mohou být umístěny pouze v krajních uzlech úseku. Znázorňujeme jím i vodojem.
- Okruhem rozumíme uzavřenou cestu v grafu, kde počátečním uzlem je  $a_0$  a koncovým uzlem je tentýž  $a_0 = a_r$ .
- Nezávislým okruhem nazýváme takový, který je tvořen z nejmenšího možného počtu úseků.
- Orientovaným grafem označujeme takový graf, u kterého je stanoven počáteční a koncový uzel. Tím určíme i jeho orientaci.

#### ***Podklady potřebné pro řešení***

K úspěšnému vytvoření fungujícího matematického modelu je nezbytně nutné shromáždit potřebná data, která můžeme zadávat. Jedná se o topologické a hydraulické údaje modelované vodovodní sítě. Důležité jsou i podrobné údaje o odběrech a vtocích do sítě, režimu provozování čerpacích stanic atd. Rozdělit je můžeme do dvou skupin [4].

Mezi data potřebná pro modelování patří:

- geometrie řešené sítě (údaje o výškách, délkách, směrech, poloze),
- hydraulické informace (světlost a materiál potrubí),
- údaje o objektech, které ovlivňují danou síť (uzávěry, čerpadla, vodojemy, ...),
- hodnoty odběrů a vtoků do sítě.

Pro nutnou kalibraci modelu jsou nezbytná data získaná měřením, jsou jimi:

- hydraulické údaje o vybraných prvcích sítě (průtoky a tlaky),
- přesné hodnoty odběrů a vtoků do sítě.

Pro přehlednou práci vzhledem k velkému objemu dat je třeba rozdělit modelovanou trubní síť, tzv. ji generalizovat [1]. Možnými způsoby jsou:

- vymezení uvažovaných velkoodběratelů,

- rozdělení sítě na konečný počet úseků,
- vybrání prvků, kde bude provedeno měření pro kalibraci modelu,
- zvolení vhodného značení uzlů a úseků.

### ***Snížení počtu odběrných míst a jejich zadávání***

Toto zjednodušení můžeme použít konkrétně u řešení městských trubních sítí. Pro poměrně vysoký počet odběrných míst na síti, čímž mám na mysli především domovní přípojky, nemůžeme každé toto místo uvažovat jako samostatný uzel. Proto jako uzlové odběry uvažujeme pouze významné odběry (průmysl, občanská a technická vybavenost apod.). Domovní přípojky, které jsou umístěny po délce úseku, se přenáší do krajních uzlů. Pro toto rozdělení používáme schematizace odběrů, které jsou zadány celkovou potřebou spotřebiště  $Q_c$ . Pro toho rozdělení používáme nejčastěji dvě metody [4]:

#### **1. Metoda redukováných délek**

Princip metody spočívá v přiřazení redukčního součinitele  $C_l$  dle hustoty a výšky zástavby a pro každý úsek vypočítáme dle následujícího vztahu redukovanou délku:

$$L_r = C_l \cdot L \quad (2.16)$$

kde:  $L$  ... skutečná délka úseku [m]

$L_r$  ... redukováná délka [m]

Dále stanovíme celkovou redukovanou délku posuzované sítě, kterou použijeme pro výpočet specifické potřeby dopravovaného média:

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

kde:  $S_r$  ... celková redukováná délka sítě [m]

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

kde:  $q_r$  ... specifická potřeba sledované sítě [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$Q_c$  ... celková potřeba sledované sítě [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Výsledný odběr  $i$ -tého úseku  $Q_i$  pak vypočítáme jako

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

#### **2. Metoda dvou součinitelů**

Tuto metodu využijeme tam, kde máme podrobné podklady o odběrech a každému odběrnému místu můžeme přiřadit určitou charakteristiku (např. počet zásobovaných obyvatel, počet zásobovaných bytových jednotek atd.). Postupujeme obdobně jako

u předcházející metody, přiřadíme každému *i-tému* úseku dva součinitele  $C_1$  a  $C_2$ . Postupujeme pak obdobně dle následujících vztahů:

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

kde:  $C_1$  ... počet zásobovaných obyvatel, bytových jednotek, plocha zástavby

$C_2$  ... specifická potřeba na účelovou jednotku použitou v rámci  $C_1$

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

kde:  $S_r$  ... celková redukováná délka sítě [m]

$P_i$  ... redukováná délka úseku [m]

$$q_r = \frac{Q_c}{S_r} \quad (2.22)$$

kde:  $q_r$  ... specifická potřeba sledované sítě [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$Q_c$  ... celková spotřeba sledované sítě [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$$Q_i = q_r \cdot P_i \quad (2.23)$$

kde:  $Q_i$  ... výsledný odběr *i-tého* úseku

U statické hydraulické analýzy dělíme jednoduše odběr v *i-tém* úseku  $Q_i$  rovnoměrně do obou koncových uzlů v poměru  $0,5 \cdot Q_i$ .

### ***Základní podmínky pro analýzu okruhových sítí***

Celkový počet neznámých je dán součtem neznámých  $h_i$  a  $Q_i$ , tedy ztrátové výšky a průtoky v *i-tém* úseku. Platí, že kolik máme neznámých, tolik musíme mít k dispozici rovnic, abychom mohli dojít k výsledku. Tyto rovnice nám pomohou zabezpečit tři podmínky, které musí být při tlakovém proudění v okruhových sítích splněny. Jsou jimi podmínka uzlová, okruhová a hydraulická.

#### Uzlová podmínka

Vyjadřuje zákon zachování hmotnosti a říká, že součet všech přítoků do každého uzlu sítě se musí rovnat součtu odběrů z uzlu [4].

$$\sum Q_i = \sum O_j \quad (2.24)$$

kde:  $Q_i$  ... přítok (vtok) do *i-tého* úseku [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$O_i$  ... odtok z *j-tého* úseku nebo odběr [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

### Okruhová podmínka

Druhá podmínka je aplikací zákona zachování energie. Součet tlakových ztrát přes všechny úseky, které tvoří nezávislý okruh, se při zvolené orientaci musí podle této podmínky rovnat nule [4]. Zapsat ji můžeme následovně:

$$\sum h_{z_i} = 0 \quad (2.25)$$

kde:  $h_{z_i}$  ... ztrátová výška v  $i$ -tém úseku [m]

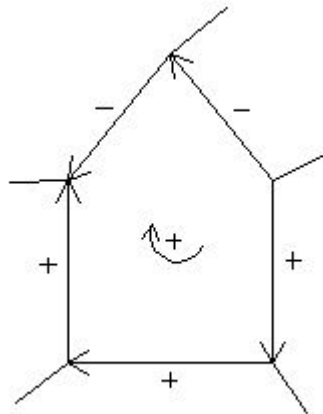
V souvislosti s okruhovou podmínkou, nezávislým okruhem a zvolením okruhové orientace je vhodné připomenout i Eulerovu podmínku [1]. Nabývá tvaru:

$$s = m - n + 1 \quad (2.26)$$

kde:  $s$  ... počet nezávislých okruhů v síti

$m$  ... počet úseků

$n$  ... počet uzlů



**Obr. 2.1** Příklad zvolené orientace v jednotlivých úsecích okruhu

### Hydraulická podmínka

Obě předchozí podmínky doplníme stavovou rovnicí, která představuje třetí podmínku. Stavová rovnice upravuje vztah mezi ztrátovou výškou a průtokem do podoby dle [1]:

$$h_{z_i} = \kappa_i \cdot Q_i^n \quad (2.27)$$

kde:  $h_{z_i}$  ... ztrátová výška v  $i$ -tém úseku [m]

$Q_i$  ... průtok v  $i$ -tém úseku [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\kappa_i$  ... odporový součinitel daného úseku

$n$  ... exponent nabývající hodnot od 1,75 do 2,00

Daný odporový součinitel můžeme empiricky vyjádřit ve tvaru:

$$\kappa = 0,020678 \lambda \frac{L}{D^5} \quad (2.28)$$

kde:  $\lambda$  ... součinitel tření

$L$  ... délka úseku [m]

$D$  ... vnitřní průměr potrubí [m]

Pro úplnost je třeba uvést poslední vztah, který vyjadřuje nahrazení místního odporu. Ty většinou nahrazujeme ekvivalentní délkou a můžeme pro ně použít vztah (2.27). Pro čerpadla nahrazení ekvivalentní délkou uplatnit nemůžeme z toho důvodu, že tlaková výška zde narůstá. Slovy popsané můžeme matematicky formulovat jako:

$$h_i = \alpha_i \cdot Q_i^{n_i} - H_{0i} \quad (2.29)$$

kde:  $h_i$  ... přírůstek tlakové výšky [m]

$Q_i$  ... průtočné množství [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$H_{0i}$ ,  $n_i$ ,  $\alpha_i$  ... parametry čerpadla dané výrobcem

### ***Používané numerické metody***

Největšího rozšíření se dočkaly metody iterační, které budou dále blíže charakterizovány. Podstatou je numerické řešení soustavy nelineárních rovnic, které se sestaví na základě podmínek (2.24), (2.25) a stavové rovnice (2.27). Principem iterace je odhad některých veličin tak, aby byly splněny alespoň dvě ze tří zmiňovaných podmínek a postupným zpřesňováním potom dosáhneme platnosti i podmínky třetí. Je žádoucí, aby zvolená metoda dosáhla požadované zvolené přesnosti s co nejmenším počtem iteračních kroků. Mezi metody patří vyrovnání ztrátových výšek, vyrovnání průtoků a vyrovnání odporových součinitelů.

#### Metoda vyrovnání ztrátových výšek

Prvním krokem je odhad průtoků a jejich směrů tak, aby byla splněna uzlová podmínka. Vypočítáme ztrátové výšky dle (2.27) nebo (2.29). Použitím dané metody určíme tzv. opravné průtoky  $\Delta Q_i$  a upravíme jimi průtoky v jednotlivých úsecích sítě. Mezi metody tohoto typu patří Newtonova, Lobačev-Crossova a Dubin-Crossova [1].

#### Metoda vyrovnání průtoků

Odhadujeme v jednotlivých úsecích tlakové ztráty a s nimi i směry průtoků. Dopočítáme průtoky a určíme velikost opravné výšky  $\Delta h_i$  a upravíme odhadnuté tlakové ztráty v úsecích sítě. Uplatnit můžeme metodu Newton II nebo Hardy-Cross [1].

#### Metoda vyrovnání odporových součinitelů

Odhadujeme zde zároveň průtoky i tlakové ztráty, aby byly splněna okružová a uzlová podmínka a pro všechny úseky sítě pak musí platit i hydraulická podmínka. Soustavou lineárních rovnic můžeme tento postup uplatnit u metody Mc Ilroyovy [1].

### **2.1.4 Kalibrace a verifikace modelu**

Model je do značné míry ovlivněn výše uvedenými předpoklady a zjednodušeními. Ovlivňují především to, s jakou přesností dokáže model pracovat a podávat nezkreslené

výsledky díky vzájemným vztahům mezi jednotlivými stavovými veličinami a přiřazením výstižných hodnot daným parametrům.

Stěžejní úlohu představuje kalibrace modelu. Cílem procesu je úprava parametrů hydraulického modelu do té fáze, kdy se simulace různých průběhů shodují s hydraulickými hodnotami naměřenými přímo na síti (tlak a průtok). Rozeznáváme dvě rozdílné úrovně kalibrace modelu, a to kalibraci plošnou a detailní [8]. První z nich, plošná kalibrace, probíhá za běžných denních režimů s charakteristickými odběry, kdy ani mimořádně velký odběr nezpůsobí změny v topologii dané sítě a k modelování celého tlakového pásma dochází v jednom čase. V této části kalibrace jsou zaznamenány hrubé chyby topologie, např. nevhodné umístění vodojemu, chybějící potrubí, uzavřená potrubí aj. Detailní kalibrace se na rozdíl od plošné zaměřuje podrobně na jednotlivé konkrétní části sítě. Dochází ke kalibraci ve stejném čase postupně v úsecích o celkové délce přibližně 500 až 1000 m. Základem kalibrace je upravit parametry každého objektu tak, abychom vypočítané i naměřené hodnoty průtoků a tlaků byly v rámci povolené chyby stejné, splňovat přitom musíme i počáteční a okrajové podmínky. Po průběhu výše zmíněného pak porovnáváme  $\Delta p$ , což představuje rozdíl tlaků [8]:

$$\Delta p = p_M - p_C \quad (2.30)$$

kde:  $p_M$  ... naměřený hydrodynamický přetlak v potrubí pro referenční průtok [MPa]

$p_C$  ... vypočítaný hydrodynamický přetlak ve stejném uzlu pro referenční průtok [MPa]

Je-li tento rozdíl menší než 0,01 MPa, můžeme považovat přesnost modelu za vyhovující. Technicky většinou není ani možné dosáhnout vyšší přesnosti kvůli přesnosti tlakových čidel, kolísání úrovně hladiny v akumulární nádrži vodojemu aj.

Data, která používáme, rozdělujeme podle jejich využití pro plošnou nebo detailní kalibraci. Pro první krok kalibrování používáme průtok měřený za normálních provozních podmínek. První soubor dat je měřen na výtoku z vodojemu, druhý soubor získáme naměřením na vybraných místech sítě. Je nezbytné vytvořit z těchto získaných dat statickou analýzu, abychom dostali požadované veličiny, kterými jsou minimální, průměrný, maximální hodinový průtok a nejvyšší naměřený průtok v intervalu 5 minut. Pro detailní kalibrování, které následuje po úspěšném plošném kalibrování při odstranění důležitých chyb modelu, využíváme hodnot hydraulické drsnosti potrubí a jeho vnitřního průměru na každém úseku sítě [8].

Pro ověření správnosti a dostatečnosti kalibrování využíváme verifikaci modelu. Jedná se o ověření výsledků kalibrace na jiné sadě vstupních dat [1]. Tuto shodu u verifikace a stejně tak u kalibrace stanovujeme subjektivně na základě přesnosti používaných vstupních dat a dat naměřených. Očekávat nemůžeme přesnější shody, než jaké jsou u metod používaných pro zisku vstupních dat a které jsou zatíženy určitou chybou.

## 2.2 DOSTUPNÉ SOFTWAREVÉ NÁSTROJE

Pro hydraulickou analýzu trubní sítě dnes využíváme specializované softwarové produkty. Data o síti uchovávaná tímto způsobem lze potom výhodně exportovat do matematického modelu automaticky.

### *SiteFlow*

Tento původní český software využívá výpočetní jádro Epanet 2.0. Dokáže řešit stacionární a kvazi-dynamické proudění. Program vyvíjený společností Aquion s.r.o. je možno použít pro správu, projektování a simulační modelování vodovodů a kanalizací. Součástí je digitální model terénu, polygonová typologie a služby pro podkladní mapy [9].

### *Kypipe, Pipe 2012*

Přidanou hodnotou těchto nástrojů je nejen řešení stacionárního a kvazi-dynamického proudění, ale také dynamického. Můžeme s ním modelovat požární průtoky s různou volbou hydrantů v síti, rychlé hydraulické změny při manipulaci s uzavěry nebo čerpadly a jiné [10].

### *MikeNet*

S pomocí tohoto programového prostředku můžeme modelovat ustálené i kvazi-dynamického proudění ve vodovodních sítích pomocí gradientní metody. Umožňuje také simulovat trasování vodních částic, změnu koncentrace látek a stáří vody. Numerické řešení je založeno na výpočetním modelu Epanet 2.0 a je rozšířeno o výpočetní modul analýzy vodního rázu [11].

### *WaterCAD, WaterGEMS*

Program je obdobou aplikace Kypipe. Jeho předností je možnost propojení s grafickými aplikacemi typu CAD, např. AutoCAD, MicroStation a umožňuje přenos do databáze ArcGIS [12].

### *Innovyze*

Software rozšířený po celém světě vhodný pro modelování zásobování vodou, odvodnění a protipovodňové ochrany urbanizovaných oblastí. Vhodný jako podpora pro řízení provozu a správy majetku v oblasti VaK a vodních toků. Umožňuje spolupráci s aplikacemi ArcGIS, AutoCAD. [13]

## 2.3 EPANET 2.0

Jedná se o softwarovou aplikaci, která je volně dostupná na webových stránkách Agentury na ochranu životního prostředí Spojených států amerických (U. S. EPA). Tento analytický nástroj umožňuje řešit problematiku hydraulických poměrů při pohybu Newtonovských kapalin, jejich stacionární a kvazi-dynamické proudění, simuluje kvalitu a stáří vody, dokáže



analyzovat znečištění v síti, trasování částic, stanovit jím lze i pracovní bod čerpadla. Nejrozšířenější je však z mého pohledu právě pro hydraulickou analýzu tlakových sítí.

### **2.3.1 Princip výpočtu**

Matematické modely podobného typu pracují na dvou základních principech, jedním z nich je model řízený odběrem (DDM – „Demand Driven Model“), druhým je model řízený tlakem (PDM – „Pressure Driven Model“). Epanet 2.0 je model řízený odběrem a pro výpočet hydraulických veličin využívá gradientní metodu. Postupně budou zmíněné pojmy blíže vysvětleny.

#### ***Model řízený odběrem***

Postup výpočtu u modelu tohoto typu je následující. Pro daný zatěžovací stav se stanoví uzlové odběry, čímž získáme informace o požadovaném dopravovaném množství vody a průtocích v jednotlivých úsecích sítě. Z hodnot těchto průtoků můžeme dopočítat tlakové ztráty v úsecích a stanovit tak lze hydrodynamický přetlak v jednolitých uzlech. Základním předpokladem při užití je přitom fakt, že odběr je realizován v plném rozsahu, bez ohledu na tlak v síti. Je to ovšem zjednodušující předpoklad. Ve skutečnosti je průběh průtoku přímo směřně závislý na tlaku, klesne-li tlak, zaznamenáme také pokles průtoků. Kontrolou správného výpočtu pro nás mohou být právě zmíněné hodnoty tlaků v uzlech. Při nesprávném nastavení mohou být tyto hodnoty zobrazeny jako záporná čísla [4].

#### ***Model řízený tlakem***

U těchto modelů je postup obrácený. Nejdříve definujeme v určených místech sítě tlaky a z nich následně odvodíme průtoky a odběry na síti. Na rozdíl od předchozího typu modelu zde dochází k poklesu průtoků při poklesu tlaků. V místech sítě, kde jsme určili tlak, nadefinujeme odběry tam, kde nedochází k poklesu tlaků. Poklesne-li následně tlak pod tyto definované hodnoty, klesne úměrně tomu i průtok [14].

#### ***Gradientní metoda***

Tato metoda je vedle již zmíněné iterační metody obecně používána pro hydraulickou analýzu trubních tlakových systémů s nestlačitelným médiem a využívá se ke komerčním účelům jako základ výpočtových programů. Pomocí iterací hledá řešení soustavy rovnic vytvořených pomocí uzlové a hydraulické podmínky. Aby mohl zmíněný iterační výpočet proběhnout, je nutné předchozí rozdělení sítě, tzv. seletonizace. Spočívá v dělení sítě na uzly (nádrž, vodojem, spojení potrubí apod.) a úseky (potrubí, čerpadlo aj), které slouží pro dopravu přenášeného média [15].

Na počátku stojí odhad průtoků mezi dvěma uzly. V tomto okamžiku ještě nemusí být splněna uzlová podmínka. Následuje totiž zmíněný iterační postup výpočtu, kdy se každým novým krokem tyto hodnoty zpřesňují do takové podoby, abychom se splnění podmínky

neustále přibližovali. Výpočet spočívá v řešení soustavy nelineárních rovnic, přes které jsou určovány nové hodnoty tlaků a s jejich pomocí pak znovu hodnoty průtoků. Iterační výpočet je ukončen ve chvíli, kdy dosáhneme hodnoty menší nebo rovné 0,001. Jedná se o poměr absolutní hodnoty rozdílu průtoků stanovených v posledních dvou krocích a celkového součtu průtoků, jak je zapsáno v následující rovnici [4]:

$$\frac{\sum_i (Q'_{ij} - Q_{ij})}{\sum_i Q_{ij}} \leq 0,001 \quad (2.31)$$

kde:  $Q'_{ij}$  ... průtok v úseku mezi uzly  $i$  a  $j$  stanovený v předposledním kroku [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$Q_{ij}$  ... průtok v úseku mezi uzly  $i$  a  $j$  stanovený v posledním kroku [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

### 2.3.2 Základní charakteristika

Pracovní prostředí aplikace umožňuje zadávání dat a tvorbu modelu, pro kterou můžeme využitím podkladních map a schémat, např. ve formátu bmp., emf., wmf., v souřadném systému X, Y, dále editaci dat, provádění simulací, vyhledávání ve výsledcích, prohlížení a export výsledků v podobě barevných map, tabulek a grafů.

Výpočet pomocí tohoto matematického modelu začíná určením uzlových odběrů pro daný zatěžovací stav. Definujeme tím požadavky na dopravované množství vody ze sítě a průtoky jednotlivými úseky. Pokračuje se určením tlakových ztrát na každém úseku a stanovením hydrodynamického přetlaku v uzlech. Předpokladem je, že odběr je realizován beze ztrát. Tato podmínka je ovšem v reálu nesplnitelná, protože odebíraný průtok je úměrně závislý na tlaku v síti. Nežádá kdy nastane po proběhnutí výpočtu situace, kdy dostaneme výsledky v záporných hodnotách. Znamená to nesprávné zadání nebo zadání chybných hodnot [4].

Výsledky hydraulické analýzy z Epanetu můžeme rozdělit podle toho, jakou část soustavy prověřujeme. Síť je zde rozdělena na několik součástí, ze kterých se při modelování skládá, jsou jimi především uzly a úseky. Tyto dvě součásti se používají pro sestavení trubní sítě. Další součástí projektu mohou být i objekty, jako vodojem, čerpací stanice, šoupata a nádrže. Všechny tyto objekty můžeme do výpočtu zahrnout zadáním jejich parametrů.

V uzlech zadáváme nadmořskou výšku a odběr média, Epanet 2.0 v rámci snižování počtu odběrných míst a zjednodušení modelu používá odběr v uzlech (viz „Snižování počtu odběrných míst a jejich zadávání“). Objektům se zadají parametry odpovídající realitě, např. velikost, průtok, apod. Úsekům je nutno přiřadit délku a také drsnost, což může být u stávajících sítí problematické, stejně tak jako u nově plánovaných, protože musíme brát v potaz i degradaci materiálu vlivem jeho stáří a ostatních provozních podmínek. Jelikož Epanet 2.0 dokáže počítat hydraulické ztráty mechanické energie v potrubí dle Hazen-Williamsovy rovnice (dále jen H-W), která se využívá především v USA a dle Darcy-Weisbacha (dále jen D-W) využívaného hlavně v Evropě, je nutno umět zadat hodnoty drsnosti pro dané úseky. U H-W rovnice se drsnost může pohybovat až do hodnoty 150. Čím je tato hodnota nižší, tím

je potrubí drsnější. U D-W je to právě naopak, hodnota může jít teoreticky do nekonečna, přičemž začíná nulou a čím je tato hodnota vyšší, tím je potrubí drsnější. Jak je patrné, počítá se zde pouze se ztrátami třením po délce, ztráty místní způsobené armaturami se nahrazují ekvivalentní délkou, nebo je můžeme paušálně nahradit tak, že se každému úseku přiřadí určitá procentuální hodnota. Po zadání těchto parametrů je možno provést statickou analýzu nadefinované sítě. Jedná-li se o kvazi-dynamickou analýzu, musí být přiřazeny časové křivky a to například průběh odběru během dne nebo doba, kdy je čerpadlo v provozu apod. [14].

Výstupem ze statické hydraulické analýzy vodovodní sítě je v uzlech hydrodynamický přetlak, v úsecích pak průtok a rychlost. U kvazi-dynamické analýzy sledujeme hydrodynamický přetlak, průběh tohoto tlaku v celém čase simulace, průběh rychlostí v úsecích a zjistíme i průběh hladiny ve vodojemu.

### 3 HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ

V následující kapitole jsou aplikovány výše popsané principy modelování na konkrétním případě, a to na části vodovodní sítě sídliště Bystrc.

#### 3.1 ZÁJMOVÁ LOKALITA BRNO - BYSTRC

##### 3.1.1 Popis městské části

Brno, coby největší město Moravy, je tvořeno 29 městskými částmi, z nichž jednou je městská část Bystrc. Nachází se na severozápadním okraji města a svou rozlohou 27,24 km<sup>2</sup> je největší částí, která byla vystavěna v panelové sídlišti v 70. – 90. letech minulého století. Počet trvale zde žijících obyvatel sahá bezmála ke 24 000 a řadí tak zmiňované sídliště mezi nejvíce obydlené městské části. Bystrc se rozkládá v nížině obklopené lesy a průměrná nadmořská výška činí 290,00 m n. m. Daná lokalita leží na mírně svažitém terénu se svahy exponovanými směrem k přilehlé Brněnské přehradě, tedy ve směru jihovýchodním [16] [17].



Obr. 3.1 Poloha městské části Brno - Bystrc

##### 3.1.2 Zásobování pitnou vodou

###### *Zdroje a doprava vody*

Vodovodní síť města Brna je v současné době napojena na tři zdroje pitné vody. Ty jsou schopny i samostatně, v případě poruchy, dodávat několikanásobně vyšší množství, než je požadovaných 66 l·s<sup>-1</sup>. Zdrojem podzemní vody jsou JÚ Březová, využívající prameniště

v Březové nad Svitavou, odkud je voda vedena březovským přivaděčem I. a II. Zdrojem vody povrchové jsou údolní nádrže Vír s úpravnou vody Švařec a dopravováním pomocí vírského oblastního vodovodu, dříve se sem řadila i řeka Svratkou a její úpravnou v Pisárkách, která byla ovšem v loňském roce vyřazena z provozu a plně ji nahradila ÚV Švařec [18].

Strategickým bodem v zásobování vodou je vodojem Palackého vrch s akumulacním objemem  $2 \times 17\,500 \text{ m}^3$ . Tento vodojem přivádí vodu do VDJ situovaného u ulice Nad Dědinou v západní části Bystrce. Z něj je voda rozváděna do sledované oblasti sídliště. Do VDJ Palackého vrch je voda přiváděna z VDJ Čebín ( $2 \times 8500 \text{ m}^3$ ), kam je dodána z ÚV Švařec gravitačním potrubím DN 1400. Ten byl uveden do provozu v roce 2010 z důvodu promíchání vody z II. březovského vodovodu s vodou z Vírského oblastního vodovodu (VOV). Vodoprávně povolený odběr z 55 km dlouhého II. březovského přivaděče (ocel, DN 1000 – 1200) je  $780 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , zatímco povolený povrchový odběr z nádrže činí  $1140 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  [19].



Obr. 3.2 Schéma zásobování vodou s vyznačenou lokalitou [19]

### *Jakost pitné vody*

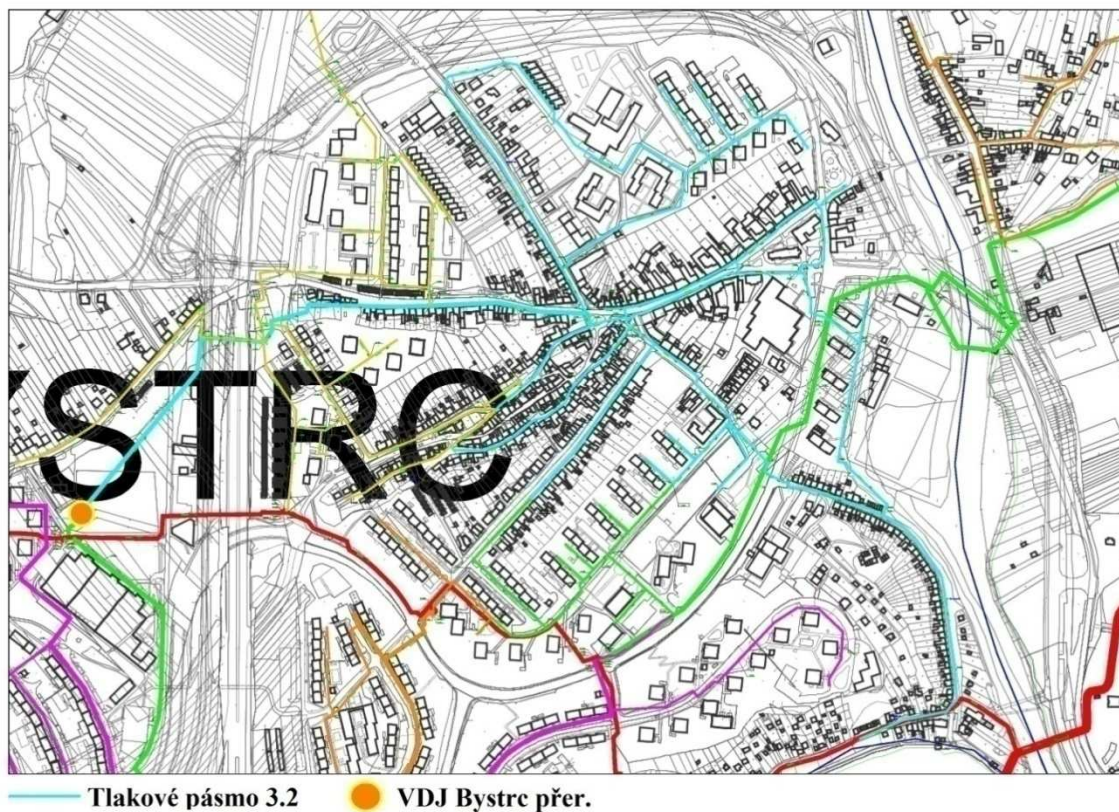
Voda z prameniště Březová splňuje dle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb. požadavky na pitnou vodu bez úpravy. Vrty provedené do druhé zvodně dokonce splňují požadavky na kojeneckou vodu a pro tyto účely byla i využívána, a to díky svému nízkému obsahu dusičnanů do  $15 \text{ mg/l}$  (do roku 2004). Současná nejvyšší mezní hodnota  $50 \text{ mg/l}$  není pro naměřené dusičnany v rozmezí  $30 - 37 \text{ mg/l}$  směrodatná. Stálá teplota podzemní vody se pohybuje kolem  $9,5 \text{ }^\circ\text{C}$  a charakterem je tvrdá. Proto je vhodné zmíněné promíchání s měkkou vodou z nádrže s provzdušňováním [20].

## Úprava vody

Úprava vody se týká především povrchového zdroje. ÚV Švařec, zřízena pro účely nádrže Vír I, se nachází 5 km od hráze nádrže. Odběry surové vody pro úpravu se nachází v hloučce 15, 30 a 50 m od maximální hladiny (469,00 m n. m.). Maximální výkon redukováný sníženou kapacitou filtrace je  $1150 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Voda je hnána přes Francisovu turbínu (210 kW), dále je jako oxidační činidlo použit oxid chloričitý nebo ozon. Jako kouagulant je dávkován síran hlinitý, popř. manganistan draselný pro odstranění manganu. V dalším stupni je využito pomalé mísení, 10 pískových filtrů a 10 filtrů s náplní z granulovaného aktivního uhlí (GAU). Odtud je voda akumulována do jedné z akumuláčnických nádrží o objemu  $20\,000 \text{ m}^3$  [19].

## Tlakové poměry

Městská část Brno – Bystrc náleží do 3. základního tlakového pásma z celkem šesti pásem v Brně. Výškové rozdíly jsou řešeny pomocí 3 vodojemů. Sledované území spadá do oblasti tlakového pásma 3.2 s rozsahem zástavby od 213,00 m n. m. do 240,00 m n. m. Tímto pásmem je zásobena celá spodní část Bystrce na pravém břehu Svatky. Přerušovací vodojem Bystrc 273 je situován u ulice Nad dědinou, na odbočce ze zásobovacího řadu DN 600 z VDJ Palackého vrch. Z bystrckého vodojemu je veden zásobovací řad DN 200 do níže položeného spotřebiště. Stáří popisované sítě je ve staré zástavbě 30 let, v novějších zhruba 20 let.



Obr. 3.3 Rozdělení tlakových pásem v Bystrci [19]

### ***Vlastníci a provozovatelé***

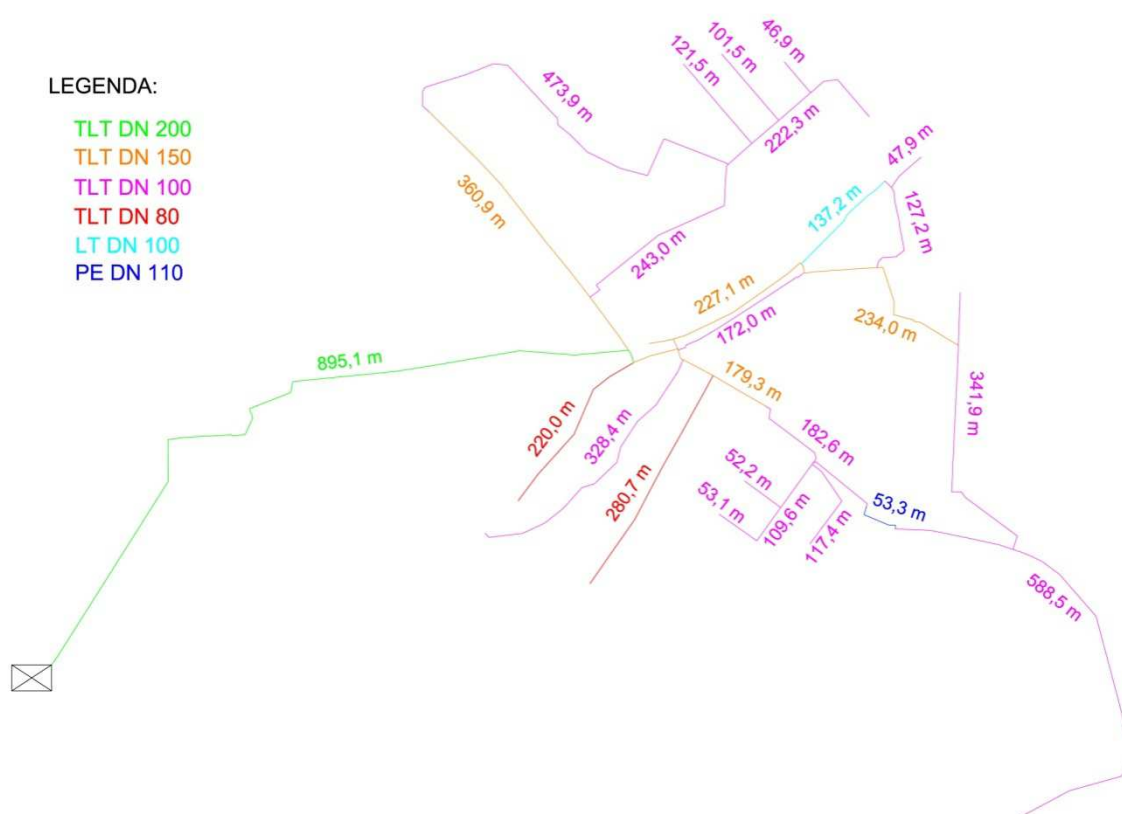
Vlastníkem vodovodu v zájmové oblasti je Statutární město Brno, Dominikánské náměstí 196, Brno, 60167. Provozovatelem je potom společnost Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., Hybešova 254/16, Brno, 65733. BVK, a.s., je stejně tak provozovatelem převážné části VOV a obou březovských vodovodů. Zbývající ojedinělé části provozuje Vodárenská akciová společnost, a.s., Soběšická 156, Brno, 63801. Zatímco vlastníkem Vírského oblastního vodovodu je Vírský oblastní vodovod, sdružení měst, obcí a svazků obcí, Zelný trh 13, Brno, 60200 [19].

### ***Vodovodní síť***

Na vodovodní síť je dle údajů provozovatele připojeno 100 % obyvatel žijících v dané části Bystrce. Ve zmíněném tlakovém pásmu zásobující část zájmového území jsou jako materiály vodovodních řadů použity šedá a tvárná litina a polyetylen. Výstavba zde probíhala postupně od roku 1972, kdy byla použita primárně šedá litina (TLT), přičemž jeden úsek pásma byl vystavěn z tvárné litiny (LT). Pro překonání jednoho z hlavních tahů v Bystrci, silnice na ulici Odbojářské, byl použit polyetylen (PE). Řady jmenovitých světlostí se pohybují v intervalech 80, 100, 110, 150 až po zásobovací řad z vodojemu, jehož jmenovitá světlost činí 200 mm. Délky jednotlivých dimenzí potrubí znázorňuje následující tabulka a schéma.

**Tab. 3.1 Délky jednotlivých dimenzí potrubí**

<b>DN [mm]</b>	<b>Materiál</b>	<b>Délka [m]</b>
<b>200</b>	TLT	895,1
<b>150</b>	TLT	1001,3
<b>100</b>	TLT	3276,5
<b>80</b>	TLT	492,7
<b>100</b>	LT	137,2
<b>110</b>	PE	53,3
<b>Celkem [m] sítě:</b>		<b>8556,1</b>



Obr. 3.4 Schéma dimenzí a délek potrubí

### Vodojem

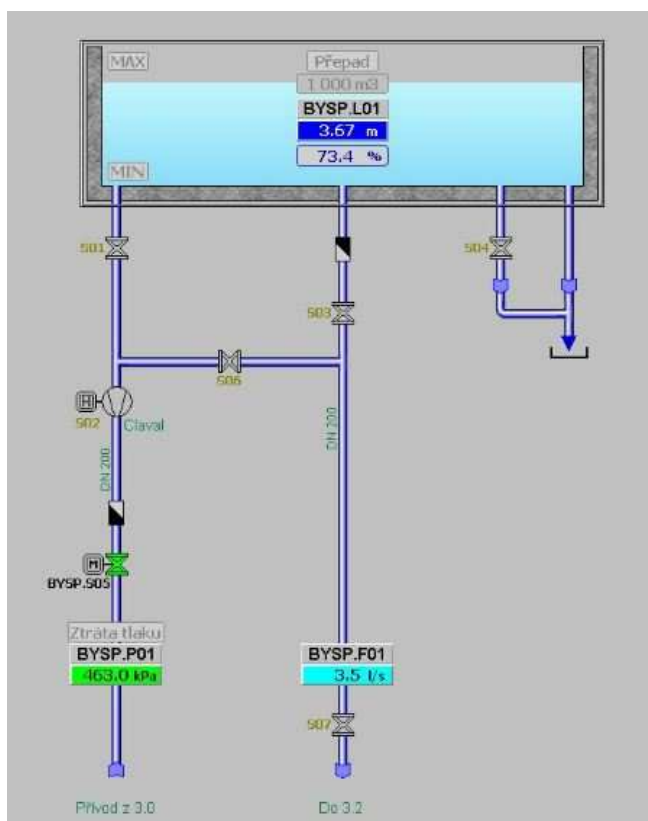
Kvůli velkým výškovým rozdílům mezi zástavbou a vodojemem, který spotřebiště zásobuje, je na sledovaném tlakovém pásmu 3.2 umístěn přerušovací vodojem. Je nutno přerušit tlaky, které vzniknou při výškovém rozdílu vzhledem k VDJ v tlakovém pásmu 3.0, ze kterého je voda přiváděna. Tento rozdíl činí přibližně 50 m. Přerušovací vodojem Bystrc je umístěn v nadmořské výšce 268,00 m n. m. Jedná se o zemní vodojem s jednou armaturní a jednou akumulací komorou o objemu 1000 m<sup>3</sup>. Maximální hladina je umístěna v nadmořské výšce 273,00 m n. m. Konstrukce vodojemu je železobetonová monolitická [19].

Přívodní potrubí je jmenovité světlosti 200 mm. Jak je patrné z níže umístěné fotografie, jsou na něm osazeny dva uzávěry, filtr a redukční ventil CLA-VAL, jehož maximální průtok je 16,5 l·s<sup>-1</sup> a redukuje vysoký vstupní tlak otevřením se při vystoupení hladiny v akumulací komoře 20 cm nad nastavenou provozní hladinu. Na odběrném potrubí DN 200 jsou dva uzávěry, vodoměr osazen na redukovaném potrubí na DN 80, a navíc odběrné místo pro vzorkování. Obě potrubí jsou propojena obtokovým potrubím s uzávěrem pro případ dočasného vyřazení akumulací komory z provozu, např. z důvodu čištění.





Obr. 3.5 Pohled do armaturní komory



Obr. 3.6 Schéma armaturní komory [19]

## 3.2 TERÉNNÍ PRŮZKUM A MĚRNÁ KAMPAŇ

Všechny níže popsané údaje o umístění hydrantů a úzavěrů, společně s podrobným popisem druhu zástavby, podlažnosti objektů, počtem bytových jednotek a v kritických místech i výškou objektů, jsou zaznačeny v přehledné situaci tlakového pásma, viz příloha A.

Při terénním průzkumu, který byl pro účely bakalářské práce proveden v květnu 2013, byla ověřena trasa vodovodní sítě a počet hydrantů a šoupátek, které jsou na síti osazeny, spolu s počtem vodovodních přípojek. Na vodovodní řady tlakového pásma 3.2 je napojeno celkem 398 přípojek. Z toho 340 tvoří přípojky pro rodinné domy, které mají obvykle 2 podlaží, 38 přípojek pro bytové domy o dvanácti až šestnácti bytových jednotkách a 20 přípojek občanské vybavenosti (např. obchody, obchodní pasáž, restaurační zařízení, kulturní centrum, pneuservis, ambulance, školy a ostatní objekty občanské vybavenosti).

Celkový počet hydrantů, které se na síti nachází, je 64. Přehled počtu hydrantů a jejich rozdělení dle jmenovité světlosti je znázorněn níže viz Tab. 3.2 Počet hydrantů, zaznamenání jejich rozmístění na vodovodní síti viz příloha B. Výšková kóta nejnižšího umístěného hydrantu *H42* je 211,59 m n. m. a nachází se v ulici Jakuba Obrovského u č.p. 5/547. Naopak nejvýše položený hydrant *H1* je ten nejbližší vodojemu a jeho nadmořská výška činí 257,61 m n. m. Jako požární hydranty jsou v Požárním řádu města Brna vedeny čtyři hydranty, všechny jsou podzemní. Nachází se v ulici Nad Kašnou a na nám. 28. Dubna [21]. Počet osazených uzávěrů je o jeden nižší než počet hydrantů, a to 63 kusů.

Tab. 3.2 Počet hydrantů

DN [mm]	Materiál	Počet hydrantů
200	TLT	5
150	TLT	12
100	TLT	36
80	TLT	8
100	LT	1
110	PE	2
Celkem [ks]:		64

### 3.2.1 Předmět měření

Nutnost vlastního měření na síti, které proběhlo 21. až 28. května 2013, zdůvodňuje potřeba dat, která tímto získáme a použijeme pro ověření matematického modelu, verifikaci. Pro kompletní posouzení funkčnosti modelu by měla být provedena také kalibrace. Té se ovšem tato bakalářská práce z důvodu jejího rozsahu převyšující rámec práce a časové náročnosti nevěnuje. Pro zmiňovanou verifikaci modelu jsou zapotřebí hodnoty průtoků měřené se stanoveným časovým krokem spolu s hodnotami hydrodynamických tlaků měřených v reálném čase. Výsledkem měrné kampaně jsou pak odběrové křivky a křivky hydrodynamických tlaků. Předmětem měření bylo osazení pěti tlakových čidel na vybraná

místa vodovodní sítě. Pro získání hodnot průtoků probíhalo současně standardní měření průtoků na odtoku z přerušovacího vodojemu Bystrc, které provozovatel (BVK) rutinně provádí. Odtud byla data dálkově přenesena na dispečink, následně vyexportována z databáze a statisticky zpracována viz kap. 3.2.3.

Faktorem při výběru míst pro osazení tlakových čidel byla jejich poloha. Čidla byla osazena přímo do podzemních hydrantů, což je nejjednodušší a nejekonomičtější varianta. Důležitý je i stav hydrantu, kam se má čidlo osadit. Je nutné zabezpečit vodotěsné spojení těchto dvou prvků tak, aby ani za výrazných poklesů nebo nárůstů hydrodynamického tlaku nebyl tento spoj jakkoli narušen. Došlo by tím ke zkreslení výsledků, které se z měření na síti považují za nejpřesněji získané charakteristiky systému. Hydranty tedy musely vykazovat dobrý technický stav, zjiitelný především vizuální kontrolou. Myšlena je tím např. koroze materiálu, zavodnění apod. Tři z celkem pěti sledovaných hydrantů jsou koncové (*H18*, *H28* a *H61*), čtvrtý se nachází v nejnižší situované lokalitě tlakového pásma (*H41*) a poslední je součástí hlavního zásobovacího řadu (*H5*). Umístění těchto hydrantů je zaznačeno v příloze B.

### 3.2.2 Měřící technika

Pro zaznamenání měřených veličin bylo použito pět tlakových čidel, a to 1x MEINECKE COSMOS CDL 2U, 2x SEBA LOG P-3 a 2x DRULO FAST II, která jsou vybavena automatickým záznamovým zařízením a zaznamenávala hodnotu tlaku každých 15 sekund. Ukázka osazených čidel je zobrazena na Obr. 3.7 a Obr. 3.8.

Dalším použitým měřicím přístrojem je tlakové čidlo firmy SEBA KMT, konkrétně typ SEBA LOG P-3. Tento dogger tlaku je určen jak pro krátkodobá měření, tak pro dlouhodobý monitoring a také pro zachycení nežádoucích tlakových rázů v potrubí, která jsou příčinou následných poruch. Jedná se o přístroj malých rozměrů, takže jej lze umístit do všech podzemních hydrantů dobrého technického stavu i na ostatní armatury. Datalogger s integrovaným rádiovým modulem lze použít i pro přenos dat na větší vzdálenosti než je tomu u předchozího typu čidla. Přenos dat do počítače z důvodu jejich zpracování je realizován pomocí podpůrného programu Seba Data View [22]. Grafický výstup zpracovaný tímto programem je zobrazen na Obr. 3.5.

Tlakové čidlo DRULO II firmy F.A.S.T GmbH (Německo) má v sobě vestavěnou paměť pro záznam naměřených hodnot, takže není vyžadováno další místo v hydrantu navíc pro umístění paměťové jednotky. Přístroj je opatřen vodotěsným pouzdem bez plug-in kontaktů. Tento typ dataloggeru je schopen zaznamenávat tlak v rozsahu 0 – 400 bar s minimálním intervalem měření 1 sekunda a maximálním počtem dat pro 240 000 záznamů. Pro vyhodnocení je potom možno data exportovat přes GSM do počítače, kde lze pomocí softwaru Drulo Control naměřená data zpracovat do podoby grafu viz Obr. 3.4 [23].



Obr. 3.7 Čidlo SEBA LOG P-3

Obr. 3.8 Čidlo DRULO II

### 3.2.3 Vyhodnocení měrné kampaně

Hodnoty tlaků a průtoků, které byly získány měřením na síti, byly vyhodnoceny a porovnány s výsledky modelu. Podrobné vyhodnocení jednotlivých měřicích míst uvádí následující tabulky, včetně porovnání s hodnotami tlaků predikovaných modelem. V tabulkách budou uvedeny hodnoty tlaku, které byly naměřeny tlakovými čidly v barech a tlaku, který výpočtem stanovil matematický model v jednotkách metry vodního sloupce (m v. sl.). Pro převod mezi těmito jednotkami byl použit následující vztah:

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

Např.: 1 bar = 0,1 MPa = 10,19 m v. sl.

#### *Vyhodnocení dat o průtocích*

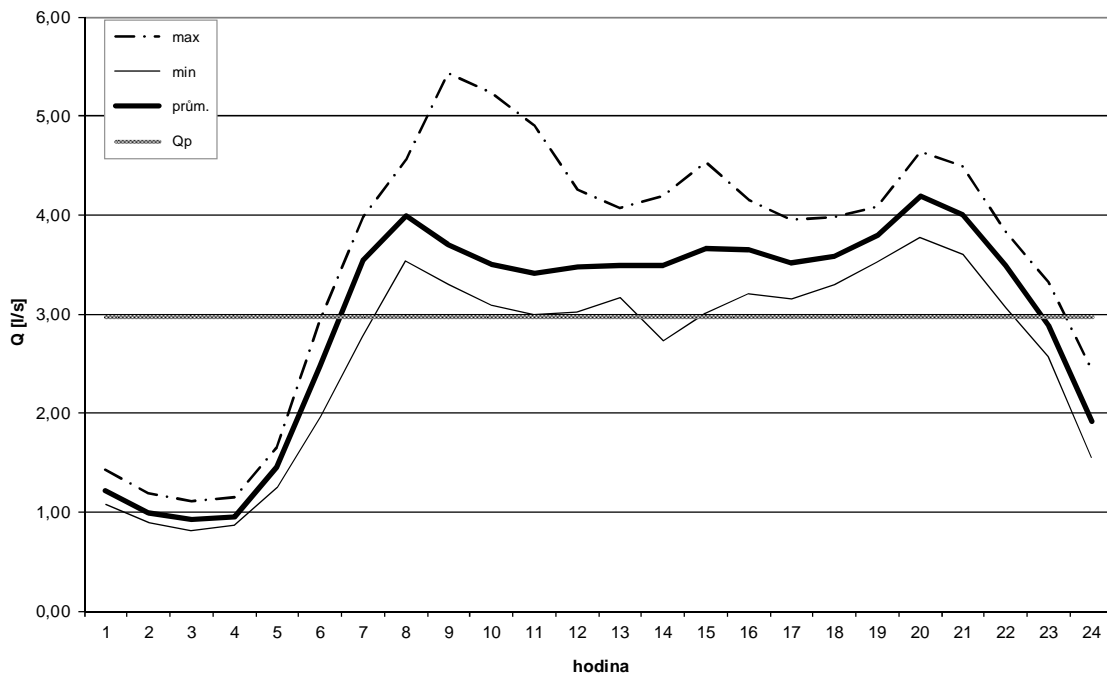
Zaznamenávání hodnot průtoků na odtoku z vodojemu probíhalo po dobu deseti dnů v intervalu pěti minut, k dispozici bylo tedy po provedeném měření 2880 hodnot čekajících na statistické zpracování. Na Obr. 3.8 je ukázka záznamu těchto surových dat získaných z dispečinku BVK. Pro potřeby verifikace simulačního modelu je nezbytné znát hodnoty minimálního  $Q_{\min}$ , průměrného  $Q_p$ , maximálního denního  $Q_d$  a maximálního hodinového průtoku  $Q_h$ . Při zpracování dat rozdělujeme získané hodnoty do tří skupin, jedná se o dny pracovní, nepracovní a o všechny dny bez rozlišení. Statistické zpracování proběhlo v prvním kroku výpočtem aritmetického průměru průtoků v rámci jedné hodiny, tzn. ze třiceti hodnot, čímž jsme získali 24 hodnot průtoků každé kategorie pro jeden den. Z těchto 24 průměrů pro jeden den následoval další aritmetický průměr tentokrát z celkových deseti hodnot, což představuje probíhající měření po dobu deseti dnů. Uvedené počty odpovídají hodnotám pro všechny dny. Pro zbývající rozlišení se uvažovalo se třemi dny pracovního klidu a se sedmi pracovními dny. Znázornění průběhu všech čtyř průtoků můžeme vidět na následujících třech grafech.

	A	B	C	D
1	DATUMCAS	BYSP_F01	BYSP_L01	BYSP_P01
2	19.5.2013 0:00	1,76	3,66	457
3	19.5.2013 0:05	2,01	3,67	458
4	19.5.2013 0:10	2,01	3,67	458
5	19.5.2013 0:15	1,89	3,67	458
6	19.5.2013 0:20	1,89	3,67	458
7	19.5.2013 0:25	1,89	3,67	458
8	19.5.2013 0:30	1,89	3,67	458
9	19.5.2013 0:35	1,89	3,67	458
10	19.5.2013 0:40	1,89	3,67	458
11	19.5.2013 0:45	2,1	3,68	460
12	19.5.2013 0:50	1,45	3,68	460
13	19.5.2013 0:55	1,45	3,68	460
14	19.5.2013 1:00	1,45	3,68	460
15	19.5.2013 1:05	1,24	3,68	460
16	19.5.2013 1:10	1,24	3,68	460
17	19.5.2013 1:15	1,36	3,69	459
18	19.5.2013 1:20	1,36	3,69	459
19	19.5.2013 1:25	1,36	3,69	459
20	19.5.2013 1:30	1,36	3,69	459
21	19.5.2013 1:35	1,51	3,7	459
22	19.5.2013 1:40	1,51	3,7	459
23	19.5.2013 1:45	1,21	3,7	458
24	19.5.2013 1:50	1,21	3,7	458
25	...			
26	Pozn:			
27	BYSP_F01 ... průtok Q [l·s <sup>-1</sup> ]			
28	BYSP_L01 ... úroveň hladiny ve VDJ [m]			
29	BYSP_P01 ... tlak [kPa]			

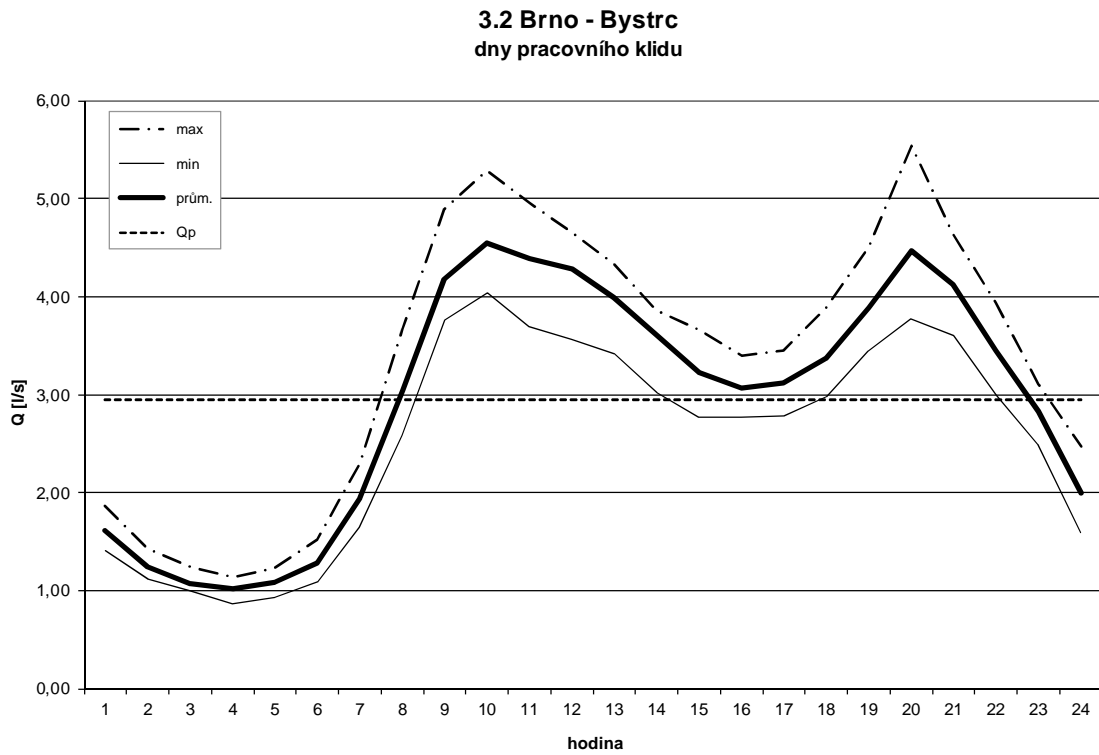
Obr. 3.9 Surová data - měření průtoku

Graf 3.1 Průběh spotřeby vody v pracovních dnech

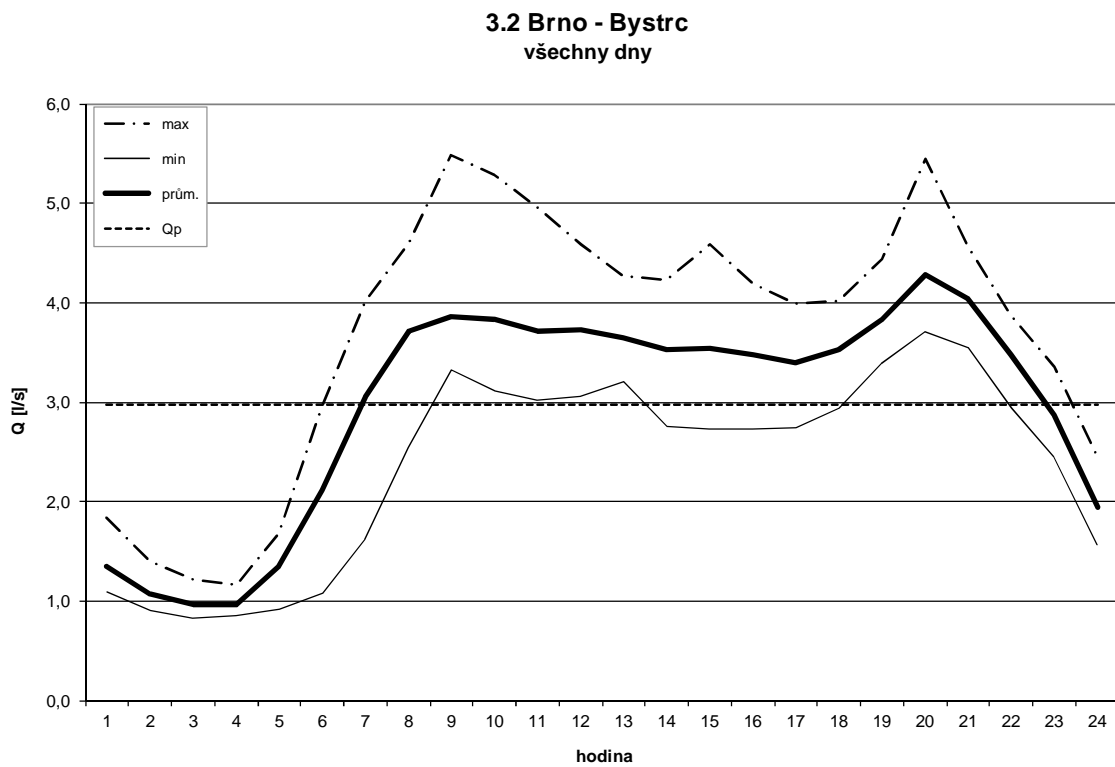
3.2 Brno - Bystrc  
pracovní dny



**Graf 3.2 Průběh spotřeby vody v nepracovní dny**



**Graf 3.3 Průběh spotřeby vody po všechny měřené dny**



Uvedené grafy jsou typickým příkladem průběhu spotřeby vody pro spotřebiště s převládajícím odběrem obyvatelstva. Dokazují to jasně viditelné špičky odběrů, zejména během nepracovních dnů, které se ve spotřebišti vyskytují mezi 8. a 9. hodinou ranní a následně večerní špička odběrů mezi 20. a 21. hodinou. Minima naopak nastávají v nočních hodinách v rozmezí od tří do čtyř hodin.

Po stanovení průměrných hodnot průtoků  $Q_p$ ,  $Q_d$ ,  $Q_h$  a  $Q_{\min}$  lze určit koeficienty denní a hodinové nerovnoměrnosti, které pomohou doplnit informace o charakteru spotřebiště. Koeficient denní nerovnoměrnosti, se pohybuje v rozmezí 1,1 – 1,6 v závislosti na velikosti a charakteru spotřebiště. Koeficient hodinové nerovnoměrnosti je dán charakterem zástavby a může nabývat hodnot 1,8 až 2,1. Vyšší hodnoty jsou určující pro spotřebiště sídlištního charakteru [24]. Vztahy pro výpočet veličin nabývají tvaru [4]:

$$k_d = \frac{Q_d}{Q_p} \quad (3.1)$$

$$k_h = \frac{Q_h}{Q_d} \quad (3.2)$$

kde:  $k_d$  ... koeficient denní nerovnoměrnosti

$k_h$  ... koeficient hodinové nerovnoměrnosti

$Q_d$  ... maximální denní průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]

$Q_p$  ... průměrný denní průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]

$Q_h$  ... maximální hodinový průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]

Následující tabulka je přehledem hodnot stanovených statistickým zpracováním naměřených dat.

**Tab. 3.3 Hodnoty průtoků a koeficientů**

3.2 Brno - Bystrc		Průtok		
		pracovní dny	nepracovní dny	všechny dny
$Q_p$	[ $l \cdot s^{-1}$ ]	2,97	2,95	2,97
$Q_d$	[ $l \cdot s^{-1}$ ]	3,42	3,11	3,45
$Q_d$	[ $m^3 \cdot den^{-1}$ ]	295,6	268,8	298,5
$Q_h$	[ $l \cdot s^{-1}$ ]	5,43	5,53	5,48
$Q_{\min}$	[ $l \cdot s^{-1}$ ]	0,82	0,87	0,83
$k_h$	[-]	1,59	1,78	1,59
$k_d$	[-]	1,15	1,05	1,16

## Vyhodnocení dat o tlacích

Tlaková čidla zaznamenávala hydrodynamické tlaky každých 15 vteřin, ve výsledku jsme tedy obdrželi celkem čtyřikrát 41761 hodnot, se kterými jsme mohli pracovat. Přenesením naměřených dat do počítače za pomoci daných programů bylo možné určit hodnotu minimálního a maximálního tlaku, kterých bylo v daném místě dosaženo. Následuje sumarizace tlaků a ukázka grafického výstupu jejich průběhů u obou typů čidel. Přehled umístění jednotlivých tlakových čidel je zaznamenáno v příloze B.

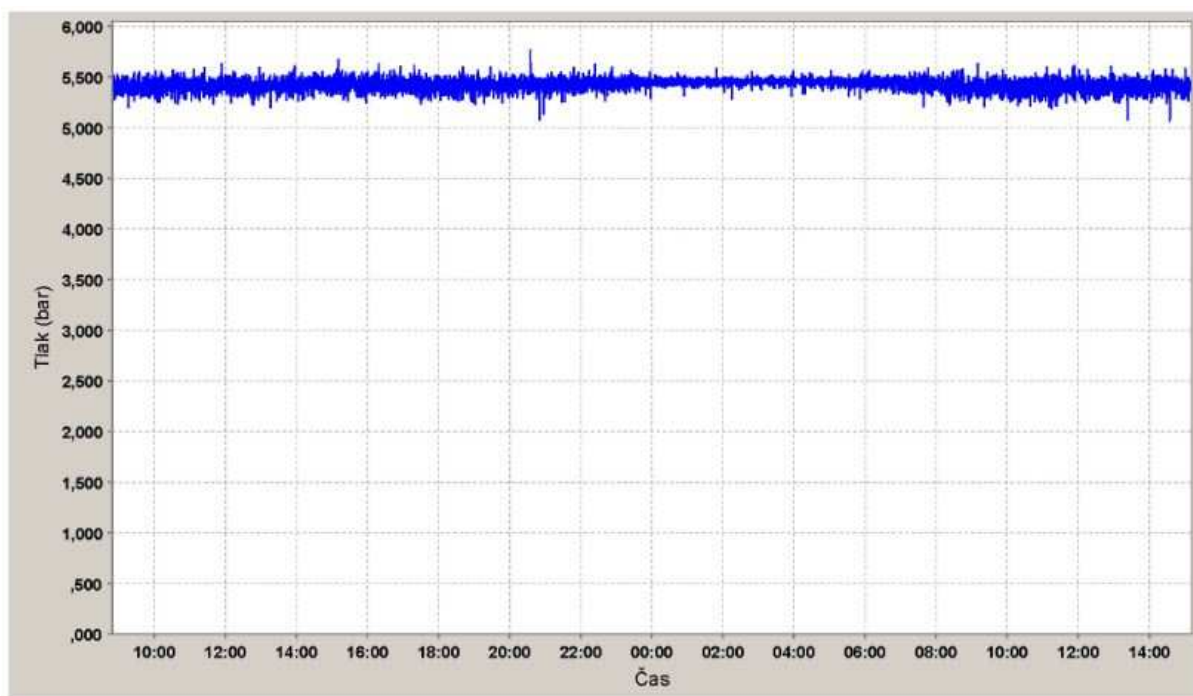
Tab. 3.4 Tlakové čidlo DRULO č. 761

DRULO II č. 761 - H18 - Pod Horkou		
Hloubka pod terénem	[cm]	35
Maximální tlak	[bar]	5,762
	[ m v. sl.]	58,715
Minimální tlak	[bar]	5,065
	[ m v. sl.]	51,612
Průměrný tlak	[bar]	5,419
	[ m v. sl.]	55,220

Tab. 3.5 Tlakové čidlo DRULO č. 553

DRULO II č. 553 - H61 - Obvodová		
Hloubka pod terénem	[cm]	15
Maximální tlak	[bar]	5,848
	[ m v. sl.]	59,591
Minimální tlak	[bar]	5,435
	[ m v. sl.]	55,383
Průměrný tlak	[bar]	5,686
	[ m v. sl.]	57,940

Graf 3.4 Časový průběh tlaků (DRULO č.761)





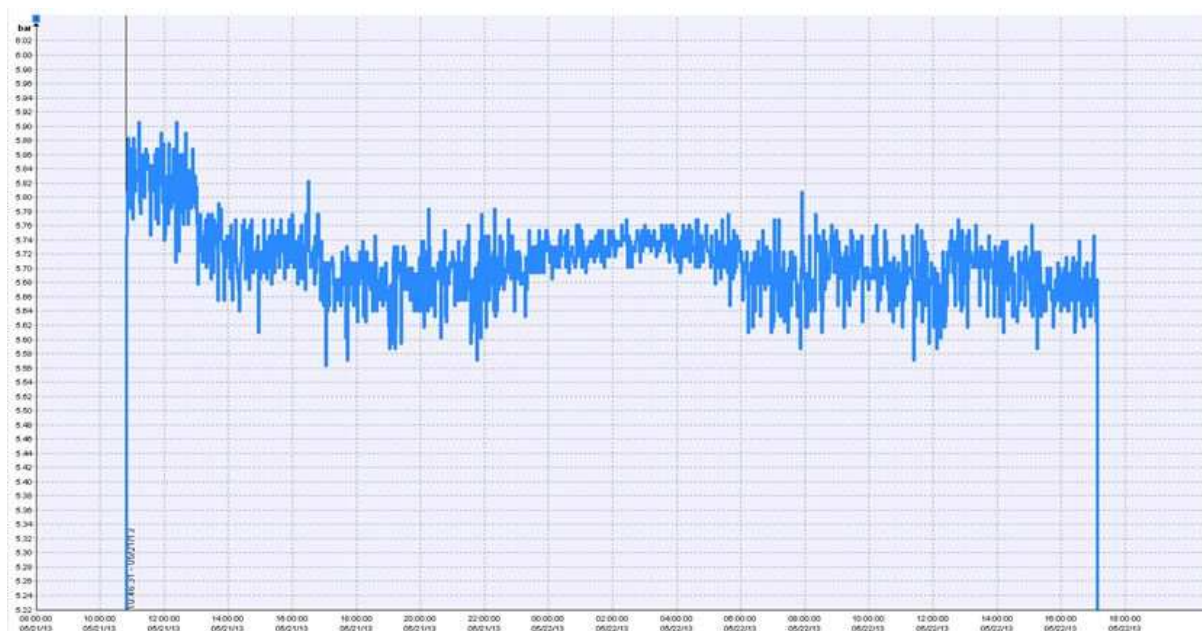
**Tab. 3.6 Tlakové čidlo SEBALOG P-3 č. 205**

SEBALOG P-3 č. 205 - H28 - Krajní		
Hloubka pod terénem	[cm]	30
Maximální tlak	[bar]	3,465
	[ m v. sl.]	35,308
Minimální tlak	[bar]	2,770
	[ m v. sl.]	28,226
Průměrný tlak	[bar]	3,274
	[ m v. sl.]	33,362

**Tab. 3.7 Tlakové čidlo SEBALOG P-3 č.183**

SEBALOG P-3 č. 183 - H41 - J. Obrovského		
Hloubka pod terénem	[cm]	20
Maximální tlak	[bar]	5,992
	[ m v. sl.]	61,058
Minimální tlak	[bar]	5,525
	[ m v. sl.]	56,230
Průměrný tlak	[bar]	5,708
	[ m v. sl.]	58,165

**Graf 3.5 Časový průběh tlaků (SEBALOG P-3 č. 183)**



Z obou grafů je dobře patrný typický průběh tlaků během jednoho dne. Například přibližně mezi druhou a čtvrtou hodinou ranní nastává útlum. Výkyvy tlaků jsou podstatně menší, než je tomu během dne při realizaci většiny odběrů. Jelikož je odběr v tuto dobu téměř nulový a nepředpokládá se, že by v tuto dobu bylo skutečně odebíráno takové množství vody, které je měřením stanoveno, lze předpokládat, že dochází v tuto dobu spíše k plnění vodojemu a daná velikost odtoku z vodojemu v tuto dobu představuje reálné úniky vody ze sítě. Při samostatném porovnání grafů 3.4 a 3.5 je možno zaznamenat větší výkyvy u čidla, které bylo osazeno na hydrant H41. Hydrant se nachází v nejnižším místě vzhledem k vodojemu a projevuje se zde tedy více vliv trubní hydrauliky, proto čidlo zaznamenalo tlaky značně rozkolísanější.

Dle údajů od výrobců obou typů tlakových čidel nemůžeme považovat naměřené údaje za zcela přesné. Při rozsahu tlaků v intervalu 0 až 10 bar je měření u obou typů čidel zatíženo chybou 0,5 % z rozsahu čidla, což představuje maximální chybu jednoho záznamu až 0,05 bar, tedy 0,5 m v. sl. [23] [22].

Tyto hodnoty tlaků naměřených na vodovodní síti budou v další kapitole použity pro posouzení přesnosti matematického modelu porovnáním hodnot tlaků, které byly získány simulací právě tímto modelem.

### 3.3 STAVBA MODELU

Základním kamenem každé hydraulické analýzy je nutně matematický model, pomocí kterého lze simulovat chování a procesy, které ve vodovodní síti mohou probíhat. Funkčnost modelu je pak přímo úměrná kvalitě vstupních dat, stejně tak jako nároky na jeho podrobnost. Pro účely bakalářské práce bylo potřeba sestavit fungující verifikovaný matematický model schopný poskytnout informace o hodnotách tlaků v uzlech a rychlostí v potrubí.

Díky spolupráci s Brněnskými vodárnami a kanalizacemi, a.s., které mají jako provozovatelé kompletní přehled o všech běžných provozních stavech, vyskytujících se problémech a kritických místech jimi provozovaných sítí, se podařilo získat kostru modelu, se kterou bylo možno dále pracovat. Mezi základní informace, které jsou zapotřebí pro sestavení, patří:

- Výškopis a polohopis spotřebiště a vodovodních objektů (uzlové odběry, hydranty, přerušovací vodojem) získané z GIS ve správě BVK.
- Topologie sítě a charakteristika stávajícího potrubí, stáří, materiál a jmenovitá světlost získané z GIS ve správě BVK.
- Poměr rozdělení uzlových odběrů, exportováno ze ZIS BVK.

Tyto tři druhy informací získaný stacionární simulační model obsahoval. I přes věrohodnost informací obdrženy od BVK byly pro jistotu zkontrolovány a aktualizovány některé údaje. Jednalo se konkrétně o některé chybějící uzly, které nebyly v modelu doplněny. Podle provedeného průzkumu neodpovídaly všechny polohy hydrantů. Není z nich trvale realizován odběr pitné vody, nebyly tedy uvažovány při rozdělení uzlových odběrů. Z důvodů následné verifikace je to ale vhodné místo pro porovnání tlaků měřených a vypočtených. Rozmístění uzlů na distribuční síti je znázorněno jako výstup z EPANETu spolu s uvedením jmenovitých světlostí každého z úseků v příloze C.

Dále byla kompletně na celé distribuční síti uvedena jako materiál šedá litina (TLT), převážně z let 1972/3 a 1984. Tato položka byla tedy v modelu ručně upravena pomocí změny drsnosti potrubí, ve dvou úsecích je totiž použita tvárná litina (LT) a polyetylen (PE). Hodnoty drsností šedé litiny se v modelu pohybují v rozmezí 2 až 3 mm, u nově vybudovaného úseku potrubí LT z roku 2006 činí hodnota drsnosti přibližně 0,1 mm, stejně tak u polyetylenu. Údaj o drsnosti potrubí je důležitý pro výpočet ztrát třením po délce, které

jsou v modelu počítány dle vztahu Darcy-Weisbach. Při určování drsnosti každého úseku potrubí je rozhodující v první řadě materiál, ze kterého je potrubí vyrobeno, stáří a zahrnuty jsou i místní ztráty způsobené osazením armatur apod. V příloze D jsou pro jednotlivé úseky potrubí zobrazeny jejich materiály.

Dalším krokem byla kontrola topologie sítě. Mapové podklady, které byly k dispozici (viz příloha č. 1), sloužily po vyexportování programem AutoCAD do formátu „.dxf“ jako podklad. Soubor tohoto formátu lze do EPANETu 2.0 načíst jako *Backdrop* (pozadí) a pracovat tak pohodlně přímo v rozhraní softwaru. Byly doplněny chybějící nově vybudované úseky a doplněny uzly s odběry. U čtyř hydrantů, kde bylo provedeno měření, byla navíc upravena nadmořská výška z původní úrovně terénu přímo do úrovně osazení tlakového čidla. Kompletní topologie sítě se znázorněním nadmořských výšek uvádí příloha E. Výhodou modelu bylo, že obsahoval procentuální rozdělení uzlových odběrů. Nebylo tedy zapotřebí složitě stanovit hodnoty uzlových odběrů metodou rozdělení podle délek úseků, metodou redukovaných délek nebo rozdělení dle počtu zásobovaných obyvatel jak je popsáno v kapitole 2.1.3. S takto aktualizovanou verzí stacionárního hydraulického modelu už bylo možné provést simulaci zatěžovacími stavy.

### 3.4 VERIFIKACE MODELU

Jak jsme se již dozvěděli, verifikace má být jakousi kontrolou správně provedené kalibrace modelu, která jí má předcházet. Z důvodu velkého obsahu převyšující rámec této práce je samotná kalibrace vynechána. Můžeme tedy provést přímo verifikaci. Ta proběhne při dvou zatěžovacích stavech sítě. Za minimálních průtoků, kdy můžeme uzlům přiřadit nejvyšší hodnoty tlaků, které se na ni mohou kdy vyskytnout, a při maximální večerní špičce ve vodovodní síti, které odpovídají naopak nejnižší hydrodynamické tlaky téměř se shodující s hodnotou tlaku hydrostatického.

První verifikační stav se vztahoval k minimálním průtokům. Hodnota tohoto průtoku, která je z vodojemu odebírána, činí  $0,83 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . V nočních hodinách, kdy k průtokům této velikosti dochází, je hydrodynamický tlak téměř totožný s hodnotou hydrostatického tlaku. Průtok pro druhý verifikační stav nabývá velikosti  $5,48 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  a získáme díky němu představu o minimálních pohybech tlaků nevzdalujících se díky své velikosti od hydrostatického tlaku. Porovnání tlaků vypočítaných modelem a naměřených přímo na síti pro všechny čtyři hydranty je uvedeno v následujících tabulkách.

**Tab. 3.8 Hodnoty tlaků na hydrantu H18**

Tlakové čidlo DRULO II č. 761 – ul. Pod Horkou				
Verifikační stav	Tlak	Naměřený	Vypočtený	Rozdíl
Minimální průtok	[m v. sl.]	58,72	54,29	4,43
Maximální průtok		51,61	53,78	2,17

**Tab. 3.9 Hodnoty tlaků na hydrantu H61**

Tlakové čidlo DRULO II č. 553 – ul. Obvodová				
Verifikační stav	Tlak	Naměřený	Vypočtený	Rozdíl
Minimální průtok	[m v. sl.]	59,59	56,29	3,30
Maximální průtok		55,38	55,68	0,30

**Tab. 3.10 Hodnoty tlaků na hydrantu H28**

Tlakové čidlo SEBALOG P-3 č. 205 – ul. Krajní				
Verifikační stav	Tlak	Naměřený	Vypočtený	Rozdíl
Minimální průtok	[m v. sl.]	35,31	32,60	2,71
Maximální průtok		28,23	32,14	3,91

**Tab. 3.11 Hodnoty tlaků na hydrantu H41**

Tlakové čidlo SEBALOG P-3 č. 183 – ul. Jakuba Obrovského				
Verifikační stav	Tlak	Naměřený	Vypočtený	Rozdíl
Minimální průtok	[m v. sl.]	61,06	58,09	2,97
Maximální průtok		56,67	56,23	0,44

Velikosti rozdílů tlaků naměřených na síti a vypočtených modelem se pohybují zhruba ve stejných řádech, v průměru činí tato diference 2 až 4 m v. sl. Díky stejným hodnotám lze odhadnout, že bude nepřesnost již na počátku distribuční sítě a to přímo ve vodojemu. V modelu může být zadaná nesprávná nadmořská výška hladiny, jejíž diference je pak určující pro rozdílnost obdržených hodnot tlaků.

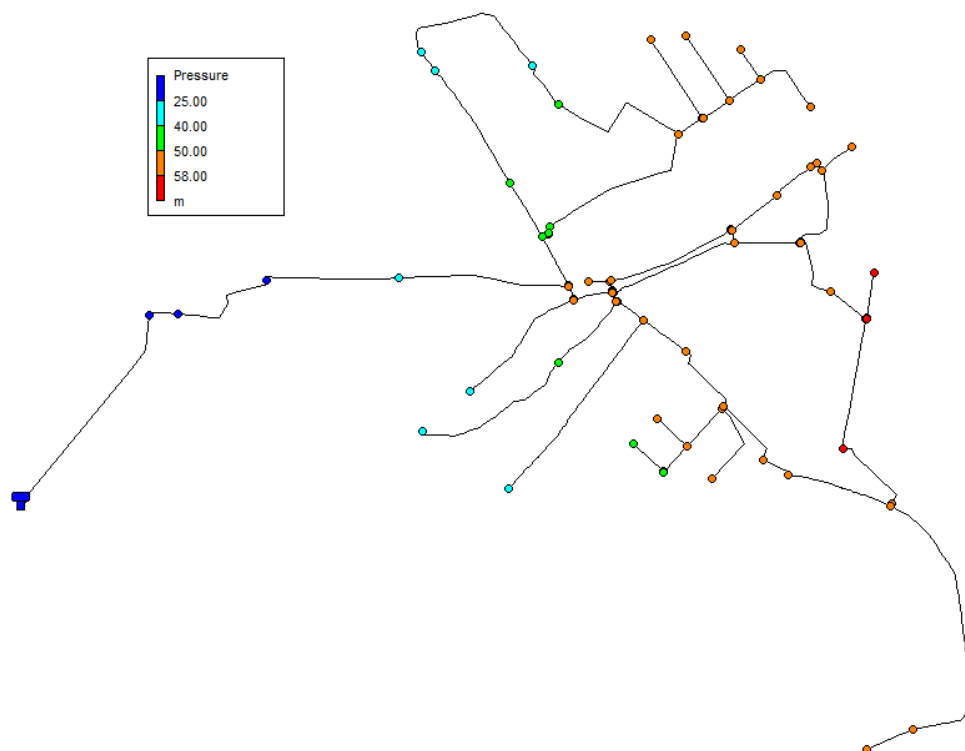
### 3.5 VÝSLEDKY HYDRAULICKÉ ANALÝZY

Cílem hydraulické analýzy bylo simulovat stávající tlakové a průtokové poměry ve vodovodní síti prostřednictvím hydraulického modelu. Výstup této analýzy tvoří čtyři mapové přílohy se zobrazením tlaků a rychlostí zvláště pro každý ze zatěžovacích stavů. Následuje posouzení celého systému z hlediska požadavků ČSN 75 5401 Navrhování vodovodního potrubí. Výsledky provedené analýzy sítě mohou sloužit pro potřeby provozování a řízení stávající distribuční sítě v plném rozsahu nebo také jako podklad pro návrh případných dalších opatření na vodovodní síti.

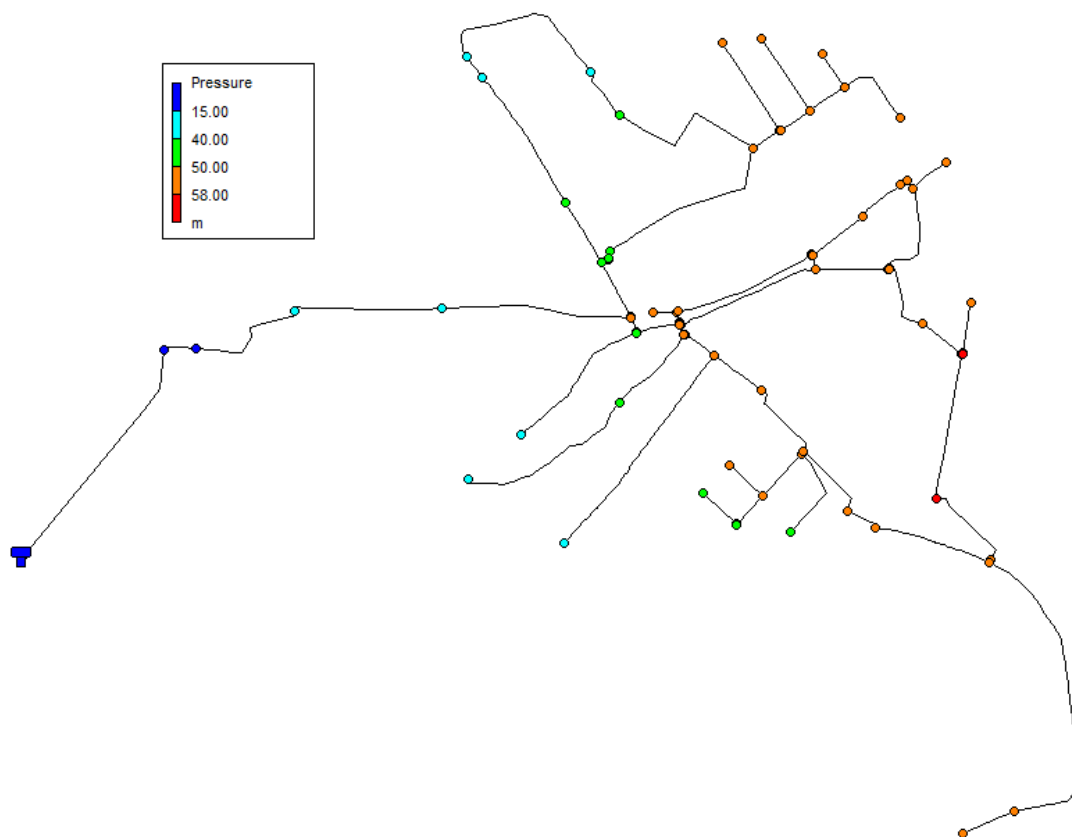
Výpočet byl proveden pro čtyři zatěžovací stavy. První zatěžovací stav je určen průměrným denním průtokem  $Q_p$ , který lze výpočtem stanovit na základě počtu obyvatel a specifické potřeby vody  $q$  neboli množství vody za jednotku času připadající na jednoho obyvatele. Celkový počet obyvatel zásobovaný ze studovaného tlakového pásma je dle počtu napojených vodovodních přípojek a druhu napojených jednotek stanoven na přibližný počet 2040. Druhý zatěžovací stav je dán hodnotou  $Q_d$ , maximální denní potřebu vody, která nastává v tzv. večerní špičce. Připisujeme ji dle analýzy průtoků (viz 3. kapitola) 20. až 21. hodině a představuje 8 až 13 % z celkové maximální denní potřeby  $Q_d$ . Zatěžovací stav v pořadí třetí připadá na minimální průtok  $Q_{min}$ , který představuje množství vody dodávané především v nočních hodinách a jehož hodnoty se limitně blíží nule. Hodnota přetlaku v daném uzlu se tedy téměř shoduje s hodnotou daného hydrostatického tlaku v témže uzlu. K těmto odběrům dochází dle provedené analýzy mezi třetí a čtvrtou hodinou ranní a představují přibližně 0,8 až 1,5 %  $Q_d$ . Čtvrtý, poslední z uvažovaných zatěžovacích stavů, je logicky  $Q_h$ , maximální hodinová potřeba vody. Jde o největší potřebu vody po dobu jedné hodiny. Následující tabulka uvádí hodnoty jednotlivých zatěžovacích stavů

Při posuzování maximálních rychlostí, které mohou být v distribuční síti dosaženy, napovídají získané hodnoty o značném předimenzování některých úseků. Zejména koncové úseky by bylo vhodné provést z potrubí o menší jmenovité světlosti. Často jsou v těchto úsecích použity potrubí DN 100 a rychlosti dosahují pouze minimálních hodnot  $\pm 0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podrobně pro každý úsek jsou uvedeny maximální rychlosti v příloze F. Maximální rychlosti je možno dosáhnout na potrubí za vodojemem, její hodnota je  $0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

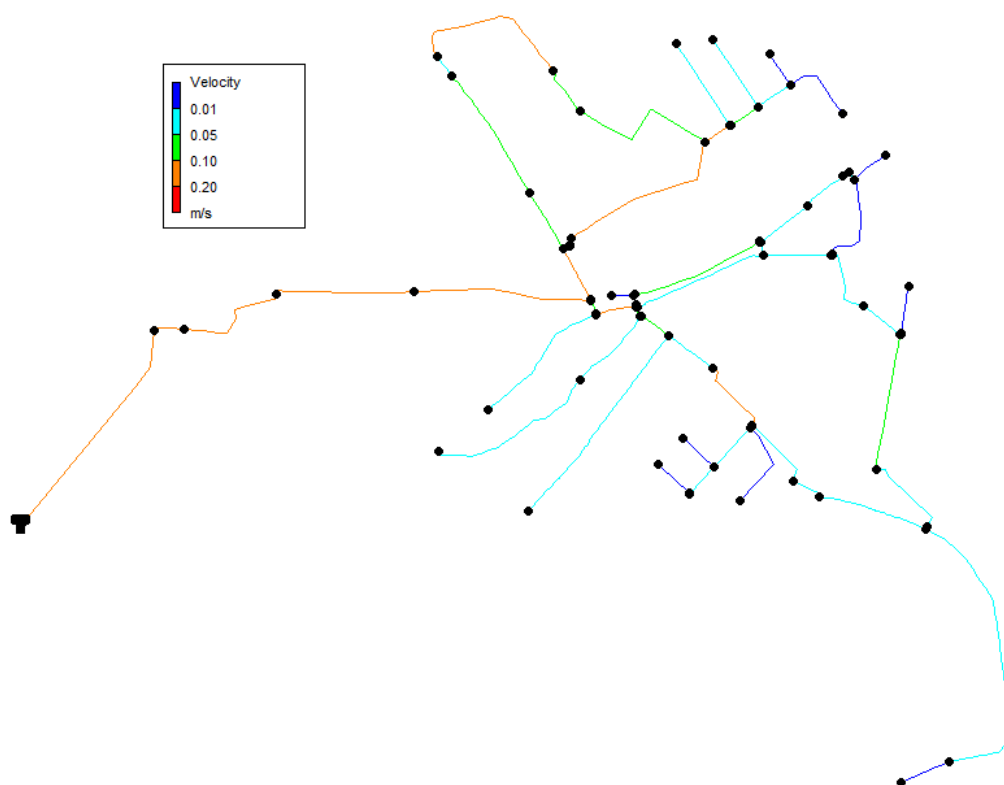
Maximální tlaky, kterých lze na síti dosáhnout, činí  $\pm 13 \text{ m v. sl.}$  Při uvažování zmiňované nepřesnosti výpočtového modelu bychom obdrželi hodnotu požadovaného minima  $15 \text{ m v. sl.}$ , což lze považovat za splnění podmínek daných normou. Maximální vypočtený tlak pak dosahuje  $59 \text{ m v. sl.}$ , a to v nejnižším místě vodovodní sítě vzhledem k vodojemu. Následující obrázky zobrazují schematicky hodnoty maximálních rychlostí a minimálních a maximálních tlaků.



**Obr. 3.10** Schéma maximálních tlaků na vodovodní síti



**Obr. 3.11** Schéma minimálních tlaků na vodovodní síti



Obr. 3.12 Schéma maximálních dosažených rychlostí

### 3.6 POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ VE VODOVODNÍ SÍTI

Posouzením tlaků, jejichž hodnoty jsou stanoveny vyhláškou č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích, vyšlo najevo, že se rozdíly mezi maximálním a minimálním přetlakem v jednotlivých výpočtových uzlech pohybují v rozmezí přibližně 0,5 až 1 m v. sl. Dle uvedené vyhlášky je hodnota maximálního hydrostatického tlaku 0,6 MPa, ojediněle v odůvodněných případech i 0,7 MPa [25]. Tuto podmínku splňuje celá vodovodní síť, jak dokazuje příloha G. Výstupy analýzy jsou doplněny o přílohu H, kde jsou v mapě zaznamenány minimální přetlaky na síti.

Dalším z výstupů provedené hydraulické analýzy může být i přehledné zpracování dat ve formě formuláře, které budou sloužit pro potřeby kalibrace modelu. Formulář shrnuje všechny známé informace o daném místě osazení tlakovým čidlem (datum měření, nadmořská výška, typ tlakového čidla, dosažené tlaky – minimální, průměrný a maximální, průtok). Ukázka vyplněného formuláře tvoří přílohu I.

## 4 HYDRAULICKÁ KAPACITA HYDRANTŮ

Kapitola se věnuje normativnímu popisu týkajícího se požadavků na požární vodu a požárních hydrantů obecně. Bude popsán postup vedoucí k určení zatěžovacích stavů, metodika, která stanoví hydraulickou kapacitu hydrantů, a to s konkrétními hodnotami odběrů náležitých vodovodní síti v zájmové lokalitě.

### 4.1 ZÁSOBOVÁNÍ POŽÁRNÍ VODOU

Zdroje požární vody je nutno zabezpečit všude tam, kde existuje požární riziko, tedy v požárních úsecích stavebních objektů, v otevřených technologických zařízeních, na volných skládkách apod., a to takovým způsobem, aby byly schopny po dobu alespoň 30 minut zásobovat dané místo požární vodou v předepsaném množství. Od tohoto kroku lze upustit v případech uvedených v ČSN 73 0873 – Zásobování požární vodou. Podmínkou je předpoklad zabránění přenesení požáru na sousední objekty (např. při dostatečné odstupové vzdálenosti). Zdroje představují vnitřní odběrní místa a vnější odběrní místa, kterými jsou nadzemní a podzemní hydranty, požární výtokové stojany, vodní toky a nádrže na vodu (přirozené i umělé). Tyto uvedené vnější odběrní místa jsou určena především pro mobilní požární techniku, která odtud může při zásahu získat vodu potřebnou pro hašení. Zmíněná zařízení pro zásobování lze navrhovat společně s trubním vedením pitné nebo užitkové vody [26].

Význam dodávky požární vody právě z vodovodní sítě je nutné u měst a obcí se sníženou dostupností k povrchovým zdrojům nebo při jejich úplné absenci. Proto je standardní součástí každé distribuční sítě soustava hydrantů. Při pohledu na rozmístění těchto hydrantů se zdá jejich poloha i počet dostačujícími. Ne každý hydrant je ovšem primárně určen pro požární využití. Většina u nich totiž plní prioritně účely vodárenských společností. Takové hydranty lze samozřejmě pro potřeby hašení využít, schází nám ovšem záruka toho, že námi náhodně vybraný hydrant bude dostačující z hlediska hydraulické kapacity. Právě na tyto prvky se při stanovení jejich hydraulické kapacity zaměřím.

#### 4.1.1 Vnější odběrní místa

Rozhodujícím faktorem při návrhu odběrných míst jsou úseky s nejvyššími nároky na požární vodu. Maximální vzdálenosti jsou zároveň pro různé druhy objektů dány zmiňovanou normou ČSN 73 0873, „Tabulka 1“. Našeho konkrétního případu sídliště Bystrc a sledovaného tlakového pásma se týká maximální rozestup, který činí 200 m od objektu do plochy 200 m<sup>2</sup> a 400 m mezi sousedními hydranty [26].

Mimořádnou roli hraje z hlediska požární bezpečnosti objektů přetlak v distribuční síti, ať už hydrodynamický nebo hydrostatický. Hydrant, který zaujímá na síti nejnepříznivější polohu, by měl disponovat zásobovacím (statickým) přetlakem alespoň 0,2 MPa. Zajistí se tak tím kontinuální zásobování bez výpadku vody v případě akutní potřeby hašení požáru [27].



Potrubí, které dodává vodu do hydrantů (nadzemních i podzemních), navrhujeme s ohledem na jmenovitou světlost těchto zařízení. Tyto hodnoty DN představují zároveň jmenovitou světlost potrubí pro přívod požární vody do odběrního místa.

Podmínkou funkčnosti těchto vnějších odběrních míst je jejich přístupnost. U hydrantů činí tato vzdálenost 9,0 m od přístupové komunikace, pro dobrou dostupnost mobilní požární techniky. Souvisí s tím i manipulační plocha o velikosti alespoň 3 m<sup>2</sup>, z důvodu pohodlné a bezpečné obsluhy armatur daného odběrního místa [26].

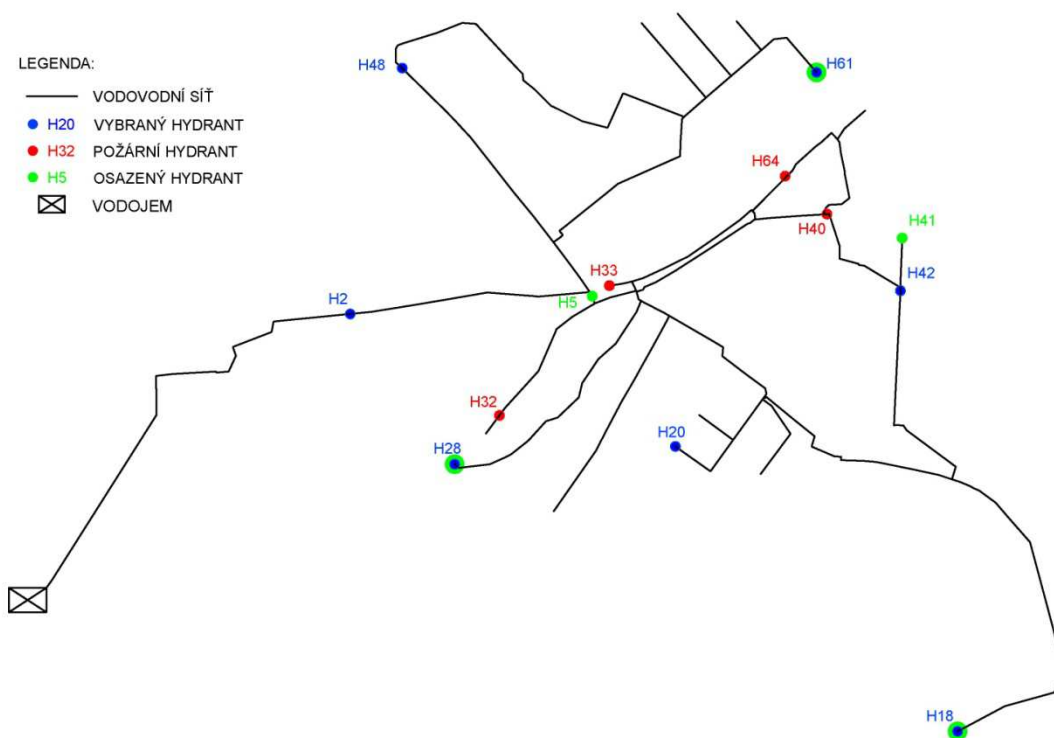
Důležité je zmínit se i o technickém stavu distribuční sítě. Hydraulická kapacita odběrního místa se může stát reálně nedostatečnou, např. z důvodu zanášení potrubí nebo zvýšených ztrát. Snížení kapacity může být důsledkem zejména inkrustace vnitřních stěn potrubí nebo inkrustací ovládacích armatur na vodovodní síti. V důsledku to znamená pokles hydrodynamického tlaku při odběru. Pro snížení rizika této tlakové ztráty je vhodné odběrní místa z hydrantů umisťovat na vodovodní řady DN 150 mm a výše. Při optimálním stavu by totiž neměla být dimenze potrubí menší než 100 mm. Výtokové stojany by se pak z těchto důvodů a také z důvodu udržení kvality vody měly osazovat na řady DN 250 mm a větší [27]. Dle ČSN 73 0873 je minimální jmenovitou světlostí, na které může být hydrant umístěn, 80 mm [26]. Při navrhování vodovodní sítě se snažíme, ať už z důvodů ekonomických nebo pro zajištění příznivých hydraulických poměrů, o návrh co nejmenší možné jmenovité světlosti potrubí. U vodovodů hraje v tomto ohledu roli také kvalita dopravovaného média. Při zbytečném předimenzování a nedostatečně velkých odběrech ze sítě voda v potrubí stagnuje, mění tak své kvalitativní vlastnosti. K odběrateli se potom dostane voda starší, než by tomu bylo za normálních podmínek a tím pádem méně kvalitní.

### ***Podzemní hydranty***

Tento druh vnějšího odběrního místa se navrhuje zejména jako zásobování pro účel hašení objektů na volném prostranství (rodinné domy apod.). Výtokové stojany a plnicí místa se instalují spíše v uzavřených výrobních areálech a skladech. Hydranty je vhodné osazovat na okružovou vodovodní síť z důvodu trvalého zavodnění a přístupu vody. Pokud není možno podmínce vyhovět, je vhodné dodržet vzdálenost do dvaceti metrů od trvale zavodněného přívodního potrubí. Při návrhu postupujeme podle parametrů daných normou. Pro studované tlakové pásmo 3.2 v Bystrci určuje „Tabulka 2 – Hodnoty nejmenší dimenze potrubí, odběru vody a obsahu nádrže“ ČSN 73 0873 dle druhu objektů, kterými jsou sice ve většině případů rodinné domy do 200 m<sup>2</sup> zastavěné plochy a nevýrobní objekty do plochy 120 m<sup>2</sup>, ale výrazně tento případ navyšují svou plochou bytové domy, které se svou plochou požárního úseku patří do kategorie 120 m<sup>2</sup> < S ≤ 1000 m<sup>2</sup>, jako nejmenší jmenovitou světlost potrubí 100 mm s odběry 6,0 l·s<sup>-1</sup> (pro doporučenou rychlost 0,8 m·s<sup>-1</sup>) a 12 l·s<sup>-1</sup> (pro rychlost 1,5 m·s<sup>-1</sup> s požárním čerpadlem) [26]. Tyto hodnoty budou v další podkapitole použity pro posouzení výsledků simulace požárního odběru s ohledem na požadované hodnoty hydrostatických přetlaků.

## 4.2 HYDRANTOVÁ SÍŤ BRNO – BYSTRC

Shrnu-li informace potřebné pro uvedené účely, nachází se ve zkoumaném tlakovém pásmu celkem 64 hydrantů, z toho 4 jsou primárně určeny pro požární odběry [21]. Pro stanovení hydraulické kapacity jsem vybrala pro tyto účely sedm hydrantů. Výběr se řídil významností polohy daného hydrantu a jedná se o určité hydranty koncové, dále nejvýše položené a ty, které se nachází v blízkosti bytových domů, tedy tam, kde by mohlo dojít k přerušení dodávky vody z důvodu potřeby vyšších tlaků na síti. Záměrně nebyly do výběru zahrnuty právě ty hydranty, které primárně plní funkci požárních účelů. Níže je graficky znázorněn výběr 7 zmiňovaných lokalit s jejich charakteristikou a zaznačení oněch čtyř požárních hydrantů.



Obr. 4.1 Poloha popsaných hydrantů

Hydrant s označením *H2* je významný svým umístěním. Je nejbližše položeným hydrantem vzhledem k poloze vodojemu. Rozdíl nadmořských výšek v této vzdálenosti 582,3 m činí přibližně 33,4 m. Co se zástavby týká, nachází se v této oblasti pouze řídká zástavba rodinných domů. Hydrant *H18* zastupuje prvek, který je od přerušovacího vodojemu umístěn nejdál. Celková délka potrubí, které tyto dvě místa propojuje je 1898,8 m. Hydrant *H20* byl vybrán pro své umístění v blízkosti bytových domů s počtem osmi až dvanácti bytových jednotek a jejichž výška se pohybuje v průměru kolem 15 m. Další hydrant *H26* je koncovým hydrantem jedné z větví vodovodní sítě, nachází se ve vzdálenosti 1293,0 m a obklopuje

ho hustá zástavba rodinných domů. *H42* je označení koncového hydrantu, který je zároveň nejnižše situovaným hydrantem vzhledem k umístění vodojemu. Rozdíl nadmořských výšek činí v tomto místě 56,5 m. Nejvýše položený hydrant je ten s označením *H48*, jeho nadmořská výška je 237,6 m n. m. a rozdíl výšek vzhledem k vodojemu je 30,4 m. Posledním z řady je hydrant *H61*, je hydrantem koncovým a nachází se za kombinací husté zástavby rodinných domů a domů bytových, jejichž výška činí přibližně 20 m a jsou celky s dvaceti bytovými jednotkami.

### 4.3 SIMULACE ZATĚŽOVACÍCH STAVŮ V HYDRAULICKÉM MODELU SÍTĚ

Pro potřebu práce s reálnými čísly jsou vyžadovány konkrétní hodnoty zatěžovacích stavů, pomocí kterých lze nasimulovat potřebné požární odběry a posoudit tak v dalším kroku práce jejich hydraulickou kapacitu. Zatěžovací stavy byly zvoleny čtyři a charakterizují chování distribuční sítě za běžných provozních stavů. Jako časový krok pro zvolenou simulaci je uvažováno  $\Delta t = 1$  hod.

První zatěžovací stav je určen průměrným denním průtokem  $Q_p$ . Druhý zatěžovací stav je dán hodnotou  $Q_d$ , maximální denní potřebu vody, která nastává v tzv. večerní špičce. Připisujeme ji dle analýzy průtoků (viz 3. kapitola) 20. až 21. hodině a představuje 8 až 13 % z celkové maximální denní potřeby  $Q_d$ . Zatěžovací stav v pořadí třetí připadá na minimální průtok  $Q_{min}$ , který představuje množství vody dodávané především v nočních hodinách a jehož hodnoty se limitně blíží nule. Čtvrtý, poslední z uvažovaných zatěžovacích stavů, je logicky  $Q_h$ , maximální hodinová potřeba vody. Jde o největší potřebu vody po dobu jedné hodiny. Následující tabulka uvádí hodnoty jednotlivých zatěžovacích stavů

Tab. 4.1 Přehled zatěžovacích stavů

ZS	$Q_N$	[l·s <sup>-1</sup> ]
1.	$Q_p$	2,97
2.	$Q_d$	3,45
3.	$Q_{min}$	0,83
4.	$Q_h$	5,48

Hodnoty uvažovaných průtoků byly stanoveny statickým zpracováním časové řady odtoku vody z vodojemu, viz kapitola 3.2.3.

## 4.4 METODIKA STANOVENÍ HYDRAULICKÉ KAPACITY HYDRANTŮ

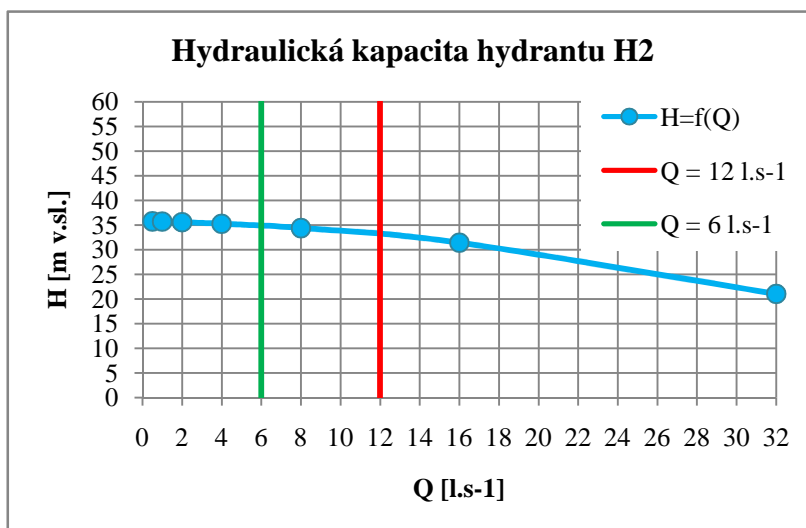
### 4.4.1 Stanovení kapacity výpočtem

U výše popsaných hydrantů byly během simulace požárních odběrů výpočetním modelem sledovány hodnoty hydrodynamických tlaků. Jako zatěžovací stav byl vybrán ten nejnepříznivější, během kterého dochází k největším odběrům ze sítě, a to maximální denní průtok  $Q_d$ , tedy v pořadí druhý zatěžovací stav. Průběh stanovení kapacity byl následující:

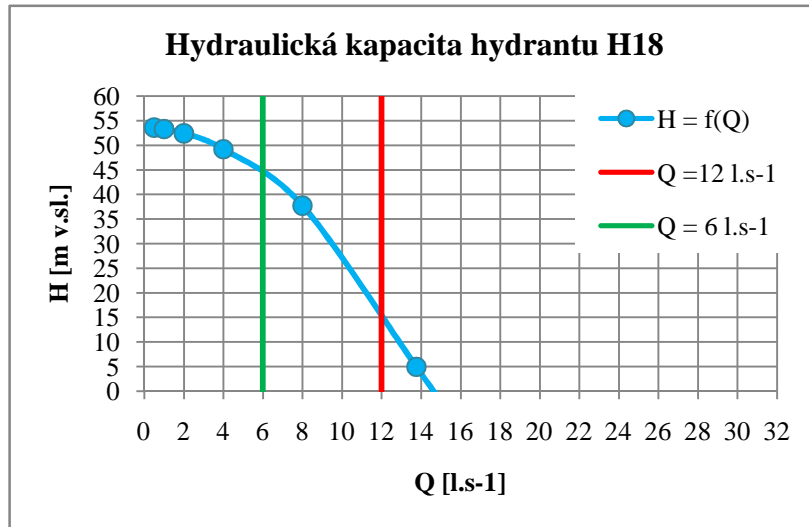
- Z výtípaného hydrantu byl simulován požární odběr s vzestupnou velikostí v intervalu  $0,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  až maximální možný odběr při podmínce dodržení minimálního požadovaného přetlaku  $0,05 \text{ MPa}$ .
- Při každém odběru daného průtoku byly pozorovány a zaznamenány hodnoty hydrodynamického a hydrostatického přetlaku.
- Výstupem každé takové simulace pro daný hydrant je grafické znázornění průběhu odběru požární vody a tlaku v daném uzlu.
- Posledním krokem je posouzení každého hydrantu, zda je jeho hydraulická kapacita pro tyto účely dostačující.

Dosažený hydrostatický tlak musel mít hodnotu alespoň  $0,2 \text{ MPa}$ , což představuje minimální hydrostatický tlak na hydrantu doporučený normou. Této podmínce vyhověly všechny ze sledovaných hydrantů, jelikož zde nedochází k ovlivnění odběrem, ale polohou hydrantu, která se nemění. Požadavku na odběr  $12 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  vyhověly všechny sledované hydranty i za podmínky udržení minimálně  $5 \text{ m v. sl.}$  na vodovodní síti. Dále jsou přehledně znázorněny výsledky simulace hydraulickým modelem. V grafech jsou zeleně označeny odběry  $6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  a červeně požadované vyšší odběry  $12 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . V tabulce jsou pak shrnuty maximální možné průtoky, které můžeme v daném uzlu odebírat za dodržení požadovaných přetlaků na síti.

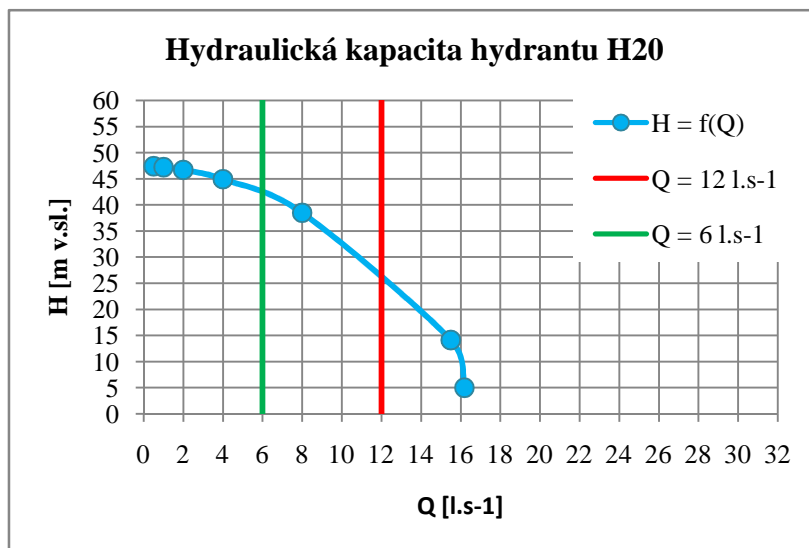
Graf 4.1 Hydraulická kapacita hydrantu H2



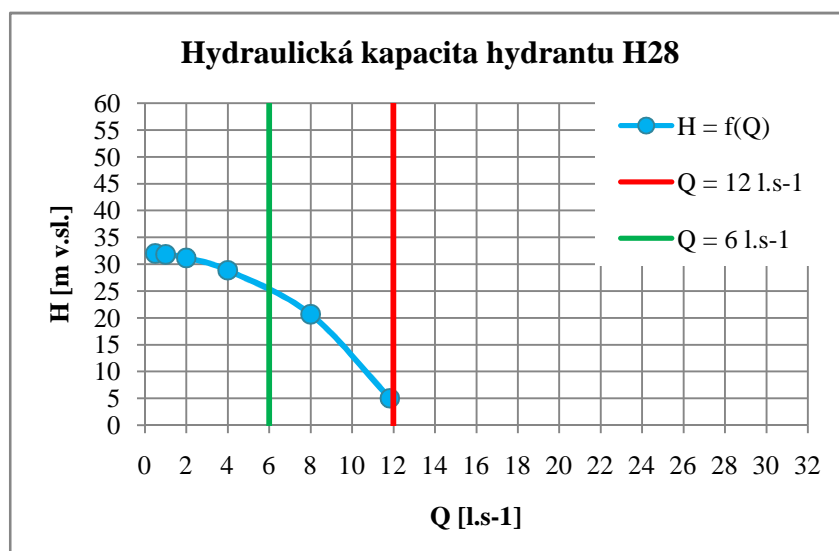
Graf 4.2 Hydraulická kapacita hydrantu H18



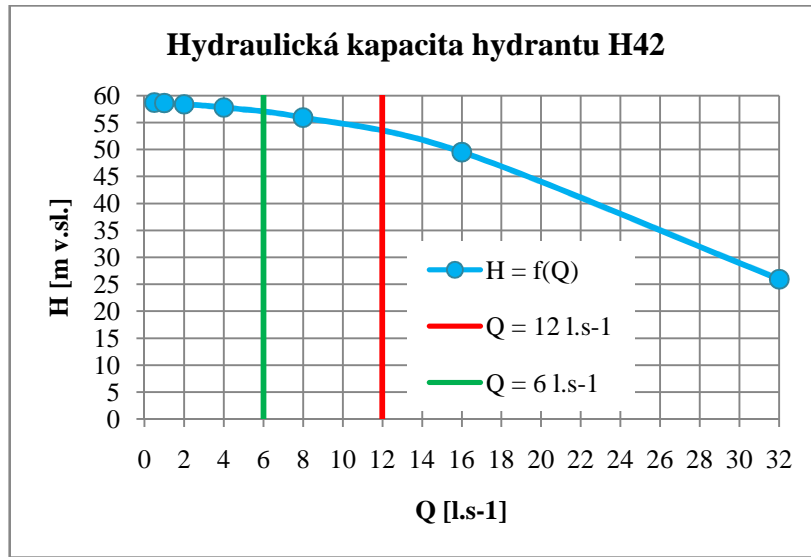
Graf 4.3 Hydraulická kapacita hydrantu H20



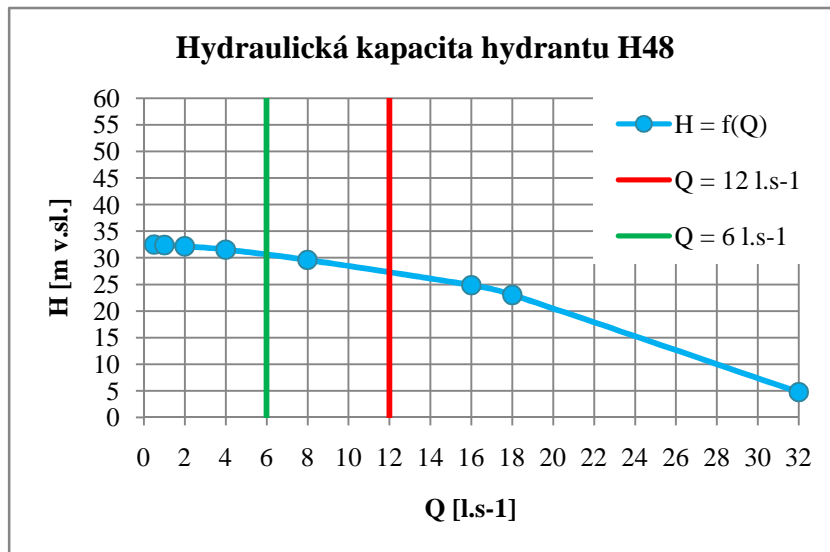
Graf 4.4 Hydraulická kapacita hydrantu H28



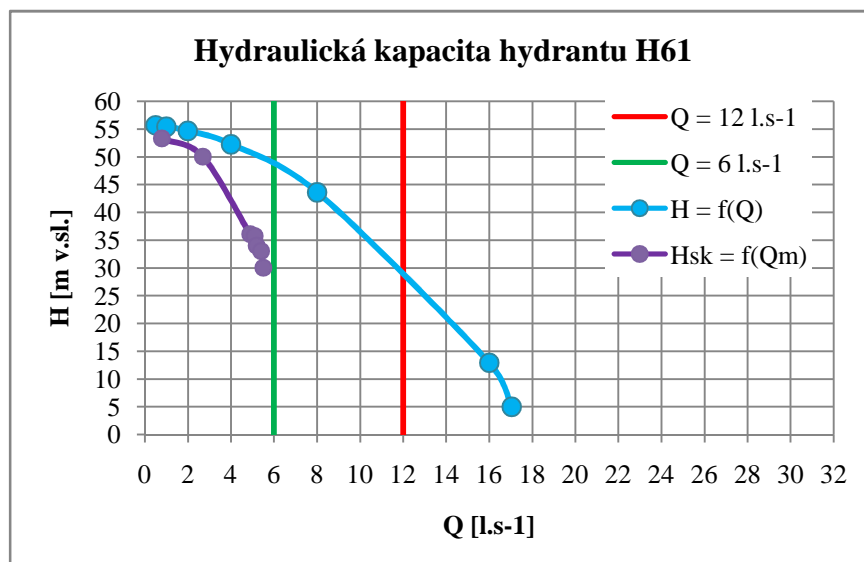
Graf 4.5 Hydraulická kapacita hydrantu H42



Graf 4.6 Hydraulická kapacita hydrantu H48



Graf 4.7 Hydraulická kapacita hydrantu H61



**Tab. 4.2 Přehled hydraulických kapacit**

Označení hydrantu	Ulice	DN potrubí [mm]	$Q_{max}$ [ $l \cdot s^{-1}$ ]	H [m v.sl.]	Splněno $Q_{pož}$
H2	Výhon	200	36,5	23,2	ANO
H18	Pod Horkou	100	11,7	20,0	ANO
H20	Vondrákova	100	14,9	20,0	ANO
H28	Krajní	80	8,3	20,0	ANO
H42	J. Obrovského	100	37,6	21,3	ANO
H48	Přístavní	150	20,9	20,0	ANO
H61	Obvodová	100	14,6	20,0	ANO

Pozn.:  $Q_{max}$  [ $l \cdot s^{-1}$ ] ... odběr maximálního možného průtoku při dodržení tlaků na síti

$H$  [m v.sl.] ... tlak na hydrantu při odběru  $Q_{max}$

$Q_{pož}$  ... požárního odběr  $12 l \cdot s^{-1}$

#### 4.4.2 Hydrantový test pro stanovení kapacity hydrantu

Na hydrantu H61 byl navíc proveden během měrné kampaně hydrantový test. Šlo o osazení přenosného měřicího zařízení, které je zobrazeno níže na fotografii pořízené při měření. Měřicí zařízení bylo osazeno na hydrant a postupně byl odebírán průtok od  $1,0$  až do  $5,5 l \cdot s^{-1}$  se současným měřením tlaku. Tyto hodnoty průtoku spolu s hodnotami jim příslušejících tlaků byly zaznamenány do tabulky a vyneseny do grafu.



**Obr. 4.2 Foto z průběhu měření**

Samotné měřicí zařízení je tvořeno nástavcem vyrobeným z oceli se svarovými spoji. Ty zajišťují kompaktnost nástroje a snižuje se tak možnost poškození během dopravy nebo jiné manipulace. Umožňuje odebírat vzorky vypouštěné vody a dále napojení tlakového čidla pro kontrolu tlaků a průtokoměru pro zjištění aktuálního množství odběru. Tímto způsobem měření lze dosahovat velice přesných výsledků. Zařízení umožňuje měřit průtok s přesností  $\pm 0,1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  v rozsahu 0,5 až  $15,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Přesnost naměřených tlaků je uváděna  $\pm 0,25 \text{ m v. sl.}$  v celkovém rozsahu 0,0 až 100 m v. sl., hodnota rozsahu je v přímé závislosti na typu a možnostech použitého tlakového čidla [28]. Níže je foto-ukázka celého měřicího systému a bližšího pohledu na senzory tlaku, analogický a napojení digitálního čidla.



Obr. 4.3 Detail tlakových čidel



Obr. 4.4 Přenosné měřicí zařízení



Výsledky jsou zaznamenány ve společném grafu pro porovnání teoretických a skutečných hodnot odběrů a přetlaků, viz graf 4.7. Skutečně naměřené hodnoty splnily očekávání a při přiblížení se požárnímu odběru  $Q = 6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  byl zaznamenán strmější pokles tlaků na hydrantu oproti předpokládanému průběhu daného simulačním modelem. Dokazuje to tedy, že model vyžaduje na základně hydraulické analýzy kalibraci, aby se výsledky naměřené na síti shodovaly při dané toleranci s výsledky vypočtenými modelem.

## 5 ZÁVĚR

Matematické modelování, kterým je celá práce provázena, je jedním z pokroků 20. století. Základy mu dali vědci již o pár století dříve a díky moderní technice bylo možno ho rozvést do dnešní podoby. Využitím výpočetní techniky a dokonalejších měřících přístrojů je možno napodobovat reálné děje v námi vytvořených umělých podmínkách. Právě tak tomu bylo v této bakalářské práci, jejímž cílem bylo provedení hydraulické analýzy vodovodní sítě, ověření na základě provedeného měření a jeho využití pro stanovení hydraulické kapacity hydrantů.

Obsahem bakalářské práce je tedy popis matematického modelování soustav s tlakovým režimem proudění, které jsou trubní vodovodní sítě představovány. Vysvětlují postup stavby výpočetního modelu v programech k tomu určených, nutné zjednodušení při zadávání a následný princip kalibrace a verifikace, které jsou podmínkou pro vytvoření správně fungujícího modelu. Popsány jsou softwarové nástroje, které je možno pro tyto účely využít a pozornost je zaměřena na dostupnou softwarovou aplikaci EPANET 2.0, vyvinutou ve Spojených státech amerických a využívanou jako základní výpočetní jádro i jinými programy v tomto odvětví.

Úvodem do praktické části práce je představení řešené lokality, sídliště Brno – Bystrc, konkrétně oblastí, kde je zajišťována dodávka pitné vody prostřednictvím tlakového pásma 3.2. Pro detailní poznání této oblasti byl proveden podrobný terénní průzkum, během kterého byla ověřena trasa vodovodní sítě, rozmístění hydrantů, počty napojených přípojek a prohlídka přerušovacího vodojemu Bystrc s pracovníky BVK, od kterých jako provozovatelů vodovodu byly zjištěny základní informace o spotřebišti a provozu sítě. Následovala měrná kampaň, během které bylo osazeno pět tlakových čidel na vybraných hydrantech a po dobu deseti dnů byly zaznamenávány hodnoty dosažených tlaků. Dále proběhlo měření hydraulické kapacity na jednom z koncových hydrantů pomocí přenosného měřícího nástroje, zaznamenávali jsme hodnoty momentálního průtoku a jemu odpovídající tlak. Obdržené výsledky byly použity pro ověření správné funkce matematického modelu.

Vyhodnocení hydraulické analýzy vodovodní sítě spočívalo v posouzení celého systému z hlediska požadavků ČSN 75 5401 Navrhování vodovodního potrubí. Součástí bylo ověření správnosti výpočtu modelu porovnáním hodnot veličin naměřených na síti a vypočtených. Srovnáním jsem došla k závěru, že model, ke kterému poskytl základní údaje provozovatel, zcela neodpovídá skutečnosti. Hodnoty všech posuzovaných veličin se lišily řádově stejným rozdílem. Příčinou může být samozřejmě určitá nepřesnost měření, způsobena jak samotnou měřící technikou, tak lidským faktorem. Souviset s tímto výsledkem může i neaktuálnost dat o vodovodní síti, konkrétně o potrubí a jeho drsnosti nebo o neaktuálním poměru rozdělení uzlových odběrů. Na základě této hydraulické analýzy může být například provedena detailní kalibrace, která nebyla z důvodu svého rozsahu do bakalářské práce zahrnuta.

Poslední část je věnována stanovení hydraulické kapacity hydrantů. Nejdříve je upřesněna problematika zásobování požární vodou dle ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb - Zásobování požární vodou. Stanovení kapacity proběhlo při zatěžovacím stavu na maximální denní průtok a proběhlo porovnání hydraulické kapacity stanovené výpočtem a zmíněným měřením. Výpočet je ale opět zatížen drobnou nepřesností nekalibrovaného modelu.

Bakalářská práce tedy dospěla ke splnění cílů stanovených v úvodní části práce a jejím zadání. Za předpokladu provedení detailní kalibrace a následné verifikace použitého modelu lze její výsledky použít např. pro sestavení proplachovacího plánu, výsledky hydraulické kapacity hydrantů pak také pro sestavení odkalovacího plánu a dosáhnout tak vyšší kvality v zásobování pitnou vodou tamních obyvatel.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

1. ŘÍHA, J. et al. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Brno: PC-DIR, spol. s r. o. 1997. ISBN 80-214-0827-8.
2. BARNES, B. a G. FULFORD. *Mathematical Modeling with Case Studies: A Differential Equation Approach Using Maple*. T&F STM, 2002.
3. HŘEBÍČEK, J. a M. ŠKRDLA. *Úvod do matematického modelování*. Brno: Masarykova univerzita, 2006, s. 83.
4. TUHOVČÁK, L. et al. *VODÁRENSTVÍ: B. Doprava vody*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s. r. o. 2006.
5. MASE, G. E. *Theory and problems of continuum mechanics*. New York: McGraw Hill Book Company, 1970.
6. REICHL, J. a M. VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2013 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://fyzika.reichl.com>
7. JANDORA, J. a J. ŠULC. *Hydraulika*. Modul 01. Brno: Studijní opora FAST VUT v Brně, 2006.
8. KOVÁŘ, J. a J. RUČKA. *Software Tool for Calibration od Hydraulic Models od Water-Supply Networks*. *Mechatronics 2013 Recent Technological and Scientific Advances*, 2013. ISBN 978-3-319-02293-2.
9. AQUION, S. R. O. [online]. verze <http://www.aquion.cz> [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.aquion.cz/index.php/software/siteflow>
10. KYPIPE. *Kypipe Overview* [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://kypipe.com/kypipe>
11. DHI. *DHI Software* [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.mikebydhi.com/>
12. BENTLEY. *BENTLEY Systems* [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.bentley.com/en-US/Products/WaterCAD/>
13. INNOVYZE, *Innovyze for Sustainable Infrastructure* [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.innovyze.com/products/testimonials/>
14. ROSSMAN, A. L. *EPANET 2 Users Manual*. United States Enviromental Protection Agency US E.P.A. 2000.
15. KOVÁŘ, J. *Návrh regulace tlaku a průtoku v soustavě čerpadlo-nádrž*. Brno: 2013, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brne, Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc. Disertační práce.
16. *BRNO, Bystrc* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.bystrc.cz/>
17. *PROGRAM ROZVOJE MĚSTSKÉ ČÁSTI BRNO-BYSTRC* [online]. 2010 [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.bystrc.cz.vps6137.globenet.cz/Upload/4470.pdf>

18. *PLÁN ROZVOJE VODOVODŮ A KANALIZACÍ JIHOMORAVSKÉHO KRAJE* [online]. 2009 [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: <http://prvkjm.poyry.cz/PRVK%20Brno-mesto/Default.htm>
19. *BRNĚNSKÉ VODOVODY A KANALIZACE, a.s.* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.bvk.cz>
20. KOŽÍŠEK, J. Je vodovodní voda vhodná i pro kojence? In: *SOVAK: časopis oboru vodovodů a kanalizací* [online]. 2005, 11/2005 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: [http://sovak.cz/sites/File/casopis\\_cela\\_cisla\\_2005/11\\_05.pdf](http://sovak.cz/sites/File/casopis_cela_cisla_2005/11_05.pdf)
21. POŽÁRNÍ ŘÁD MĚSTA BRNA. *Příloha č. 3: Přehled zdrojů vody pro hašení požárů na území města Brna* [POŽÁRNÍ ŘÁD MĚSTA BRNA] [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.bysrtc.cz>
22. SEBA KMT. *Sebalog P-3* [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.sebakmt.com/cz/products/vodovodni-site/detekce-uniku-vody/mereni-tlaku-a-prutoku/sebalog-p-3.html>
23. F.A.S.T GmbH. *DRULO II* [online]. 2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://www.fastgmbh.de/Inhalt\\_Ger/Drucklogger.html](http://www.fastgmbh.de/Inhalt_Ger/Drucklogger.html)
24. Potřeba vody - koeficienty nerovnoměrnosti. In: *VODOVOD.INFO* [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: [http://www.vodovod.info/index.php/tabulky/217-potreba-vody-koeficienty-nerovnomernosti#.U3Dy8fl\\_sQU](http://www.vodovod.info/index.php/tabulky/217-potreba-vody-koeficienty-nerovnomernosti#.U3Dy8fl_sQU)
25. ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. č. 428/2001 Sb, In: 428/2001.
26. ČR. ČSN 73 0873. *Požární bezpečnost staveb - Zásobování požární vodou*. Český normalizační institut, 2003.
27. KROČOVÁ, Š. *STRATEGIE DODÁVEK PITNÉ VODY..* Ostrava: EDICE SPBI SPEKTRUM, 2009. ISBN 978-80-7385-072-2.
28. RUCKA, J. a J. KOVAR. Prevention of discoloration events in water distribution systems. *Procedia Engineering*. Exeter: University of Exeter, 2014. ISSN 1877-7058.

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Délky jednotlivých dimenzí potrubí.....	24
Tab. 3.2 Počet hydrantů.....	27
Tab. 3.3 Hodnoty průtoků a koeficientů.....	32
Tab. 3.4 Tlakové čidlo DRULO č. 761      Tab. 3.5 Tlakové čidlo DRULO č. 553.....	33
Tab. 3.6 Tlakové čidlo SEBALOG P-3 č. 205	
Tab. 3.7 Tlakové čidlo SEBALOG P-3 č. 183 .....	34
Tab. 3.8 Hodnoty tlaků na hydrantu H18 .....	37
Tab. 3.9 Hodnoty tlaků na hydrantu H61 .....	37
Tab. 3.10 Hodnoty tlaků na hydrantu H28 .....	37
Tab. 3.11 Hodnoty tlaků na hydrantu H41 .....	37
Tab. 4.1 Přehled zatěžovacích stavů.....	44
Tab. 4.2 Přehled hydraulických kapacit .....	48

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1 Průběh spotřeby vody v pracovních dnech .....	30
Graf 3.2 Průběh spotřeby vody v nepracovní dny .....	31
Graf 3.3 Průběh spotřeby vody po všechny měřené dny .....	31
Graf 3.4 Časový průběh tlaků (DRULO č.761).....	33
Graf 3.5 Časový průběh tlaků (SEBALOG P-3 č. 183) .....	34
Graf 4.1 Hydraulická kapacita hydrantu H2.....	45
Graf 4.2 Hydraulická kapacita hydrantu H18.....	46
Graf 4.3 Hydraulická kapacita hydrantu H20.....	46
Graf 4.4 Hydraulická kapacita hydrantu H28.....	46
Graf 4.5 Hydraulická kapacita hydrantu H42.....	47
Graf 4.6 Hydraulická kapacita hydrantu H48.....	47
Graf 4.7 Hydraulická kapacita hydrantu H61 .....	47

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Postup při matematickém modelování .....	3
Obr. 2.1 Příklad zvolené orientace v jednotlivých úsecích okruhu .....	14
Obr. 3.1 Poloha městské části Brno - Bystrc .....	21
Obr. 3.2 Schéma zásobování vodou s vyznačenou lokalitou .....	22
Obr. 3.3 Rozdělení tlakových pásem v Bystrci .....	23
Obr. 3.4 Schéma dimenzí a délek potrubí .....	25
Obr. 3.5 Pohled do armaturní komory .....	26
Obr. 3.6 Schéma armaturní komory .....	26
Obr. 3.7 Čidlo SEBALOG P-3    Obr. 3.8 Čidlo DRULO II .....	29
Obr. 3.9 Surová data - měření průtoku .....	30
Obr. 3.10 Schéma maximálních tlaků na vodovodní síti.....	39
Obr. 3.11 Schéma minimálních tlaků na vodovodní síti .....	39
Obr. 3.12 Schéma maximálních dosažených rychlostí.....	40
Obr. 4.1 Poloha popsaných hydrantů .....	43
Obr. 4.2 Foto z průběhu měření.....	48
Obr. 4.3 Detail tlakových čidel.....	49
Obr. 4.4 Přenosné měřicí zařízení .....	49



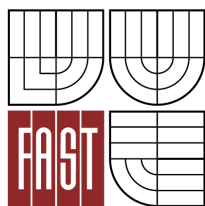
## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

- $\rho$  ( $p(x,y,z,t)$ ,  $T(x,y,z,t)$ ) ... hustota kapaliny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  
 $v_i(x,y,z,t)$  ... vektor rychlosti [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $x_i(t)$  ... prostorová souřadnice, která je funkcí času  $t$   
 $v_x(x,t)$  ... složka vektoru rychlosti [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $\sigma_{ij}$  ... tenzor napětí  
 $f_i(x,y,z,t)$  ... složky vektoru objemového zatížení  $f$  vztaženého na jednotku hmotnosti  
 $p(x,y,z,t)$  ... tlak [Pa]  
 $\lambda(\rho,T)$  ... koeficient objemového přetvoření  
 $\mu(\rho,T)$  ... koeficient dynamické viskozity [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]  
 $\varepsilon_v$  ... tenzor rychlosti objemového přetvoření  
 $\delta_{ij}$  ... Kroneckerovo delta  
 $\Phi$  ... energie (tepelná  $T$ , kinetická turbulentní  $k$ , apod.)  
 $\lambda$  ... difúze  
 $S_\Phi$  ... objemový zdroj  
 $z$  ... geodetická výška osy potrubí [m]  
 $x$  ... prostorová souřadnice ve směru osy potrubí [m]  
 $v$  ... průřezová rychlost kapaliny [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $\tau$  ... tečné napětí kapaliny [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $O$  ... omočený obvod potrubí [m]  
 $A$  ... průtočná plocha [ $\text{m}^2$ ]  
 $\alpha$  ... Coriolisovo číslo  
 $h_z$  ... celková ztrátová výška [m]  
 $h_t$  ... ztrátová výška třením [m]  
 $h_m$  ... ztrátová výška v místních odporech [m]  
 $\lambda$  ... součinitel tření  
 $L$  ... délka potrubí [m]  
 $D$  ... vnitřní průměr potrubí [m]  
 $Re$  ... Reynoldsovo kritérium  
 $\Delta$  ... absolutní drsnost stěn [mm]  
 $\Sigma\xi$  ... součet místních odporových součinitelů v jednotlivých úsecích  
 $L$  ... skutečná délka úseku [m]  
 $L_r$  ... redukovaná délka [m]  
 $S_r$  ... celková redukovaná délka sítě [m]

- $q_r$  ... specifická spotřeba sledované sítě [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]  
 $Q_c$  ... celková spotřeba sledované sítě [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]  
 $C_1$  ... počet zásobovaných obyvatel, bytových jednotek, plocha zástavby  
 $C_2$  ... specifická potřeba na účelovou jednotku použitou v rámci  $C_1$   
 $S_r$  ... celková redukovaná délka sítě [m]  
 $P_i$  ... redukovaná délka úseku [m]  
 $Q_i$  ... výsledný odběr i-tého úseku  
 $Q_i$  ... přítok (vtok) do i-tého úseku [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]  
 $O_i$  ... odtok z j-tého úseku nebo odběr [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]  
 $s$  ... počet nezávislých okruhů v síti  
 $m$  ... počet úseků  
 $n$  ... počet uzlů  
 $\kappa_i$  ... odporový součinitel daného úseku  
 $n$  ... exponent nabývající hodnot od 1,75 do 2,00  
 $H_{0i}, n_i, \alpha_i$  ... parametry čerpadla dané výrobcem  
 $h_i$  ... přírůstek tlakové výšky [m]  
 $Q'_{ij}$  ... průtok v úseku mezi uzly i a j stanovený v předposledním kroku [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]  
 $Q_{ij}$  ... průtok v úseku mezi uzly i a j stanovený v posledním kroku [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]  
 $Q_p$  ... průměrný denní průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]  
 $PO$  ... počet obyvatel zásobovaných v daném tlakovém pásmu  
 $q$  ... specifická potřeba vody [ $l \cdot os^{-1} \cdot den^{-1}$ ]  
 $t$  ... časový krok simulace [s]  
 $Q_d$  ... maximální denní průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]  
 $k_d$  ... koeficient denní nerovnoměrnosti [-]  
 $Q_{min}$  ... minimální průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]  
 $Q_h$  ... maximální hodinový průtok [ $l \cdot s^{-1}$ ]  
 $k_h$  ... koeficient hodinové nerovnoměrnosti [-]  
TLT ... šedá litina  
LT ... tvárná litina  
PE ... polyetylen  
ZIS ... Zákaznický informační systém

## SEZNAM PŘÍLOH

- A. Přehledná situace tlakového pásma 3.2 Brno - Bystrc
- B. Hydrantová mapa tlakového pásma 3.2
- C. Schéma vodovodní sítě – profily potrubí
- D. Schéma vodovodní sítě – materiál potrubí
- E. Schéma vodovodní sítě – nadmořské výšky výpočtových uzlů
- F. Výsledky hydraulické analýzy – maximální tlaky na vodovodní síti
- G. Výsledky hydraulické analýzy – minimální tlaky na vodovodní síti
- H. Výsledky hydraulické analýzy – maximální rychlosti v potrubí
- I. Formulář zpracování výsledků hydraulické analýzy



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ

## POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

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

**Autor práce** Lenka Hofmannová

**Škola** Vysoké učení technické v Brně

**Fakulta** Stavební

**Ústav** Ústav vodního hospodářství obcí

**Studijní obor** 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby

**Studijní program** B3607 Stavební inženýrství

**Název práce** Hydraulická analýza vodovodní sítě sídliště Brno - Bystrc

**Název práce v anglickém jazyce** Hydraulic analysis of the Brno - Bystrc water supply system

**Typ práce** Bakalářská práce

**Přidělovaný titul** Bc.

**Jazyk práce** Čeština

**Datový formát elektronické verze** pdf

**Anotace práce** Bakalářská práce je zaměřena na hydraulickou analýzu spotřebišť Brno - Bystrc. Struktura je rozdělena do tří částí. První část je věnována rešerši používaných postupů, uplatňovaných principů a dostupných softwarových prostředků, zejména pak programu EPANET 2.0, který byl při řešení dané problematiky využit. Dále se práce zabývá popisem měrné kampaně, která je nedílnou součástí prováděné analýzy, a samotnou hydraulickou analýzou, postupem a interpretací získaných výsledků. V poslední části se věnují metodice stanovení hydraulické kapacity vybraných hydrantů, které nejsou primárně určeny pro požární účely, vzhledem k požadavkům daných normou ČSN 73 0873 - Požární bezpečnost staveb - Zásobování požární vodou.

**Anotace práce v anglickém jazyce** The bachelor's thesis is focused on the hydraulic analysis of water storage Brno – Bystrc. The structure is divided into three parts. The first part is devoted to the research of used and applied methods and all available software tools, especially to the EPANET 2.0 programme, which was used

during solving of given issue. The thesis also deals with description of specific campaign, which is the integral part of conducted analysis, and with the very hydraulic analysis, process and with the interpretation of acquired results outcome. The last part is dedicated to methodology of determining of the hydraulic capacity in chosen selected hydrants, which are not primarily intended for the fire protection, in the view of the CSN 73 0873 - Fire protection of buildings- Equipment for fire-water supply.

**Klíčová slova** hydraulická analýza, vodovodní síť, tlakové poměry, hydrant, hydraulická kapacita

**Klíčová slova v anglickém jazyce** hydraulic analysis, water network, pressure ratios, hydrant, hydraulic capacity

# PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne .....

.....  
podpis autorky  
Lenka Hofmannová