

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta stavební**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Brno, 2017**

**Bc. Kateřina Tranová**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

# HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ MĚSTSKÉ ČÁSTI BRNO - IVANOVICE

HYDRAULIC ANALYSIS OF THE BRNO – IVANOVICE WATER SUPPLY SYSTEM

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Tranová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

BRNO 2017



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Kateřina Tranová
Název	Hydraulická analýza vodovodní sítě městské části Brno - Ivanovice
Vedoucí práce	Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

---

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
- [4] Odborné články ze seminářů a konferencí

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

V rámci diplomové práce bude vytvořen hydraulický model vodovodní sítě městské části Brno - Ivanovice v délce přibližně 11 km. K tvorbě modelu budou využity simulační softwarové nástroje Epanet 2.0, resp. MikeNet či Mike Urban. Studentka provede simulaci vybraných zatěžovacích stavů, které charakterizují hydraulický režim vodovodní sítě a posoudí tlakové poměry ve spotřebišti. Předmětem práce bude také vyhodnocení přesnosti hydraulických simulačních stavů při různé kvalitě a podrobnosti vstupních informací.

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

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



## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je vytvořit hydraulický model vodovodní sítě v městské části Brno-Ivanovice. Pro tvorbu hydraulického modelu byl použit softwarový nástroj MIKE URBAN. Byla provedena simulace na různé zatěžovací stavy. Vodovodní síť byla také posouzena na tlakové poměry ve spotřebišti. Výstupem práce je na kalibrovaný hydraulický model vodovodní sítě. Součástí přílohy jsou výkresy, které graficky zobrazují vyskytující se tlaky na síti při různých zatěžovacích stavech a přehledná situaci vodovodní sítě.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

hydraulický model, hydraulická analýza, vodovod, simulace, MIKE URBAN

## **ABSTRACT**

This diploma's thesis aims to model the hydraulic model of the Brno – Ivanovice water supply system. The software MIKE URBAN for model hydraulic model of water supply system was used. It was performed a simulation of the various states of loading. The water supply system was assessment of pressure ratios. The outcome of this work is calibrated hydraulic model of water supply system. The appendix consists also of drawings, which represented pressure ratios, which are situated on water supply system. On the fourth drawing is described transparent situation of Brno-Ivanovice water supply system.

## **KEYWORDS**

hydraulic model, hydraulic analysis, water supply, simulation, MIKE URBAN

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Kateřina Tranová *Hydraulická analýza vodovodní sítě městské části Brno - Ivanovice*. Brno, 2017. 98 s., 15 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkoval panu Ing. Jan Ručkovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Sucháčkovi za pomost a ochotu vždy poradit při práci v programu.

## **PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 13. 1. 2017

---

Bc. Kateřina Tranová  
autor práce

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
1.1	CÍL PRÁCE .....	10
<b>2</b>	<b>MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ</b> .....	<b>12</b>
2.1	ZÁKLADY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ .....	12
2.1.1	ZÁKLADNÍ VZTAHY V MATEMATICKÉM MODELOVÁNÍ .....	12
2.1.2	ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY .....	13
2.1.3	NUMERICKÉ METODY .....	14
2.2	PRAKTICKÉ VYUŽITÍ MODELŮ .....	15
<b>3</b>	<b>HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ</b> .....	<b>16</b>
3.1	CÍL HYDRAULICKÉ ANALÝZY .....	16
3.2	HYDRAULICKÁ ANALÝZA TRUBNÍCH TLAKOVÝCH SÍTÍ .....	16
3.2.1	POTŘEBNÁ DATA PRO ŘEŠENÍ .....	16
3.2.2	PODMÍNKY PRO HYDRAULICKOU ANALÝZU .....	17
3.2.3	ZADÁVÁNÍ ODBĚRŮ VODY DO MODELU VODOVODNÍ SÍTĚ .....	17
3.3	POUŽÍVANÉ METODY HYDRAULICKÉ ANALÝZY .....	18
3.4	KALIBRACE MODELU .....	19
3.5	VERIFIKACE MODELU .....	20
3.6	SOFTWAREVÉ PRODUKTY .....	20
3.6.1	EPANET 2.0 .....	20
3.6.2	MIKE NET .....	21
3.6.3	MIKE URBAN .....	21
3.6.4	KYPIPE .....	21
3.7	VYUŽITÍ HYDRAULICKÉ ANALÝZY VE SVĚTĚ .....	22
3.7.1	HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ V UTAHU .....	22
3.7.2	HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ V NEVADĚ .....	23
3.7.3	HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ V ITÁLII .....	23
<b>4</b>	<b>BRNO-IVANOVICE</b> .....	<b>24</b>
4.1	POPIS SOUČASNÉHO ZÁSOBOVÁNÍ PITNOU VODOU .....	25
4.2	ROZDĚLENÍ VODOVODNÍ SÍTĚ NA TLAKOVÁ PÁSMA.....	26

<b>4.3</b>	<b>OBJEKTY NA VODOVODNÍ SÍTI.....</b>	<b>28</b>
4.3.1	ČERPACÍ STANICE .....	28
4.3.2	REDUKČNÍ VENTIL.....	29
<b>4.4</b>	<b>ZÁKLADNÍ INFORMACE O VODOVODU.....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>TVORBA HYDRAULICKÉHO MODELU SÍTĚ .....</b>	<b>30</b>
<b>5.1</b>	<b>MĚŘENÍ HYDRAULICKÝCH VELIČIN NA SÍTI .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2</b>	<b>TVORBA MODELU SÍTĚ.....</b>	<b>45</b>
5.2.1	TVORBA KOSTRY MODELU .....	45
5.2.2	ZÁKLADNÍ MODEL SÍTĚ.....	46
5.2.3	PODROBNÝ MODEL SÍTĚ .....	50
<b>5.3</b>	<b>KALIBROVANÝ MODEL SÍTĚ .....</b>	<b>52</b>
5.3.1	ZPŘESNĚNÉ VSTUPY DO MODELU .....	52
5.3.2	SIMULACE DNE .....	55
5.3.3	KALIBRACE MODELU .....	59
5.3.4	VERIFIKACE MODELU .....	65
<b>6</b>	<b>POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ .....</b>	<b>66</b>
<b>6.1</b>	<b>POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ DLE LEGISLATIVY .....</b>	<b>66</b>
<b>6.2</b>	<b>TLAKOVÉ POMĚRY NA VODOVODNÍ SÍTI .....</b>	<b>67</b>
6.2.1	MINIMÁLNÍ TLAKY NA SÍTI.....	68
6.2.1	MAXIMÁLNÍ TLAKY NA SÍTI.....	68
6.2.2	ROZBOR TLAKŮ VE VODOVODNÍ SÍTI.....	71
<b>6.3</b>	<b>POSOUZENÍ ZDROJE POŽÁRNÍ VODY .....</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>VLIV KVALITY DAT .....</b>	<b>75</b>
<b>7.1</b>	<b>VLIV KVALITY DAT NA MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ.....</b>	<b>75</b>
7.1.1	DATA POLOHOVÁ A POPISNÁ .....	75
7.1.2	VSTUPUJÍCÍ HODNOTY ODBĚRŮ NA SÍTI .....	76
7.1.3	OBJEKTY NA SÍTI.....	77
7.1.4	ZÍSKÁVÁNÍ DAT A JEJICH FINANČNÍ NÁROČNOST .....	78
7.1.5	VYSTUPUJÍCÍ HODNOTY.....	79
7.1.6	VSTUPUJÍCÍ HODNOTY V ZÁJMOVÉ LOKALITĚ.....	80
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>84</b>
<b>9</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>86</b>

# 1 ÚVOD

Hydraulická analýza či matematické modelování má počátky v samotné matematice. Počátky matematiky jsou datovány už od samotného období Paleolit, kdy jeskynní malby (ve Francii či Španělsku) znázorňovaly prostor na plochu jako počátky geometrických představ. V souvislosti se s rozvíjející matematikou je taky rozvoj počítačů. Úplný počátek prototypu počítače se začíná odvíjet počátkem 40. let 20. století, v roce 1943, kdy Howard Aiken uvedl do provozu počítač Mark 1 sestrojený za podpory firmy IBM. Počítač byl pravděpodobně použit k výpočtům první atomové bomby. [1] V současné době je počítač nezbytnou pomůckou ve všech oborech. Platí tak i pro obor vodní hospodářství. Počítačové modely pro analýzu a navrhování vodovodů byly k dispozici již v letech 1960. Hlavním důvodem pro růst a použití počítačových modelů byla dostupnost a rozšířenost této technologie. S tímto příchodem bylo umožněno vodohospodářským společnostem a vodohospodářským inženýrům vytvářet matematické modely, provádět hydraulické analýzy, zkoumat chování systému a provádět navrhované změny v systémech. [2]

Ve vodním hospodářství se metodami matematického modelování provádí hydraulická analýza. Cílem hydraulické analýzy je vytvořit takový model, který se svým chováním a strukturou přibližuje co nejvíce reálnému systému. Na základě tohoto modelu získá uživatel potřebné informace, které mohou sloužit k provozování, k projektování nových úseků, k rekonstrukci sítě, k napojování nových odběratelů atd. K těmto informacím lze také dojít přímým měřením na síti, avšak u velkých vodovodů by toto měření bylo zdlouhavé, vyžadovalo by velké množství měřicí techniky a bylo by ekonomicky náročné. Metoda vytvoření modelu a následné provedení hydraulické analýzy byla použita na městské části Brno-Ivanovice. Ivanovice je jedna nejmenších městských částí v Brně. Nachází se zde převážně zástavba jednopatrových či dvoupatrových rodinných domů. Žije zde celkem 1746 obyvatel (k datu 26. 3. 2011).

Pro tvorbu tohoto modelu byly získány data od společnosti Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. Mezi základními daty byla topologie sítě (délky, dimenze, materiál potrubí), průtoky na určitých místech na síti a informace o objektech na síti. Před samotnou tvorbou modelu byla provedena měrná kampaň, kde byly naměřeny skutečné hodnoty tlaků. Na základě těchto hodnot byl model na kalibrován. Na základě kvality a přesnosti dat se také odvíjí kvalita výsledků. Kvalita vstupních hodnot a o vlivu na přesnost výsledků se věnuje závěrečná část diplomové práce.

## 1.1 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit hydraulický model vodovodní sítě městské části Brno-Ivanovice. Pro tvorbu hydraulických modelů bude použit softwarový nástroj MIKE URBAN. Byla provedena simulace vybraných zatěžovacích stavů, které charakterizují

hydraulický režim vodovodní sítě. Vodovodní síť byla posouzena na tlakové poměry ve spotřebišti. Předmětem této práce bylo vyhodnotit přesnost hydraulických simulačních stavů při různé kvalitě a podrobnosti vstupních informací. Součástí práce jsou přílohy, které zobrazují výsledky simulace a přehlednou situaci.



## 2 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Modelování lze rozlišit na matematické a experimentální. Experimentální modelování je obvykle časově i finančně náročné. Proto je ve většině případech upřednostněno modelování matematické. Matematické modelování se využívá v mnoha různých oborech, a to v přírodních, ekonomických, sociálních a technických. V současné době se stalo důležitým pomocníkem při modelování a simulací systémů, analýzách a předvídání různých procesů, jevů, chování a stavů. Matematické modely poskytují srozumitelný popis všech faktorů dané situace a umožňují odhalit vztahy mezi prvky daného systému. Matematické modely přinášejí řadu výhod, umožňují zjistit informace o chování systémů a urychlují proces poznání reality. Procesy, které ve skutečném systému probíhají pozvolna a dlouhodobě, lze pomocí modelu sledovat během jeho výpočtu, který závisí na použité informační a komunikační technologii. Pracovníky, kteří se zabývají problematikou matematického modelování, můžeme rozdělit do dvou základních skupin, a to na uživatele a tvůrce modelu. Tvůrci modelu se především specializují na tvorbu modelů, ke které je zapotřebí znalost matematiky, fyziky a programování. Naopak uživatelé aplikují výsledky vytvořené tvůrci modelu. Tito pracovníci by měli mít znalost v oboru vodního hospodářství a praktické zkušenosti. [3,4]

### 2.1 ZÁKLADY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ

V následující kapitole jsou stručně popsány základy matematického modelování.

#### 2.1.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY V MATEMATICKÉM MODELOVÁNÍ

Matematické modely jsou tvořeny soustavami rovnic doplněny okrajovými a počátečními podmínkami. Základem těchto modelů jsou zákony mechaniky a stavové rovnice. Tvorba modelů vychází z těchto základních zákonů:

##### *Navier-Stokesovy rovnice*

Nejobecnějšími rovnicemi pohybu vazké nestlačitelné kapaliny jsou diferenciální rovnice Naviera-Stokese. Rovnice byla odvozena Francouzem Claude Louis Marie Henri Navier a George Gabriel Stokes v letech 1827 a 1845 nezávisle na sobě. Rovnice je odvozena z bilance sil, které působí na tekutinu. Navier-Stokesovy rovnice obdržíme dosazením konstitutivních vztahů do rovnice hybnosti. Konstitutivní vztahy vyjadřují závislost mezi napětím a tenzorem rychlosti přetvoření. V případě newtonovské kapaliny, jsou konstitutivní vztahy, vyjadřují napětí v kapalině jako lineární funkci rychlosti přetvoření a tlaku. [4]

##### *Zákon zachování hmotnosti*

Principem zákona zachování hmotnosti neboli rovnice kontinuity je zachování hmotnosti proudící kapaliny. Ze zákona vyplývá, že časová změna hmotnosti kapaliny se rovná rozdílu

hmotnosti kapaliny vtékající a hmotnosti kapaliny vytékající z daného elementu za časový interval. [4]

### ***Zákon zachování hybnosti***

Zákon hybnosti lze vyjádřit jako celkovou hybnost izolované soustavy těles, která se nemění. Izolovaná soustava je soustava dvou těles, která působí navzájem na sebe silami podle zákona akce a reakce. Na tyto tělesa nepůsobí silami žádná jiná tělesa. [4]

### ***Bernoulliho rovnice***

V případě modelování trubních sítí při výpočtech vycházíme z Bernoulli rovnice. Pro výpočet ztrát, které vstupují do rovnice, využíváme Darcy-Weisbachovy rovnice. [4]

#### **2.1.2 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY**

Modely proudění tekutin lze aplikovat na více vodohospodářských úloh. Dle proudění můžeme tyto modely dělit do různých skupin. Zde je jich pár vyjmenovaných:

- podle hydraulického režimu (laminární a turbulentní),
- podle časového režimu (proudění stacionární, kvazi-dynamické, dynamické),
- podle prostorové dimenze (jednorozměrné, dvojrozměrné, třírozměrné),
- podle charakteristiky kapalin (homogenní, nehomogenní, stlačitelné, nestlačitelné),
- podle účelu (simulační, řídicí, optimalizační),
- podle povahy vstupních a hledaných veličin (stochastické, deterministické).

Všechny vyjmenované typy lze odvodit s využitím řady předpokladů, které nám pomohou zjednodušit model, který popisuje chování kapaliny. Cílem je omezit počet parametrů ve stavových rovnicích a zjednodušit vazby mezi neznámými hodnotami. Při zjednodušení předpokladů musí být brán ohled na kvalitu a množství dat získaných měřeními, které slouží pro kalibraci a verifikaci modelu. Zjednodušení vstupujících parametrů může ovlivnit požadovanou přesnost výstupů. [4]

### ***Předpoklad stacionarity***

Jedním zjednodušením je předpoklad časové nezávislosti obecně na čase závislých hydrodynamických dějů. V čase neměnný režim proudění kapaliny předpokládáme v tom případě, kdy změny parametrů v modelu v čase jsou krátké a neovlivní tak charakter proudění. Dalším důvodem, kdy uvažujeme časovou nezávislost, je ten, že nebylo získáno dostatečné množství dat pro kalibraci či verifikaci modelu. [4]

### ***Snižení rovnoměrnosti úloh***

Při řešení úloh, kdy předpokládáme charakter a směr proudění můžeme zanedbat změny veličin v některém ze směrů. Tento zjednodušující předpoklad se využívá při stavbě modelů proudění a transportu a disperze látek a energie. Při řešení kanalizačních či vodovodních sítí obvykle zanedbáváme složku vektoru rychlosti kolmé na podélnou osu potrubí. [4]

### ***Vlastnosti kapalin***

Nejčastějším předpokladem ve vodním hospodářství je, že vodu považujeme za homogenní, izotropní kapalinu, která je nestlačitelná a má konstantní hustotu, kterou neovlivňuje nijak teplota ani rozpuštěné látky v ní. [4]

### ***Rozměry a tvar náhradní oblasti***

Dle použité numerické metodě a programového vybavení je zapotřebí tvar oblasti řešení zjednodušit. Tvar řešené oblasti je dělen na jednodušší oblasti a dále na uzly, popřípadě na elementy náhradní oblasti. Toto dělení by mělo přesně vystihnout tvar řešené oblasti. Jako velmi výhodná metoda se zde jeví metoda konečných prvků, která díky přizpůsobivosti dokáže vystihnout skutečný stav. [4]

## **2.1.3 NUMERICKÉ METODY**

Používané numerické metody se skládají z určitých kroků, kdy se parciální diferenciální rovnice převedou na soustavu algebraických, obvykle lineárních rovnic. Řešením těchto rovnic získáme hodnoty hledaných veličin v diskrétních bodech náhradní oblasti. Mezi nejpoužívanější numerické metody patří metoda konečných prvků a metoda konečných diferencí. [4]

### ***Metoda konečných prvků***

Metoda konečných prvků je zobecněna Ritzova metoda využívající speciální funkce. Danou metodou lze přibližně vyřešit úlohy mechaniky kapalin a plynů. Základními kroky metody je, že nejdříve problém formulujeme jako variační. Poté provedeme diskretizaci, čili oblast rozdělíme na malé podoblasti, které nazýváme konečnými prvky. Každé dva prvky mají společnou stěnu, stranu, vrchol, anebo nemají žádný společný bod. Přibližné řešení se hledá ve třídě funkcí. Na závěr pomocí kódových čísel se s přihlédnutím na okrajové podmínky z lokálních matic vytvoří výsledná matice soustavy a vektor pravé strany. Řešením těchto soustav rovnic se získají hodnoty neznámých parametrů v uzlech náhradních oblastí. Výhodou této metody je, že algoritmus výpočtu není závislý na tvaru řešené oblasti, ale závisí pouze na typu elementu. V případě potřeby lze určitou oblast více zahustit, popřípadě kombinovat typy elementu (trojúhelníky, n-úhelníky). [4]

### ***Metoda konečných diferencí***

Principem této metody je, že parciální derivace, které se zde vyskytují, nahradíme algebraickými výrazy. Algebraické výrazy vyjadřují podíl konečných diferencí závislé a nezávislé proměnné. Jedná se o nejstarší numerickou metodu, která byla využívána již před zavedením výkonných číslicových počítačů. Její velkou výhodou je jednoduchost, a proto je někdy upřednostňována před efektivnějšími metodami. [4]

## **2.2 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ MODELŮ**

I přesto, že matematické modely mají široké uplatnění, využívání těchto modelů není u nás natolik rozšířené jako v jiných zemích. Jedním z těchto důvodů může být pozdější nástup výkonné výpočetní techniky či pozdější vyškolení kvalifikovaných pracovníků. V současné době se ve vodohospodářské praxi nabízí jejich použití například při optimalizaci parametrů vodohospodářských děl, kdy díky této optimalizaci můžeme nalézt nejlepší variantu konstrukce, která by vyhovovala jak po stránce stavební provozní, ale také i ekonomické. Dalším praktickým využitím je optimalizace řízení provozu, a to především co se týká množství a jakosti vody. Dále lze použít při řešení kritických situací v povodí (havárie, povodně atd.) anebo napomáhá předvídat chování sítě na základě vytvořených situací, které by mohly nastat. [4]

### **3 HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ**

Matematické modelování se stává stále důležitější částí v oboru vodohospodářství. Hydraulické modely vodovodních sítí mají zásadní význam pro analýzu, plánování a řízení sítě. Poskytuje technikům předpovídat chování vodovodního systému vyplývající z plánovaných aktivit a zároveň poskytuje informace o aktuálním nebo očekávaném fungování systému. Výrazně také sníží množství času k potřebné analýze. Takové modely se stávají cenným nástrojem pro technické pracovníky i provozovatele. [5]

#### **3.1 CÍL HYDRAULICKÉ ANALÝZY**

Cílem hydraulické analýzy je získat co nejvíce možných informací o tlakových a průtokových poměrech na síti. Znalost těchto informací je podkladem pro správné provozování vodovodního systému. Hydraulická analýza může sloužit také pro projektování nových trubních rozvodů, případné rozšiřování stávajícího distribučního systému a napojování nových odběratelů. S využitím matematického modelu vodovodní sítě lze simulovat řadu provozních stavů. [6]

#### **3.2 HYDRAULICKÁ ANALÝZA TRUBNÍCH TLAKOVÝCH SÍTÍ**

Jak už bylo řečeno, hydraulická analýza slouží ve většině případů k zjištění informací o tlakových a průtokových poměrech na síti. Může také sloužit ke zjištění stáří vody nebo k hydraulické analýze vodních rázů. Máme celkem tři druhy analýzy průtoků: [7]

- Statická analýza

Statická analýza slouží pro konkrétní zatěžovací stav odběrů na síti. Tento stav je v čase neměnný.

- Kvazi-dynamická analýza

Kvazi dynamická analýza řeší po sobě jdoucí statické analýzy pro určitý počet časových intervalů. V každou hodinu se mění zatěžovací stavy odběrů na síti. Posuzovaný úsek může být den, týden nebo i měsíc či rok.

- Dynamická analýza

Dynamická analýza řeší relativně krátké časové úseky s velmi krátkými intervaly změny průtokových a tlakových poměrů. Krátkým intervalem může být sekunda. Dynamickou analýzou se provádí hydraulická analýza vodních rázů.

##### **3.2.1 POTŘEBNÁ DATA PRO ŘEŠENÍ**

Pro provedení hydraulické analýzy je nutné získat co nejvíce možných dat, data topologická a hydraulická. [7]

Potřebná data pro modelování:

- Topologie řešené sítě – údaje směrové, délkové, výškové a polohové.
- Hydraulické parametry – světlost, drsnost, materiál a DN potrubí.
- Objekty na síti – čerpací stanice, vodojemy, přivaděče, redukční ventily, uzávěry, přerušovací komory.
- Odběry na síti a zdroje vody.

Potřebná data pro kalibraci modelu:

- Měřené hodnoty – průtoky a tlaky na daných místech.
- Hydraulické údaje o vybraných prvcích sítě.

### **3.2.2 PODMÍNKY PRO HYDRAULICKOU ANALÝZU**

Mezi tyto podmínky patří uzlová podmínka, okruhová podmínka a hydraulická podmínka. Tyto podmínky vyjadřují zároveň základní fyzikální zákony. Díky těmto podmínkám lze v síti vypočítat průtoky jednotlivými úseky. [7]

- Uzlová podmínka

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

- 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.

- Hydraulická podmínka (stavová rovnice)

Stavová rovnice je obecně každý vztah, který vyjadřuje závislost některého vnitřního parametru na vnějších parametrech. V tomto případě se jedná o hydraulickou podmínku vyjadřující závislost mezi tlakovou ztrátou  $h$  a průtokem  $Q$ . Tuto podmínku můžeme matematicky vyjádřit Darcy-Weissbachovy rovnicemi.

### **3.2.3 ZADÁVÁNÍ ODBĚRŮ VODY DO MODELU VODOVODNÍ SÍTĚ**

Základním vstupem pro řešení hydraulické analýzy je zadávání odběrů. Získání odběru na síti může být dvěma způsoby, a to početně, kdy uvažujeme specifickou spotřebu vody na osobu nebo můžeme vycházet ze záznamů o odběru z předešlých let. Na vodovodní síti se nachází velké množství odběrných míst. Každé odběrné místo uvažujeme jako samostatný uzal. Dalším odběratelem neboli uzlem jsou významní odběratelé (průmyslové budovy,

školy atd.) Každý významný odběr uvažujeme jako samostatný uzel. V síti, kde je velký počet odběrných míst by bylo téměř nemožné do každého uzlu odběr samostatně zadávat. Vzhledem k vysokému počtu těchto míst aplikujeme zjednodušení předpokladů, a to snížení počtu odběrných míst. Proto se pro rozdělení těchto odběrů používá schematizace rozdělení těchto odběrů. V rámci schematizace rozdělení celkové spotřeby na dané jednotlivé úseky a stanovení odběrů se používají tyto metody: [7]

### ***Metoda redukováných délek***

U metody redukováných délek se každému trubnímu úseku přiřadí na základě hustoty a výšky zástavby redukční součinitel  $C_i$ . Redukční součinitel  $C_i$  můžeme určit například na základě připojené nemovitosti nebo na základě zástavby nacházejících se na stranách úseku. Na základě této metody získáme výsledný odběr na síti. Celkový odběr  $Q_i$  rozdělíme rovnoměrně do obou krajních uzlů daného úseku. [7]

### ***Metoda dvou součinitelů***

Metoda dvou součinitelů se používá v případě, kdy jsou k dispozici podrobné podklady o odběrech a o každém odběrném místě. Každému odběrnému místu (domovní přípojce) je možno přiřadit například počet zásobovaných bytových jednotek, plochu zásobované zástavby a počet zásobovaných jednotek. Každému  $i$ -tému úseku přiřadíme součinitele  $C_1$  a  $C_2$ . Na základě této metody získáme výsledný odběr na síti. Celkový odběr  $Q_i$  rozdělíme rovnoměrně do obou krajních uzlů daného úseku. [7]

## **3.3 POUŽÍVANÉ METODY HYDRAULICKÉ ANALÝZY**

Nejčastěji používanými metodami jsou:

### ***Iterační metody***

U iterační metody se předpokládá, že určité hydraulické veličiny posuzované sítě jsou odhadnuty. Dvě ze tří základních podmínek jsou splněny, třetí podmínka je iteračním výpočtem pomocí oprav odhadnutých veličin zpřesňována. Iterační metody dělíme na metody vyrovnání tlaků a na metodu vyrovnání odporových součinitelů. Tyto metody se rozlišují na základě odhadnuté veličiny, kterou iteračním výpočtem zpřesňujeme. [7]

- Metoda vyrovnání tlaků

Odhadujeme průtoky tak, aby byla splněna uzlová a hydraulická podmínka. Kontroluje se tak splnění okružové podmínky. K těmto metodám patří metoda Newton I, metoda Lobačev-Cross a metoda Dubin-Cross.

- Metoda vyrovnání průtoků

Odhadujeme tlakové ztráty, aby byla splněna okruhová a hydraulická podmínka. Kontroluje se splnění uzlové podmínky. K těmto metodám patří metoda Newton II a Hardy Cross.

- Metody vyrovnání odporových součinitelů

Odhadujeme průtoky a tlakové ztráty, aby byla splněna uzlová a okruhová podmínka. Kontroluje se tak splnění hydraulické podmínky. K těmto metodám patří metoda Mc Ilroyova.

### ***Gradientní metody***

Známa taky s malými rozdíly jako Newtonova-okruhovo-uzlová podmínka nebo hybridní. Gradientní metoda je založena na splnění základních podmínek (hydraulická a uzlová podmínka). Iteračním postupem se hledá řešení rovnic. Ty jsou sestavovány právě z těchto podmínek. [7]

## **3.4 KALIBRACE MODELU**

Míra přesnosti vypočtených parametrů záleží zejména na přesnosti pořízení vstupních dat. Do modelu často vstupují nepřesné či odhadnuté parametry, aby se model co nejvíce blížil k realitě, musí být model posouzen. Kalibraci matematického modelu by měla předcházet podrobná rozvaha o cílech výsledků (např. návrh průměru potrubí, studie provozu sítě, návrh sítě, rekonstrukce sítě, optimalizace sítě, analýza parametrů kvality vody) a o typech hydraulických výpočtů. Před samotnou kalibrací modelu musí být také provedeno skutečné měření. Data získaná z modelu jsou porovnána s daty získanými skutečným měřením. Velmi často se používají data z testů požárních hydrantů, měřené údaje z čerpacích stanic a vodojemů a měření odběrů na síti. Kromě staticky měřených dat je vhodné shromáždit souvisle měřené údaje v delším časovém úseku. Opakovaným postupným soustavným měněním parametrů v modelu se přibližujeme k daným hodnotám. Hydraulický model je již od začátku zatížen chybou. Rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými chybami může být například ve vstupních hodnotách (drsnost potrubí, uzlový odběr), chybný popis uzlu (nadmořské výšky), špatně popsání potrubí (délky, průměry atd.), chybné okrajové podmínky atd. Je-li maximální odchylka sledované veličiny větší než požadovaná (například 30%), lze tuto chybu minimalizovat pouze důkladnou kontrolou veškerých vstupních dat a ověření kritických míst. Jsou-li odchylky mezi odhadnutými a naměřenými parametry minimální, přistupujeme k doladění modelu (oprava drsnosti potrubí atd.). [8, 9]



### 3.5 VERIFIKACE MODELU

Verifikace hydraulického modelu znamená ověření či kontrola pravdivosti tohoto modelu. Cílem verifikace modelu je ověření vstupních parametrů, tj. součinitele hydraulické drsnosti a uzlových odběrů na základě řady statických hodnot tlaků a průtoků shromážděných v různých hodinách a za různých podmínek. V rámci verifikace ověřujeme správnost vstupních parametrů, správnost ověřujeme na řadu měřených hodnot a vstupních veličin a počátečních podmínek. Tyto hodnoty se liší od hodnot použitých při kalibraci modelu. To znamená, že pro provedení správné verifikace je nutné použít řadu hodnot tlaků a průtoků, na které nebyla provedena kalibrace matematického modelu vodovodní sítě. Řada průtoků a tlaků by měla vystihnout různé zatěžovací stavy. Porovnáním vypočtených a naměřených hodnot se zjistí, do jaké míry jsou obě hodnoty shodné. Tato odchylka by měla být v rámci možností co nejmenší. [9]

### 3.6 SOFTWAREVÉ PRODUKTY

V současné době je matematické modelování velmi rozšířeným oborem. Mezi velmi známé produkty patří například EPANET 2.0, MIKE NET a MIKE URBAN. V následujících kapitolách se věnuji stručnému popisu daných programů. Praktická část diplomové práce je prováděna v softwarovém programu MIKE URBAN.

#### 3.6.1 EPANET 2.0

Jedná se o software pro systémy Windows, který slouží pro simulaci hydraulických poměrů a kvalitativních parametrů ve vodovodní síti (tlakové trubní systémy). EPANET 2.0 je určen pro statickou a kvazi-dynamickou simulaci. Tvůrcem tohoto programu je agentura pro ochranu životního prostředí Spojených států amerických (EPA). Tento snadno uživatelem ovladatelný nástroj umožňuje analýzu hydraulických poměrů a analýzu šíření znečištění v síti. Program EPANET je v současné době velmi využívaným programem po celém světě a to k analýzám vodárenských distribučních modelů nebo k analýzám koncentraci zbytkového chloru. V tomto programu lze posoudit tlakové poměry, kapacitu potrubí a modelovat různé provozní stavy. Dále lze prověřovat chování sítě v různých zatěžovacích stavech, modelovat vodojemy, nádrže a hydranty. Pro tvorbu modelu lze využít podkladní mapy a schémata ve formátu \*bmp, \*emf a \*wmf v souřadném systému X, Y. Nevýhodou programu je, že v programu EPANET 2.0 nelze importovat soubory \*dxf. Další nevýhodou je, že nelze zadávat odběry pomocí metody redukovaných délek ani metodu dvou součinitelů přímo v programu EPANET 2.0, neboť tento program neumožňuje zadat součinitele  $C_i$  a  $C_j$ . Proto je zapotřebí vypočítat odběry ručně, například pomocí programu \*xls. To v případě u velkých vodovodních sítí může být pracné a zdlouhavé. [10,11]

### 3.6.2 MIKE NET

MIKE NET je program, v kterém lze provádět statickou a kvazi-dynamickou hydraulickou analýzu. Dále lze posoudit tlakové poměry, kapacitu potrubí a modelovat různé provozní stavy. Výhodou programu je, že umožňuje import souboru ve formátu \*.dxf, což dokazuje, že MIKE NET podporuje propojení se softwary AutoCAD a Microstation. Program umožňuje i opačný postup. Dokáže vyexportovat soubory do formátu \*.dxf pro další práci v AutoCADu nebo Microstation. Na rozdíl od programu EPANET 2.0 lze přímo v programu rozdělit odběr vody do krajních uzlů a využít tak metody redukčních součinitelů. [12]

### 3.6.3 MIKE URBAN

MIKE URBAN je softwarový program, který uživatelům poskytuje kompletní pracovní prostředí pro hydraulickou analýzu, řízení a provoz. První verze produktu MIKE URBAN byla distribuována uživatelům stávajících produktů MOUSE a MIKE NET. Program MIKE URBAN umožňuje matematické modelování vodovodní sítě, splaškové kanalizace, dešťové kanalizace a jednotných systémů. Výpočetním jádrem tohoto programu je EPANET. MIKE URBAN je určen pro statickou, dynamickou i kvazi-dynamickou simulaci. Jednou velkou výhodou tohoto programu je přehledné a jasné pracovní prostředí. Další výhodou je, že umožňuje import souboru ve formátu \*.dxf. Dále umožňuje import souboru ve formátu \*.shp a \*.inp. V programu MU lze posuzovat tlakové poměry, kapacitu potrubí a modelovat různé provozní stavy. Dále lze prověřovat chování sítě v různých zatěžovacích stavech, modelovat vodojemy a nádrže, hydranty a výtoky do volna, čerpadla, uzávěry, místní ztráty a posuzovat kolísání hladin vodojemů během dne atd. Výstupy z tohoto programu lze dotvářet v programu ArcGis, který je s programem MIKE URBAN propojen databází. Tato databáze je vytvořena v MU a je zapotřebí ji při každé změně v programu aktualizovat. Velkou předností ArcGisu je propojení s WMS servery. [13]

### 3.6.4 KYPIPE

KYPipe je program, který byl vyvinut na univerzitě v Kentucky. Uživatelům poskytuje kompletní pracovní prostředí pro hydraulickou analýzu, řízení a provoz. Tento software umožňuje řešit stacionární, kvazi-dynamické a dynamické hydraulické analýzy. Prostřednictvím tohoto modelu je také možné řešit chemické koncentrace v síti (například chlór) a určovat stáří vody v síti. [14]

### 3.7 VYUŽITÍ HYDRAULICKÉ ANALÝZY VE SVĚTĚ

Mnoho srovnávacích studií pro optimalizaci distribučních sítí byly vyvinuty v 50. letech. První sítě, které byly použity pro tyto účely, byly New York (Shake a Lai, 1967), TwoLoops nebo Hanoj (Fujiwara i Khang, 1990). Postupem času se optimalizace sítí zlepšovala. Byly provedeny studie na sítích, které byly větší a měly větší počet prvků. Jeden z těchto modelů je LargeNetwork (Kang and Lansley, 2012). Ačkoliv tyto sítě byly velmi užitečné pro pochopení optimalizace sítě, postrádaly chování reality. Jedna z odpovídajících sítí ke skutečnému systému je model C-Town (Ostfeld et al., 2012), který obsahuje delší dobu simulace a větší množství prvků v modelu. V této kapitole budou popsány případové studie ze světa, kdy bylo využito matematické modelování a hydraulická analýza. [15]

#### 3.7.1 HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ V UTAHU

Hydraulická analýza byla provedena v malém městě Millville, jedná se o město v okrese Cache County ve státě Utah ve Spojených státech amerických. K roku 2010 zde žilo 1 829 obyvatel. Stávající vodovodní systém je rozdělen na horní a dolní tlakové pásmo. Tato dvě pásma jsou od sebe oddělena redukčním ventilem, který redukuje průtok protékajícího z horního pásma do dolního. Vodovodní systém zásobuje celkem tři prameny a dva vodojemy. První vodojem má kapacitu 260 m<sup>3</sup> a druhý vodojem 80 m<sup>3</sup>. Celková délka vodovodní sítě je 25 km. Jako vstupující hodnota byla struktura sítě se znalostmi o délce, dimenze a materiálu potrubí. Stanovení odběru vody bylo provedeno dvěma způsoby. První způsob byl, že byla stanovena tzv. ekvivalenta ERC. Dle druhu napojeného objektu, hodnota ERC vyjadřovala spotřebu vody. Nebo byl stanoven odběr vody na základě průměrné spotřeby vody na den. Cílem hydraulické analýzy bylo posoudit vliv připojení tří nových řadů na vodovodní síť. Dalším cílem bylo zjistit, jak ovlivní vodovodní síť a zdroje postupné zvyšování obyvatelstva a jejich odběr. Při tvorbě hydraulického modelu a posouzení tlakových poměrů byl kladen důraz na zajištění odběru požární vody v místě základní školy. Byla provedena statická analýza v softwarovém programu InfoWater po dobu sedmi dnů. Software pracuje na základě naprogramovaných algoritmů a vzorců (Hazen-Williamsovi rovnice atd.) Kalibrace modelu byla provedena na základě měření tlaků na síti. Měření na síti bylo provedeno na šesti hydrantech. Bylo použito pitotovo měřidlo, které slouží na měření tlaku a průtoku tekoucí vody z otevřeného hydrantu. V zemi Utah společnost Utah Division of Drinking Water stanovila normy, které vyžadují, aby města udržovala a aktualizovala hydraulické modely svých vodovodních systémů. Jsou povinni profesionálním licencovaným inženýrem provést hydraulickou analýzu, zda je možné další připojení, aniž by negativně ovlivnilo systém. Tento předpis je definován v normě R309-511 norma hydraulického modelování ve Státním správním řádu. Dle této normy nesmí klesnout hodnota minimálního hydrodynamického tlaku pod úroveň 20 psi neboli 13,79 m v. sl. při

běžném odběru vody. Hodnota minimálního hydrodynamického tlaku nesmí klesnout pod 30 psi neboli 20,68 m v. sl. v denní špičce. [16]

### **3.7.2 HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ V NEVADĚ**

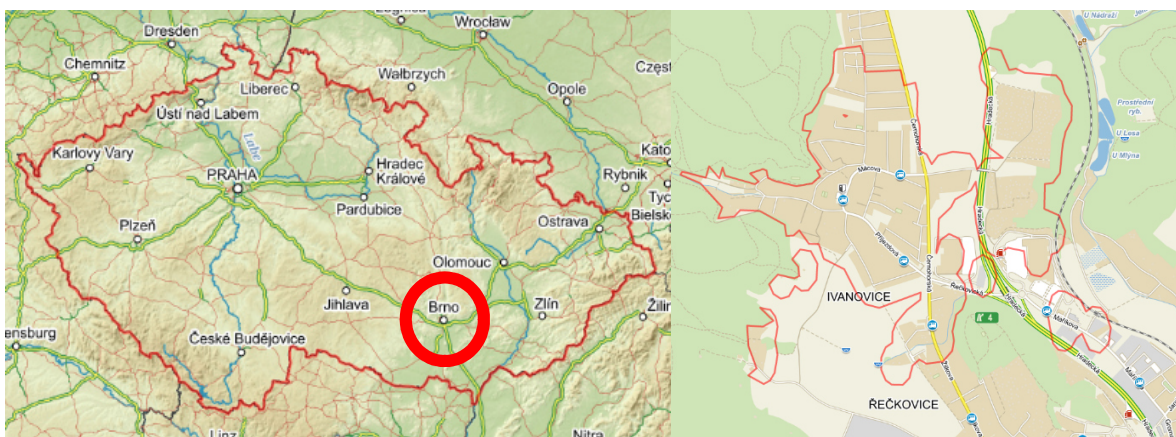
Z důvodu rostoucí migrace obyvatelstva do měst, vyšší zatížení infrastruktury a její stárnutí vytvořilo potřebu řídit vodovodní síť co nejrychleji a nejefektivněji. Pro tento účel byl v městě Las Vegas ve státě Nevada vytvořen simulační model sítě. Byl proveden tzv. real-time simulační model, který představuje nejúčinnější model pro předvídaní chování sítě. Velký důraz je kladen na vstupní data neboli okrajové podmínky, které vstupují do modelu. Model musel být co nejrealističtější a hodnoty musely být co nejvíce přesné. Jako okrajové podmínky slouží úrovně hladin ve vodojemu, provozní stavy (výkon čerpadla, stavy zapnutí/vypnutí atd.). Vodovodní síť, která byla nasimulována, slouží pro 1,3 milionu obyvatel. Zdrojem vody je jezero Lake Mead. V letním období je také využíváno celkem 62 podzemních vrtů. Systém je rozdělen do 24 tlakových pásem. Na síti se nachází celkem 52 čerpacích stanic a 41 vodojemů. Vstupující hodnoty odběru byly v tomto případě převzaty z měření odběrů jednotlivých objektů z předchozího roku. V rámci provozu se každodenně připravuje, na základě tohoto modelu, předem aktuální denní provozní plán a deseti denní provozní plán pro vodní elektrárny. Cílem tohoto simulačního modelu je co nejefektivněji a nejrychleji zareagovat na změny okrajových podmínek, které se mohou vyskytnout. [17]

### **3.7.3 HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ V ITÁLII**

Jeden z dalších případů využití hydraulického modelu je vodovodní síť v městě Milán. Milán se nachází na severu Itálie. Vodovodní síť zásobuje přes 1,3 milionu obyvatel. Nachází se zde výhradně podzemní zdroje pitné vody, které jsou čerpány do úpraven vody. Odtud je voda přiváděna celkem do 33 vodojemů a poté přivaděči přiváděna do spotřebiště. Nachází se zde pouze jedno tlakové pásmo. Model byl proveden v softwarovém programu EPANET. Cílem tohoto modelu bylo rozdělit síť na více tlakových pásem, snížit cenu za energie a snížit úniky a ztráty na síti. Dále sjednotit model s databází GIS, která byla neaktuální a neodpovídala skutečnosti. V mnoha případech bylo potřeba, při tvorbě topologie sítě, lépe dohledat informace nebo provést přímo terénní průzkum. V rámci tohoto modelu byly některé prvky vyměněny nebo opraveny (čerpadla, potrubí atd.). Odběry na síti byli stanoveny na základě záznamů z předešlých let. Kostra modelu byla tvořena 149 639 uzly, 118 950 úseky, 26 čerpacími stanicemi a 95 posilovacími čerpacími stanicemi. Kalibrace modelu proběhla pouze v části Abbiategrasso, vzhledem k časové a finanční náročnosti. V budoucnu se očekává, že proběhne kalibrace celého modelu. Tento model by měl sloužit jako vzorový model pro velké vodovodní sítě, který chtějí řešit stejný problém. [15]

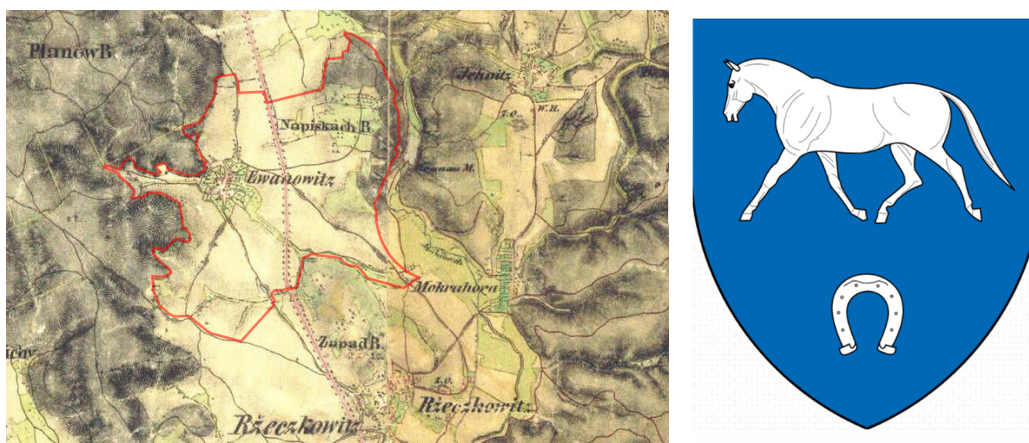
## 4 BRNO-IVANOVICE

Zájmová lokalita o rozloze 245 ha se nachází na severním okraji města Brna od železniční tratě z Brna do Prahy. Území Brno-Ivanovice hraničí s městskými částmi Brno-Jehnice, Brno-Řečkovice, Mokrá Hora, dále s obcemi Jinačovice a Česká. Danou oblastí prochází významná silnice E461 spojující Brno se Svitami. Ivanovice mají dodnes vesnický charakter. Nacházejí se zde z velké části rodinné domy.



Obr. 1 Zájmové území v České republice (vlevo), hranice zájmového území (vpravo).

Ivanovice je jedna z nejmenších městských částí v Brně. V Ivanovicích se převážně nachází rodinné domy, pár drobných obchodů, hospod, restaurací a mateřská škola. Strategie rozvoje městské části je především v posílení infrastruktury a občanské vybavenosti, protože v posledních patnácti letech proběhla rozsáhlá výstavba rodinných domků, ovšem zcela bez koncepce. To je v současné době s maximálním úsilím napravováno. [18]



Obr. 2 Hranice zájmového území v 19. století (vlevo), znak Ivanovic (vpravo).

## 4.1 POPIS SOUČASNÉHO ZÁSOBOVÁNÍ PITNOU VODOU

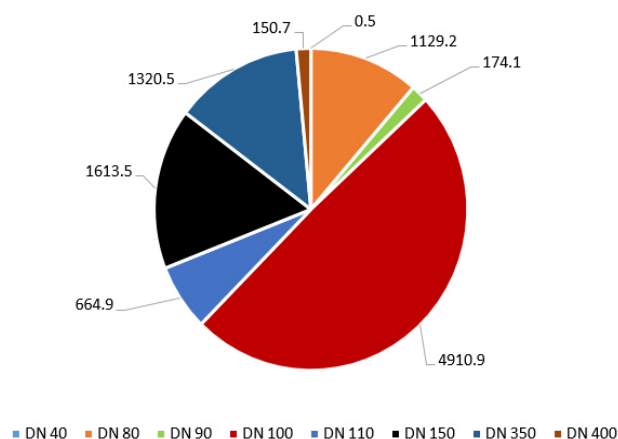
Ivanovice je zásobena ze skupinového vodovodu č. 317 Kuřim–Lelekovice–Česká. Vodárenské objekty na území města Brna jsou majetkem Statutárního města Brna zastoupené Magistrátem města Brna – Odborem technických sítí, Kounicova 67, 601 67 Brno, Objekty Vířského oblastního vodovodu jsou majetkem Vířského oblastního vodovodu s.r.o., Zelný trh 13, 602 00 Brno. Smluvním provozovatelem vodárenských objektů a sítě je společnost Brněnské vodárny a kanalizace a.s., Hybešova 254/16, 657 33 Brno.

Zdrojem vody v městě Brně a okolí jsou prameniště v Březové nad Svitavou a Vířská přehradní nádrž. Voda z Vířské přehradní nádrže je dopravována do úpravně vody Švařec. Voda z Březové nad Svitavou je dopravována do vodojemu Čebín, kde se mísí s vodou upravenou ve Švařci. Do městské části Brno-Ivanovice je voda dopravována II.březovským přivaděčem. Nad městskou částí je odbočka z II.březovského přivaděče, kde je voda dále dopravována do spotřebiště. Na odbočce je umístěna vodoměrná šachta. (Zdroj: BVK, a.s.)

Vodovodní síť městské části Brno-Ivanovice je tvořena potrubím o různé dimenzi a materiálu potrubí. Dimenze potrubí je zde zastoupena DN40-DN400. Nachází se zde materiál polyetylen, ethylen, tvárná litina, ocel a šedá litina. (Zdroj: BVK, a.s.)

Tab. 1. Celkový přehled délek dle dimenze potrubí.

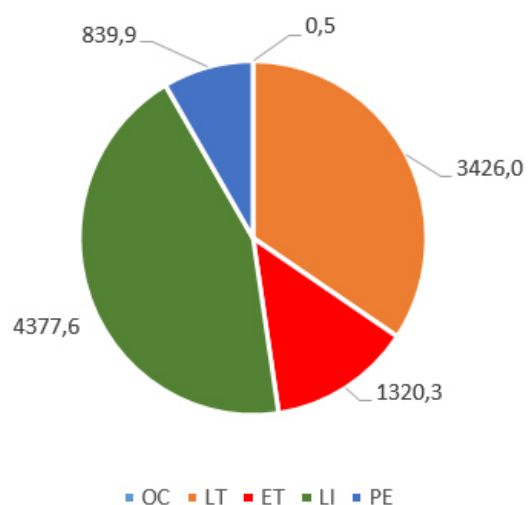
Dimenze	Délka
[mm]	[m]
400	150,70
350	1350,70
150	1583,30
110	664,90
100	4910,9
90	174,10
80	1129,24
40	0,50
<b>Celková délka</b>	<b>9964,30</b>



Obr. 3 Přehled délek dle dimenze potrubí.

Tab. 2. Celkový přehled délek dle materiálu potrubí.

Typ materiálu	Délka
[mm]	[m]
Ocel, nerez	0,50
Polyetylen	839,90
Šedá litina	4377,60
Tvárná litina	3426,00
Etylen	1320,30
<b>Celková délka</b>	<b>9964,30</b>



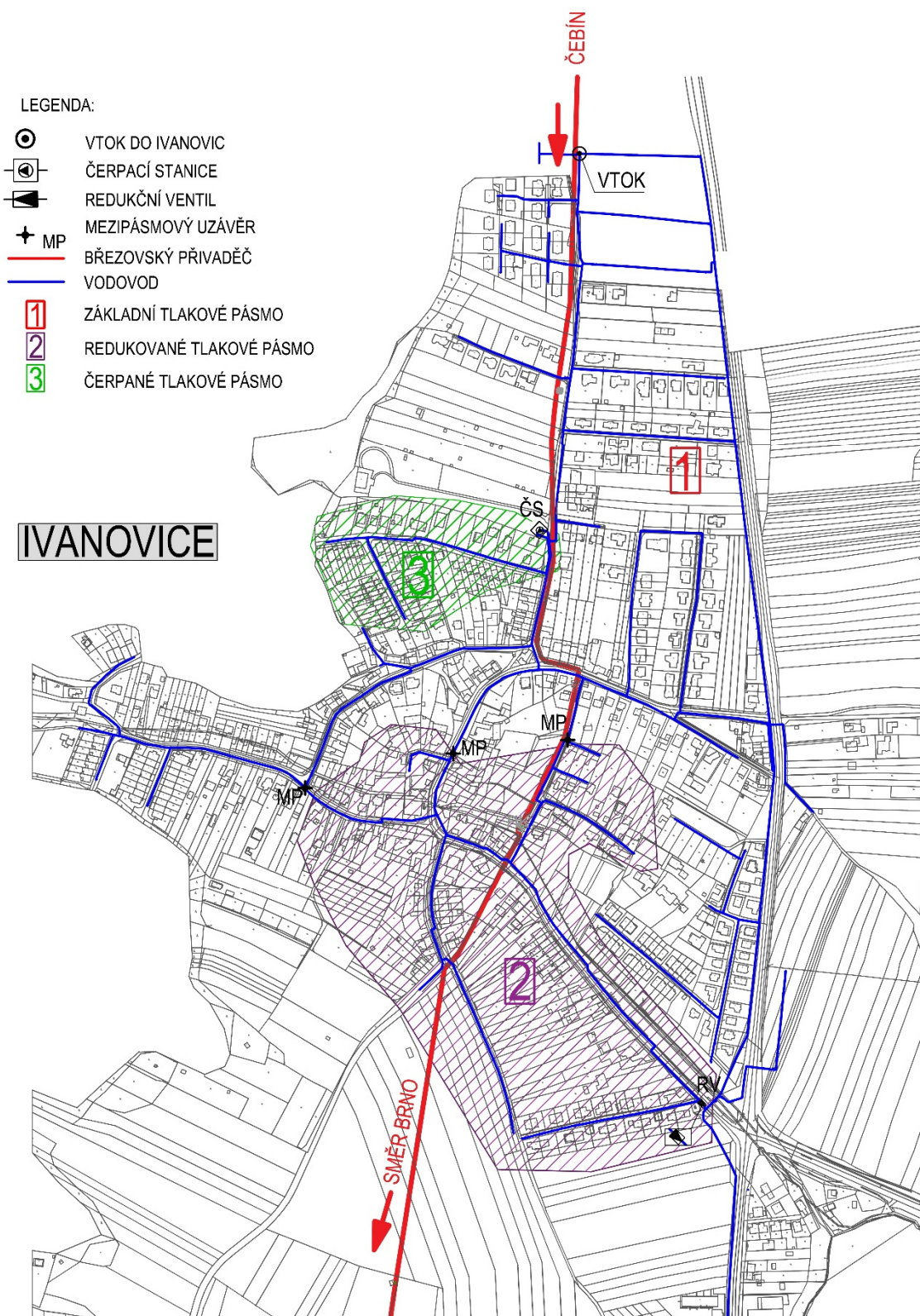
Obr. 4 Přehled délek dle materiálu potrubí.

## 4.2 ROZDĚLENÍ VODOVODNÍ SÍTĚ NA TLAKOVÁ PÁSMA

Vodovodní síť je rozdělena na tři tlaková pásma: základní tlakové pásmo, redukované tlakové pásmo a čerpané tlakové pásmo. Přiváděcím řadem základního tlakového pásma je již zmiňovaný II. Březovský přiváděč v trase Čebín-Palackého vrch. Základní tlakové pásmo zásobuje nejjižnější část obce Česká, Brno-Ivanovice a voda je dále vedena až do Brna-Řečkovice, kde toto tlakové pásmo zasahuje až na ul. Žilkovu (ke kasárnám) a k vodojemu Řečkovice, kde zásobuje nejvýše položenou zástavbu rodinných domků a kde je voda také přiváděna do vodojemu Řečkovice. (Zdroj: BVK, a.s.)

Redukované tlakové pásmo Brno-Ivanovice se nachází jihozápadní straně Ivanovic. Zde jsou zásobovány nejnižší položené zástavby přes redukční ventil umístěný v armaturní šachtě na ulici Příjezdová. Je zde osazen redukční ventil značky CLA-VAL z důvodu výskytu maximálních hydrostatických přetlaků vody při přímém napojení na vodojem Čebín. Kromě armaturní šachty s redukčním ventilem na vstupu do pásma je tlakové pásmo redukované od základního tlakového pásma odděleno třemi mezipásmovými uzávěry, a to v ulicích Kouty, Mácova a Atriová. Výstupní tlak z redukčního ventilu je 0,50 MPa. (Zdroj: BVK, a.s.)





Obr. 5 Přehledná situace s objekty na síti.



## 4.3 OBJEKTY NA VODOVODNÍ SÍTI

### 4.3.1 ČERPACÍ STANICE

Čerpací stanice je součástí vodárenského zásobovacího celku pitné vody. Jejím hlavním úkolem je zabezpečit dopravu vody do vyššího tlakového pásma ve chvíli, kdy nelze dopravovat vodu gravitačním způsobem. Jedná se o samostatný objekt nacházející se na začátku ulice Zatloukalova. Tato čerpací stanice musí splňovat zásady návrhu vodárenských čerpadel. V čerpací stanici jsou celkem osazeny tři čerpací jednotky. Jedná se o odstředivá čerpadla z nerezové oceli značky Lowara uspořádaná v jedné řadě. Čerpadlo je navrženo na dopravní výšku  $H = 21,6$  až  $44,2$  m, na průtokné množství  $Q = 5$  až  $14$  m<sup>3</sup>. hod<sup>-1</sup> a na proměnlivé otáčky  $n = 2900$  1.min<sup>-1</sup>. Jsou zde osazeny celkem tři čerpací jednotky z důvodu bezpečnosti. Dvě čerpací jednotky slouží jako rezerva. (Zdroj: BVK, a.s.)



Obr. 6 Pohled na ČS stanice (vlevo), pohled na tři čerpadla (uprostřed), štítek s technickými parametry na čerpadle (vpravo).



Obr. 7 Pohled na čerpací stanici z ulice Hatě.

### **4.3.2 REDUKČNÍ VENTIL**

V předešlých kapitolách jsme se zmínili o tlakových pásmech nacházejících se na síti. „Redukované tlakové pásmo“ je redukované pomocí tlakového redukčního ventilu značky CLA-VAL. Pomocí redukčního ventilu se redukuje proměnlivý tlak na vstupu na konstantní tlak výstupu. Změny průtoků neovlivňuje pevně nastavený výstupní tlak. Hodnota výstupního tlaku činí 0,50 MPa. Profil redukčního ventilu je DN 80. (*Zdroj: BVK, a.s.*)

## **4.4 ZÁKLADNÍ INFORMACE O VODOVODU**

Vlastník a provozovatel sítě vodovodu jsou Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.

Oficiální název: čtvrť Brno-Ivanovice, Brno

Kraj: Jihomoravský

Katastr: Ivanovice [655856]

Počet obyvatel: 1 746 (26. 3. 2011)

Vodovod: ANO – celková délka 9964,3 m

Kanalizační síť: ANO

Provozovatel vodovodu: Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.

## 5 TVORBA HYDRAULICKÉHO MODELU SÍTĚ

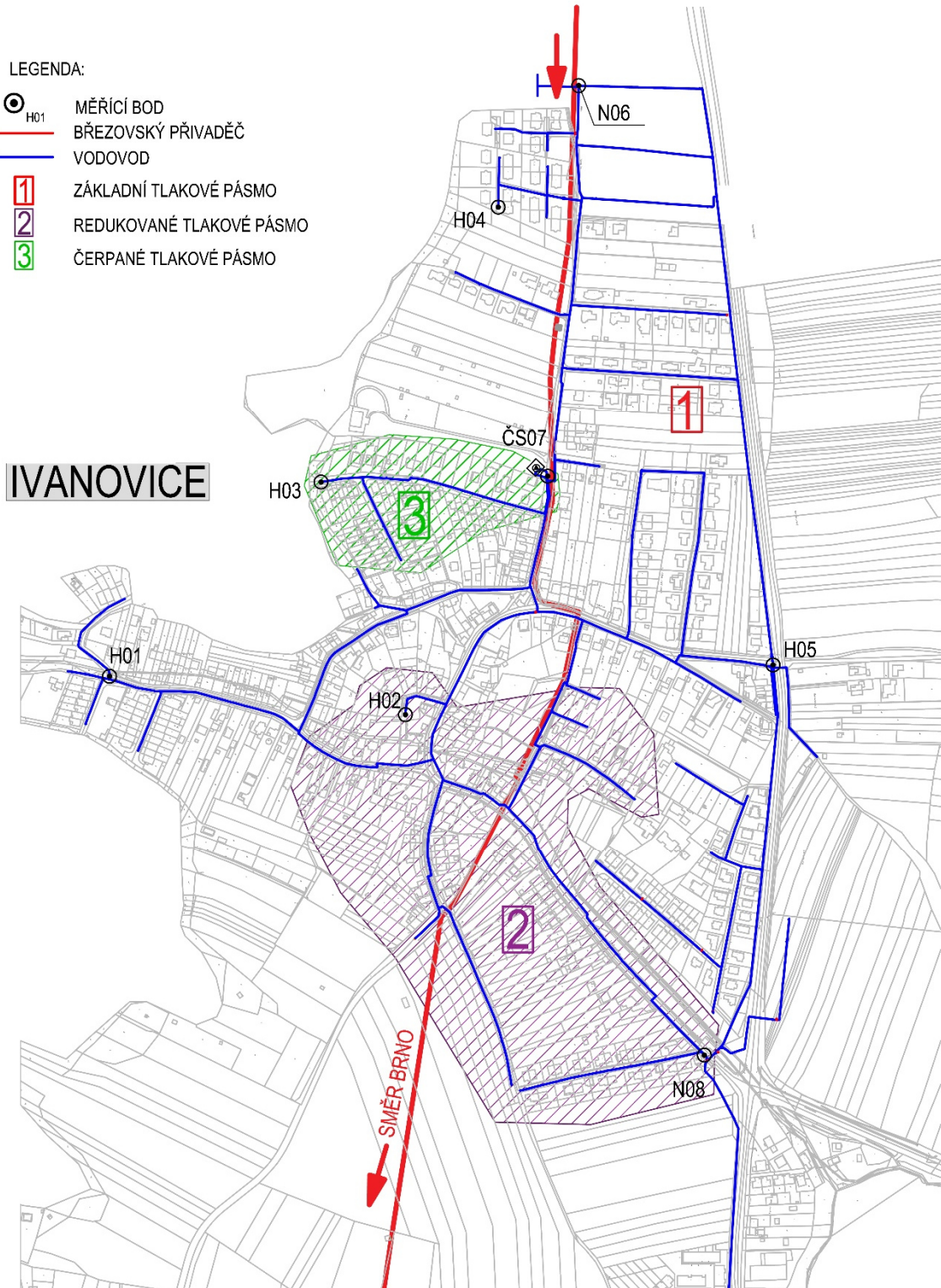
Následující kapitola se věnuje přípravě a samotné tvorbě hydraulického modelu. Na základě předem stanovených cílů a požadavků na přesnost modelu určíme kvalitu a přesnost vstupujících dat. Cílem hydraulického modelování vodovodní sítě městské části Brno-Ivanovice je vyhodnotit tlakové poměry na síti. V rámci této práce byly vytvořeny celkem tři hydraulické modely, které se budou lišit v kvalitě a v přesnosti vstupujících dat. Hydraulický model bude sestaven tak, aby v co největší míře odpovídal reálné vodárenské soustavě.

### 5.1 MĚŘENÍ HYDRAULICKÝCH VELIČIN NA SÍTI

Pro zkvalitnění a získání na kalibrovaného modelu byla provedena měrná kampaň. Při výběru měrných míst byly vzaty v úvahu reálné podmínky na vodovodní síti, především rozmístění funkčních hydrantů a jejich dostupnost.

Celkem bylo zvoleno osm míst pro získání potřebných informací. Na pěti místech byly osazeny měřicí přístroje, ze zbylých třech míst byly získány informace od provozovatele. Před výběrem měřicích míst byl proveden terénní průzkum, kde byl ověřen stav nadzemních či podzemních hydrantů a přístup k daným hydrantům. Měrná kampaň trvala celkem čtyři dny. Byla zahájena v dopoledních hodinách ve čtvrtek 12. května a ukončena dopoledne v pondělí 16. května. Důvodem tohoto výběru dnů byl, aby měřicí technika zaznamenala kolísání tlaků ve všedních dnech a kolísání tlaků vody v dnech víkendových. V následujících odstavcích jsou stručně popsány měřicí místa, doplněné fotografiemi a grafy s vyhodnocením vyskytujících se tlaků v daném bodě. K měření tlaku byla použita tato technika:

- Seba KMT je měřicí technika slouží k měření tlaku na síti, kontroly požárních hydrantů, monitoringu tlaku v průmyslových objektech a k získávání dat pro tvorbu hydraulických modelů. Umisťuje se do podzemních hydrantů nacházejících se na řešené síti. [19]
- DRULO II je měřicí technika slouží k měření tlaku na síti, kontroly požárních hydrantů, monitoringu tlaku v průmyslových objektech a k získávání dat pro tvorbu hydraulických modelů. Umisťuje se do podzemních hydrantů nacházejících se na řešené síti. [20]



Obr. 8 Přehledná situace s označenými místy, kde bylo provedeno měření.



### ***Měřicí místo H01***

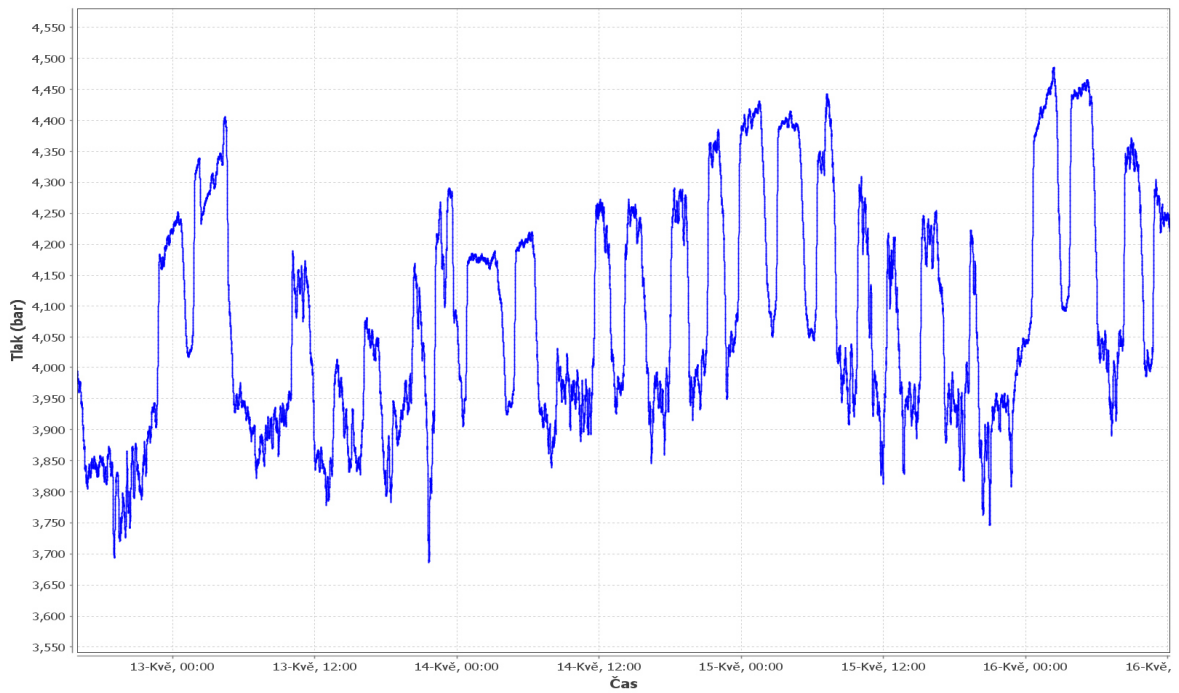
Prvním měřicím bodem byl zvolen podzemní hydrant, který se nachází v místní komunikaci na ulici Kouty. Podzemní hydrant je v dobrém stavu. Hydrant se nachází v základním tlakovém pásmu. Je přístupný a za spolupráci s pracovníky z Brněnských vodáren a kanalizací, a.s. otevřen. Zde byla osazena po dobu pěti dnů měřicí technika značky DRULO II 761. Data byla stáhnuta do počítače a dále zpracovávána.



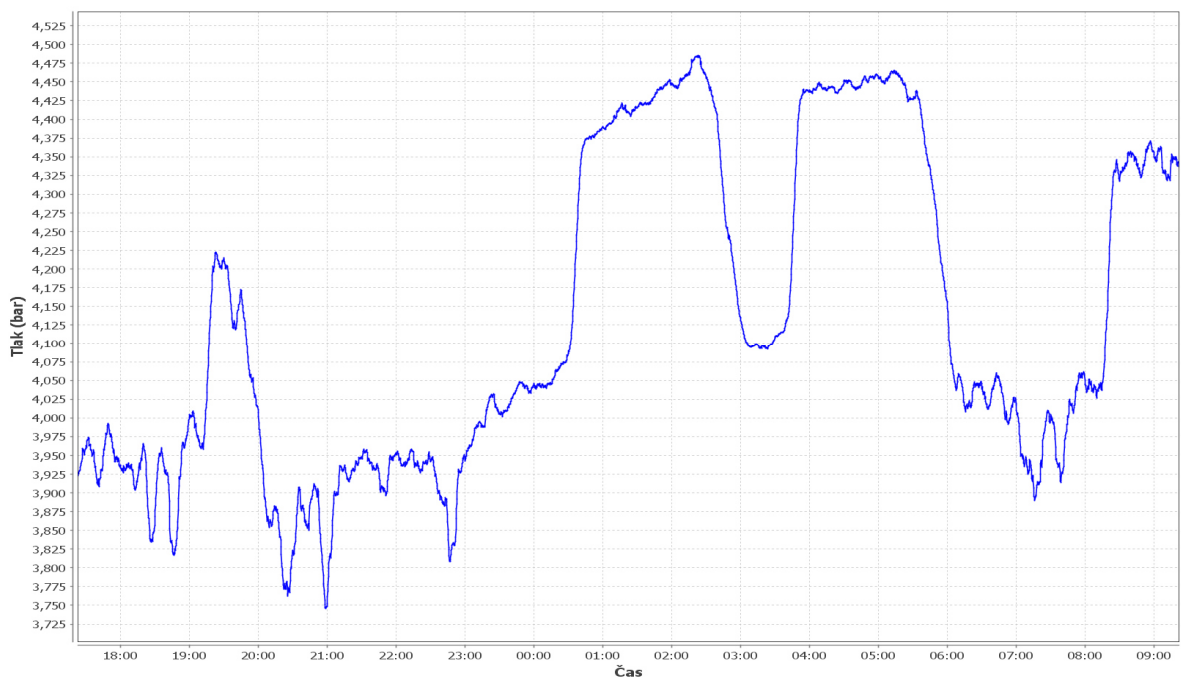
*Obr. 9 Podzemní hydrant v ulici Kouty.*



*Obr. 10 Osazena měřicí technika značky DRULO II.*



Obr. 11 Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H01.



Obr. 12 Graf zobrazující detailní výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H01.

Byl zde naměřen maximální tlak **0,45 MPa** v pondělí 16. května v 2:25 hod.

Byl zde naměřen minimální tlak **0,37 MPa** v pátek 13. května v 21:40 hod.



## ***Měřicí místo H02***

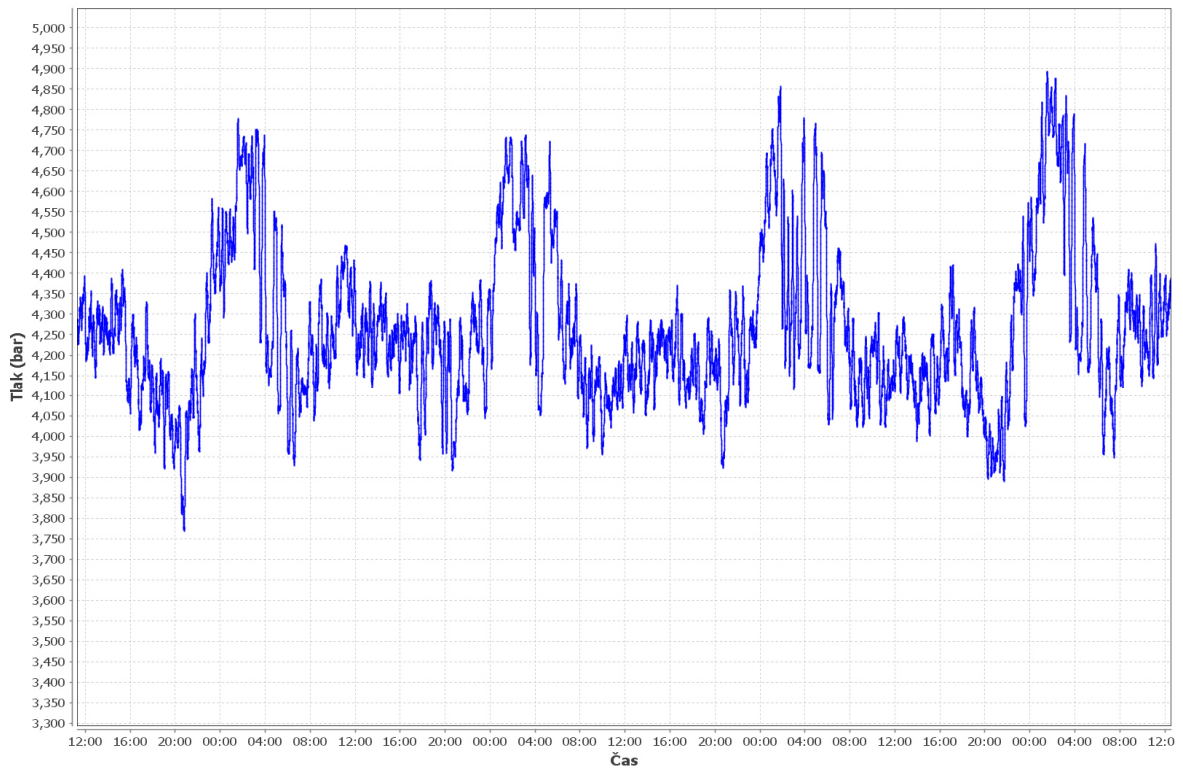
Druhým zvoleným měřicím bodem je opět podzemní hydrant nacházející se uprostřed Ivanovic na ulici Mácová. Podzemní hydrant se nachází v redukovaném tlakovém pásmu. Hydrant se nachází opět v místní komunikaci. Zde byla použita měřicí technika značky DRULO II 553.



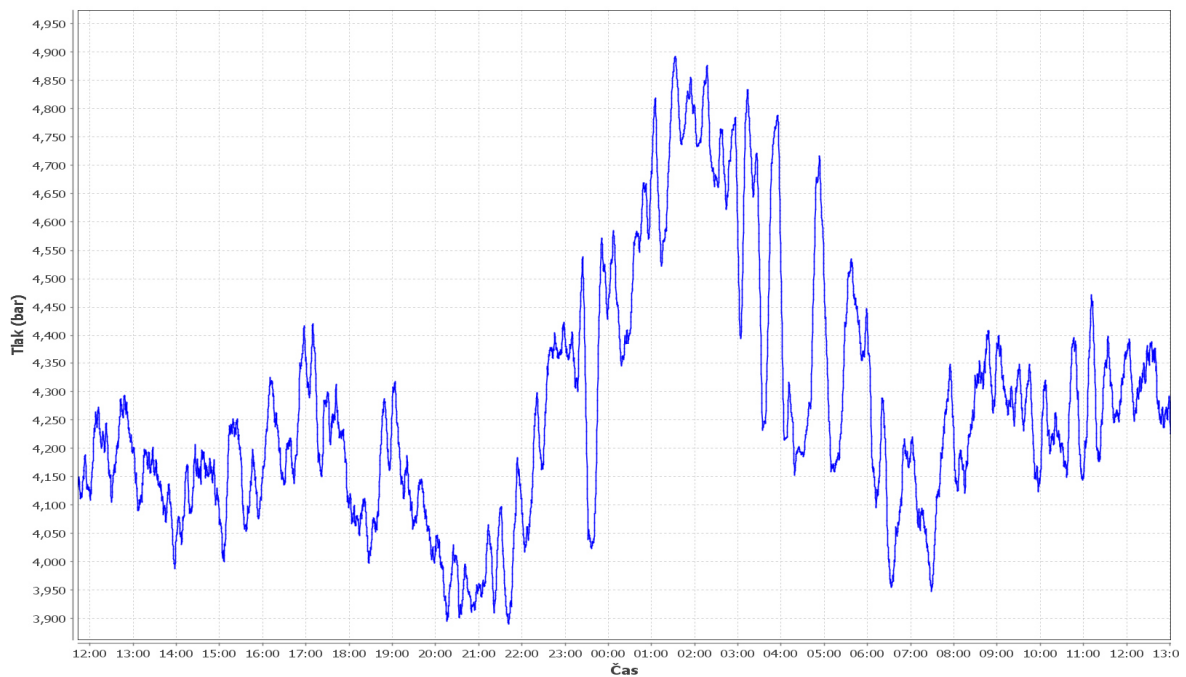
*Obr. 13 Podzemní hydrant v ulici Mácova.*



*Obr. 14 Osazena měřicí technika značky DRULO II.*



*Obr. 15 Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H02.*



*Obr. 16 Graf zobrazující výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H02.*

Byl zde naměřen maximální tlak **0,49 MPa** v pondělí 16. května v 1:34 hod.

Byl zde naměřen minimální tlak **0,38 MPa** ve čtvrtek 12. května v 20:50 hod.



### ***Měřicí místo H03***

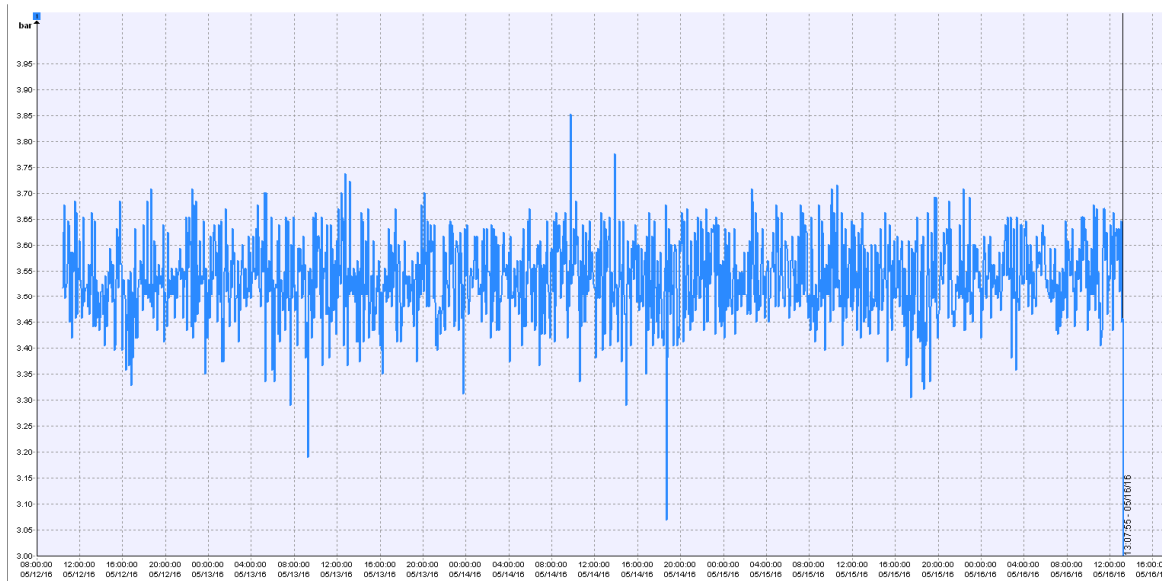
Třetím zvoleným měřicím bodem je opět podzemní hydrant nacházející se na konci ulice Zatloukalova. Hydrant se nachází v čerpaném tlakovém pásmu. Do této větve sítě je voda čerpána čerpací stanicí nacházející se na začátku dané ulice. Hydrant se nachází v místní komunikaci. Zde byla použita měřicí technika značky Seba KMT 183.



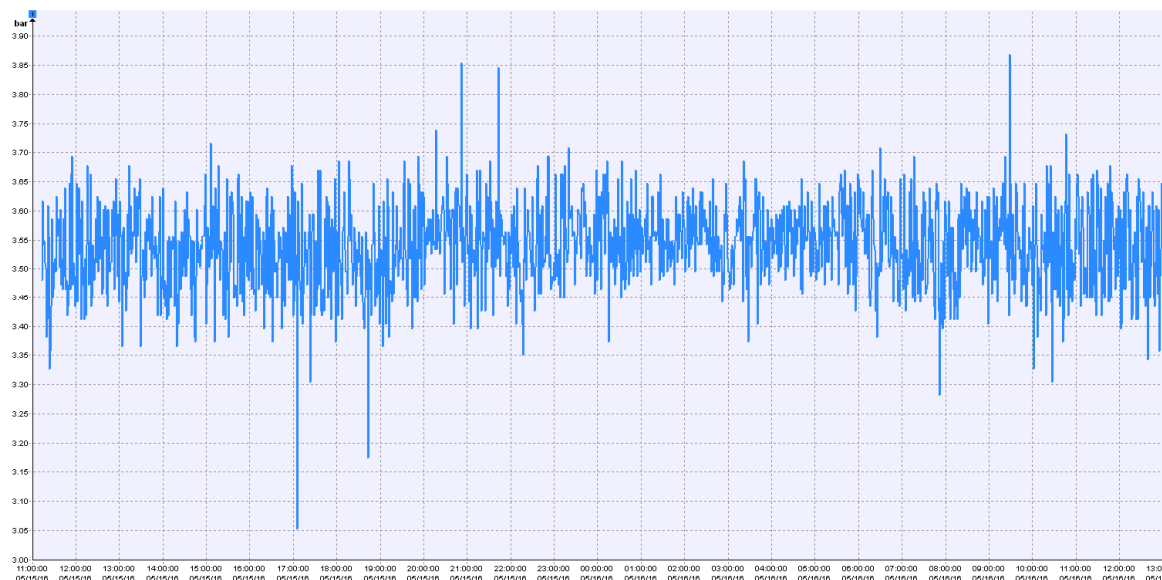
*Obr. 17 Podzemní hydrant na ulici Zatloukalova.*



*Obr. 18 Osazena měřicí technika značky Seba KMT.*



Obr. 19 Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H03.



Obr. 20 Graf zobrazující výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H03.

Byl zde naměřen maximální tlak **0,39 MPa** v pondělí 16. května v 1:13 hod.

Byl zde naměřen minimální tlak **0,30 MPa** v sobotu 14. května v 16:50 hod.

Byla zde naměřen průměrný tlak **0,35 MPa** ve dnech 12. května až 16. května.



### ***Měřicí místo H04***

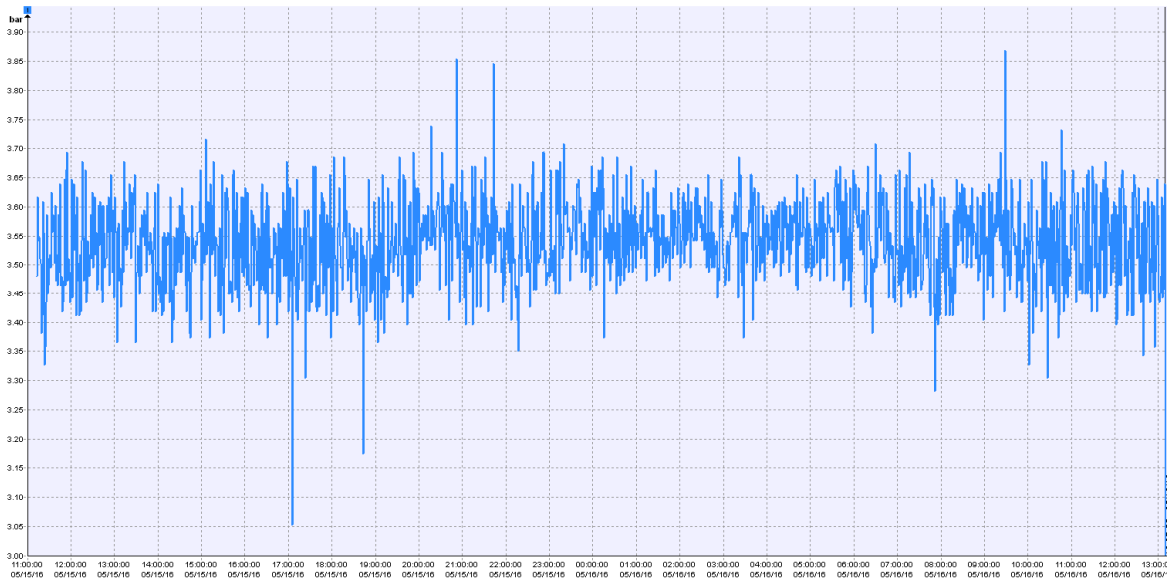
Předposledním zvoleným měřicím bodem je podzemní hydrant nacházející se v ulici Pod Ostrou. Podzemní hydrant se nachází v základním tlakovém pásmu. Hydrant se nachází v horším stavu, je zkorodovaný a částečně zatopený. Zde byla použita měřicí technika značky Seba KMT 205.



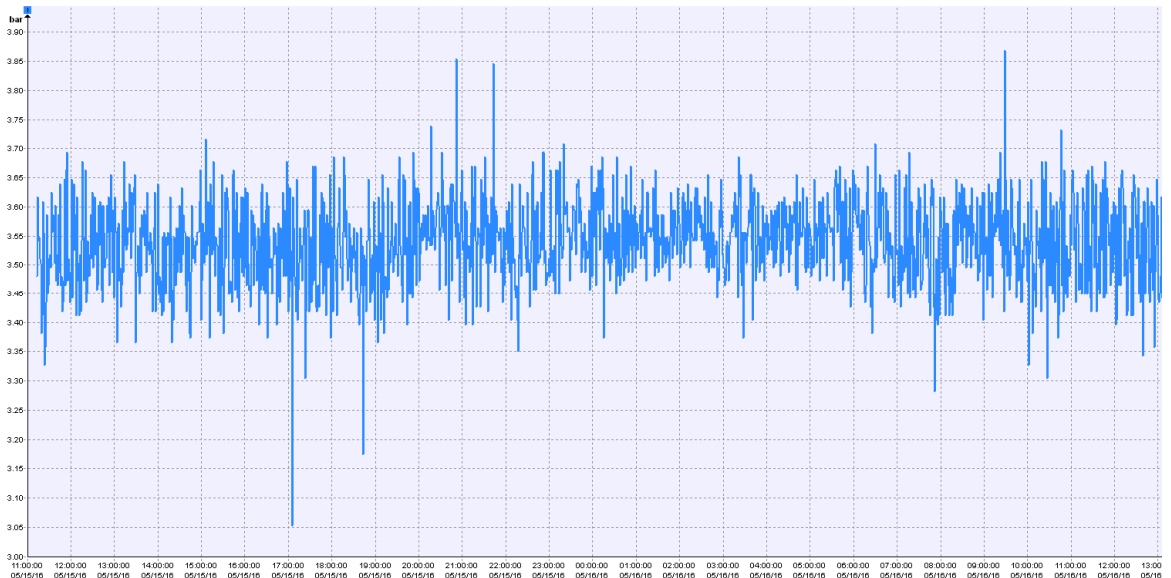
*Obr. 21 Podzemní hydrant na ulici Zatloukalova.*



*Obr. 22 Osazena měřicí technika značky Seba KMT.*



Obr. 23 Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H04.



Obr. 24 Graf zobrazující výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H04.

Byl zde naměřen maximální tlak **0,39 MPa** v pondělí 16. května v 2:21 hod.

Byl zde naměřen minimální tlak **0,28 MPa** v sobotu 12. května v 22:14 hod.

Byla zde naměřen průměrný tlak **0,39 MPa** ve dnech 12. května až 16. května.



### ***Měřicí místo H05***

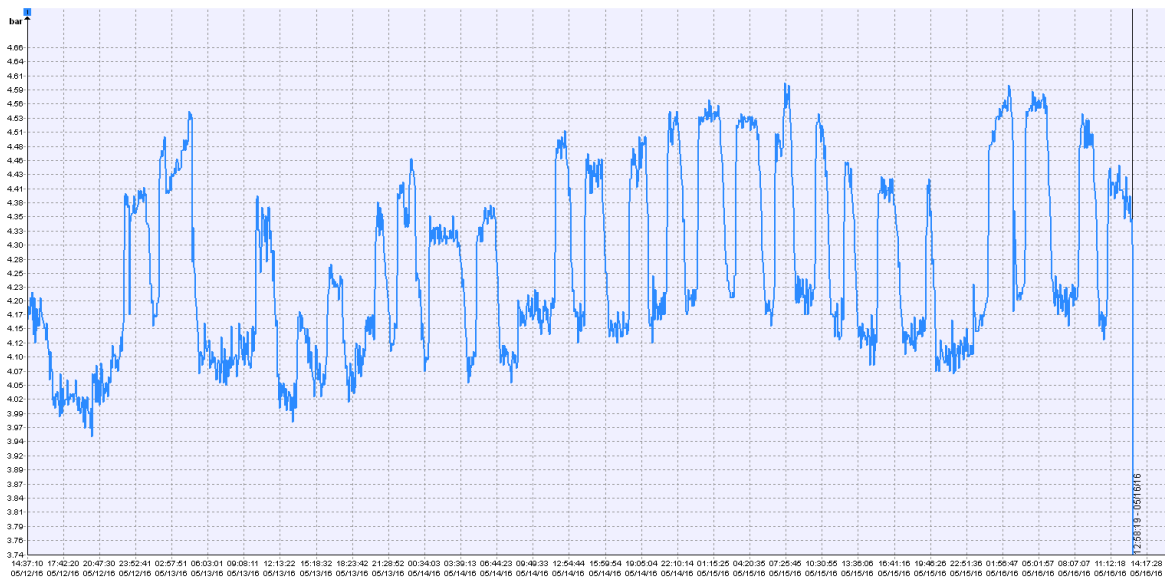
Posledním zvoleným měřicím bodem je nadzemní hydrant nacházející se v ulici Černohorská. Nadzemní hydrant se nachází v základním tlakovém pásmu. Zde byla použita měřicí technika značky Seba KMT 1978.



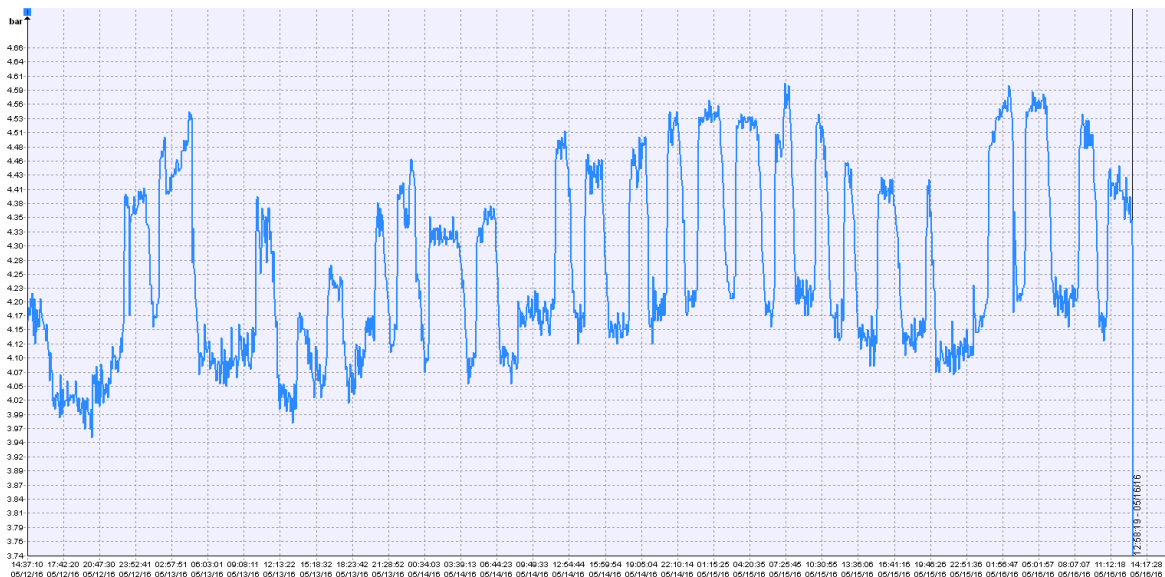
*Obr. 25 Nadzemní hydrant na ulici Černohorská.*



*Obr. 26 Osazena měřicí technika značky Seba KMT.*



Obr. 27 Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H05.



Obr. 28 Graf zobrazující výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H05.

Byl zde naměřen maximální tlak **0,48 MPa** v pátek 15. května v 7:13 hod.

Byl zde naměřen minimální tlak **0,39 MPa** ve čtvrtek 12. května v 19:50 hod.

Byla zde naměřen průměrný tlak **0,43 MPa** ve dnech 12. května až 16. května.



Další data byla poskytnuta ze tří měřicích míst od Brněnských vodáren a kanalizací, a.s. Mezi tato měřicí místa patří Měřicí místo Nadávky, Měřicí místo Příjezdová a Měřicí místo ČS Zatloukalova.

### ***Měřicí místo N06***

Zdrojem pitné vody v městské části Ivanovice je soustava studní v Březové nad Svitavou. Voda je ze zdroje přiváděna druhým Březovským přivaděčem. Na tomto přivaděči se nachází odbočka s měřicím přístrojem. Zde byly získány hodnoty průtoků a tlaků.



*Obr. 29 Vodoměr na odbočce z Březovského přivaděče.*

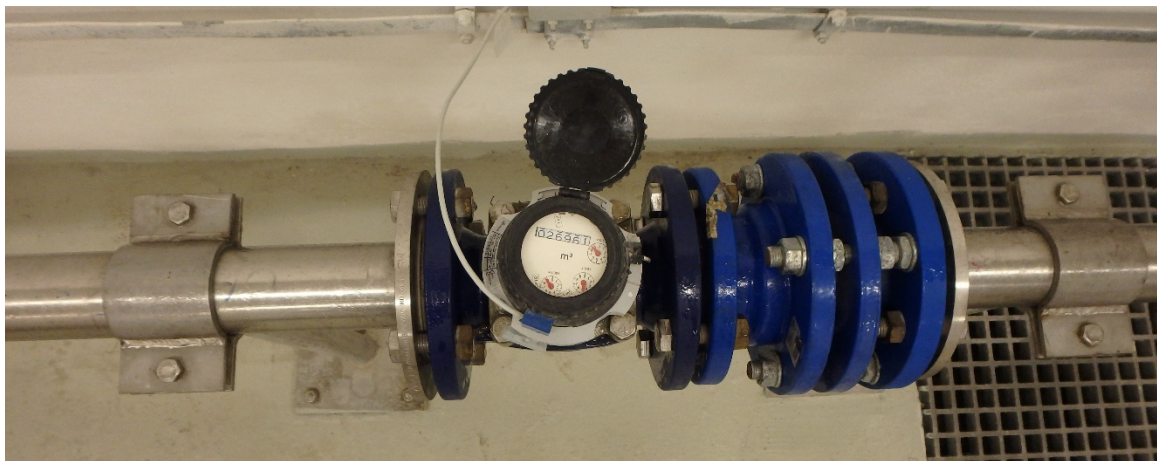
Byl zde naměřen maximální tlak **0,49 MPa** v neděli 15. května v 7:18 hod.

Byl zde naměřeni minimální tlak **0,42 MPa** ve čtvrtek 12. května v 20:03 hod.

Byla zde naměřen průměrný tlak **0,45 MPa**.

### *Měřicí místo ČS07*

Vodovodní síť v Ivanovicích je rozdělena na tři tlaková pásma. Ulice Zatloukalova se nachází v tlakovém pásmu, kde je voda čerpána čerpadlem, aby dodržela požadované hodnoty tlaku v síti. V čerpací stanici se nachází měřicí zařízení. Zde byly získány hodnoty tlaků i průtoků.



*Obr. 30 Vodoměr v čerpací stanici Zatloukalova.*



*Obr. 31 Čerpadla značky Lowara.*

Byl zde naměřen maximální tlak **0,41 MPa** v neděli 15. května v 7:15 hod.

Byl zde naměřen minimální tlak **0,33 MPa** ve čtvrtek 12. května v 12:35 hod.

Byla zde naměřen průměrný tlak **0,36 MPa**.



### ***Měřicí místo N08***

Redukované tlakové pásmo je z důvodu vyskytujících se vysokých tlaků, redukováno pomocí tlakového redukčního ventilu značky CLA-VAL. Zde byly získány pouze hodnoty průtoků.



*Obr. 32 Pohled do šachty s osazeným redukčním ventilem (vlevo). Redukční ventil CLA-VAL (vpravo).*

*Tab. 3. Přehledná tabulka hodnot tlaků v naměřených místech.*

Název	Ulice	Minimální tlak	Maximální tlak	Průměrný tlak
		[MPa]	[MPa]	[MPa]
Měřicí místo H01	ul. Kouty	0,37	0,45	0,41
Měřicí místo H02	ul. Mácova	0,38	0,49	0,42
Měřicí místo H03	ul. Zatloukalova	0,30	0,39	0,35
Měřicí místo H04	ul. Pod Ostrou	0,28	0,39	0,39
Měřicí místo H05	ul. Černohorská	0,39	0,48	0,43
Měřicí místo N06	ul. Nadávky	0,42	0,49	0,45
Měřicí místo ČS07	ul. Zatloukalova	0,33	0,41	0,36
Měřicí místo N08	ul. Příjezdová	*	*	*

## 5.2 TVORBA MODELU SÍTĚ

V rámci diplomové práce byly vytvořeny celkem tři modely, a to základní model sítě, podrobný model sítě a kalibrovaný model sítě. Verze modelu se od sebe liší přesností vstupních dat. Nejdříve byl popsán postup při tvorbě kostry modelu, která tvoří základ pro každou verzi modelu. Pro vytvoření kostry sítě byly použity softwarové programy Autocad a MIKE URBAN.

	Vstupní data
Základní model	Dimenze (vyčtena z GISU). Drsnost pro celou síť určena, $k = 0,5$ . Nadmořské výšky vyčteny z internetového portálu. Rozdělení uzlových odběrů dle metody redukované délky. Průtoky - vypočteny. Provedena statická hydraulická analýza.
Podrobný model	Dimenze (vyčtena z GISU). Drsnost pro celou síť zvolena dle materiálu potrubí. Nadmořské výšky vyčteny z internetového portálu. Rozdělení uzlových odběrů dle metody dvou součinitelů. Průtoky - vypočteny. Provedena statická hydraulická analýza.
Verifikovaný model	Dimenze (vyčtena z GISU). Drsnost pro celou síť zvolena dle materiálu potrubí. Nadmořské výšky vyčteny z internetového portálu. Rozdělení uzlových odběrů dle metody dvou součinitelů. Průtoky - získány z analýzy časové řady. Provedena kvazi-dynamická analýza.

### 5.2.1 TVORBA KOSTRY MODELU

#### ***Rozdělení sítě a import souborů \*.dxf***

Prvním krokem při tvorbě modelu bylo provedení tzv. „skeletonizace sítě“. Vodovodní síť poskytnuta z podkladní mapy GIS byla v programu CAD rozdělena na úseky a uzly. Přiměřené množství úseků a uzlů ovlivňuje přesnost hydraulického modelu. Skeletonizace sítě byla provedena pouze u příváděcích a hlavních rozváděcích řadů, nebyly uvažovány domovní přípojky. Úseky a uzly jsou rozděleny na základě určitých pravidel. Uzly byli vytvořeny vždy v místě odbočení a v místech, kde se mění topologie sítě (dimenze a materiál). Důvodem je, aby úseku mezi uzly mohl být přiřazen popis materiálu a dimenze. Uzly byly také vytvořeny v místě nadzemních a podzemních hydrantů kvůli následné kalibraci. V městské části Brno-Ivanovice se nenachází žádný významný velkoodběratel, proto nebyl vytvořen samostatný uzel, který by zastupoval významného odběratel v dané síti. Na závěr byly délky úseků rozděleny na kratší úseky. Maximální délka úseku je 200 m. Výjimečně lze nechat úsek v délce větší než 200 m, a to v případě, že nejsou připojeni žádní

odběratelé nebo pouze velmi malý počet odběratelů, který je zanedbatelný. Takto připravená síť je převedena do jedné stejné hladiny v programu Autocad a převedena do souboru \*.dxf. Po otevření programu MIKE URBAN, je naimportován daný soubor. Jedna z velkých výhod programu je právě tato možnost převádění dat mezi Autocadem a MIKEM URBANEM. Při importu je důležité zkontrolovat nastavení jednotek a souřadného systému, aby import proběhl úspěšně. Po načtení souboru je zapotřebí model „nakrmit“ daty. MIKE URBAN z Autocadu naimportuje délku sítě.

### ***Zadávání vstupů do programu MU***

Základní podmínkou je mít dostatečné a kvalitní podklady. Neboť bez správných vstupních dat není možné postavit správný model, ať už se jedná o jakýkoliv model. Kvalita vstupních dat determinuje kvalitu výstupu. Vstupy můžeme rozdělit na dva druhy:

- Vstupy zadávány do uzlů

Základní informace, které vkládáme do uzlů, jsou popis (*description*), nadmořská výška (*elevation*), koeficienty  $C_i$  (*coefficients*).

- Vstupy zadávány do výpočtových úseků

Základní informace, které vkládáme do úseků je popis (*description*), materiál (*material*), dimenze (*diameter*).

- Vstupy zadávány do ostatních prvků

Dalšími nacházejícími prvky na síti kromě uzlů a úseků jsou také armatury (redukční ventily) čerpací stanice a vodojemy či rezervoáry.

### **5.2.2 ZÁKLADNÍ MODEL SÍTĚ**

Kostra základního modelu sítě byla provedena dle již dříve zmíněného postupu. Vodovodní síť byla rozdělena na tři tlaková pásma: „Základní tlakové pásmo, redukované tlakové pásmo a čerpané tlakové pásmo“. Do připraveného modelu byly zadány tyto vstupující hodnoty:

#### ***Vstupy do modelu***

- Nadmořské výšky

Nadmořské výšky uzlů byly vyčteny z vrstevnic z internetového portálu.

- Odběr vody

V dalším kroku bylo potřeba zadat odběr vody v síti. Při rozdělení odběrů používáme dvě hlavní metody, kterým je věnována kapitola 3.2.3 Zadávání odběrů do modelu. Program MIKE URBAN umožňuje do uzlů zadávat přímo redukční součinitele. Proto není nutné provést výpočet předem, ale rovnou zadávat vstupující hodnoty do modelu. V základní verzi

modelu byl odběr zadán do uzlů (v daném programu lze odběr zadávat i do úseků), rozdělení odběru do okrajových uzlů byl proveden podle metody redukovaných délek.

- Redukční součinitel C

Na základě hustoty zástavby byla stanovena hodnota součinitele:

- C = 1 [-] - oboustranně připojené nemovitosti,
- C = 0,5 [-] - jednostranně připojené nemovitosti,
- C = 0 [-] - nepřipojené nemovitosti.

- Dimenze

Dimenze potrubí byly vyčteny z podkladové mapy vodovodní sítě.

- Drsnost potrubí

Hodnota drsnosti pro všechno potrubí v základní verzi modelu byla zvolena  $k = 0,5$  [-].

- Čerpací stanice

Na vodovodní síti se nachází čerpací stanice s jednou funkční čerpací jednotkou. Čerpací křivka čerpadla byla navržena s dopravní výškou  $H = 20,0$  m. Čerpaný průtok byl zvolen na základě vypočtených zatěžovacích stavů. Tento návrh byl zvolen na základě předpokladu, že na síti se nachází hodnoty tlaků dle platné legislativy.

- Redukční ventil

Hodnota výstupního tlaku byla zvolena 0,55 MPa. Tento návrh byl zvolen na základě předpokladu, že na síti se nachází hodnoty tlaků dle platné legislativy.

- Vodojem/rezervoár

Zdroj vody v hydraulickém modelu zastupuje objekt rezervoár, neboť zdrojem vody není vodojem, ale příváděcí řad. V tomto případě je základní vstupující hodnotou do modelu energetický horizont s ohledem na výškově uložený nejnižší bod v síti. Tato hodnota byla určena na základě dodržení maximálního hydrostatického tlaku na síti a zároveň na dodržení minimálního hydrodynamického tlaku. V základním modelu se tato hodnota rovná **338,5 m n. m.**

Po této úloze je spuštěna funkce „Projekt check tool“. Tato funkce je jednou z předností programu. Spuštěním této funkce MU provede automaticky kontrolu zadaných údajů, a zda je projekt správně nastaven. Pokud je projekt správně nastaven, je spuštěna simulace. Byla provedena základní statická analýza pro dva zatěžovací stavy. První zatěžovací stav se rovná vypočítané maximální hodinové potřebě vody  $Q_h$ . Maximální hodinová spotřeba vody byla vypočítána na základě specifické spotřeby vody  $150 \text{ l. os.den}^{-1}$  vynásobenou počtem obyvatel žijící v dané lokalitě. Druhý zatěžovací stav je dán hodnotou minimálního průtoku

$Q_{\min}$ . Tato hodnota byla stanovena na základě odhadu, že na síti je minimální průtok a minimální hodnoty ztrát vody.

Výpočet maximální hodinové potřeby vody:

$$Q_p = PO \times q_{\text{spec}} \quad (5.1)$$

$$Q_p = 1746 \times 150$$

$$Q_p = 261\,900 \text{ [l.den}^{-1}\text{]} = 3,00 \text{ [l.s}^{-1}\text{]}$$

$$Q_d = Q_p \times k_d \quad (5.2)$$

$$Q_d = 3,00 \times 1,35$$

$$Q_d = 4,10 \text{ [l.s}^{-1}\text{]}$$

$$Q_h = Q_d \times k_h \quad (5.3)$$

$$Q_h = 4,10 \times 1,80$$

$$Q_h = 7,40 \text{ [l.s}^{-1}\text{]}$$

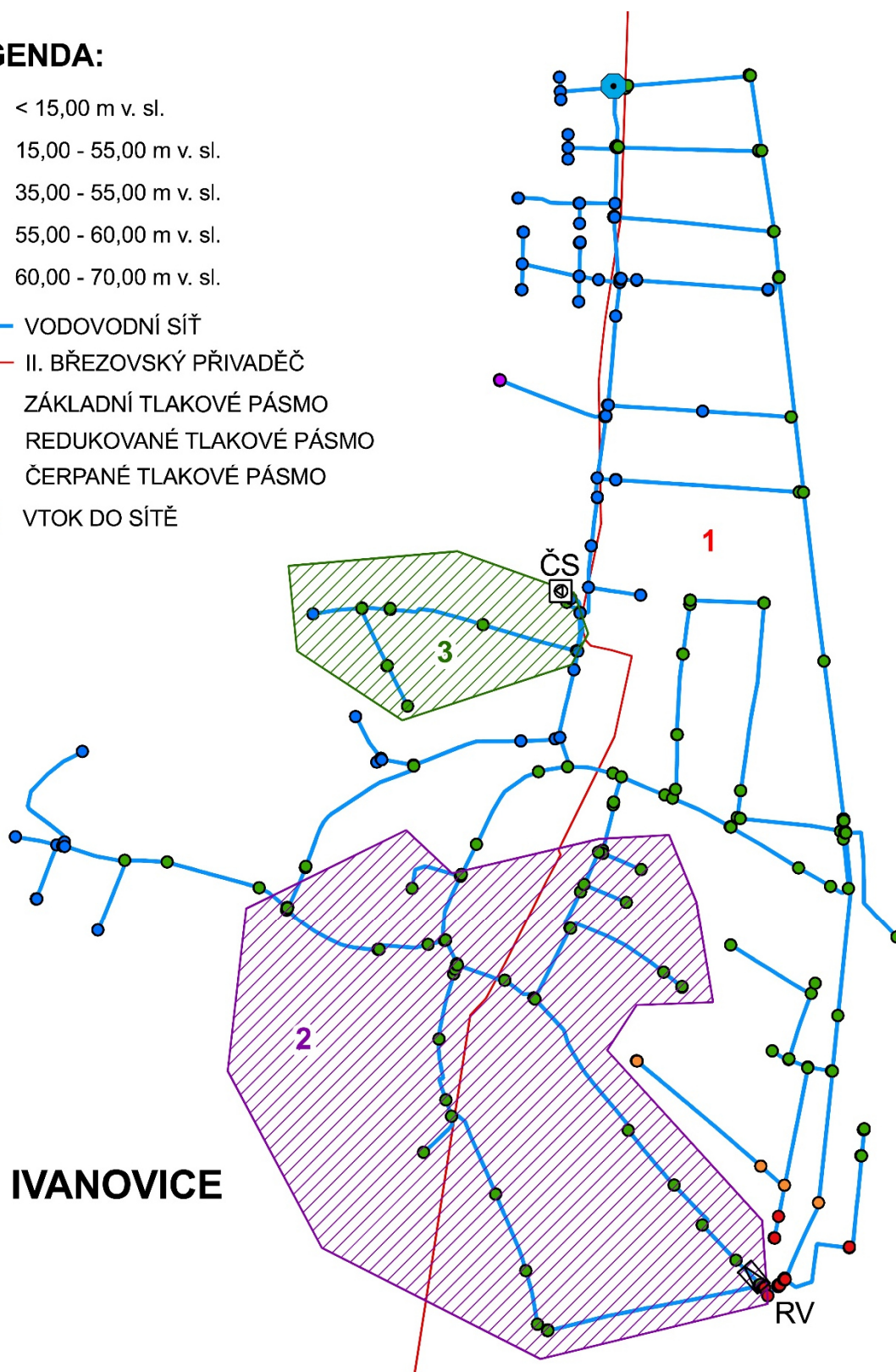
Kde:	PO	počet obyvatel	[obyvatel]
	$Q_{\text{spec}}$	specifická potřeba vody	[l.ob <sup>-1</sup> .den <sup>-1</sup> ]
	$k_d$	doporučené hodnoty koeficientu denní nerovnoměrnosti (empiricky stanovena dle počtu obyvatel)	[-]
	$k_h$	doporučené hodnoty koeficientu hodinové nerovnoměrnosti (empiricky stanovena dle počtu obyvatel)	[-]

Tab. 4. Přehled hodnot zatěžovacích stavů pro statickou analýzu.

Zatěžovací stav	[l.s <sup>-1</sup> ]
ZS1 $Q_h$	7,40
ZS2 $Q_{\min}$	0,01

### LEGENDA:

- < 15,00 m v. sl.
- 15,00 - 55,00 m v. sl.
- 35,00 - 55,00 m v. sl.
- 55,00 - 60,00 m v. sl.
- 60,00 - 70,00 m v. sl.
- VODOVODNÍ SÍŤ
- II. BŘEZOVSKÝ PŘIVADĚČ
- 1 ZÁKLADNÍ TLAKOVÉ PÁSMO
- 2 REDUKOVANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- 3 ČERPANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- VTOK DO SÍTĚ



Obr. 33 Základní hydraulický model – tlakové poměry na síti pro ZS1.

### 5.2.3 PODROBNÝ MODEL SÍTĚ

Při tvorbě druhého modelu byly zpřesněny vstupující hodnoty. Základem pro podrobný model byl již vytvořený základní model.

#### **Zpřesněné vstupy:**

- Drsnost potrubí

Drsnost potrubí byla zpřesněna na základě materiálu potrubí, materiál potrubí byla vyčten z údajů v GIS BVK, a.s.

- Odběr vody

V podrobném modelu byl odběr zadán opět do uzlů, rozdělení odběru do okrajových uzlů bylo provedeno podle metody dvou součinitelů.

- Koeficienty  $C_1$  a  $C_2$

Na základě počtu připojených přípojek na jednotlivém úseku byl určen součinitel  $C_1$ . Za součinitel  $C_2$  byla dosazena ve všech případech hodnota 1.

- $C = 1$  [-] - oboustranně připojené přípojky,
- $C = 0,5$  [-] - jednostranně připojené přípojky,
- $C = 0$  [-] - představuje nepřipojené přípojky.

- Dimenze

Dimenze potrubí byly vyčteny z podkladové mapy vodovodní sítě.

- Drsnost potrubí

Hodnota drsnosti pro všechno potrubí v základní verzi modelu byla zvolena  $k = 0,5$  [-].

- Redukční ventil

Na základě poskytnutých informací byla zadána reálná hodnota vystupujícího tlaku z ventilu 0,50 MPa.

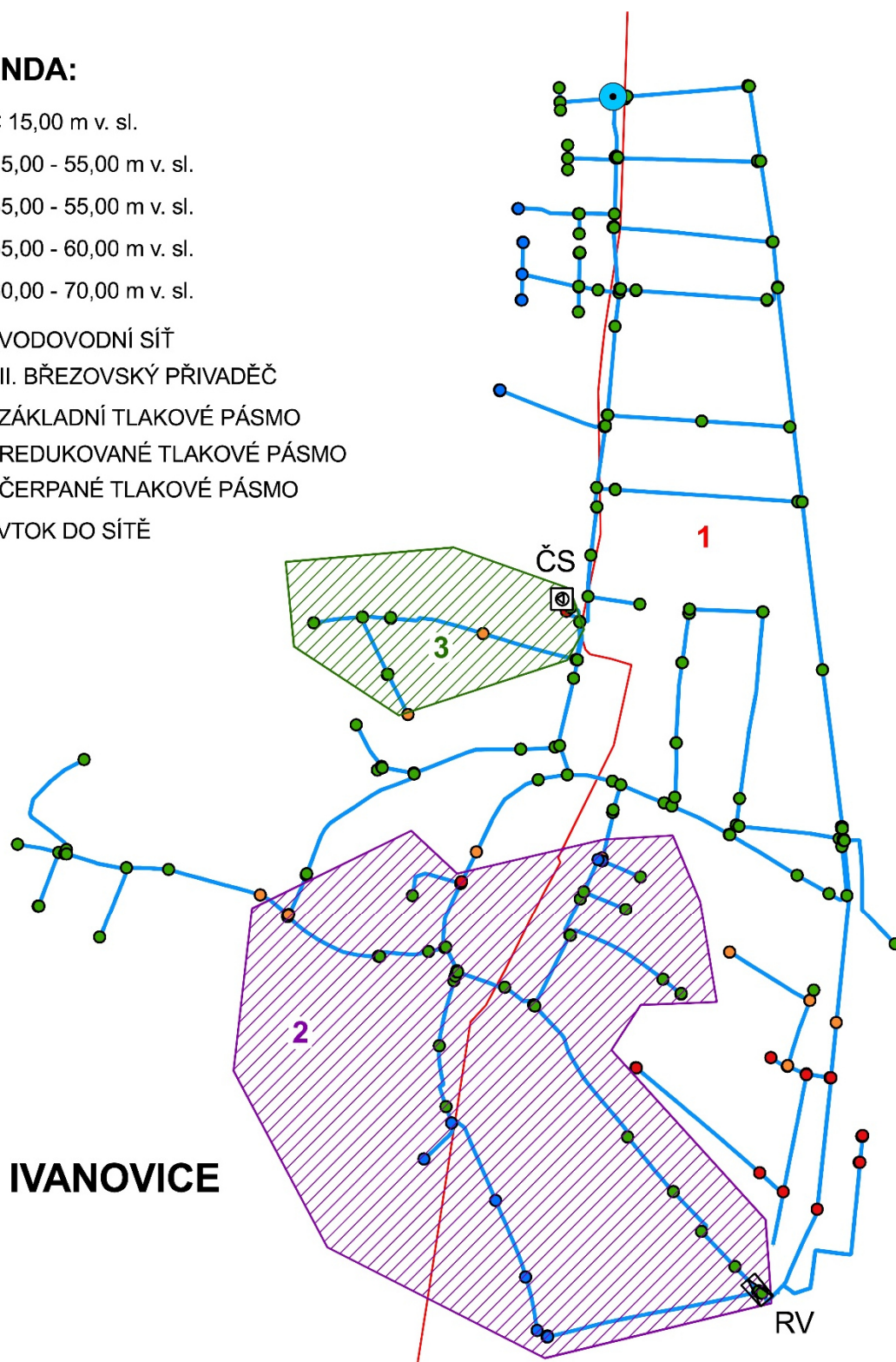
- Vodojem/rezervoár

Zdroj vody v hydraulickém modelu zastupuje objekt rezervoár, neboť zdrojem vody není vodojem, ale příváděcí řad. V tomto případě je zadaná hodnota z předchozího modelu zpřesněna na základě reálné hodnoty, která se nachází v nejkratší vzdálenosti od místa napojení. Za předpokladu, že v tak krátkém úseku od zdroje není žádný odběratel, můžeme tuto hodnotu brát za důvěryhodnou.



### LEGENDA:

- < 15,00 m v. sl.
- 15,00 - 55,00 m v. sl.
- 35,00 - 55,00 m v. sl.
- 55,00 - 60,00 m v. sl.
- 60,00 - 70,00 m v. sl.
- VODOVODNÍ SÍŤ
- II. BŘEZOVSKÝ PŘIVADĚČ
- 1 ZÁKLADNÍ TLAKOVÉ PÁSMO
- 2 REDUKOVANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- 3 ČERPANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- V TOK DO SÍTĚ



Obr. 34 Podrobný hydraulický model – tlakové poměry na síti pro ZS1.



U matematických modelu byla provedena statická analýza na dva základní zatěžovací stavy. První zatěžovací stav se rovná vypočítané maximální hodinové potřebě vody  $Q_h$ . Maximální hodinová spotřeba vody byla vypočítána na základě specifické spotřeby vody  $150 \text{ l.os.den}^{-1}$  vynásobenou počtem obyvatel žijící v dané lokalitě. Druhý zatěžovací stav je dán hodnotou minimálního průtoku  $Q_{\min}$ .

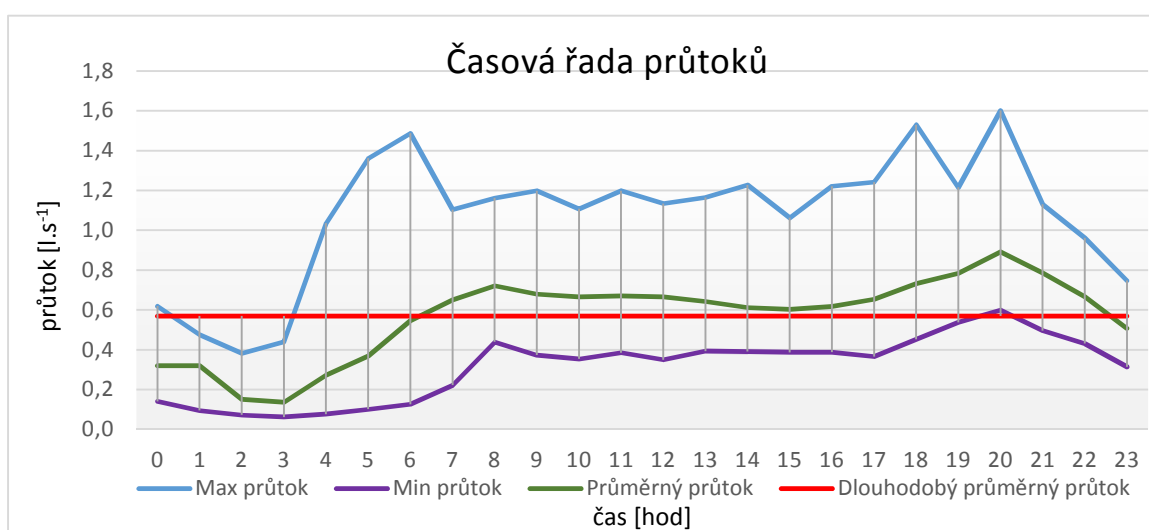
### 5.3 KALIBROVANÝ MODEL SÍTĚ

Při tvorbě třetího modelu byly zpřesněny vstupující hodnoty. Základem pro kalibrovaný model byl již vytvořený podrobný model. V této chvíli nám jsou k dispozici veškerá data a informace ohledně sítě. Jsou známy hodnoty průtoků na síti a naměřené hodnoty tlaků z měrné kampaně.

#### 5.3.1 ZPŘESNĚNÉ VSTUPY DO MODELU

##### *Zpracování dat o spotřebě vody*

Pro nejpodrobnější model a kalibrovaný model byla poskytnuta data o průtocích v různých časových intervalech. Bylo použito měření průtoků v redukovaném tlakovém pásmu. Pro další zpracování byla použita data měřená v období 1. února až 29. února 2016 a data měřená v období 1. dubna 2016 až 30. dubna 2016. Tyto data byla měřena v časovém intervalu pěti minut. Z těchto poskytnutých dat byla vypočítána hodnota aritmetického průměru pro každou hodinu. Bylo tedy získáno celkem 24 hodnot pro každý den. V našem případě se jednalo o 59 dní, tudíž bylo získáno celkem 1416 hodnot průtoků. Z každé hodiny po dobu měření byly stanoveny minimální a maximální průtoky. Na základě těchto změřených hodnot byly stanoveny hodnoty minimálního, maximálního denního, maximální hodinového a průměrného denního průtoku. Z těchto dat byly sestaveny křivky, viz Obr. 35



Obr. 35 Časová řada průtoků v „Redukovaném tlakovém pásmu“.

Vzhledem k tomu, že se jedná o spotřebišť, kdy odběrateli jsou obyvatelé Ivanovic lze na grafu vidět, že maximální hodinová spotřeba vody je mezi šestou až sedmou hodinou ráno a mezi dvacátou až jednadvacátou hodinou večer. Průběh spotřeby vody není atypický. V rámci této diplomové práce nebyly rozlišeny dny pracovní a dny nepracovní.

Tab. 5. Vybraná data z průtoků v redukovaném tlakovém pásmu.

Datum	Minimální průtok	Maximální průtok	Průměrný průtok
[hod]	[l.s <sup>-1</sup> ]	[l.s <sup>-1</sup> ]	[l.s <sup>-1</sup> ]
1	0.141	0.619	0.319
2	0.095	0.476	0.221
3	0.073	0.383	0.151
4	0.062	0.440	0.136
5	0.077	1.035	0.273
6	0.101	1.362	0.369
7	0.126	1.487	0.546
8	0.222	1.104	0.651
9	0.440	1.163	0.721
10	0.373	1.199	0.679
11	0.354	1.108	0.666
12	0.386	1.199	0.670
13	0.350	1.135	0.666
14	0.393	1.165	0.644
15	0.391	1.228	0.613
16	0.387	1.063	0.602
17	0.388	1.221	0.618
18	0.366	1.242	0.654
19	0.453	1.530	0.734
20	0.538	1.216	0.784
21	0.599	1.601	0.893
22	0.496	1.131	0.787
23	0.431	0.961	0.665
24	0.314	0.748	0.507

Tab. 6. Stanovení průtoků v „Redukovaném tlakovém pásmu“.

Průtok	[l.s <sup>-1</sup> ]
Q <sub>p</sub>	0,57
Q <sub>d</sub>	0.84
Q <sub>h</sub>	1,60
Q <sub>min</sub>	0,06

Dále byli vypočítány hodnoty koeficientů, a to koeficientu hodinové nerovnoměrnosti a koeficientu denní nerovnoměrnosti. Dle výpočtu:

$$k_d = \frac{Q_d}{Q_p} ; k_h = \frac{Q_h}{Q_p} \quad [-]$$

(5.4, 5.5)

kde:

Q <sub>p</sub>	průměrná denní potřeba vody	[l.s <sup>-1</sup> ]
Q <sub>d</sub>	maximální denní potřeba vody	[l.s <sup>-1</sup> ]
Q <sub>h</sub>	maximální hodinová potřeba vody	[l.s <sup>-1</sup> ]
k <sub>d</sub>	koeficient denní nerovnoměrnosti	[-]
k <sub>h</sub>	koeficient hodinové nerovnoměrnosti	[-]

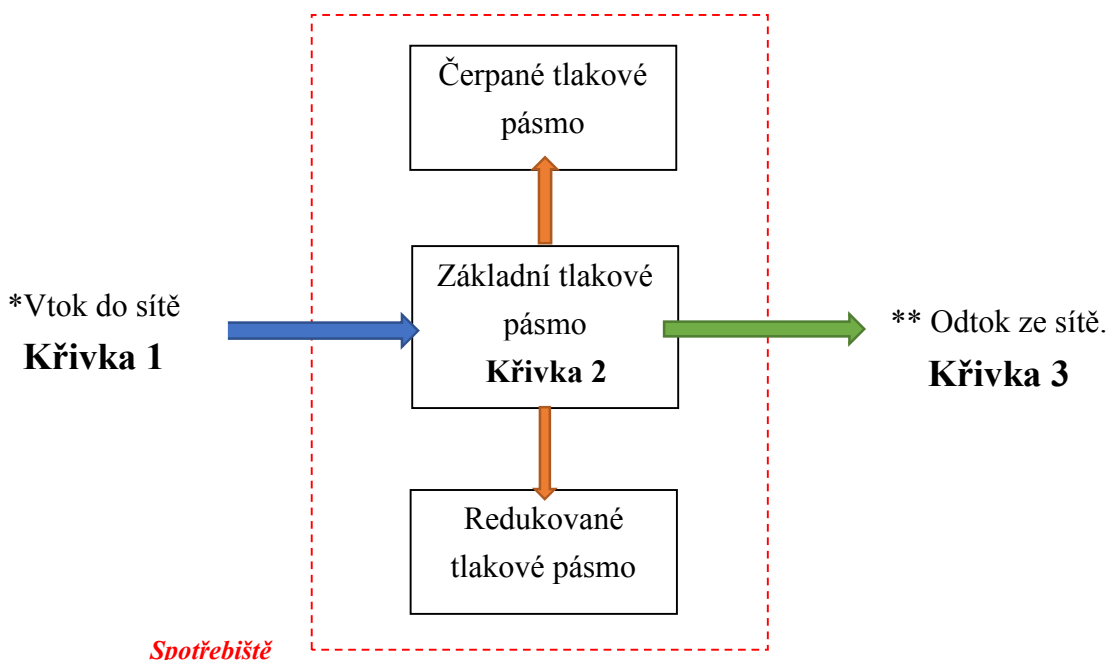
Na základě těchto rovnic můžeme vypočítat koeficient hodinové nerovnoměrnosti **k<sub>h</sub>**, která se rovná hodnotě 1,91 [-] a koeficient denní nerovnoměrnosti **k<sub>d</sub>**, která se rovná hodnotě 1,48 [-]. Tyto hodnoty byly stanoveny na základě měření v místě nátok do redukovaného tlakového pásma.

V případě modelování vodovodní sítě v Ivanovicích je známý nátok do sítě, ale není známý odtok. Neboť Březovský přivaděč zásobuje nejen Brno-Ivanovice, ale dále je voda vedena až do Brna-Řečkovice, kde toto tlakové pásmo zasahuje až na ul. Žilkovu (ke kasárnám) a k vodojemu Řečkovice, kde zásobuje nejvýše položenou zástavbu rodinných domů a kde je voda také přiváděna do vodojemu Řečkovice. Proto odtok vody byl zjištěn jednoduchou rovnicí, kdy po odečtení odběru vody na síti z celkového nátoků se rovná odtoku.

Hodnota odběru vody v celém spotřebišti nebyla změřena. Proto za předpokladu, že se v Ivanovicích nachází stejná zástavba, byla tato hodnota dopočítána na základě reálně změřených hodnot. Ze znalosti odběrů v redukovaném tlakovém pásmu a ze znalosti počtu přípojek nacházejících se v celém spotřebišti, byl vypočítán průměrný denní průtok pro celé spotřebišť  $2,4 \text{ l.s}^{-1}$ .

### 5.3.2 SIMULACE DNE

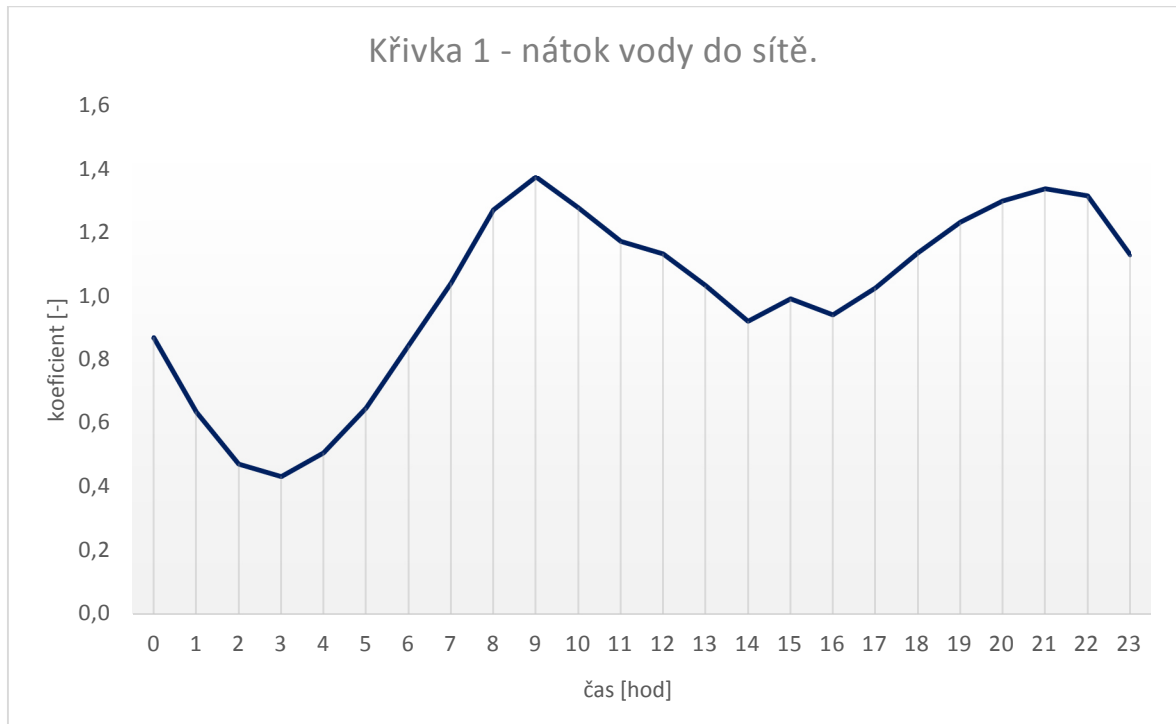
Byla provedena simulace pracovního dne pátku 13. května 2016. Důvodem výběru tohoto dne byl, že byly naměřeny reálné hodnoty tlaků na síti, a to po dobu celého dne. Na základě znalosti hodnot vtoku do spotřebišť, v daný den, a stanovení hodnoty průměrného denního průtoku pro celé spotřebišť, byla vypočítána hodnota odtoku ze sítě. A to jednoduchým vztahem, že nátok do sítě mínus odběr na síti se rovná odtoku vody ze sítě. Vzhledem k tomu, že se jedná o kvazi-dynamickou analýzu, je tedy zapotřebí získat celkem hodnoty pro 24 časových kroků neboli 24 koeficientů vyjadřující časový průběh odběru vody, odtoku a nátoku vody na síti. Jak už bylo zmíněno, do Ivanovic je voda odebírána z II. březovského přivaděče a dále zásobuje další části Brna. **Křivku 1** (ve schématu) můžeme vidět na Obr. 37. Tato křivka vyjadřuje průběh hodnot průtoků na vtoku do sítě. **Křivku 2** (ve schématu) můžeme vidět na Obr. 38. Tato křivka vyjadřuje průběh odběru vody na síti. **Křivku 3** (ve schématu) můžeme vidět na Obr. 39. Tato křivka vyjadřuje průběh hodnot průtoků na odtoku do sítě.



Obr. 36 Přehledná schéma vodovodní sítě.

\*Voda do spotřebišť Ivanovice je přiváděna odbočkou z II. březovského přivaděče.

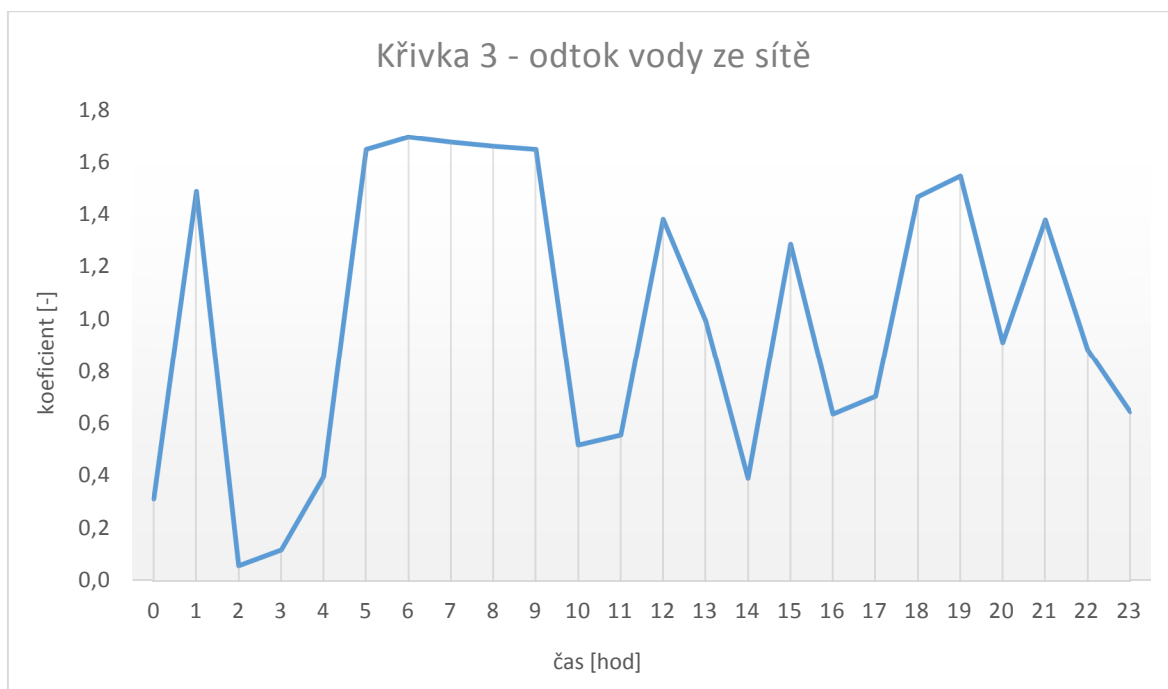
\*\*Voda ze spotřebišť Ivanovice je dále vedena do Brna – Řečkovic.



Obr. 37 Křivka 1 – vyjadřující nátok vody do sítě.

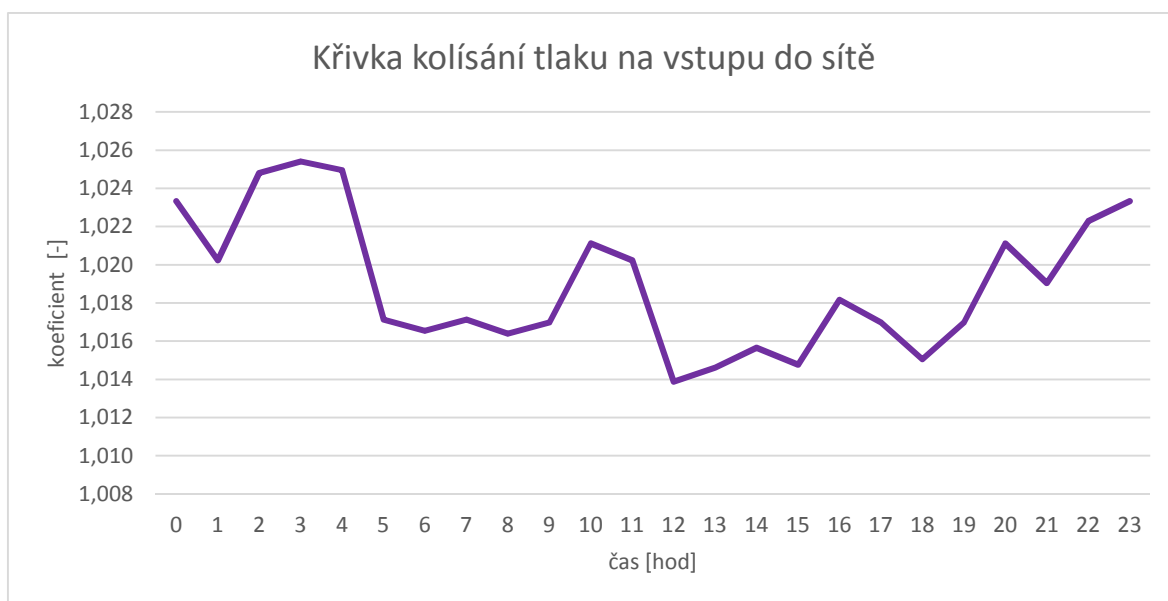


Obr. 38 Křivka 2 - vyjadřující odběr vody ve spotřebišti.



Obr. 39 Křivka 3 - vyjadřující odtok vody ze spotřebiště.

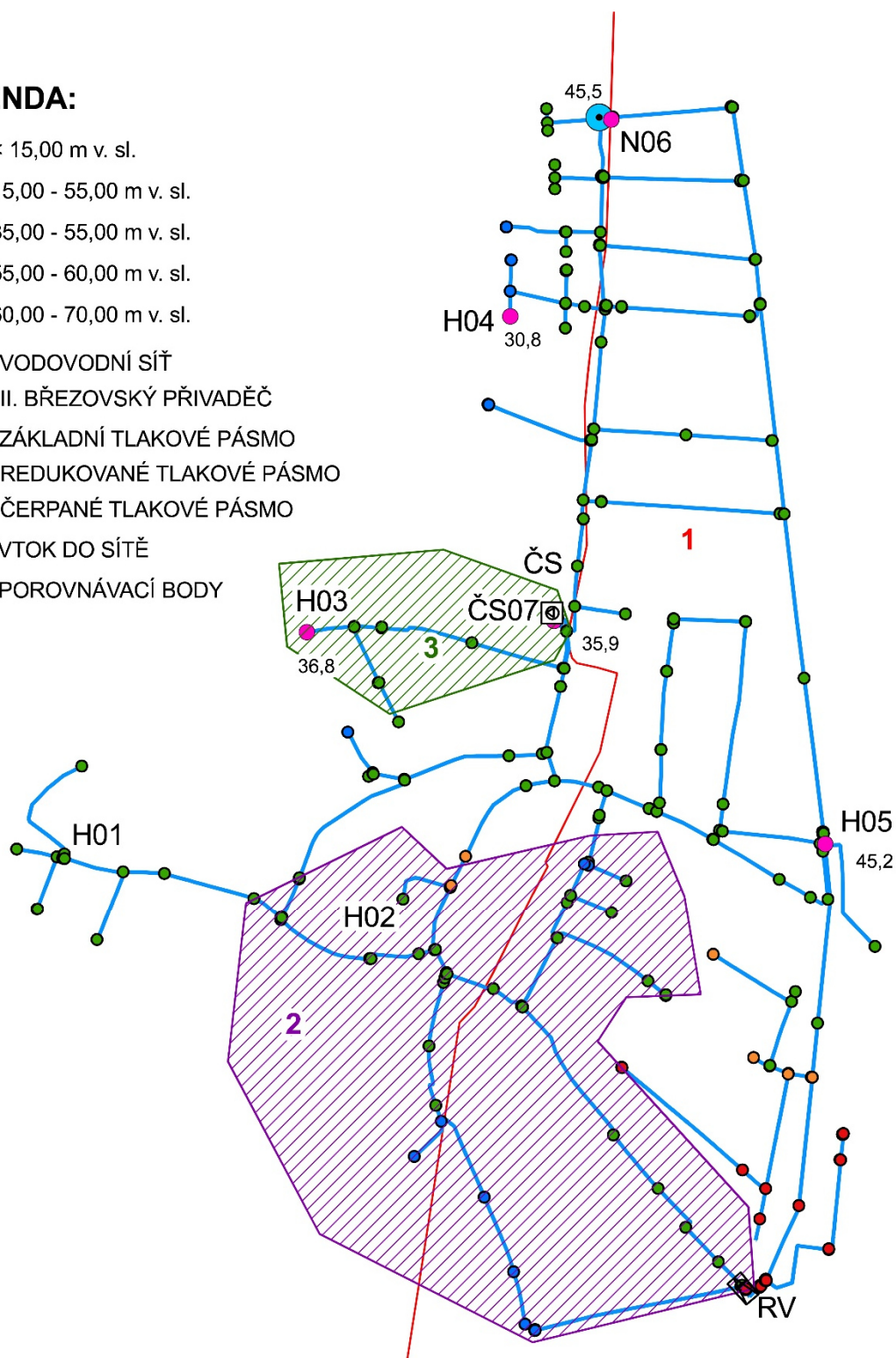
Dané spotřebiště není zásobováno vodojemem, ale přiváděcím řadem. V místě odbočky na přiváděcím řadě mírně kolísají tlaky, proto bylo zapotřebí stanovit křivku, která bude znázorňovat kolísání tlaku na vstupu. Tato křivka byla opět vyjádřena koeficienty a byla vložena do uzlu symbolizující „Rezervoár“ neboli zdroj vody. Vzhledem k tomu, že mezi místem měření a napojením není žádný odběr, bylo toto kolísání stanoveno na základě znalosti kolísání tlaků v průběhu dne vyskytujících se v blízkosti napojení.



Obr. 40 Křivka kolísání tlaku v místě napojení na II. březovský přivaděč.

### LEGENDA:

- < 15,00 m v. sl.
- 15,00 - 55,00 m v. sl.
- 35,00 - 55,00 m v. sl.
- 55,00 - 60,00 m v. sl.
- 60,00 - 70,00 m v. sl.
- VODOVODNÍ SÍŤ
- II. BŘEZOVSKÝ PŘIVADĚČ
- 1 ZÁKLADNÍ TLAKOVÉ PÁSMO
- 2 REDUKOVANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- 3 ČERPANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- V TOK DO SÍŤE
- POROVNÁVACÍ BODY



Obr. 41 Schéma tlakových poměrů ve vodovodní síti 13. května 2016.

### 5.3.3 KALIBRACE MODELU

Z měrné kampaně a z poskytnutých dat byly získány reálné hodnoty tlaků na síti během dne 13. května 2016 ve vybraných místech. Vzhledem k tomu, že nejvyšší odběr vody je okolo 20:00, byl model vodovodu na kalibrován na tento den.

Tab. 7. *Reálné hodnoty tlaků v průběhu dne 13. května 2016.*

Označení místa měření	N06	H03	ČS07	H04	H05
Ulice	Nadávky	Zatloukalova	Zatloukalova	Pod Ostrou	Černohorská
Čas	Tlak				
[hod]	[m v. sl.]				
0	46.3	37.4	38.2	35.3	44.2
1	45.3	37.7	36.8	35.0	44.0
2	46.8	37.9	36.6	35.0	44.0
3	47.0	37.9	35.7	35.2	44.0
4	46.9	38.6	36.0	35.2	44.0
5	44.3	34.7	38.2	35.2	44.0
6	44.1	34.6	35.9	35.2	44.1
7	44.3	34.4	37.5	35.3	44.0
8	44.0	34.4	37.0	35.1	44.1
9	44.2	34.7	36.4	35.3	44.2
10	45.6	36.7	36.3	35.3	44.1
11	45.3	36.9	37.1	35.3	44.1
12	43.2	33.8	36.5	35.2	44.0
13	43.4	35.1	36.6	35.1	44.0
14	43.8	34.9	35.9	35.3	44.2
15	43.5	34.3	35.9	35.0	43.8
16	44.6	35.6	36.3	34.8	43.6
17	44.2	35.7	36.4	34.7	43.6
18	43.6	34.3	37.2	34.6	43.4
19	44.2	35.0	36.2	34.3	42.9
20	45.6	37.1	36.1	34.2	42.8
21	44.9	35.8	36.9	33.9	42.5
22	46.0	37.5	36.7	33.6	42.3
23	46.3	37.0	36.7	33.5	42.0

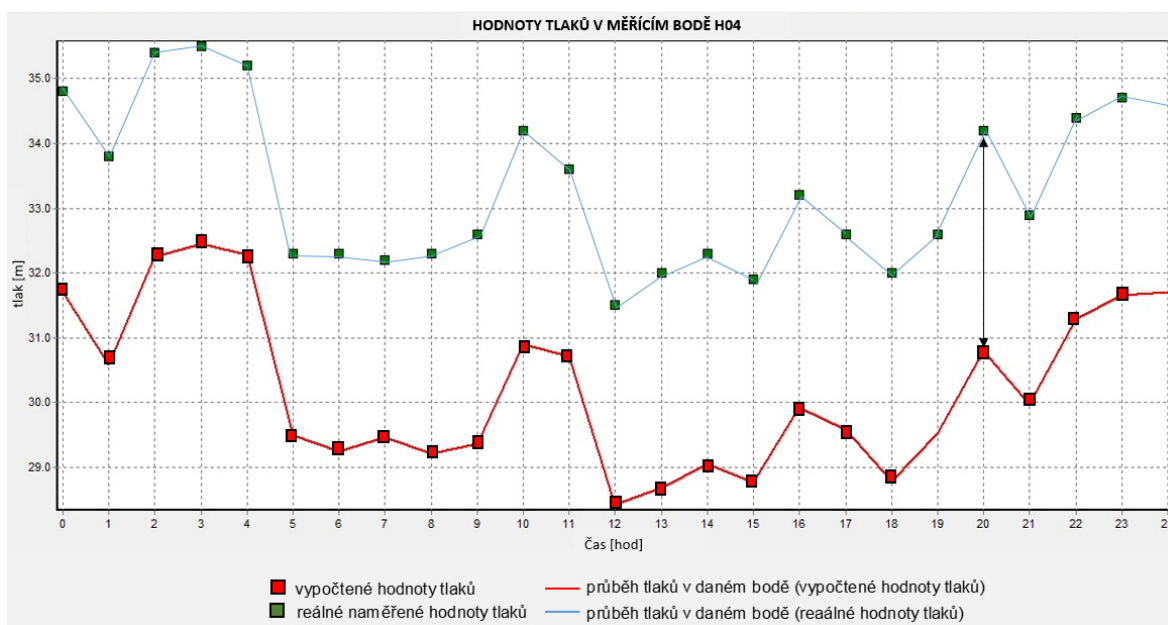


Na základě získaných reálných hodnot tlaků z měrné kampaně byly posouzeny naměřené a vypočítané hodnoty v místech měření, viz Tab. 8.

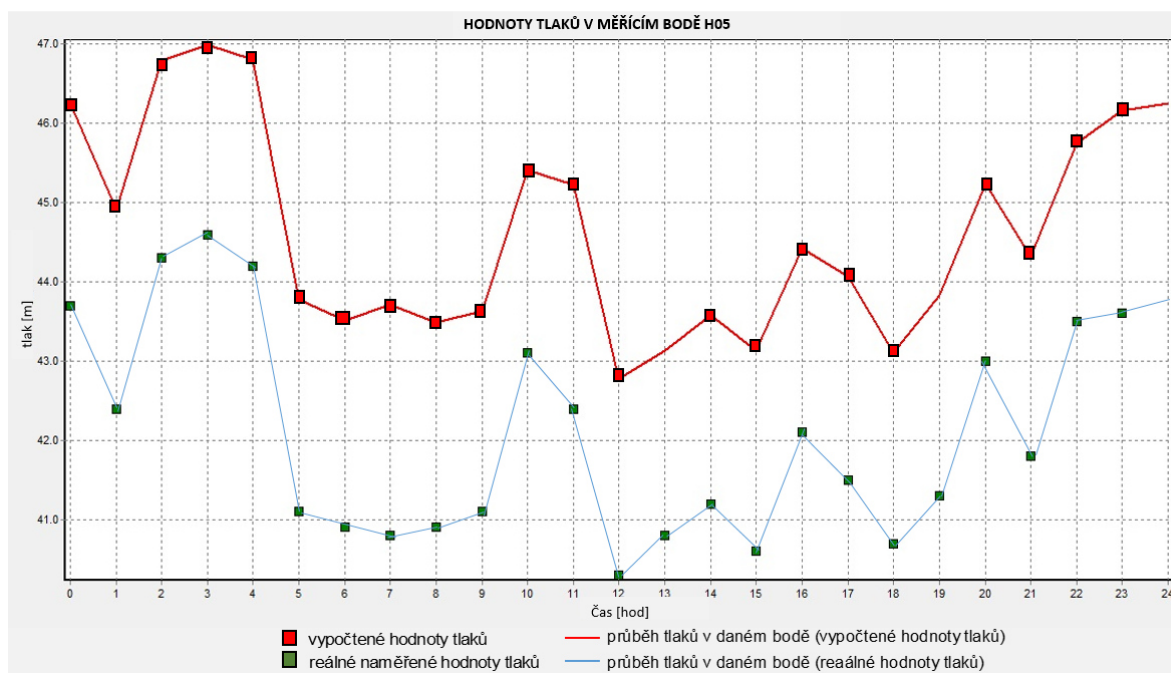
Tab. 8. Rozdíl mezi tlaky vypočtenými a tlaky naměřenými.

Označení místa měření	N06	H03	ČS07	H04	H05
Ulice	Nadávky	Zatloukalova	Zatloukalova	Pod Ostrou	Černohorská
[m v. sl.]					
Naměřený	45.6	37.1	36.1	34.2	42.8
Vypočtený	45.5	36.8	35.9	30.8	45.2
<b>Rozdíl</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>	<b>3.4</b>	<b>2.4</b>

V Tab. 8 můžeme vidět, že největší rozdíl v naměřených a vypočtených hodnotách je v měřicím bodě H04 a v bodě H05. Kvůli tomuto rozdílu se budeme věnovat při kalibraci modelu právě těmto bodům. Pro porovnání byly sestaveny dvě křivky, které můžeme vidět na následujícím obrázku Obr. 42. Červená křivka vyjadřuje kolísání vypočtených tlaků v daném bodě, naopak modrá křivka vyjadřuje kolísání reálně naměřených tlaků v daném bodě. Lze vidět, že tyto křivky mají velmi podobný průběh. Avšak co se neshoduje, jsou hodnoty tlaků. Zaměříme-li se přímo na bod H04 a na čas 20:00, kdy na tento čas byl hydraulický model kalibrován, zjistíme, že rozdíl mezi těmito hodnotami je 3,4 m v. sl. (viz černá šipka na obrázku). V ostatních bodech je rozdíl hodnot naměřených a vypočtených velmi podobný a pohybuje se okolo 3,0 m v. sl..



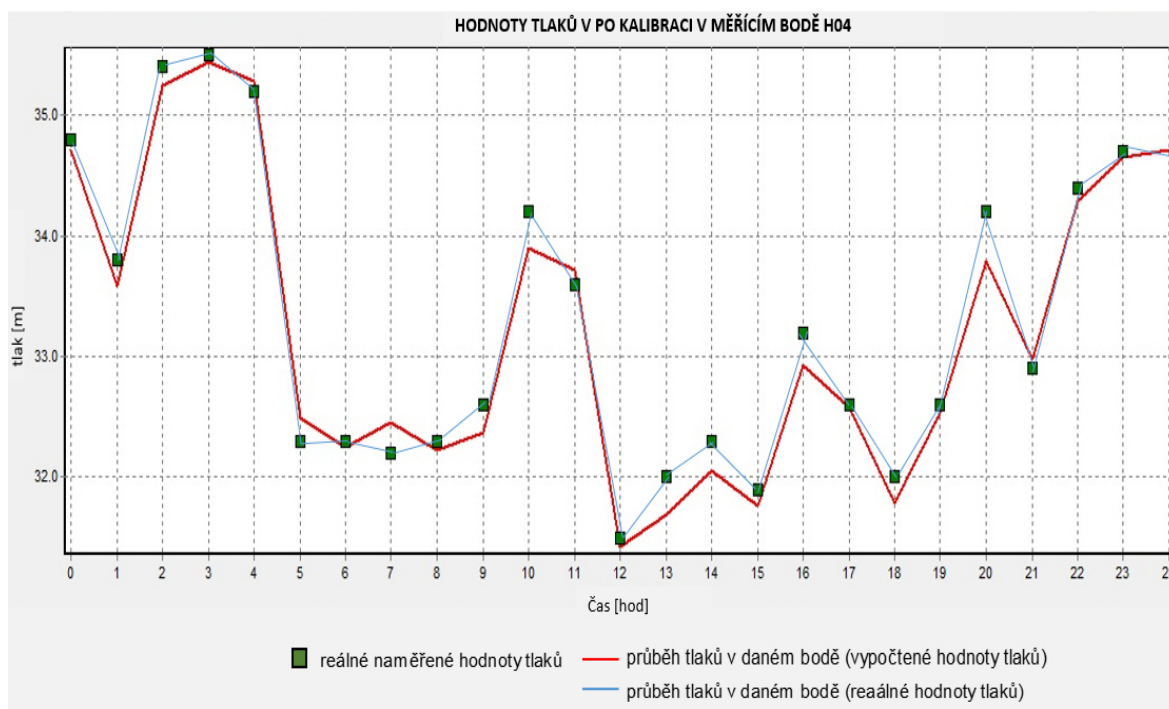
Obr. 42 Rozdíl tlaku naměřeného a tlaku vypočteného v bodě H04.



Obr. 43 Rozdíl tlaku naměřeného a tlaku vypočteného v bodě H05.

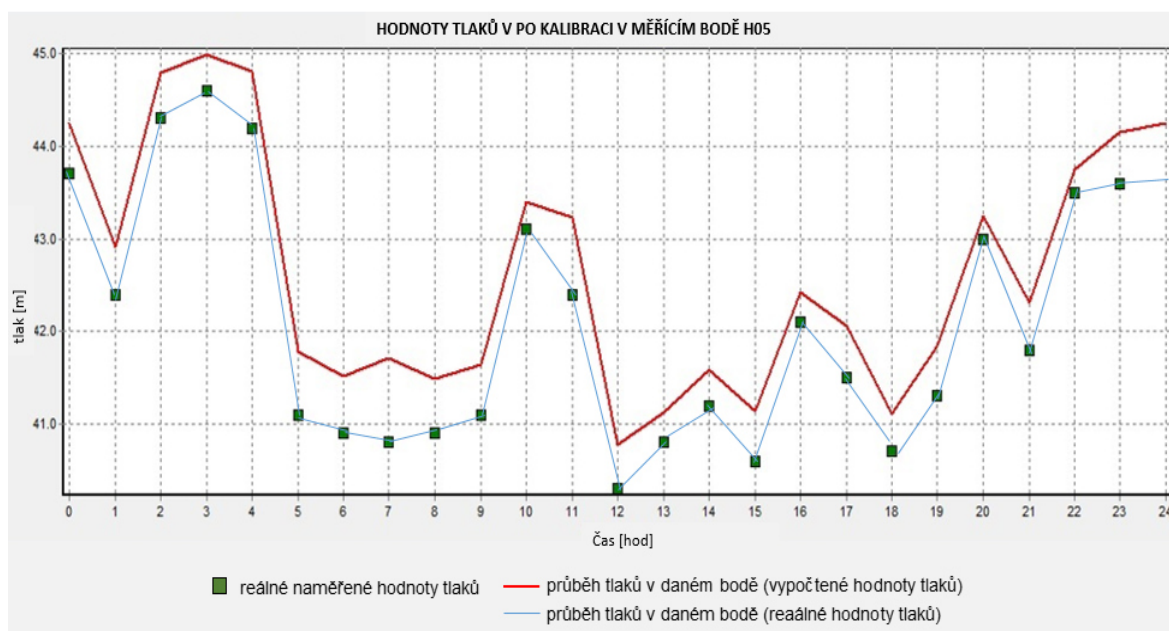
Velmi podobnou situaci, která již byla zmíněna u měřicího bodu H04, můžeme vidět i na dalším obrázku Obr. 43. V čase 20:00, rozdíl mezi hodnotou naměřenou a hodnotou vypočtenou je 2,4 m v. sl. Při kalibraci modelu se upravují vstupující hodnoty jako je drsnost a v ojedinělém případě dimenze. Tyto změny se provádí za předpokladu, že dané potrubí může být zkorodované. Avšak v našem případě lze vidět, že tato nesrovnalost tlaků není způsobena těmito veličinami. Je tedy zapotřebí zkontrolovat jiné vstupující hodnoty. V našem případě nenastala chyba ani v zadávání odběrech, okrajových podmínek či v topologii, ale nastala v odečítání nadmořských výšek bodu. Vzhledem k tomu, že daná síť nebyla zaměřena geodetem, ale pouze odečítána z internetového portálu, mohla tato chyba nastat. Po ověření této chyby a případných opravách byla provedena další simulace. Správnost kalibračního zásahu lze vidět i na následujících křivkách.

V měřícím bodě H04 se celkem z dvacetičtyř hodnot, sedm hodnot graficky shodují. Ostatní body se mírně liší. Avšak tento rozdíl mezi hodnotou naměřenou a vypočtenou je menší než 1,0 m v. sl.



Obr. 44 Rozdíl tlaku naměřeného a tlaku vypočteného v bodě H04.

V měřicím bodě H05 jsou vyšší odchylky než v bodě H04, avšak tento rozdíl mezi hodnotou naměřenou a vypočtenou je menší než 1,0 m v. sl.



Obr. 45 Rozdíl tlaku naměřeného a tlaku vypočteného v bodě H05

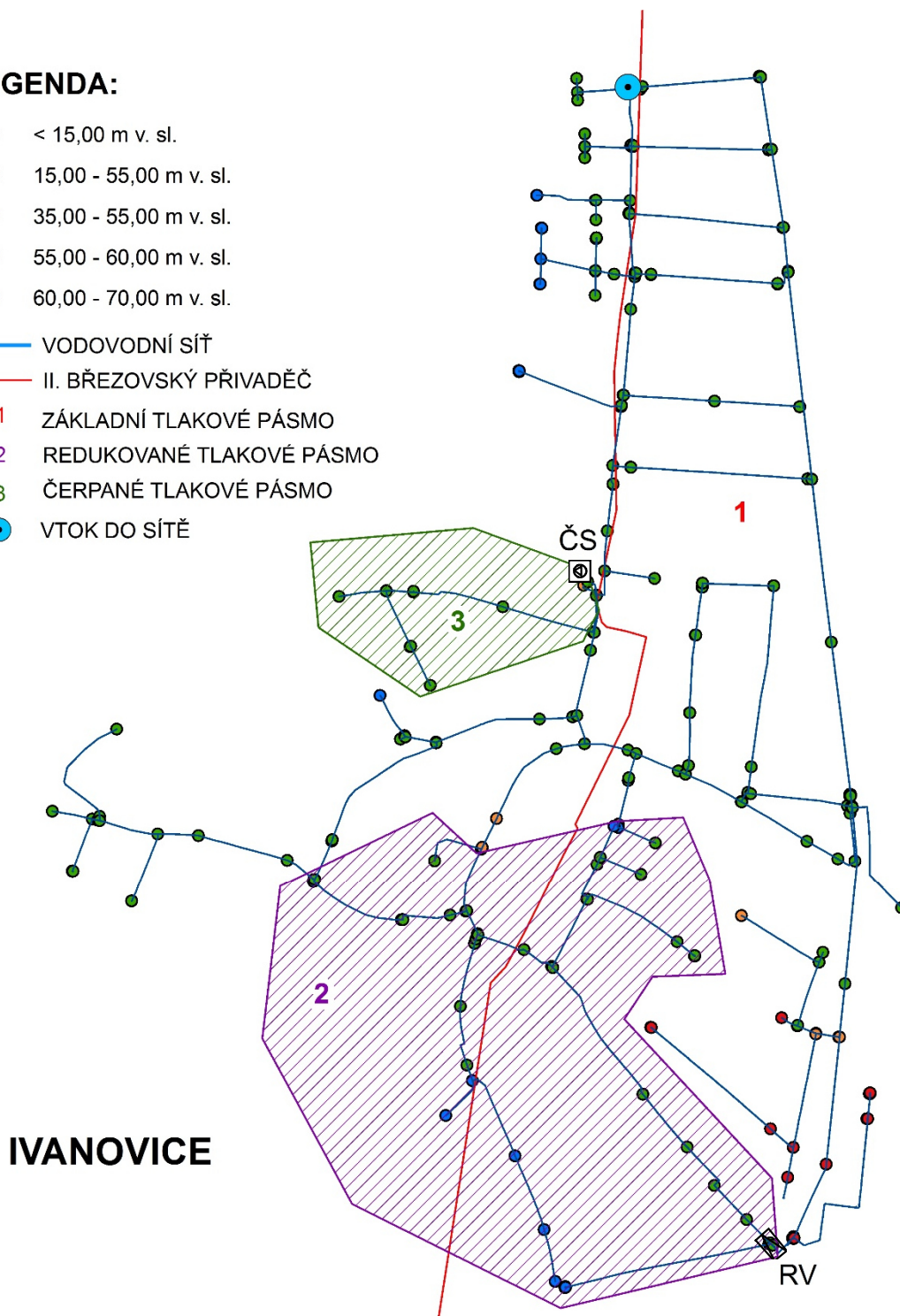
V následující Tab. 9 můžeme vidět rozdíl mezi hodnotami vypočtenými tlaky a naměřenými tlaky. Vyhodnocené naměřené údaje nelze považovat za přesné, neboť každé zařízení, které bylo použito při měrné kampani je, zatíženo určitou chybou. Nejistota měření u typů použitých čidel činí 0,5% z celkového rozsahu měření čidla, kterým je interval od 0 do 10 baru. To znamená, že chyba měření může být až 0,5 m v. sl. [21] Ukázalo se, že nepřesným odečtením nadmořských výšek byli způsobeny značné odchylky mezi naměřenou a vypočtenou hodnotou. Po úpravě daných hodnot se odchylky redukuje. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými tlaky a vypočtenými tlaky je menší než **1,0 m v. sl., s tak malým rozdílem můžeme model považovat za kalibrovaný.**

Tab. 9. Rozdíl tlaků na síti vypočtených a naměřených po kalibračním zásahu.

Označení místa měření	N06	H03	ČS07	H04	H05
Ulice	Nadávký	Zatloukalova	Zatloukalova	Pod Ostrou	Černohorská
[m v. sl.]					
Naměřený	45.6	37.1	36.1	34.2	42.8
Vypočtený	45.5	36.8	36.9	33.8	43.2
<b>Rozdíl</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.8</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>

**LEGENDA:**

- < 15,00 m v. sl.
- 15,00 - 55,00 m v. sl.
- 35,00 - 55,00 m v. sl.
- 55,00 - 60,00 m v. sl.
- 60,00 - 70,00 m v. sl.
- VODOVODNÍ SÍŤ
- II. BŘEZOVSKÝ PŘIVADĚČ
- 1 ZÁKLADNÍ TLAKOVÉ PÁSMO
- 2 REDUKOVANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- 3 ČERPANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- VTOK DO SÍTĚ

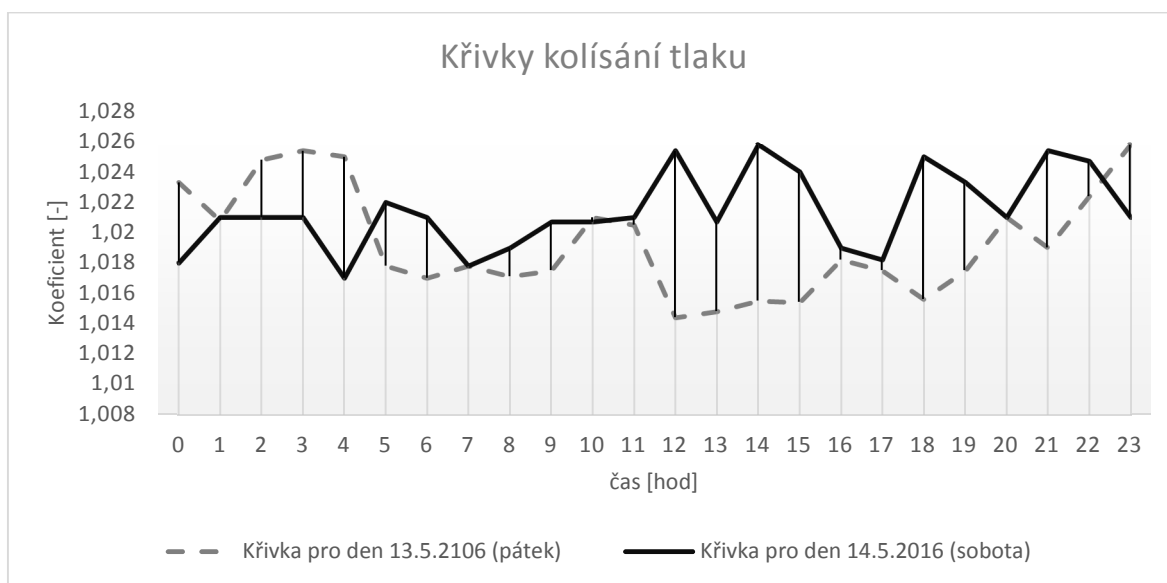


Obr. 46 Schéma tlakových poměrů ve vodovodní síti 13. května 2016 v na kalibrovaném modelu.



### 5.3.4 VERIFIKACE MODELU

V rámci ověření přesnosti modelu byla provedena verifikace modelu, kdy na kalibrovaný model byl nasimulován na jiný den. Pro tuto verifikaci modelu byl použit den 14. května 2016. Jako upravená hodnota byl vstupní tlak, který odpovídal kolísání tlaku na nátoku v simulovaný den. Na následujícím grafu můžeme vidět křivku vyjadřující kolísání tlaku během dne na nátoku. Doplňující křivkou je křivka vyjadřující kolísání tlaku v původně nasimulovaném dnu.



Obr. 47 Křivky kolísání tlaků.

Tab. 10. Porovnání naměřených tlaků a vypočtených tlaků při verifikaci modelu.

Označení:	N06	H03	ČS07	H04	H05
Ulice:	Nadávky	Zatloukalova	Zatloukalova	Pod Ostrou	Černohorská
[m v.sl.]					
Naměřený	45.1	35.3	35.4	33.4	41.9
Vypočtený	45.1	37.1	37.1	34	43.5
Rozdíl	<b>0.0</b>	<b>-1.8</b>	<b>-1.7</b>	<b>-0.6</b>	<b>-1.6</b>

Při ověření správnosti modelu jsme zjistili, že maximální odchylka od naměřených a vypočtených hodnot je 1,8 m v. sl. Budeme-li brát v úvahu ztráty, chyby při zadávání vstupních hodnot a chyby v měření na síti, můžeme považovat verifikovaný model za důvěryhodný.

## 6 POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ

V následující kapitole budou nejdříve uvedeny legislativní dokumenty, které se věnují tlakovým poměrům. Na závěr bude provedeno posouzení tlakových poměrů vodovodní sítě v městské části Brno-Ivanovice na základě těchto předpisů.

### 6.1 POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ DLE LEGISLATIVY

***Vyhláška č. 428/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva zemědělství, kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích)*** [22]

Jedná se o jeden z nejzákladnějších technických předpisů ve vodním hospodářství. V dané vyhlášce v části sedmé *Technické požadavky na stavbu vodovodů* je definován maximální přetlak v nejnižších místech vodovodní sítě každého tlakového pásma, tato hodnota nesmí přesáhnout hodnotu 0,60 MPa, v odůvodněných případech se může zvýšit až na 0,70 MPa. Dále je definován minimální hydrodynamický přetlak v rozvodné síti. Při zástavbě do dvou nadzemních podlaží v místě napojení vodovodní přípojky nesmí přetlak dosáhnout hodnoty nižší než 0,15 MPa. Při zástavbě nad dvě nadzemní podlaží nejméně 0,25 MPa.

***ČSN EN 805 dříve Česká technická norma ČSN 755011 – Vodárenství na vnější síti a jejich součásti*** [23]

Jedná se o normu, která je českou verzí evropské normy EN 805:2000. Tato norma se věnuje tlakům v určitých částech kapitol. Jedna z těchto kapitol nám říká, že potrubí musí být posouzeno na vnitřní přetlak při nejvyšším průtoku, nulovém průtoku a krátkodobých změnách (vodním rázu). Navrhnuté potrubí musí vydržet přechodný podtlak 0,08 MPa vzhledem k atmosférickému tlaku. Je nutno stanovit návrhový provozní přetlak a nejvyšší výpočtový přetlak. Do návrhu je nutno uvažovat i zkušební přetlak. V následující kapitole se norma zmiňuje o tom, že každý projektant musí stanovit přetlaky, nejvyšší přetlaky a zkušební přetlaky. Dle Tabulky 2 v kapitole 8.4.5 musí být v potrubí dovolený provozní přetlak větší nebo roven návrhovému přetlaku v rozvodné síti. Nejvyšší dovolený provozní přetlak v potrubí musí být větší nebo rovno nejvyššímu návrhovému přetlaku v rozvodné síti. Dovolенý zkušební přetlak na staveništi v potrubí musí být větší nebo rovno zkušebnímu přetlaku v rozvodné síti.

***Zákon č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích)*** [24]

Předmětem zákona je upravovat některé vztahy, které vznikají při rozvoji, výstavbě a provozu vodovodů či kanalizací sloužících veřejné potřebě. Upravuje také vztahy přípojek napojených na daný vodovod či kanalizaci, jakož i působnost orgánů územních

samosprávných celků a správních úřadů na tomto úseku. Zákon se vztahuje na vodovody a kanalizace, které jsou trvale využívány alespoň padesáti fyzickými osobami, nebo pokud průměrná denní produkce z ročního průměru pitné nebo odpadní vody za den je 10 m<sup>3</sup> a více. Zákon se nevztahuje na vodovody sloužící k rozvodu jiné než pitné vody, na oddílné kanalizace sloužící k odvádění povrchových vod vzniklých odtokem srážkových vod a na vodovody a kanalizace nebo jejich části, na které není připojen alespoň 1 odběratel. Jedná se o hlavní legislativní dokument ve vodním hospodářství. V případě tlaků se daný zákon zmiňuje pouze v těchto bodech:

Dle tohoto zákona je provozovatel oprávněn přerušit dodávku vody (nebo omezit) v případě, že nevyhovuje zařízení odběratele technickým požadavkům tak, že jakost nebo tlak vody ve vodovodu může ohrozit zdraví a bezpečnost osob a způsobit škodu na majetku. Při omezeném zásobování vodou pro poruchu na vodovodu, při přerušení dodávky elektrické energie a při nedostatku vody nebo z důvodu, pro který je vlastník nebo provozovatel oprávněn dodávku vody omezit nebo přerušit, není vlastník či provozovatel zodpovědný za škody a ušlý zisk vzniklé nedostatkem tlaku vody. Zákon č. 274/2001 Sb. Je platný od 2. srpna 2001, jeho účinnost od 1. ledna 2002.

### ***Česká technická norma ČSN 755401 - Navrhování vodovodního potrubí*** [25]

Daná norma doplňuje ČSN EN 805 a ČSN EN 1993-4-3 tam, kde to tyto normy umožňují nebo v oblasti, kterou tyto normy neřeší. Ve čtvrté kapitole *Všeobecné požadavky* v podkapitole 4.5 *Návrhový přetlak* jsou zmíněny parametry tlaku, které musí být při navrhování vodovodního potrubí dodrženy. Tato norma říká, že návrhový přetlak v nejnižších místech nových rozváděcích řadů, budovaných pro zásobování nových budov, nemá převyšovat hodnotu 0,60 MPa, v odůvodněných případech 0,70 MPa. Pokud tento tlak není pro vysoké budovy dostatečný je zapotřebí zařídit zařízení pro zvýšení tlaku.

Další legislativním dokumentem je ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou. [26] Tomuto legislativnímu dokumentu je věnována samostatná kapitola 6.3.

## **6.2 TLAKOVÉ POMĚRY NA VODOVODNÍ SÍTI**

Městská část Brno-Ivanovice je zásobována II. březovským přivaděčem. Voda je přiváděna z vodojemu Čebín, který se nachází v nadmořské výšce 352,60 m n. m. Nejvyšší místo v dané lokalitě se nachází v 326,0 m n. m., nejnižší místo se nachází v 275,1 m n. m. Výškový rozdíl tak činí 50,9 m. Vodovodní síť je rozdělena do tří tlakových pásem: základní tlakové pásmo, redukované tlakové pásmo a čerpané tlakové pásmo. Bylo provedeno posouzení tlakových poměrů na základě stanovených hodnot v již zmíněných dokumentech. Pro posouzení tlakových poměrů bude sloužit na kalibrovaný model. Simulace byla provedena na dva zatěžovací stavy.

Na zatěžovací stav ZS1, který odpovídá maximální odběru na síti. Maximální odběr na síti probíhá ve večerních hodinách mezi 19:00 až 20:00. Tyto maximální odběry jsou doprovázeny minimálními tlaky na síti. Další simulace proběhla pro zatěžovací stav ZS2, který odpovídá minimálnímu nočnímu odběru na síti. Minimální odběry na síti jsou v nočních hodinách mezi 1:00 až 2:00. Tyto minimální odběry na síti jsou doprovázeny maximálními tlaky na síti.

Tab. 11. Použité hodnoty průtoků.

Typ zatěžovacího stavu	Nátok do sítě	Odběr na síti	Odtok ze sítě
	[l.s <sup>-1</sup> ]		
Qp	46,70	6,74	39,96
Qh	1,30	0,29	1,01

### 6.2.1 MINIMÁLNÍ TLAKY NA SÍTI

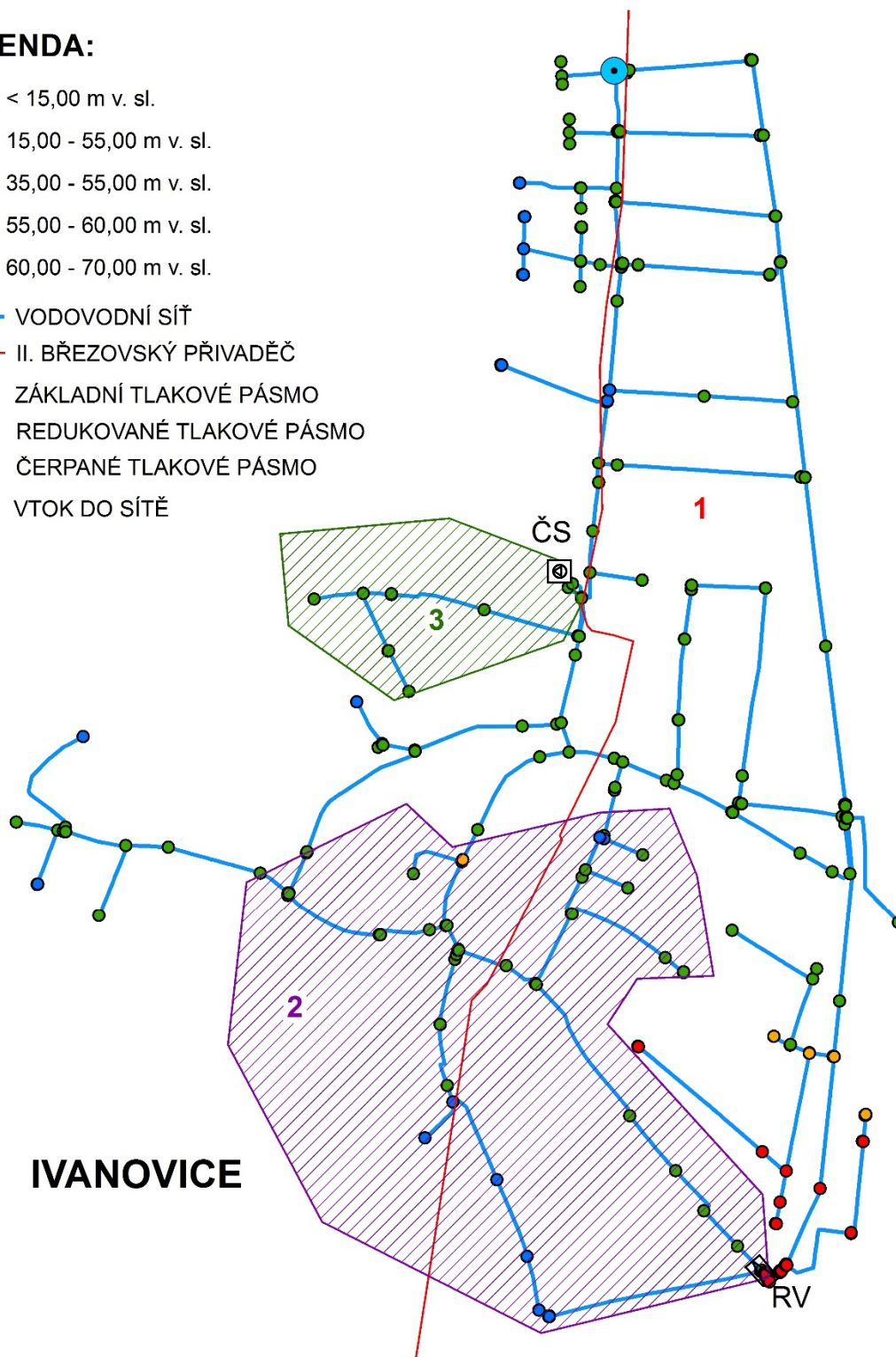
Nejnižší vyskytující se tlak dle vypočteného modelu je 22,78 m v. sl. Dle legislativy je minimální požadovaný hydrodynamický tlak pro jedno podlažní a dvoupodlažní zástavbu 0,15 MPa (15,30 m v. sl.) Pro vyšší než dvoupodlažní zástavbu je hodnota požadovaného hydrodynamického tlaku 0,25 MPa (25,50 m v. sl.) Dle Obr. 48 lze usoudit, že na síti se nenachází žádný uzel, kde by se vyskytoval hydrodynamický tlak menší než je 15,3 m v. sl. Lze tedy říci, že dle legislativních požadavků na minimální hydrodynamický tlak na síti daná lokalita splňuje podmínky. Průměrná hodnota tlaku v době nejvyššího odběru vody je 45,60 m v. sl.

### 6.2.1 MAXIMÁLNÍ TLAKY NA SÍTI

Dle legislativy je dovolený maximální hydrostatický tlak 0,60 MPa (61,20 m v. sl.), v odůvodněných případech je možné, aby hodnota dosahovala až 0,70 MPa (71,40 m v. sl.). Dle Obr. 49 lze vidět, že na síti se nacházejí i vypočtené hodnoty hydrostatického tlaku pohybující se v intervalu od 60 do 70 m v. sl. Avšak uvažujeme-li chybu měření a odchylku vypočtených hodnot od reálných hodnot můžeme říci, že daná lokalita vyhovuje legislativním požadavkům. Průměrná hodnota tlaku v době nejmenšího odběru vody je 45,70 m v. sl.

### LEGENDA:

- < 15,00 m v. sl.
- 15,00 - 55,00 m v. sl.
- 35,00 - 55,00 m v. sl.
- 55,00 - 60,00 m v. sl.
- 60,00 - 70,00 m v. sl.
- VODOVODNÍ SÍŤ
- II. BŘEZOVSKÝ PŘIVADĚČ
- 1 ZÁKLADNÍ TLAKOVÉ PÁSMO
- 2 REDUKOVANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- 3 ČERPANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- ⊙ VTOK DO SÍTĚ

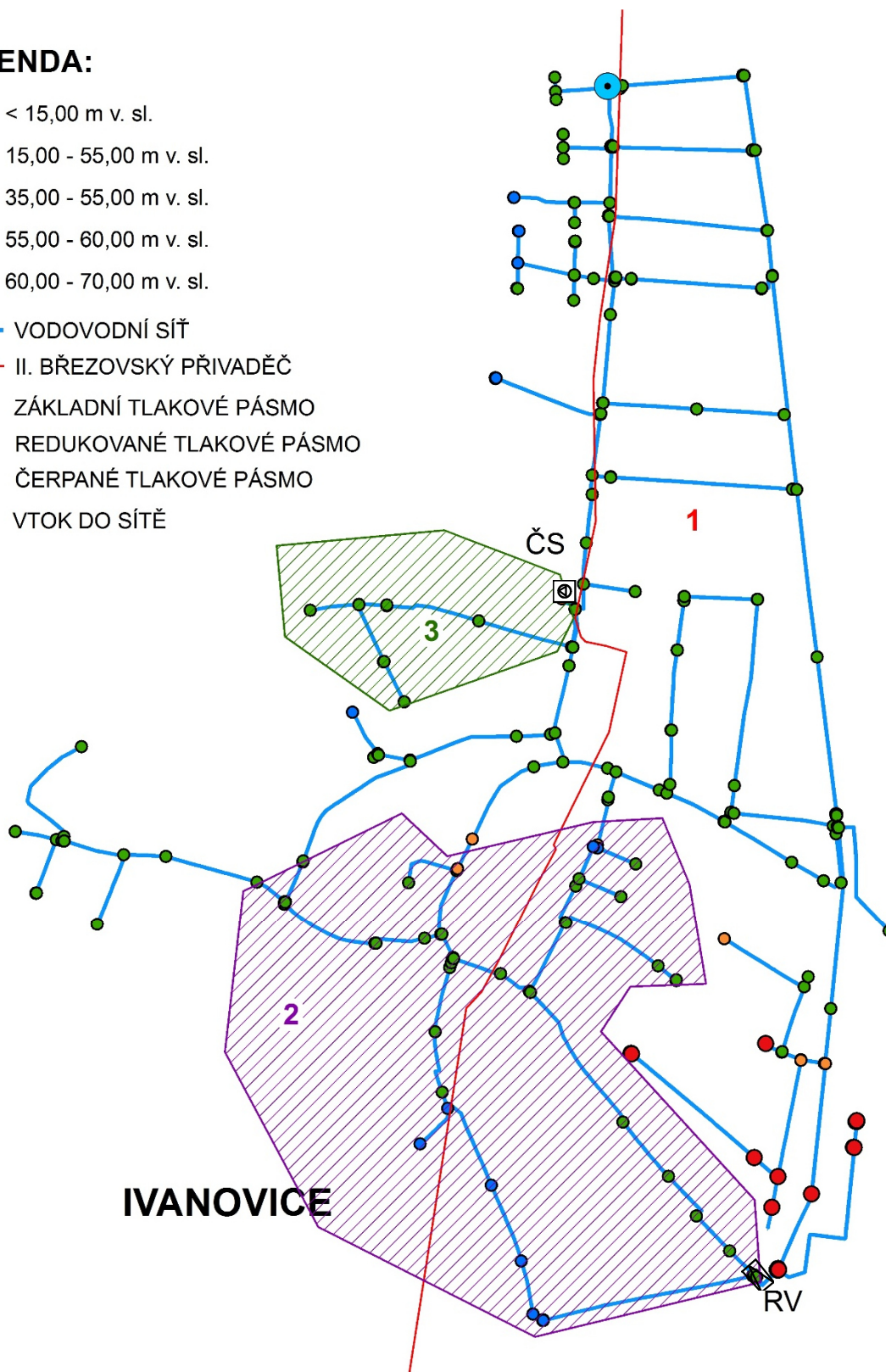


Obr. 48 Posouzení sítě na minimální hydrodynamický tlak.



### LEGENDA:

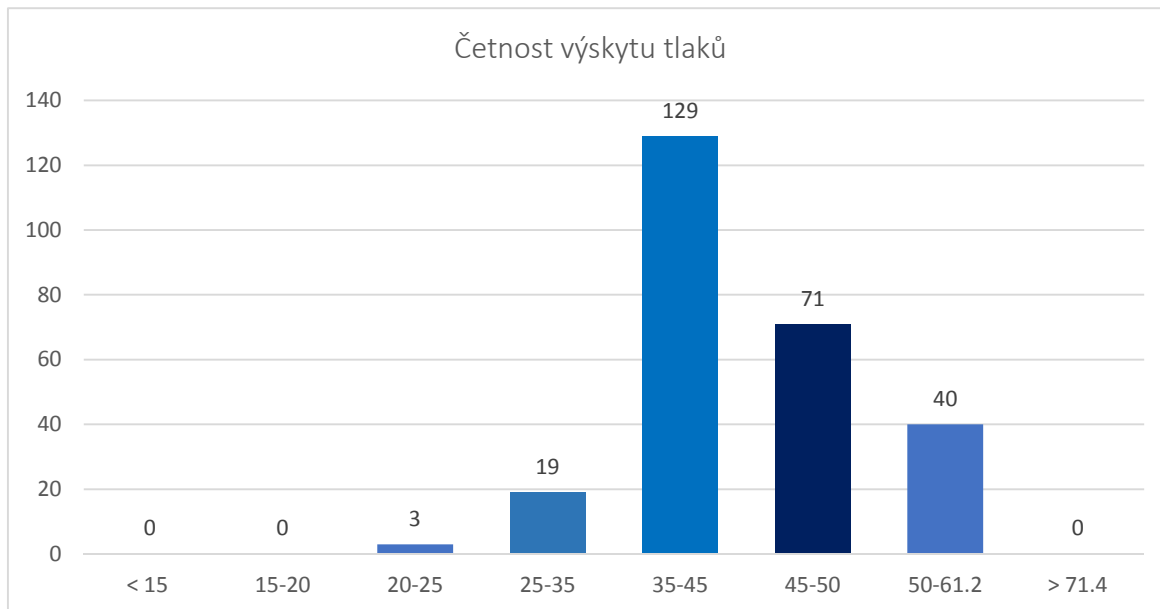
- < 15,00 m v. sl.
- 15,00 - 55,00 m v. sl.
- 35,00 - 55,00 m v. sl.
- 55,00 - 60,00 m v. sl.
- 60,00 - 70,00 m v. sl.
- VODOVODNÍ SÍŤ
- II. BŘEZOVSKÝ PŘIVADĚČ
- 1 ZÁKLADNÍ TLAKOVÉ PÁSMO
- 2 REDUKOVANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- 3 ČERPANÉ TLAKOVÉ PÁSMO
- VTOK DO SÍTĚ



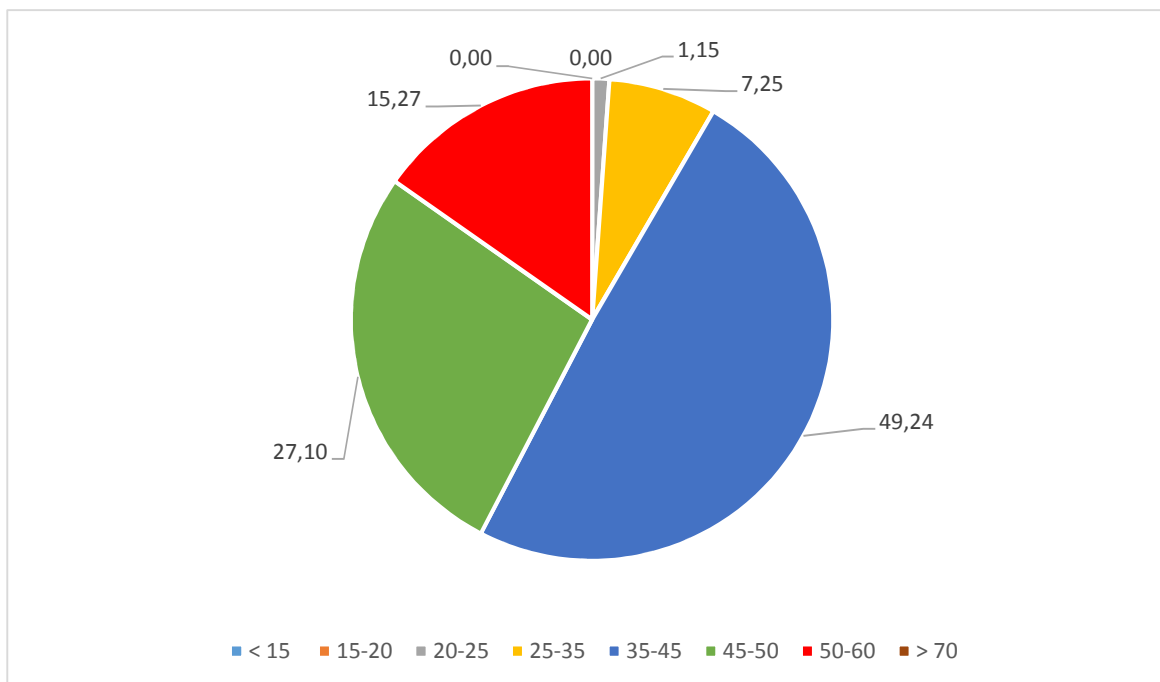
Obr. 49 Posouzení sítě na maximální hydrostatický tlak.

## 6.2.2 ROZBOR TLAKŮ VE VODOVODNÍ SÍTI

Na síti se nachází celkem 262 uzlů. Z tohoto počtu uzlů se u 49,24 % z nich pohybují tlaky v intervalu od 35,0 do 45,0 m v. sl.. Na síti se nenachází žádné uzly s hodnotou menší než je 15,3 m v. sl. a vyšší než je 71,4 m v. sl.



Obr. 50 Četnost výskytu tlaků v době maximálního odběru na síti.



Obr. 51 Procentuální zastoupení uzlů v daném intervalu tlaku.

### 6.3 POSOUZENÍ ZDROJE POŽÁRNÍ VODY

Na vodovodní síti v Ivanovicích se nachází celkem 129 hydrantů. Z toho se 5 hydrantů nachází v čerpaném tlakovém pásmu, 22 hydrantů v redukovaném tlakovém pásmu a 102 hydrantů v základním tlakovém pásmu. Vzhledem k velikosti vodovodní sítě, která činí 9,96 km je daný počet hydrantů nadbytečný. Proto je doporučeno optimalizovat počet nacházejících se hydrantů na síti.

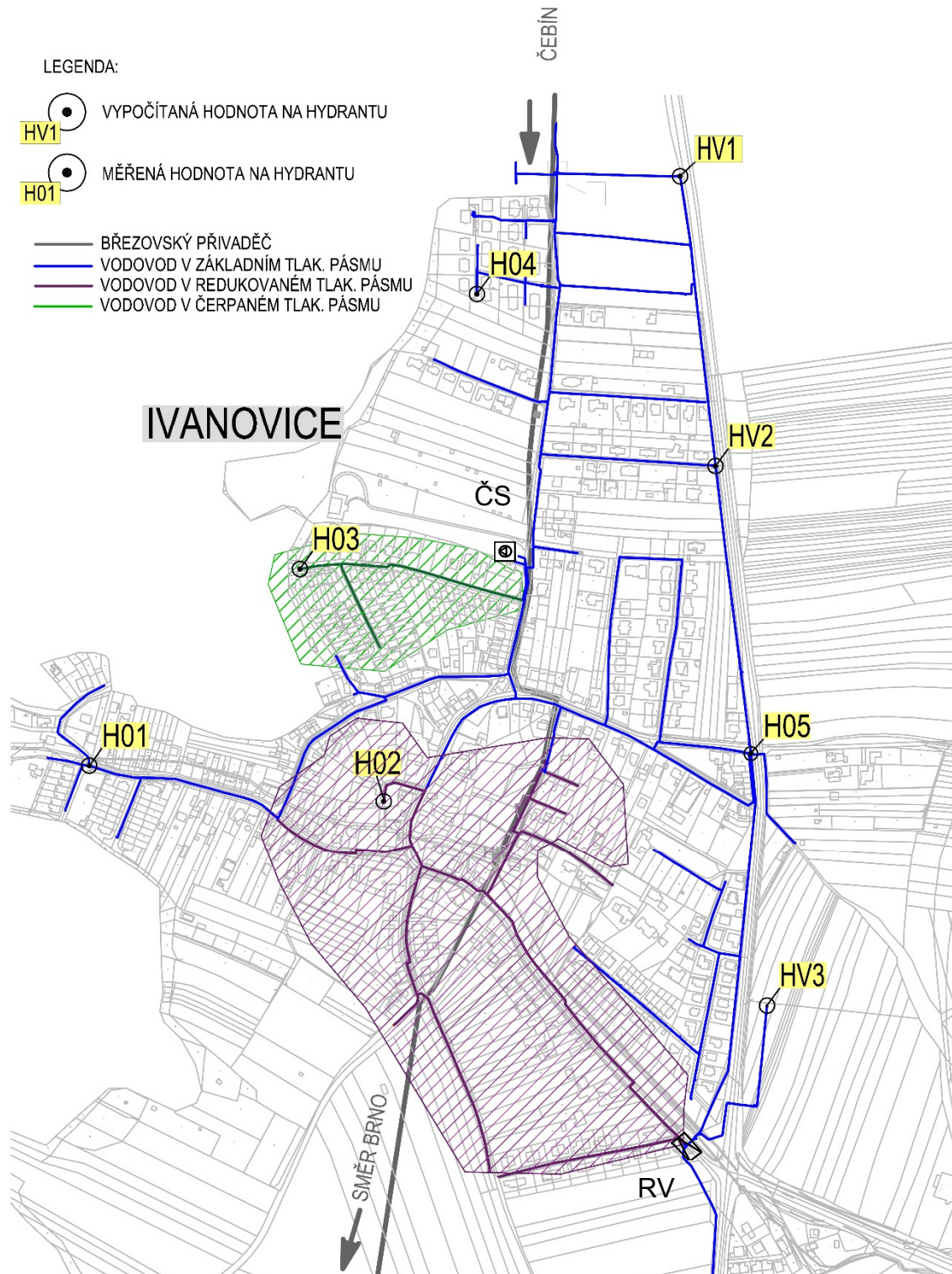
#### **ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou.** [26]

Na základě dané normy bude provedeno posouzení požární bezpečnosti v zájmové lokalitě. V místech, kde existuje riziko vzniku požáru, musí být zajištěn zdroj požární vody, který je schopen trvale zajišťovat požární vodu v předepsaném množství po dobu alespoň 30 minut. Tímto zdrojem jsou vnější odběrná místa (např. nadzemní nebo podzemní hydranty, požární výtokové stojany, plnicí místa a vodní toky) a vnitřní odběrná místa. Navrhují se zejména nadzemní hydranty, které lze navrhnout zároveň s trubním vedením pitné či užitkové vody. Požární výtokové stojany a plnicí místa se instalují nejčastěji v uzavřených areálech. V obcích a městech, tudíž i v městských částech je, dodávka požární vody přímo z vodovodní sítě častá a to především z toho důvodu, že se v blízkosti nenachází povrchové zdroje vody. [26]

Základním požadavkem jsou vzdálenosti vnějších odběrných míst, a to od objektu a mezi sebou. Tyto vzdálenosti se stanovují na základě nepravděpodobnější trasy vedení zásahu nebo jízdy požární techniky. Vzdálenosti mezi hydranty ovlivňuje druh objektu a jeho mezní plochy požárního úseku. Tyto hodnoty najdeme v již zmíněné normě v kapitole 5 v „Tabulce 1 – Největší vzdálenosti vnějších odběrných míst“. V městské části Brno-Ivanovice se nachází převážně rodinné domy do zastavěné plochy  $S \leq 200 \text{ m}^2$ , nachází se zde také nevýrobní objekt do plochy  $S \leq 120 \text{ m}^2$ . V tomto případě norma předepisuje maximální vzdálenosti od objektu 200 m a 400 m mezi sebou. V zájmové oblasti vzdálenost mezi hydranty není větší než 400 m. Z tohoto hlediska je požární bezpečnost zajištěna, uvažujeme-li, že všechny hydranty slouží k požárním účelům. Hydranty lze také osadit za účelem proplachů na síti. Dle normy a tabulky: „Tabulka 2 – Hodnoty nejmenší dimenze potrubí, odběru vody a obsahu nádrže“ je předepsána minimální jmenovitá světlost potrubí dle DN 80, kde je hydrant umístěn. Tato podmínka je v zájmové lokalitě splněna. Nejmenší odběr je  $4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  a doporučenou rychlostí v potrubí je  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [26]

U nejnepříznivějšího položeného nadzemního či podzemního hydrantu musí být zajištěný tlak minimálně 0,20 MPa (20,40 m v. sl.). Při odběru by tlak neměl dosáhnout hodnoty nižší než 0,05 MPa (5,10 m v. sl.). Byl posouzen tlak na pěti hydrantech. Hydrant H01 byl vybrán jako nejvzdálenější hydrant v redukovaném pásmu. Hydrant H02 zastupuje hydrant umístěný uprostřed dané oblasti. Hydrant H03 se nachází na nejvyšším místě v městské části.

Jeho nadmořská výška je 326,00 m n. m. Hydrant H04 zastupuje nejvýše umístěný hydrant v blízkosti napojení sítě na přívaděcí řad. V okolí hydrantů se nachází rodinná zástavba. Jako jediný posouzený nadzemní hydrant je hydrant H05. Další tři hydranty HV1, HV2, HV3 byly libovolně zvoleny na síti. [26]



Obr. 52 Tlakové posouzení požárních hydrantů.

Tab. 12. Naměřené hodnoty na hydrantech v době minimální a maximálních průtoků.

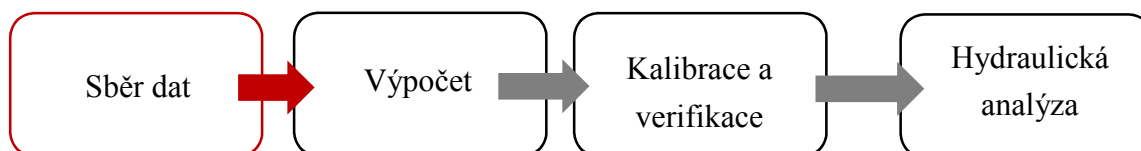
Označení	H01	H02	H03	H04	H05	HV1	HV2	HV3
Ulice	Kouty	Mácova	Zatloukalova	Pod Ostrou	Černohorská	Černohorská	Černohorská	Řečkovická
	[m v. sl.]							
ZS1 <sub>(Q<sub>max</sub>)</sub>	39,3	38,3	35,9	33,4	44,8	49,8	44,8	59,3
ZS2 <sub>(Q<sub>min</sub>)</sub>	42,0	38,6	37,1	38,4	44,8	61,8	46,9	53,5

V době minimálních nočních průtoků se dle vypočteného modelu na síti vyskytuje minimální hodnota tlaku 22,9 m v. sl.. Dle legislativy ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou [26] lze tedy říci, že daná síť splňuje předepsané požadavky. V době maximálního odběru na síti se dle vypočteného modelu na síti vyskytuje minimální hodnota tlaku 22,8 m v. sl. I v tomto případě daná síť splňuje předepsané požadavky. Rozdíly mezi předepsanou a vypočtenou minimální hodnotou tlaku jsou 2,40 až 2,50 m v. sl., proto i kdyby odchylka od reálných hodnot byla 2 m v. sl., stále jsou splněny předepsané požadavky.



## 7 VLIV KVALITY DAT

V předešlých kapitolách jsme se podrobně věnovali výpočtu matematického modelu, kalibraci a hydraulické analýze. V této kapitole se budeme věnovat první fázi modelování, a to sběru dat. Po definování cílů a očekávání od modelu je výběr a kvalita vstupních dat nejdůležitějším krokem v modelování.



Obr. 53 Fáze modelování vodovodní sítě

### 7.1 VLIV KVALITY DAT NA MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Kvalita dat je jedním z rozhodujících faktorů, které ovlivňují naše výsledky v matematickém modelování. Naše požadavky na kvalitu vystupujících hodnot z modelu ovlivňují naše nároky na kvalitu vstupujících hodnot. Neznalost této kvality dat může dojít k nadějnému očekávání na přesné a reálné výsledky. Nekvalitní data jsou ta data, která způsobují „ztrátu“, v našem případě ztrátu na reálném chování modelu.

#### 7.1.1 DATA POLOHOVÁ A POPISNÁ

Hlavním zdrojem polohových dat jsou podkladové mapy získané od vlastníka nebo provozovatele vodovodní sítě. V současné době se díky vyvíjející se technice využívají čím dál častěji geoinformační systémy (GIS). Velkou výhodou geoinformačního systému je jeho rychlá aktualizace dat v prostředí, možnost okamžitého zapsání nového stavu a rychlého získání vystupujících dat. GIS může obsahovat data o katastru nemovitostí, ortofotomapy či data z jiných využívaných systémů. Systém se využívá při identifikaci místa poruchy, při získávání informací o veškerých prvcích vodovodní sítě či nemovitém majetku, při plánování odstávek, revizí a údržby. Je proto velmi jednoduché s těmito informacemi daný objekt spravovat a na základě získaných informací rozhodovat o efektivnějším využití zdrojů a zhodnocování vynaložených prostředků. [27]

#### ***Geografický informační systém - GIS***

Geografický informační systém je třeba chápat jako souhrn výkonného hardware, software, geografických dat a vysoce kvalifikovaných odborných pracovníků. V rámci systému je řešen nejen efektivní sběr, verifikace, archivace a údržba dat, ale je zde řešeno také

poskytování jednoduchých informací a prostorové analýzy včetně uživatelských výstupů.  
[27]

Oproti GISu jsou tedy klasické mapové podklady. Pokud jsou v mapách zapsány základní informace, jsou dostačující pro sestavení matematického modelu.

Tyto podklady by měly obsahovat základní informace o:

- Délkách jednotlivých větví,
- nadmořské výšce,
- materiálu potrubí,
- dimenzi potrubí,
- stáří potrubí.

Nejdůležitější vstupující hodnotou je délka jednotlivých větví. Tyto délky nemusí být přesné, avšak dávají nám jistou představu o tom, kudy vodovodní síť vede a jak je dlouhá. Dalším důvodem, proč je tato informace podstatná, je fakt, že když tuto hodnotou budeme znát, můžeme již sestavit model sítě. V případě, kdy bychom znali pouze materiál, dimenzi anebo stáří potrubí, nemohli bychom bez znalosti trasy sítě síť sestavit. Přibližnou výškovou polohu bychom dokázali získat terénním průzkumem a následně upřesnit hodnotu díky internetovým portálům jako je [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz) nebo [www.google.cz/maps/](http://www.google.cz/maps/). Materiál potrubí, dimenze či stáří lze odhadnout na základě roku výstavby sítě anebo se jednoduše nechat informovat staršími obyvateli bydlicími v daném místě. Do modelu by byl zadán nejpravděpodobněji použitý materiál a dimenze. Na základě této informace by byla odhadnuta hodnota drsnosti.

### **7.1.2 VSTUPUJÍCÍ HODNOTY ODBĚRŮ NA SÍTI**

Dalšími vstupujícími hodnotami jsou odběry vody na síti. Tyto hodnoty lze získat dvěma způsoby. Nejsou-li k dispozici podrobná měření průtoků nebo dřívější záznamy vypočítá se potřeba vody rovnicemi. Jedná se o méně přesný způsob stanovení odběru. Zjistí se odhadnutím spotřeby vody pro domácnost na osobu a na den a vynásobí se počtem zásobovaných osob. Tato hodnota se pohybuje v rozmezí 150 l až 450 l. Už v tomto místě se dopouštíme prvních chyb. Neboť počet trvale bydlicích lidí se nerovná počtu odběratelů a specifická spotřeba vody je ve většině případů předdimenzována. V ideálním případě by bylo nejlepší variantou zjistit, kolik lidí skutečně žije v daném místě a kolik ve skutečnosti spotřebují vody a tuto hodnotu měřit v delším období. Tento způsob by byl složitý, náročný a reálný pouze u malých spotřebišť. Proto využíváme získaná data z měření. Z dostupné literatury bylo zjištěno, že jako dostačující je získání historických dat pro jednotlivá

spotřebišťe minimálně z tříletého období. Je předpokládáno, že v tomto období bude v dostatečné míře pochopeno chování distribuční vodovodní sítě a tím i stanoveny a zohledněny extrémní výkyvy proti normálu. Těchto celkových hodnot lze získat důvěryhodnou hodnotu průměrné denní spotřeby, maximální denní a maximální hodinové průtoky.

### ***Zadávání odběrů do modelu***

Abychom se přiblížili co nejvíce reálnému modelu vodovodní sítě, měli bychom v každém místě odběru vytvořit tzv. uzel a k němu přiřadit reálnou hodnotu odběru. Tento postup je složitý a časově náročný, proto není používán. Pro zjednodušení zadávání odběrů do uzlů se používá metoda redukovaných délek a metoda dvou součinitelů. Podrobněji se těmto metodám věnuje kapitola 6.3. Metoda dvou součinitelů se používá v případě, jsou-li k dispozici podrobné podklady o odběrech a o zájmové lokalitě (počet zásobovaných obyvatel, bytové jednotky, plochy zástavby). Můžeme tedy říct, že jde o přesnější metodu.

### **7.1.3 OBJEKTY NA SÍTI**

Mezi nejčastěji vyskytujícími se objekty na vodovodní síti patří redukční/regulační tlakový ventil, čerpací stanice, uzávěry a zdroje vody (vodojem, rezervoár, přivaděč).

#### ***Redukční/regulační ventil***

Základními charakteristikami redukčního/regulačního ventilu jsou profil DN, vystupující hodnota tlaku a průtokový součinitel „kv“. Průtokový součinitel „kv“ vyjadřuje množství vody [ $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ ], které protéká otevřenou armaturou při tlakovém spádu 0,1 MPa mezi vstupující hodnotou a vystupující hodnotou. [7] Je-li známo, že se na vodovodní síti nachází redukční nebo regulační ventil je, zapotřebí znát průtokový součinitel anebo hodnotu vystupující ho tlaku. Tyto hodnoty nelze odhadnout na základě znalosti jiných vstupujících hodnot kromě samotného skutečného měření. V tomto případě již lze redukční/regulační ventil navrhnout. Tyto hodnoty lze vyčíst z technické zprávy poskytnuté majitelem či provozovatelem.

#### ***Čerpací stanice***

Dalším objektem na vodovodní síti je čerpací stanice. V čerpací stanici je osazeno jedno nebo více čerpadel. Nejzákladnějšími parametry u čerpadla jsou průtok čerpadla a dopravní výška složená z výšky sací a výtlačné. Každé čerpadlo má svoji pracovní křivku, tzv. charakteristiku. Charakteristickou křivku čerpadla a veškeré informace ohledně čerpadla lze vyčíst z technické zprávy poskytnuté majitelem či provozovatelem. V případě, kdy nemáme žádné tyto informace, lze tyto hodnoty přečíst přímo v terénu na štítku nalepeném na čerpadle anebo odhadnout. Podkladem pro tento odhad nám slouží výškový popis vodovodní

sítě. Jak už bylo zmíněno v předešlé kapitole, tyto výšky mohou být vyčteny z GISU nebo z internetového portálu.

### ***Zdroj vody***

V případě modelování vodovodní sítě je důležité vědět, jaké množství vody vstupuje do sítě. Tímto zdrojem může být vodojem, rezervoár, přivaděč či studna. Například u vodojemu je nezbytné vědět výšku maximální provozní hladiny a minimální provozní hladiny ve vodojemu. U rezervoáru je důležité vědět čáru energie, která závisí na znalosti výškového popisu sítě. Tato data nám může poskytnout majitel či provozovatel anebo je můžeme vyčíst z technické zprávy. V případě, že již proběhla měrná kampaň a byly získány skutečné hodnoty tlaků na síti, lze tyto zdroje vody upravit s ohledem na reálné hodnoty.

### ***Data získaná měřením***

Máme-li sestavený model, který obsahuje materiál, dimenze, délky, je zadán zdroj vody, jsou zadány odběry a veškeré základní parametry u objektů na síti, můžeme spustit simulaci modelu. Jsou-li však vystupující hodnoty reálné, to nevíme. Před zadáváním vstupujících hodnot je důležité si ujasnit, jak kvalitní data mám nyní a jak kvalitní data budu mít po simulaci modelu. Pokud budu mít z velké části data odhadnuta, můžou se výsledné hodnoty od hodnot reálných lišit. Proto je dobré provést měrnou kampaň, která je základním podkladem pro kalibraci vodovodní sítě. Měření je založeno na měření tlaků a průtoků na vodovodní síti, a provádění hydrantových testů. Před samotným měřením je potřeba si vybrat měřicí místa neboli body, kde budu měření provádět. Množství těchto vybraných měřicích bodů je závislé na dostupné technice, přístupu k měřicím bodům a významnosti těchto bodů. Je neefektivní jak časově, tak ekonomicky osazovat měřicí techniku v těsné blízkosti.

#### **7.1.4 ZÍSKÁVÁNÍ DAT A JEJICH FINANČNÍ NÁROČNOST**

Každá část vstupujících hodnot je jinak časově a ekonomicky náročná na získání. Podkladová data, která obsahují topologii a popis sítě můžeme, rozdělit na dva druhy. První druh podkladu, jsou data vygenerovaná ze stávajícího systému. Tudíž v již minulosti proběhlo zaměření sítě a došlo k aktualizování potřebných informací. Druhým typem podkladu je, že musí před samotným modelem proběhnout zaměření sítě. Což může vést k jistým výhodám, například k tomu, že síť bude aktuální. Můžou tedy být tyto vstupující hodnoty velmi věrohodné. Avšak je to zdlouhavý proces, který je časově i finančně náročný. Díky těmto nevýhodám se jeví první možnost jako lepší. Ve spoustě případech, pokud již byl zaveden geografický informační systém v minulosti, jsou tyto mapy pořád aktualizovány. Je-li tedy vodovodní síť již změřena a doplněna o všechny potřebné popisy jedná se o podklad rychle a jednoduše dostupný. Sestavení matematického modelu a provedení hydraulické analýzy je většinou v zájmu majitele či provozovatele sítě, proto jsou

tato data poskytnuta. Vstupující hodnoty odběrů na síti můžeme považovat za finančně nenáročné. Pokud je známý počet trvale žijících obyvatel, není už problém jak finanční, tak časový si odběr vypočítat. Jsou-li k dispozici data z minulých let, měla by být zaznamenána u majitele nebo provozovatele sítě, a také poskytnuta.

Nejvíce finančně a časově náročné, zároveň nejdůležitější, je měření na síti. Časově náročné je proto, že musíme počítat s určitým časem na instalaci měřicí techniky a na samotnou dobu trvání měření. V nejideálnějším případě by mělo toto měření vystihnout veškeré zatěžovací stavy, které se mohou vyskytnout. Minimální doba trvání měření by měla být taková, aby pokryla kolísání tlaku a průtoku během pracovního dne a během víkendového dne. Můžou být také využita data ze stávajících měřicích systémů, které jsou umístěny na síti a měří tlaky a odběry celoročně. Ale pro kalibraci modelu je lepší, když je více provedených měření na síti. Z ekonomického hlediska je toto měření finančně náročné, neboť k tomuto měření je zapotřebí mít dobrou a kvalitní měřicí techniku.

### 7.1.5 VYSTUPUJÍCÍ HODNOTY

Podle typu řešené úlohy považujeme za přijatelné, je-li maximální odchylka sledované veličiny (kóta tlakové čáry, tlaky, průtok) mezi 5-10%. [10] Jak už bylo zmíněno v předešlých odstavcích, vstupující data ovlivňují přesnost výsledků simulace. Tento rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými parametry mohou způsobit právě chyby ve vstupujících hodnotách. [9] Mezi tyto chyby patří:

- Chyby ve vstupních parametrech (součinitel hydraulické drsnosti, uzlový odběr).
- Chybný popis potrubí (průměr potrubí, délky, apod.)
- Chybná topologie sítě (potrubí spojená v chybných uzlech).
- Chybné okrajové podmínky kóty tlakové čáry v jednotlivých tlakových pásmech.
- Chybné okrajové podmínky (charakteristika čerpadla, hladiny ve vodojemu atd.
- Chybně nastavené časové vazby (např. počátek a konec čerpání).
- Chyby v měření sledovaných veličin (např. špatně kalibrované odečítání hladiny ve vodojemu).
- Chyba v měření (např. špatně odečtené veličiny).



Tab. 13. Přehledný výpis vstupujících dat.

Druh dat	Podrobná data	Základní data
Data polohová a popisná	Geologický informační systém Terénní průzkum podrobný Geodetické zaměření sítě	Internetový portál Terénní průzkum
Stanovení odběrů	Data z předešlých let	Výpočet
Rozdělování odběrů	Metoda dvou součinitelů	Metoda redukovaných délek
Hydraulická analýza	Kvazi-dynamická analýza	Statická analýza
Kalibrace	Měření na síti	-
Objekty na síti	Podrobný popis	Odhadnutý popis

### 7.1.6 VSTUPUJÍCÍ HODNOTY V ZÁJMOVÉ LOKALITĚ

V praktické části diplomové práce jsme zjistili, jaká vstupující data ovlivnila přesnost matematického modelu vodovodní sítě v městské části Brno-Ivanovice. V první fázi sestavení modelu nám byla známá přesná topologie sítě (dimenze a délky) a umístění objektů na síti. Z internetového portálu nám byly poskytnuty hodnoty nadmořských výšek a počet obyvatel žijící v zájmové oblasti. Hodnota drsnosti materiálu byla stanovena pro celou vodovodní síť stejně. Množství odebírané vody bylo stanoveno výpočtem. Rozdělení odběru vody do uzlů bylo provedeno pomocí metody redukovaných délek. Na základě těchto hodnot byl sestaven základní model a provedena statická analýza na dva zatěžovací stavy (minimální a maximální průtoky). Ostatní hodnoty byly odhadnuty. Tento model nám poskytl prvotní informace o síti. Nastínil, kde by se mohly vyskytovat minimální a maximální tlaky. Do spotřebiště je přiváděna voda březovským přivaděčem a je dále přes Ivanovice dopravována do vodojemu v Řečkovících. Bez znalosti odtoku, přítoku a přesného odběru na síti nelze model považovat za přesný. Na základě sestaveného základního modelu byl sestaven model podrobný. Jednalo se o zpřesnění vstupujících hodnot, a to doplněním informací o materiálu potrubí (závisí na něm drsnost potrubí), o charakteristice čerpadla a o vystupující hodnotu tlaku z tlakového redukčního ventilu. Na základě jedné změřené reálné hodnoty tlaku na nátoku do sítě, byla upravena hodnota kóty čáry energie. Rozdělení odběru vody do uzlů bylo provedeno pomocí dvou koeficientů. Tyto dva koeficienty byly stanoveny na základě podrobnějšího popisu spotřebiště. Byla provedena statická analýza na dva zatěžovací stavy (minimální a maximální průtoky). Ostatní hodnoty byly odhadnuty. Tento model nám poskytl zpřesňující hodnoty tlaků vyskytujících se na síti. Dalším krokem bylo doplnění do podrobného modelu, již v této chvíli, všechny známé reálné hodnoty. Velmi důležitou hodnotou byly tlaky na nátoku vody do spotřebiště. Dále byla zpracována data o spotřebě vody v uplynulých měsících a z těchto dat byly získány hodnoty minimálního,

maximálního denního, maximální hodinového a průměrného denního průtoku. Poté byla provedena kvazi-dynamická analýza. Posledním krokem bylo nasimulování konkrétního dne. Dne, kdy byly známy tlaky na vstupu, průtoky na nátoku, odtoku, odběru na spotřebišti a především známy tlaky v místech, kde probíhalo měření. Na tyto tlaky byl model na kalibrován. V následující tabulce můžeme vidět rozdíly tlaků od základního modelu až po model na kalibrování.

Tab. 14. Přehled vypočítaných tlaků v modelech.

Typ modelu	Označení	H01	H02	H03	H04	H05	ČS07	H08
	Ulice:	Kouty	Mácova	Zatloukalova	Pod Ostrou	Černoohorská	Zatloukalova	Příjezdová
		[m v. sl.]						
Základní model	ZS1 (Q <sub>max</sub> )	33,5	43,5	32,4	23,9	38,4	30,0	38,4
	ZS2 (Q <sub>min</sub> )	33,6	43,6	32,5	23,9	38,4	30,0	38,4
Podrobný model	ZS1 (Q <sub>max</sub> )	44,2	38,5	43,1	34,5	49,0	40,6	49,1
	ZS2 (Q <sub>min</sub> )	44,2	38,6	43,1	34,5	49,0	40,7	49,1
Verifikovaný model	ZS1 (Q <sub>max</sub> )	39,3	38,3	35,9	33,4	44,6	36,2	45,3
	ZS2 (Q <sub>min</sub> )	42,0	38,6	37,1	35,3	44,8	38,4	46,8
Naměřené hodnoty	ZS1 (Q <sub>max</sub> )	-	-	37,1	34,2	42,8	36,1	-
	ZS2 (Q <sub>min</sub> )	-	-	37,9	35,0	44,0	36,6	-

Na základě této tabulky můžeme říci, že hodnoty od základního modelu po model nejpřesnější se lišil v určitých místech a v různých zatěžovacích stavech i o 10 m v. sl. V případě, kdy je zapotřebí znát přesné výsledky hodnoty tlaků, základní model není dostačující a je zapotřebí provést model na kalibrování.

Tab. 15. Přehled použitých průtoků v modelech.

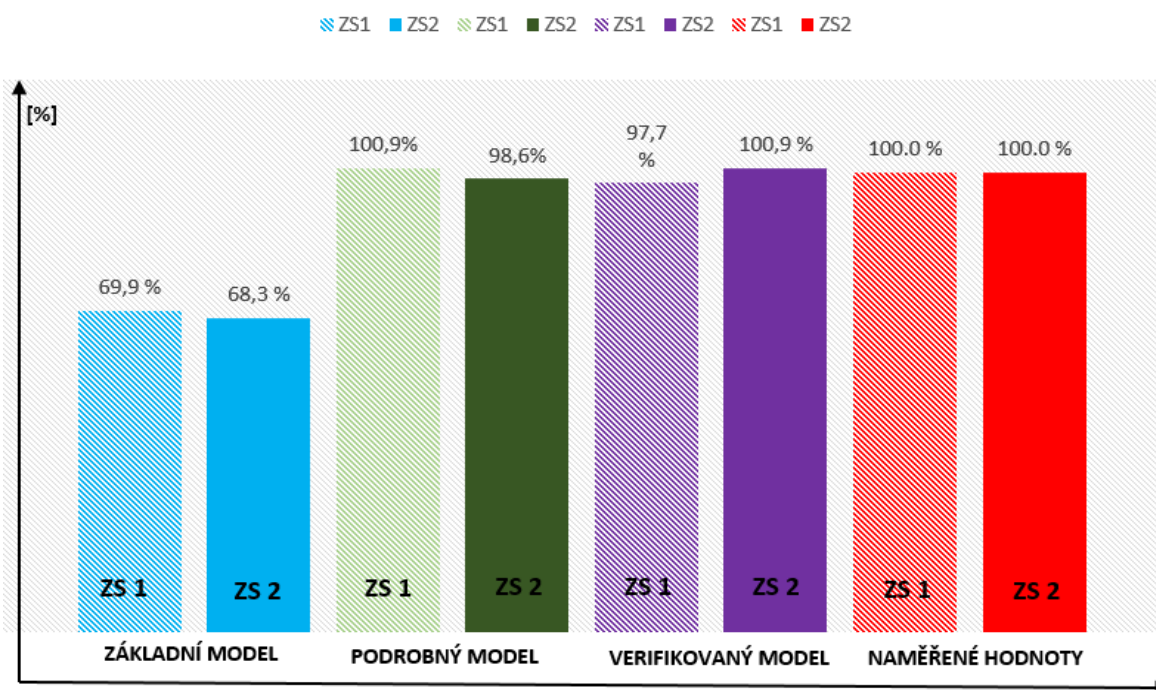
		Průtoky		
		Q <sub>p</sub>	Q <sub>h</sub>	Q <sub>min</sub>
		[l.s <sup>-1</sup> ]		
Základní model	ZS1 (Q <sub>max</sub> )	3,03	7,40	0,01
	ZS2 (Q <sub>min</sub> )	3,03	7,40	0,01
Podrobný model	ZS1 (Q <sub>max</sub> )	3,03	7,40	0,01
	ZS2 (Q <sub>min</sub> )	3,03	7,40	0,01
Verifikovaný model	ZS1 (Q <sub>max</sub> )	2,40	6,74	0,29
	ZS2 (Q <sub>min</sub> )	2,40	6,74	0,29

Co se týče odběrů, byl rozdíl u průměrného denního odběru mezi vypočtenou hodnotou a hodnotou získanou z analýzy průtoků 0,63 l.s<sup>-1</sup>. U maximálního hodinového průtoku byl rozdíl mezi vypočtenou hodnotou a hodnotou získanou z analýzy průtoků v odběru 0,60 l.s<sup>-1</sup> a u minimálního hodinového odběru byl rozdíl mezi vypočtenou hodnotou a hodnotou získanou z analýzy průtoků 0,019 l.s<sup>-1</sup>. Celková denní spotřeba vody obyvatele je 118 l.os<sup>-1</sup>den<sup>-1</sup> místo původních 150 l.os<sup>-1</sup>den<sup>-1</sup>, která byla použita při prvotních výpočtech.

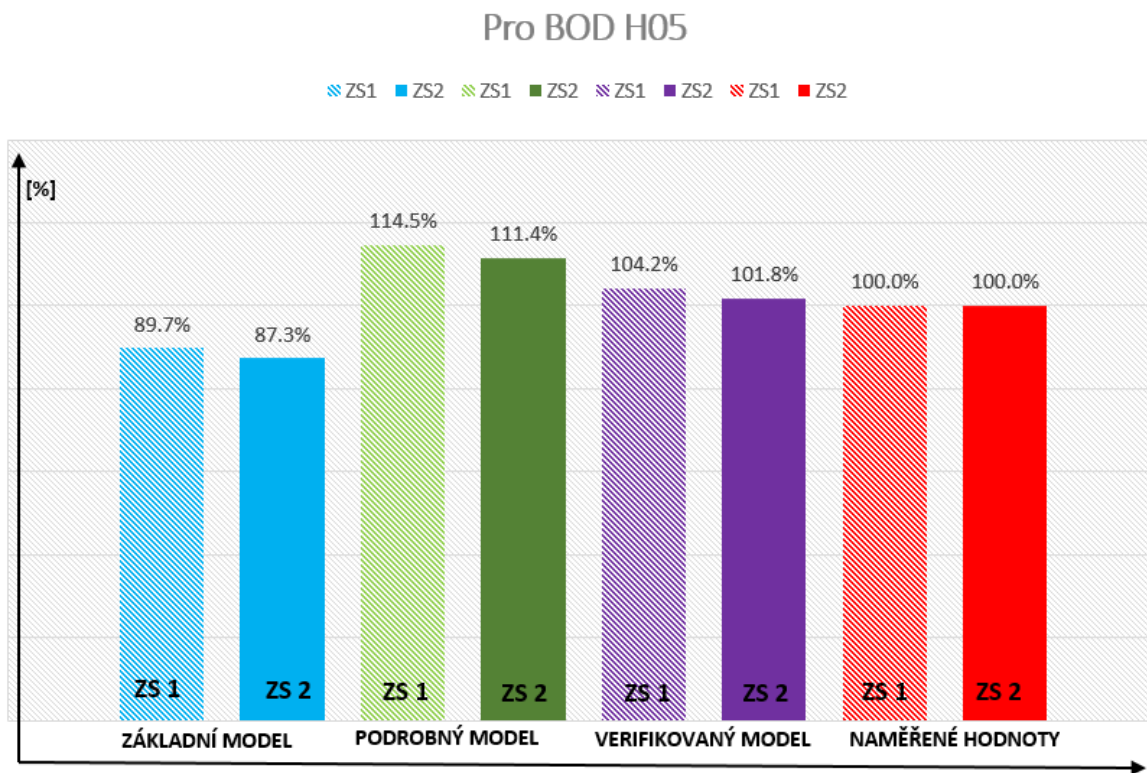
Při kalibraci modelu, viz kapitola 5.3.3 jsme zjistili, že chybou v modelu bylo odečtení nadmořských výšek. Tyto hodnoty byly pouze odečítány z internetového portálu. Konkrétní úprava nadmořské výšky proběhla v měřicím bodě H04 v ulici Pod Ostrou. Při odečtu z mapy byla hodnota nadmořské výšky zadána 311,00 m n. m. Po kalibraci byla tato hodnota změněna na 314,00 m n. m. Rozdíl odečtené hodnoty nadmořské výšky a rozdíl hodnoty nadmořské výšky po kalibraci je 3,0 m. Můžeme tedy říci, že absence geodetického zaměření sítě hrálo v tomto případě velkou roli na přesnost modelu. Avšak nejvýznamnější hodnotou v případě modelování zájmové oblasti byl vstupující tlak na nátoky vody do sítě. Po změně vstupujících tlaků do sítě dle reálných hodnot se hodnoty tlaků na síti nejvíce přiblížili k reálným hodnotám.

Porovnání výsledků, vyjádřených v procentech, si graficky ukážeme na bodě H04. Uvažujeme-li, že naměřené hodnoty vyjadřují správnost modelu na 100%, můžeme vidět rozdíly mezi modelem základním, podrobným a verifikovaným. Rozdíl výsledků v základním modelu a v naměřených hodnotách je okolo  $\pm 30\%$  u obou zatěžovacích stavů. Rozdíl výsledků v podrobném modelu a v naměřených hodnotách je 0,9 % u prvního zatěžovacího stavu a 1,4 % u druhého zatěžovacího stavu. Rozdíl výsledků mezi verifikovaným modelem a naměřenými hodnotami je 2,3 % u prvního zatěžovacího stavu a 0,9 % u druhého zatěžovacího stavu. V tomto případě můžeme vidět nejvýznamnější krok v zpřesnění výsledků mezi základním a podrobným modelem.

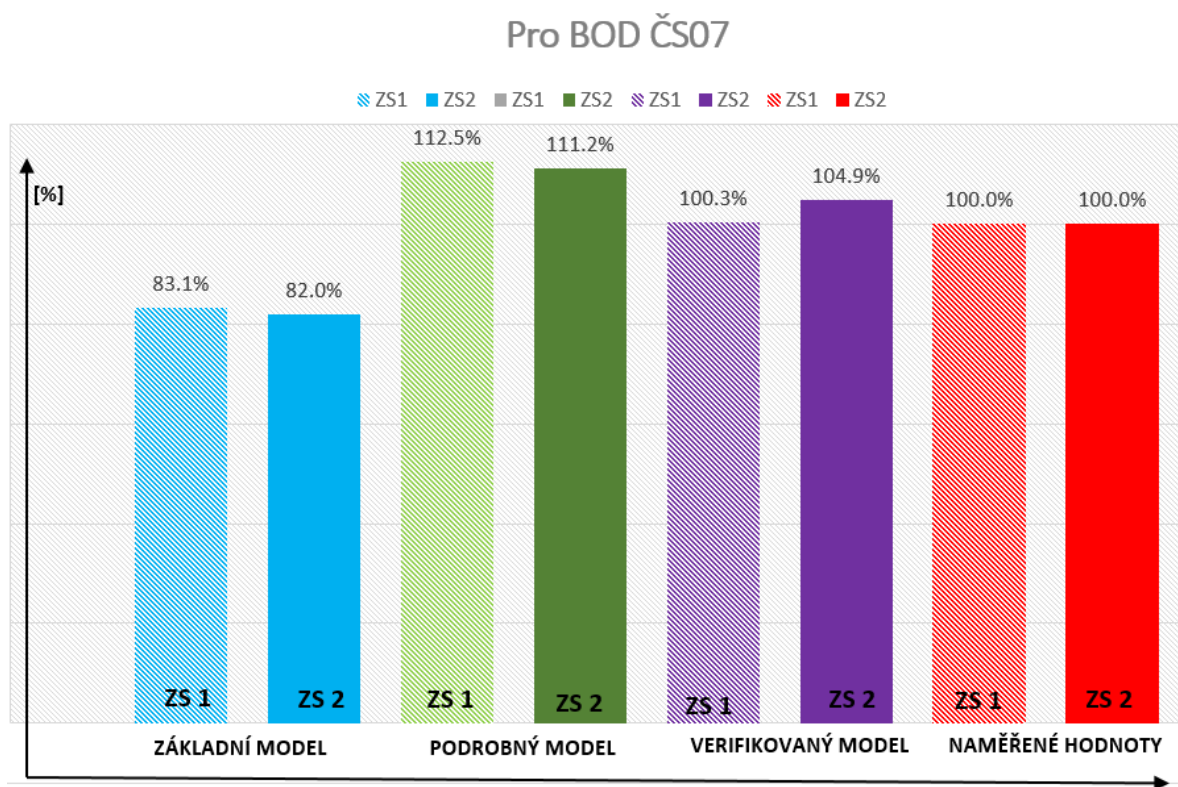
#### Pro BOD H04



Obr. 54 Grafické porovnání přesnosti modelů v bodě H04.



Obr. 55 Grafické porovnání přesnosti modelů v bodě H05.



Obr. 56 Grafické porovnání přesnosti modelu v bodě ČS07.



## 8 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na tvorbu hydraulického modelu vodovodní sítě městské části Brno-Ivanovice a na posouzení dané sítě na tlakové poměry nacházejících se ve spotřebišti. Pro sestavení hydraulického modelu byl použit softwarový program MIKE URBAN. Před samotnou tvorbou byl proveden průzkum vodovodní sítě, kdy byl zhodnocen stav podzemních a nadzemních hydrantů, pro možné osazení měřicí techniky. Poté byla provedena měrná kampaň. Na základě získaných hodnot byla provedena simulace vybraných zatěžovacích stavů, které charakterizují hydraulický režim vodovodní sítě. Cílem této práce bylo vyhodnotit přesnost hydraulických simulačních stavů při různé kvalitě a podrobnosti vstupních informací a také posoudit tlakové poměry v dané vodovodní síti.

První kapitola je věnována úvodu. Druhá kapitola je věnována obecným informacím o matematickém modelování. V této kapitole jsou zmíněny základní vztahy v modelování zjednodušující předpoklady při výpočtu a praktické využití matematických modelů. V třetí kapitole je popsána hydraulická analýza trubních tlakových sítí, a to zejména potřebná data k řešení a podmínky pro provedení hydraulické analýzy. Jsou zde také uvedeny metody hydraulické analýzy, kalibrace a verifikace modelu a používané softwarové produkty na trhu. Na závěr této kapitoly je uvedeno několik případových studií ze světa, kdy byla využita hydraulická analýza. Čtvrtá kapitola je věnována zájmové lokalitě městské části Brno-Ivanovice. Celková délka sítě činí 9,964 km. Pro lepší seznámení s obcí jsou zde uvedeny podrobné informace o obci a i také vodovodní síti, kapitola je doplněna fotografiemi. V následující kapitole je popsána měrná kampaň, která byla provedena před samotnou tvorbou modelu sítě. Je zde popsána měřicí technika a získané naměřené hodnoty z daných měřicích bodů. Celkem bylo pět měřicích bodů. V další části této kapitoly je popsána samotná tvorba modelů. A to od samotného začátku, kdy nejdříve je popsána tvorba kostry modelu, poté základní model sítě a dále podrobný model sítě. Modely se liší v přesnosti a v kvalitě vstupujících hodnot, které jsou zadávány do modelu. Závěr páté kapitoly je věnován simulaci vybraného dne. Tento model byl na kalibrován. V rámci ověření přesnosti modelu byla provedena verifikace modelu, kdy na kalibrovaný model byl nasimulován jiný den. V předposlední kapitole byla vodovodní síť posouzena na tlakové poměry dle legislativy. Byli posouzeny minimální hydrodynamické tlaky a maximální hydrostatické tlaky vyskytující se na síti. Z výsledků lze usoudit, že se na síti nenachází tlaky, které by nesplňovali podmínky dle legislativy. Tyto vyskytující se tlaky byli podrobně rozebrány a pro přehlednost znázorněny v grafech. Na závěr této kapitoly byli posouzeny zdroje požární vody dle legislativy. V rámci této podkapitoly bylo zjištěno, že na síti se nachází nadbytečný počet hydrantů. Poslední kapitola je věnována vlivu kvality dat na matematické modelování. V této kapitole jsou podrobně rozepsány vstupující hodnoty do modelů, jejich složitost a finanční náročnost na získávání. V rámci této kapitoly byla rozebrána kvalita a přesnost



vstupujících hodnot, které byly použity při tvorbě modelu zájmové oblasti. V praktické části diplomové práce byl ověřen vliv kvality vstupujících dat na přesnost výsledků vypočtených simulačním modelem. Nejvíce se projeví na přesnosti výsledků odečtené hodnoty nadmořských výšek z internetového portálu. Tento vliv kvality vstupujících dat byl klíčovým parametrem při kalibraci. Přiložené výkresy graficky zobrazují vyskytující se tlaky na síti při různém zatěžovacím stavu. Poslední příloha zobrazuje přehlednou situaci vodovodní sítě.

Byli splněny všechny zadané cíle, které jsou popsány v úvodní části a v zadání diplomové práce. V rámci této práce bylo doporučeno optimalizovat počet osazených hydrantů na vodovodní síti. Byl proveden na kalibrovaný model a následná verifikace modelu. Tato síť byla posouzena na tlakové poměry. Hlavním přínosem diplomové práce je možnost následného využití výsledků z modelu, a to v případě podrobnějšího posouzení tlakových poměrů, pro sestavení proplachovacího plánu, ověření hydraulické kapacity hydrantů nebo pro optimalizaci rozmístění podzemních či nadzemních hydrantů na síti.

## 9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Historie počítačů. Historie počítačů [online]. 2001 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: [http://historie\\_pocitacu.sweb.cz/historie\\_pocitacu1-4.htm](http://historie_pocitacu.sweb.cz/historie_pocitacu1-4.htm)
- [2] LINDELL, Orsmbee a Lingireddy SRINIVASA. Calibration of Hydraulic Network Models. Journal of the American Water Works Association. 1997, 1997(Vol. 89), pp 42-50
- [3] HŘEBÍČEK, Jiří, Zdeněk POSPÍŠIL a Jaroslav URBÁNEK. Úvod do matematického modelování s využitím Maple. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2010. ISBN 978-80-7204-691-1.
- [4] ŘÍHA, Jaromír. Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0827-8.
- [5] BERARDI, Luigi, Daniele LAUCELLI a Rita GIUSOTOLISI. Hydraulic system modelling: Background leakage model calibration in Oppegard Municipality. Procedia Engineering [online]. 2015, December 2015 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/>
- [6] <http://www.vodapitna.cz/>: Hydraulická analýza vodovodu [online]. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <http://www.vodapitna.cz/index.php/vodarenstvi/108-hydraulicka-analyza-vodovodu>
- [7] TUHOVČÁK, L.; ADLER, P.; KUČERA, T.; RACLAVSKÝ, J. Vodárenství. Vodárenství. 1. Brno: VUT v Brně, FAST, 2006.p. 1-223.
- [8] ORMSBEE, Lindell a Srinivasa LINGIREDDY. WATER DISTRIBUTION SYSTEMS HANDBOOK: Calibration of hydraulic network models. University of Kentucky. The McGraw-Hill Companies, 2004
- [9] INGEDULD, Petr a Jarmil VYČÍTAL. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VODOVODNÍCH SÍTÍ, ČÁST III. SOVAK [online]. 1999 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz>
- [10] EPANET. EPANET [online]. US Environmental Protection Agency, 2016 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/water-research/epanet#description>
- [11] Rossman, A. L., 2000. EPANET 2 Users Manual, United States Enviromental Protection Agency US E.P.A., USA 9/2000
- [12] Modeling of water distribution systems with MIKE NET. DHI Water&Environment. 2003.
- [13] INGEDULD, P.,2003. Modeling of Water Distribution Systems with MIKE NET, DHI Water&Environment, 2003
- [14] KYPIPE. Kypipe Overview [online]. 2012 [cit. 2016-17-12]. Dostupné z <http://kypipe.com/kypipe>

- [15] GAMA, Mario Castro, Emilio Attilio LANFRANCHI, Quan PAN a Andreja JONOSKI. Water distribution network model building, case study: Milano, Italy [online]. Elsevier, 2015 [cit. 2016-12-08].
- [16] DATWYLER, Trevor T. Hydraulic modeling: Pipe Network Analysis. Utah state university, 2012.
- [17] F. BOULOS, Paul, Laura B. JACOBSEN, J. Erick HEATH a SRI KAMOJJALA. Real-time modeling of water distribution systems: A case study [online]. American Water Works Association, 2014 [cit. 2016-12-08].
- [18] Brno-Ivanovice. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Brno-Ivanovice>
- [19] SebaKMT. SebaKMT: Products [online]. Germany: SebaKMT, 2016 [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <http://www.sebakmt.com/cz/homepage.html>
- [20] Radeton: DRULO [online]. Brno-Královo Pole: Radeton, 2016 [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <http://www.radeton.cz/produkt/drulo/category/66>
- [21] SUCHÁČEK, Tomáš. Hydraulická analýza vodovodního systému malého spotřebiště. Brno, 2013. 74 s., 2 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.
- [22] CHALOUPKA, Vladimír. Zákon č. 274/2001Sb., v úplném znění k 1. lednu 2003 s rozšířeným komentářem: vyhláška č. 428/2001 Sb., s komentářem. 2. vyd. se změnami reformou veřejné správy. Praha: Soudy, 2003. ISBN 80-903134-4-2.
- [23] ČSN EN 805 (755011) Vodárenství - Požadavky na vnější sítě a jejich součásti. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [24] Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). In: 428/2001. 2001.
- [25] ČSN 75 5401 Navrhování vodovodního potrubí. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [26] ČSN 73 0873 (730873) N Požární bezpečnost staveb. Zásobování požární vodou. Praha : Český normalizační institut, 1995.
- [27] HLADÍKOVÁ, Lenka. Aplikace GIS ve vodohospodářství na příkladu regionu Dobříšsko. Brno, 2010. 21 s. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze.

Přírodovědecká fakulta. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie.  
Vedoucí práce RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Zájmové území v České republice (vlevo), hranice zájmového území (vpravo). .....	24
Obr. 2	Hranice zájmového území v 19. století (vlevo), znak Ivanovic (vpravo). .....	24
Obr. 3	Přehled délek dle dimenze potrubí. ....	25
Obr. 4	Přehled délek dle materiálu potrubí. ....	26
Obr. 5	Přehledná situace s objekty na síti. ....	27
Obr. 6	Pohled na ČS stanice (vlevo), pohled na tři čerpadla (uprostřed), štítek z technickými parametry na čerpadle (vpravo). ....	28
Obr. 7	Pohled na čerpací stanici z ulice Hatě . ....	28
Obr. 8	Přehledná situace s označenými místy, kde bylo provedeno měření.....	31
Obr. 9	Podzemní hydrant v ulici Kouty. ....	32
Obr. 10	Osazena měřicí technika značky DRULO II. ....	32
Obr. 11	Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H01. ....	33
Obr. 12	Graf zobrazující detailní výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H01. ....	33
Obr. 13	Podzemní hydrant v ulici Mácova. ....	34
Obr. 14	Osazena měřicí technika značky DRULO II. ....	34
Obr. 15	Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H02. ....	35
Obr. 16	Graf zobrazující výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H02. ....	35
Obr. 17	Podzemní hydrant na ulici Zatloukalova. ....	36
Obr. 18	Osazena měřicí technika značky Seba KMT. ....	36
Obr. 19	Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H03. ....	37
Obr. 20	Graf zobrazující výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H03. ....	37
Obr. 21	Podzemní hydrant na ulici Zatloukalova. ....	38
Obr. 22	Osazena měřicí technika značky Seba KMT. ....	38
Obr. 23	Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H04. ....	39



Obr. 24	Graf zobrazující výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H04.....	39
Obr. 25	Nadzemní hydrant na ulici Černohorská.....	40
Obr. 26	Osazena měřicí technika značky Seba KMT. ....	40
Obr. 27	Graf zobrazující výskyt tlaků po celou dobu měření v měřicím bodě H05.....	41
Obr. 28	Graf zobrazující výskyt tlaků ve dnech 15. května až 16. května v měřicím bodě H05.....	41
Obr. 29	Vodoměr na odbočce z Březovského přivaděče. ....	42
Obr. 30	Vodoměr v čerpací stanici Zatloukalova. ....	43
Obr. 31	Čerpadla značky Lowar. ....	43
Obr. 32	Pohled do šachty s osazeným redukčním ventilem (vlevo). Redukční ventil CLA-VAL (vpravo). ....	44
Obr. 33	Základní hydraulický model – tlakové poměry na síti pro ZS1.....	49
Obr. 34	Podrobný hydraulický model – tlakové poměry na síti pro ZS1. ....	51
Obr. 35	Časová řada průtoků v „Redukovaném tlakovém pásmu“. ....	52
Obr. 36	Přehledná schéma vodovodní sítě.....	55
Obr. 37	Křivka 1 – vyjadřující nátok vody do sítě.....	56
Obr. 38	Křivka 2 - vyjadřující odběr vody ve spotřebišti. ....	56
Obr. 39	Křivka 3 - vyjadřující odtok vody ze spotřebišť.....	57
Obr. 40	Křivka kolísání tlaku v místě napojení na II. březovský přivaděč.....	57
Obr. 41	Schéma tlakových poměrů ve vodovodní síti 13. května 2016. ....	58
Obr. 42	Rozdíl tlaku naměřeného a tlaku vypočteného v bodě H04. ....	60
Obr. 43	Rozdíl tlaku naměřeného a tlaku vypočteného v bodě H05. ....	61
Obr. 44	Rozdíl tlaku naměřeného a tlaku vypočteného v bodě H04. ....	62
Obr. 45	Rozdíl tlaku naměřeného a tlaku vypočteného v bodě H05 .....	62
Obr. 46	Schéma tlakových poměrů ve vodovodní síti 13. května 2016 v na kalibrovaném modelu. ....	64
Obr. 47	Křivky kolísání tlaků. ....	65
Obr. 48	Posouzení sítě na minimální hydrodynamický tlak. ....	69
Obr. 49	Posouzení sítě na maximální hydrostatický tlak.....	70
		90

Obr. 50	Četnost výskytu tlaků v době maximálního odběru na síti.....	71
Obr. 51	Procentuální zastoupení uzlů v daném intervalu tlaku. ....	71
Obr. 52	Tlakové posouzení požárních hydrantů. ....	73
Obr. 53	Fáze modelování vodovodní sítě .....	75
Obr. 54	Grafické porovnání přesnosti modelů v bodě H04. ....	82
Obr. 55	Grafické porovnání přesnosti modelů v bodě H05. ....	83
Obr. 56	Grafické porovnání přesnosti modelu v bodě ČS07. ....	83

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.	Celkový přehled délek dle dimenze potrubí. ....	25
Tab. 2.	Celkový přehled délek dle materiálu potrubí. ....	26
Tab. 3.	Přehledná tabulka hodnot tlaků v naměřených místech. ....	44
Tab. 4.	Přehled hodnot zatěžovacích stavů pro statickou analýzu. ....	48
Tab. 5.	Vybraná data z průtoků v redukovaném tlakovém pásmu. ....	53
Tab. 6.	Stanovení průtoků v „Redukovaném tlakovém pásmu“. ....	54
Tab. 7.	Reálné hodnoty tlaků v průběhu dne 13. května 2016. ....	59
Tab. 8.	Rozdíl mezi tlaky vypočtenými a tlaky naměřenými. ....	60
Tab. 9.	Rozdíl tlaků na síti vypočtených a naměřených po kalibračním zásahu. ....	63
Tab. 10.	Porovnání naměřených tlaků a vypočtených tlaků při verifikaci modelu. ....	65
Tab. 11.	Použité hodnoty průtoků. ....	68
Tab. 12.	Naměřené hodnoty na hydrantech v době minimální a maximálních průtoků. ....	74
Tab. 13.	Přehledný výpis vstupujících dat. ....	80
Tab. 14.	Přehled vypočítaných tlaků v modelech. ....	81
Tab. 15.	Přehled použitých průtoků v modelech. ....	81

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

př.nl.	...	před naším letopočtem	[-]
DN	...	jmenovitý vnitřní průměr potrubí	[mm]
h	...	výška	[m]
Q	...	průtok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Ci	...	redukční součinitel	[-]
%	...	procento	[-]
GIS	...	Geoinformační informační system	[-]
CAD	...	Computer Aided Design	[-]
*xls	...	Filename extension	[-]
*dxf	...	Drawing exchange format	[-]
*bmp	...	Windows Bitmap	[-]
*emf	...	Enhanced Metafile Format	[-]
*shp	...	shapefile	[-]
SWMM	...	Storm Water Management Model	[-]
EPA	...	Environmental Protection Agency	[-]
MU	...	MIKE URBAN	[-]
WMS	...	Web Map Service	[-]
X	...	souřadnice v ose X	[-]
Y	...	souřadnice v ose Y	[-]
et. al.	...	v překladu “a kolektiv”	[-]
m <sup>3</sup>	...	metr krychlový	[-]
m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup>	...	metr krychlový za hodinu	[-]
l.min <sup>-1</sup>	...	litr za minutu	[-]
km	...	kilometr	[-]
atd.	...	a tak dále	[-]

---

m n.m.	...	metrů nad mořem	[-]
ERC	...	Equivalent Residential Connection	[-]
m v. sl.	...	metr vodního sloupce	[-]
psi	...	pounds per Square Inch	[-]
ha	...	hektar	[-]
m	...	metr	[-]
mm	...	milimetr	[-]
l.s <sup>-1</sup>	...	litr za sekundu	[-]
l	...	litr	[-]
m.s <sup>-1</sup>	...	metr za sekundu	[-]
l.os <sup>-1</sup> .den <sup>-1</sup>	...	litr na osobu za den	[-]
MPa	...	megapascal	[-]
a.s.	...	akciová společnost	[-]
BVK	...	Brněnské vodárny a kanalizace	[-]
CLA-VAL	...	tlakově redukční ventil	[-]
Obr.	...	obrázek	[-]
Tab.	...	tabulka	[-]
PE	...	polyethylene	[-]
PVC	...	polyvinchlorid	[-]
LT	...	litina tvárná	[-]
OC	...	ocel	[-]
ET	...	ethylen	[-]
ul.	...	ulice	[-]
H	...	dopravní výška	[m]
SebaKMT	...	měřicí technika	[-]
DRULO II	...	měřicí technika	[-]

---

dl.	...	délka	[-]
ČOV	...	čistírna odpadních vod	[-]
ČS	...	čerpací stanice	[-]
H	...	hydrant	[-]
RV	...	redukční ventil	[-]
hod	...	hodina	[-]
H01	...	měřicí bod hydrant 01	[-]
H02	...	měřicí bod hydrant 02	[-]
H03	...	měřicí bod hydrant 03	[-]
H04	...	měřicí bod hydrant 04	[-]
H05	...	měřicí bod hydrant 05	[-]
N06	...	měřicí bod 06	[-]
N07	...	měřicí bod 07	[-]
N08	...	měřicí bod 08	[-]
ZS1	...	zatěžovací stav 1	[-]
ZS2	...	zatěžovací stav 2	[-]
k	...	drsnost potrubí	[-]
Qd	...	maximální denní potřeba vody	[l.s <sup>-1</sup> ]
Qh	...	maximální hodinová potřeba vody	[l.s <sup>-1</sup> ]
Qp	...	průměrná denní potřeba vody	[l.s <sup>-1</sup> ]
Qmin	...	minimální průtok	[l.s <sup>-1</sup> ]
kd	...	koeficient denní nerovnoměrnosti	[-]
kh	...	koeficient hodinové nerovnoměrnosti	[-]
ČSN	...	Česká státní norma	[-]
EN	...	Evropská norma	[-]
Sb.	...	sbírka	[-]



č.	...	číslo	[-]
S	...	plocha	[m <sup>2</sup> ]
kv	...	průtokový součinitel	[-]

## SEZNAM PŘÍLOH

1. Tlakové poměry ve vodovodní síti pro zatěžovací stav ZS <sub>Qp</sub>	2xA4	M 1:4000
2. Tlakové poměry ve vodovodní síti pro zatěžovací stav ZS1	2xA4	M 1:4000
3. Tlakové poměry ve vodovodní síti pro zatěžovací stav ZS2	2xA4	M 1:4000
4. Přehledná situace vodovodní sítě městské části Brno-Ivanovice	9xA4	M 1:2000

## SUMMARY

This diploma's thesis aims to model the hydraulic model of the Brno – Ivanovice water supply system. The water supply system was assessment of pressure ratios. The software MIKE URBAN for model hydraulic model of water supply system was used. At first it was carry out research this water distribution, including of condition assessment and functionality underground hydrants. Subsequently was performed measuring campaign. It was performed a simulation of the various states of loading. The aim of this thesis was to evaluate the accuracy of the simulation of hydraulic states with different quality entering values. In the second chapter was described basics of mathematical modeling. In the third chapter was described hydraulic model of water supply system. There were described methods of hydraulic models too. In this chapter was included named hydraulic analysis using in the world. The fourth chapter was devoted to an area of interest. The water mains in Brno-Ivanovice has a total length of 9,964 km. There were some photographs included in this chapter. In the next chapter was described measuring campaign. There were five measuring points in total. These measured values were used to hydraulic models. It was performed three hydraulic models in total. These models had got a different quality entering values. The outcome of this chapter is calibrated hydraulic model of water supply system. It was performed verification. The water supply system was assessment of hydrodynamic pressures and hydrostatic pressures. The last chapter described influence of quality of entering data on results. The appendix consists also of drawings, which represented pressure ratios, which are situated on water supply system. On the fourth drawing is described transparent situation of Brno-Ivanovice water supply system. The conditions of assignment were accomplished. The main goal was to provide calibrated hydraulic model. It was recommended optimize total number of hydrants.