



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

OPTIMALIZACE TLAKOVÝCH POMĚRŮ VE VODOVODNÍCH SÍTÍCH

OPTIMISATION OF PRESSURE CONDITION IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Straňák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV TUHOVČÁK, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Petr Straňák
Název	Optimalizace tlakových poměrů ve vodovodních sítích
Vedoucí práce	doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

- [1] IRONS L. at al. Pressure from customer boundary box: New data to inform system management, Sborník konference CCWI 2016, Amsterdam
- [2] BOLOGNESI, A., C. BRAGALLI, C. LENZI, S. ARTINA, G. DE MARINIS, D. SAVIĆ a F. GRANATA. Energy Efficiency Optimization in Water Distribution Systems. *Procedia Engineering* [online]. 2014, 70: 181-190 [cit. 2015-06-23]. DOI:10.1016/j.proeng.2014.02.021. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187770581400023X>
- [3] TRICARICO, C., M.S. MORLEY, R. GARGANO, Z. KAPELAN, G. DE MARINIS, D. SAVIĆ a F. GRANATA. Integrated Optimal Cost and Pressure Management for Water Distribution Systems. *Procedia Engineering* [online]. 2014, 70: 1659-1668 [cit.2015-06-23]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.183. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814001854>
- [4] NOVÁK, Pavel. Hydraulic modelling: an introduction ; principles, methods and applications. London: Spon Press, 2010, xiv, 599 s. ISBN 978-0-419-25010-4.
- [5] BAKRLÍK Marek. Posouzení a optimalizace distribuce vody ve skupinovém vodovodu. Brno, 2015. 71 s., 39 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.
- [6] ČSN EN 805 Vodárenství – Požadavky na vnější sítě a jejich součásti

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Předmětem bakalářské práce bude ověření metodiky pro stanovení optimálních tlakových poměrů na vodovodní síti. Pro konkrétní vytipovaná tlaková pásma budou shromážděná z provozní a projektové dokumentace provozovatele potřebná data, zpracován hydraulický model, vyhodnoceny aktuální tlakové poměry a proveden návrh optimalizace tlaků pomocí navržené metodiky pro stanovení optimálních tlakových poměrů ve vodovodní síti.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá tlaky ve vodovodní síti. V úvodní kapitole jsou popsány legislativní požadavky na tlaky v síti a možnosti auditů sítí. Následující kapitola se zabývá optimalizací tlakových poměrů ve vodovodní síti, popisuje pozitiva i negativa tlakové optimalizace, přibližuje způsoby ovlivnění tlaků a zběžně analyzuje vzniklé zahraniční případové studie. V závěrečné kapitole je, s pomocí programu EPANET 2.0, provedena tlaková optimalizace na fiktivní síti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tlakové poměry, optimalizace, vodovodní síť, hydraulická analýza, případová studie.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with pressure in the water distribution network. The introductory chapter describes legislative requirements for network pressures and means of network auditing. The following chapter deals with the optimization of pressure conditions in the water distribution network, describes the positive and negative aspects of pressure optimization, illustrates ways of influencing pressures, and briefly analyzes existing case studies from abroad. In the final chapter, with the help of the EPANET 2.0 program, pressure optimization is performed on the fictional network.

KEYWORDS

Pressure conditions, optimization, water distribution network, hydraulic analysis, case study.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Petr Straňák *Optimalizace tlakových poměrů ve vodovodních sítích*. Brno, 2017. 62 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2017

Petr Straňák
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Ladislavu Tuhovčákovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky, odborné vedení a vstřícnost při konzultacích u vypracování této bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Tomáši Sucháčkovi za poskytnutí materiálů a rad.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	LEGISLATIVA A BENCHMARKING	10
2.1	Legislativní požadavky na tlakové poměry ve vodovodních sítích	10
2.1.1	Česká republika	10
2.1.2	Zahraníčí	11
2.2	Výkonnostní ukazatele vodárenských systémů a jejich srovnávání	13
2.2.1	Všeobecný benchmarking vodárenských společností a vodárenských systémů	13
2.2.2	Energetický benchmarking	15
2.2.3	Srovnání technického stavu	17
3	OPTIMALIZACE TLAKOVÝCH POMĚRŮ	18
3.1	Vliv tlaku na velikost odběru vody z vodovodní sítě	19
3.1.1	Výtok kontrolovaný – u spotřebitele	19
3.1.2	Výtok nekontrolovaný – ztráty poruchami na potrubí	21
3.2	Změny tlakových poměrů	22
3.2.1	Využití malých turbín pro redukci tlaků	22
3.2.2	Použití šoupat pro regulaci tlaků	22
3.2.3	Změny v režimech vodojemů	22
3.2.4	Změny v rozvodné síti	22
3.2.5	Tlakové redukční ventily	23
3.2.6	Automatické tlakové stanice	24
3.2.7	Tlaková pásma	25
3.3	Potřeba a spotřeba vody	26
3.3.1	Potřeba vody	26
3.3.2	Spotřeba vody	27
3.4	Analýza případových studií	29
3.4.1	Typy PRV regulací	29
3.4.2	Cíle optimalizací	30
4	PŘÍPADOVÁ STUDIE – TESTOVÁNÍ	31
4.1	Matematické modelování	31
4.1.1	Typy hydraulické analýzy	31
4.1.2	Potřebná data	31
4.1.3	Zadávaní odběrů	32
4.1.4	Základní podmínky pro hydraulickou analýzu okruhových sítí	32
4.1.5	Metody hydraulické analýzy průtoků	33
4.1.6	Princip výpočtu	34
4.2	EPANET 2.0	34
4.2.1	O aplikaci	34
4.3	Případová studie	35
4.3.1	Výchozí stav – Varianta 0	35
4.3.2	Navržené opatření – Varianta A	42
4.3.3	Navržené opatření – Varianta B	43
4.3.4	Navržené opatření – Varianta C	44

4.3.5	Tlaky v zájmových uzlech	44
4.3.6	Požární událost – Varianta D	48
4.3.7	Shrnutí a zhodnocení	51
5	ZÁVĚR	54
6	POUŽITÁ LITERATURA.....	55
	SEZNAM TABULEK	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	59
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	60
	SUMMARY	62

1 ÚVOD

Člověk ke svému životu vodu nezbytně potřebuje. V moderní společnosti je voda přiváděna přímo do jednotlivých obydlí složitým komplexním systémem – vodárenskou soustavou. Jejím úkolem je zásobování obyvatel pitnou vodou. Celá vodárenská soustava je postavena na principu tlakového proudění v potrubí, které funguje na gravitačním principu, nebo čerpáním.

Pohyb reálných tekutin je velmi komplikovaný jev, proto se při jeho zkoumání dopouštíme fyzikálních zjednodušení, zavádíme pojem „ideální tekutina“, o které předpokládáme, že je dokonale nestlačitelná a neviskózní. Díky tomuto zjednodušení se můžeme pomocí matematických prostředků dobrat k určitým výsledkům, které nám umožní pochopit základní rysy chování proudící kapaliny. Tento proces výpočtů, tzv. hydraulické modelování, je dnes realizován pomocí počítačových programů. Model nám umožňuje zkoumat vlastnosti a chování sítě, ať už zcela nové či již existující, případně analyzovat vliv zásahů do sítě.

Vodovodní síť musí splňovat množství kritérií, která jsou popsána v normách. Tato kritéria existují k zajištění bezpečnosti a správné funkčnosti sítě. Jedním z nejdůležitějších kritérií je tlak, na němž závisí fungování sítě. Příliš nízký tlak by neumožňoval požadované odběry, v extrémním případě by odběr vůbec nebyl umožněn. Příliš vysoké tlaky jsou nežádoucí z důvodu zbytečně velkého namáhání sítě, neboť čím vyšší tlaky, tím vyšší síly působící na všechny součásti sítě. České normy nám specifikují, jakých tlaků má být dosahováno. Ovšem tento interval je dosti benevolentní a umožňuje tedy do jisté míry volit provozní hodnoty, jakých chceme v potrubí dosahovat.

Každá vodárenská síť je unikátní. Z tohoto důvodu jsou možnosti zásahů do tlakových poměrů velmi individuální záležitosti. Zatímco někde by byly prakticky nemožné, jinde mohou být vhodně aplikovány i ve větším množství.

Optimalizace tlaků je pro provozovatele systému žádoucí. Při správném provedení zlepšuje vlastnosti a životnost sítě. V České republice je v oblasti vodárenství velký prostor ke zlepšování, z důvodu změn politických i spotřebitelských v posledních desetiletích jsou vodovodní systémy nevhodně hydraulicky naddimenzovány a investice na jejich obnovu jsou omezené.

Tato bakalářská práce si klade za úkol přiblížit problematiku tlakových poměrů ve vodovodních sítích, legislativní rámec této problematiky, možnosti posouzení stavu sítě, způsoby tlakové optimalizace a tvorbu hydraulického modelu fiktivní vodovodní sítě.

2 LEGISLATIVA A BENCHMARKING

Tato část práce obsahuje rešerši týkající se současného stavu poznání řešené problematiky z hlediska legislativy a možnosti posuzování vodárenských systémů.

2.1 LEGISLATIVNÍ POŽADAVKY NA TLAKOVÉ POMĚRY VE VODOVODNÍCH SÍTÍCH

2.1.1 Česká republika

Legislativní požadavky ČR na tlakové poměry ve vodovodních sítích specifikují následující dokumenty:

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

Nestanovuje žádné konkrétní hodnoty, pouze obecné požadavky:

„Vodovody musí být navrženy a provedeny tak, aby bylo zabezpečeno dostatečné množství zdravotně nezávadné pitné vody pro veřejnou potřebu ve vymezeném území a aby byla zabezpečena nepřetržitá dodávka pitné vody pro odběratele. Je-li vodovod jediným zdrojem pro zásobování požární vodou, musí splňovat požadavky požární ochrany na zajištění odběru vody k hašení požáru, je-li to technicky možné.“ [1]

ČSN EN 805 Vodárenství – požadavky na vnější síť a jejich součásti

Tato norma také nestanovuje konkrétní hodnoty, ohledně tlaků říká toto:

„Projektant, s ohledem na rozhodující průtokové podmínky, stanoví pro rozvodnou síť návrhové provozní přetlaky (DP), nejvyšší výpočtové přetlaky (MDP) a zkušební přetlaky (STP).“ [2]

Provozní přetlak (Design Pressure): *„nejvyšší provozní přetlak v rozvodné síti nebo tlakovém pásmu stanovený projektantem s ohledem na budoucí rozvoj zásobování, avšak bez vodního rázu.“ [2]*

Nejvyšší výpočtový přetlak (Maximum Design Pressure): *„nejvyšší provozní přetlak v rozvodné síti nebo tlakovém pásmu stanovený projektantem s ohledem na budoucí rozvoj zásobování a zahrnující vodní ráz.“ [2]*

Zkušební přetlak (System Test Pressure): *„hydrostatický přetlak, kterým se u nově položeného potrubí zkouší jeho neporušenost a těsnost.“ [2]*

ČSN 75 54 01 – Navrhování vodovodního potrubí

Norma uvádí nejvyšší dovolené přetlaky v síti:

„Návrhový přetlak v nejnižších místech nových rozváděcích řadů, budovaných pro zásobování nových budov, nemá převyšovat hodnotu 0,6 MPa a v odůvodněných případech hodnotu 0,7 MPa. Pokud tento přetlak není pro vysoké budovy dostatečný, je v nich nutno zřídit zařízení pro zvýšení tlaku.“ [3]

Vyhláška č.428/2001 Sb. Ministerstva zemědělství, kterou se provádí zákon č.274/2001 o vodovodech a kanalizacích

Uvádí minimální i maximální tlaky:

„Maximální přetlak v nejnižších místech vodovodní sítě každého tlakového pásma nesmí převyšovat hodnotu 0,6 MPa. V odůvodněných případech se může zvýšit na 0,7 MPa. Při zástavbě do dvou nadzemních podlaží hydrodynamický přetlak v rozvodné síti musí být v místě napojení vodovodní přípojky nejméně 0,15 MPa. Při zástavbě nad dvě nadzemní podlaží nejméně 0,25 MPa.“ [4]

ČSN 73 08 73 Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou

K potřebám přetlaku norma uvádí:

„U nejneprůzračněji položeného nadzemního (podzemního) hydrantu má být zajištěn statický (zásobovací) přetlak 0,2 MPa.“ [5]

2.1.2 Zahraničí

Zmapováním legislativních požadavků ve vybraných státech se zabývali Sucháček a Tuhovčák [6].

Slovenská republika

Problematikou veřejných vodovodů a kanalizací se na Slovensku zabývá především zákon č. 442/2002 Z. z., o veřejných vodovodech a veřejných kanalizacích a o změně a doplnění zákona č. 276/2001 Z. z. o regulácii v sieťových odvetviach ve znění pozdějších předpisů. Zákon upravuje podmínky zřízení, rozvoje a provozování veřejných vodovodů a kanalizací. Tlakové poměry ve vodovodních sítích jsou dány normami STN 75 5401 - Navrhovanie vodovodných potrubí, STN 92 0400 - Požiarna bezpečnosť stavieb, vyhláška Ministerstva vnútra SR 699/2004 Z. z., o zabezpečení stavieb vodou na hasenie a vyhláška MŽP SR 684/2006 Z. z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti o technických požiadavkách na návrh, projektovú dokumentáciu a výstavbu veřejných vodovodov a veřejných kanalizací. V místě připojení na veřejný vodovod musí tlak v potrubí na přípojce splňovat podmínky [7]:

- Maximální tlak 0,60 MPa (případně 0,70 MPa),
- Minimální tlak 0,25 MPa (případně 0,15 (0,10) MPa).

Podmínka maximálního tlaku 0,6 MPa, tj. 60 m v. sl. v rozvodné síti je dána maximální hodnotou tlaku pro armatury na přípojce a v domovních rozvodech.

Podmínka minimálního tlaku 0,25 MPa, tj. 25 m v. sl., je dána požárními požadavky v případě, kdy vodovod zabezpečuje i požární potřebu. Pakliže vodovod tuto potřebu nezabezpečuje, může být tlak v přípojce snížen na 0,15 MPa v případě nejvýše dvoupodlažní zástavby. Tato hodnota může být snížena až na 0,10 MPa, je-li přípojka situovaná pod zásobovacím vodojemem nebo v odlehlých místech s maximálně dvoupodlažní zástavbou.

Anglie a Wales

Regulátorem sektoru vodárenství v Anglii a Walesu je Ofwat. Ten v roce 2008 vydal nařízení č. 594 The Water Supply and Sewerage Services (Customer Service Standards) Regulations 2008 [8]. Tento dokument k tlakům udává:

„A water undertaker must maintain, in a communication pipe serving premises supplied with water, a minimum water pressure of seven metres static head.“ [8]

Tedy, že minimální tlak v odběrném místě musí být 7 m v. sl. Nic dalšího k tlakům uvedeno není, pouze je určena pokuta £25 pro provozovatele, který nesplní tento požadavek alespoň dvakrát za měsíc po dobu jedné hodiny. Pokuta neplatí, pokud situace nastala z důvodu sucha nebo nezbytných prací na síti.

USA – Georgie

Georgia Department of Natural Resources je úřadem zabývající se zásobováním vodou v Goergii, USA. Tento úřad vydal v roce 2000 dokument Minimum Standarts for Water Systems [9], kde jsou stanoveny minimální a maximální tlaky, ale také hodnoty normálních provozních tlaků. Minimum je 20 psi (0,14 MPa) ve všech místech sítě a přípojkách, bez ohledu na průtokové poměry. Tlaky by neměly překročit hodnotu 100 psi (0,69 MPa), pokud není požadován vyšší tlak. Obvyklé pracovní tlaky by se měly pohybovat okolo 60 psi (0,41 MPa) a neměly by klesnou pod 35 psi (0,24 MPa).

Austrálie a Nový Zéland

Austrálie a Nový Zéland mají shodné předpisy pro sektor vodárenství. Vláda vydala nařízení AS-NZS 3500-1 (2003) (English): Plumbing and drainage – Part 1: Water services [10], v němž jsou specifikovány požadavky na rozsah tlaků. Nejnižší možný provozní tlak v nevzdálenější nebo nejméně hydraulicky příznivé přípojce je 0,05 MPa. Nejvyšší možný tlak na přípojce, pokud se nejedná o požární přípojku, nemá překročit hodnotu 0,50 MPa. V poznámce je uvedeno, že tlaky nad tuto hodnotu mohou způsobovat vodní ráz, sníženou životnost zařízení, spotřebičů i armatur a zvýšenou hlučnost systému.

Avšak někteří provozovatelé poskytují vyšší tlaky. Například společnost Sydney Water garantuje minimální tlak 15 m v. sl. na přípojce. V případě poklesu pod tuto hodnotu na dobu delší než 15 minut má odběratel právo na finanční kompenzaci \$35, pokud tento stav nenastal z důvodu přerušení dodávky vody [11].

Tabulka 2.1: Shrnutí legislativních požadavků na tlak ve vybraných zemích [6]

Stát	Minimální tlak [MPa]	Maximální tlak [MPa]	Poznámka
Česká republika	0,25 (0,15 ¹)	0,60 (0,70 ²)	¹)max. dvoupodlažní zástavba ²)možné uvažovat v odůvodněných případech
Slovenská republika	0,25 ³ (0,15 ¹ ;0,10 ⁴)	0,60 (0,70 ²)	³)je-li vodovod zdroj požární vody ⁴)max. dvoupodlažní zástavba, přípojka pod VDJ, odlehlá část sítě
Anglie a Wales	0,069	---	Dojde-li 2x za 28 dní k poklesu na více než hodinu, jsou stanoveny pokuty pro provozovatele.
USA (Georgie)	0,138	0,690	Doporučená hodnota provozního tlaku je 0,414 MPa, avšak neměl by tlak klesnout pod 0,241 MPa.
Austrálie a Nový Zéland	0,05 (0,15 ⁵)	0,50	⁵)často garantovaná hodnota minimálního tlaku provozovatelem

2.2 VÝKONNOSTNÍ UKAZATELE VODÁRENSKÝCH SYSTÉMŮ A JEJICH SROVNÁVÁNÍ

Aby bylo možné vůbec zvažovat optimalizaci, je nutné vědět, v jakém stavu se systém nachází a jaké jsou faktory, které mohou být ovlivněny. Každý vodárenský systém je jedinečný, proto je třeba zavést všeobecné ukazatele, jež popisují výkonnost či efektivitu, takzvaný benchmarking.

„Obecně je cílem benchmarkingu v sektoru zásobování vodou zejména objektivizovat srovnání činností a výsledků jednotlivých společností prostřednictvím jednoznačně definovaných výkonnostních ukazatelů a následně zjistit postupy, které vedou k dosažení těch nejlepších výsledků s analýzou možností jejich aplikace ve vlastní společnosti.“ [12]

Benchmarking vodárenských systémů lze rozdělit na tři základní směry:

1. Všeobecný benchmarking, hodnotící celý systém a provozní parametry
2. Energetický benchmarking, hodnotící energetickou náročnost systému
3. Technický benchmarking, hodnotící technický stav

2.2.1 Všeobecný benchmarking vodárenských společností a vodárenských systémů

Existují různé metodiky pro vyhodnocování různorodých parametrů, jak vodárenského systému, tak i údajů od provozovatele. Uvádím zde dvě celosvětové metodiky a jednu používanou v České republice.

The international benchmarking network for water and sanitation utilities – IBNET

Mezinárodní databáze IBNET, zaměřená převážně na rozvojové země, shromažďuje ukazatele od vybraných vodárenských společností (zpravidla největších) v jednotlivých zemích. Poté zprůměruje údaje získané od těchto společností, jež pak tvoří národní charakteristiku. Nesbírá ovšem údaje ze všech společností. Databáze je doplňována nárazově, společnosti nejsou legislativně povinny dodávat údaje průběžně.

Kategorie shromažďovaných údajů [12]:

- Připojenost/pokrytí sítí,
- Produkce vody,
- Spotřeba vody,
- Relativní počet pracovníků na jednotku,
- Nefakturovaná voda,
- Úroveň měřené spotřeby,
- Podíl měřené fakturované vody,
- Poruchovost,
- Kvalita zásobování,
- Tarifní složka vodného,

- Poměr tarifu obyvatelstva k průmyslovému tarifu,
- Poplatek za přípojku,
- Fakturovaná voda,
- Jednotkové náklady,
- Provozní náklady, energetická účinnost,
- Stížnosti zákazníků,
- Vodovodní síť.

V každé kategorii je několik ukazatelů, jejich počet je různý. Ve webovém rozhraní je možné ukazatele porovnávat s výsledky jednotlivých států ve vybraných letech. Výsledky je možné exportovat ve formátu MS Excel.

European benchmarking co-operation – EBC

Cílem EBC je napomáhat vodárenským společnostem v procesu zlepšování a inovování služeb a zvyšovat transparentnost nabídnutím mezinárodního benchmarkingového programu pro vodárenské systémy, který umožňuje sdílení znalostí a zkušeností v managementu a provozu.

EBC porovnává pouze výsledky a efektivnost vodárenských společností. Data jsou ověřována kontrolním panelem, srovnávajícím je s veřejně dostupnými zdroji, jako je ročenka či výroční zpráva. V případě nesrovnalostí je prováděna korekce.

Hodnocené ukazatele pro pitnou vodu [12]:

- Připojenost/pokrytí sítí,
- Kvalita vody,
- Spolehlivost (poruchovost),
- Ztráty vody,
- Kvalita služeb (stížnosti),
- Udržitelnost,
- Finance a efektivita.

Ve většině kategorií není více ukazatelů než jeden. Ve veřejně přístupné zprávě jsou vodárenské společnosti anonymizovány, neuvádějí se názvy společností, pouze číselné značení bez klíče. Ale zúčastněné společnosti mohou navštívit workshop, kde jsou výsledky diskutovány. Nezúčastněné společnosti mohou porovnat své výsledky s ostatními evropskými společnostmi skrze grafy, kde je vyznačen medián.

Water Benchmarking – WaBe

„Projekt označovaný akronymem "WaBe" je výzkumný projekt v programu COST Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR.

Základním cílem řešeného projektu je vytvoření souboru výkonnostních ukazatelů pro analýzu, posouzení, ohodnocení a benchmarking veřejných systémů zásobování pitnou vodou a vodárenských společností, které zajišťují provoz vodovodních trubních sítí, součástí bude i jednotná metodika pro odhad, výpočet a hodnocení každého z navržených ukazatelů. Projekt

si klade za cíl vytvořit internetovou aplikaci "WaBe", která umožní správu dat a provádění analýz.“ [13]

Metodika obsahuje šedesát ukazatelů rozdělených do tří základních skupin:

- Základní ukazatele,
- Doplňkové ukazatele,
- Výkonnostní ukazatele.

Projekt přináší metodiku a postupy pro odhad a výpočet každého z navržených ukazatelů. Vstupní data byla získána z veřejně dostupných zdrojů, zejména ročenek SOVAK ČR, výročních zpráv a webových stránek vodárenských společností.

2.2.2 Energetický benchmarking

Jedná se o přístup, který hodnotí a srovnává výhradně energetickou náročnost a efektivitu vodárenského systému. Avšak potřeba energie je velmi proměnným parametrem, a to převážně kvůli rozdílným výškovým poměrům v každém systému.

Energy audit of water networks

E. Cabrera [14] popisuje energetický audit distribuční sítě. Jeho analýza spočívá ve sledování vstupů a výstupů energie do systému.

Tabulka 2.2: Rozdělení druhů energie [14]

E_{input} (vstupní energie)	E_N (přírodní energie)	E_U (energie dodávána odběratelům)	E_{output} (energie vystupující ze systému)
	E_P (vnesená energie)	E_L (energie ve ztrátách vody)	
			E_F (energie ztracená třením)

Pro použití této metody je třeba hydraulická analýza a simulace dané sítě. Časové období simulace je obvykle jeden rok.

Při vyhodnocení se posuzují dvě části. První část jsou kontextové ukazatele a druhá indikátory energetické účinnosti. V kontextové části se hodnotí poměr přírodní energie v systému k celkové a také poměr mezi minimální energií pro odběratele a minimální energií pro zabezpečení požadavků sítě. V indikátorové části se hodnotí přebytek dodávané energie, energetická účinnost sítě, energie ztracená třením, energie ve ztrátách vody, dodržení energetických požadavků.

Energy efficiency indicators

C. Lenzi [15] navazuje na Camberův energetický audit. Do konceptu navíc zahrnuje čerpadla, jako významný energetický prvek.

Hodnotícím výstupem jsou 4 indikátory, 3 jsou dílčí a slouží k výpočtu čtvrtého indikátoru – celkové energetické náročnosti sítě. Dílčí indikátory jsou:

- NEE – Network energy efficiency – energetická účinnost sítě
- LEE – Leak energy efficiency – energetická účinnost (náročnost) ztrát
- PEE – Pumping energy efficiency – energetická účinnost čerpadel.

Celková účinnost sítě je vypočtena jako součin tří dílčích indikátorů:

- WSSE (Water supply energy efficiency) = NEE * LEE * PEE

Všechny indikátory nabývají hodnot 0 až 1, čím blíže číslu 1, tím je účinnost lepší, tudíž i hodnocení. Výsledné hodnocení jsou tedy 4 hodnoty v intervalu 0 až 1.

Energy auditing

A. Mamade [16] přináší standardizovaný postup pro posouzení energetické účinnosti bez potřeby hydraulického modelu. Je postaven na Camberově konceptu [14] a na způsobu bilance vody dle IWA.

Tabulka 2.3: Energetická bilance [16]

Přírodní vstupní energie	Celková vstupní energie	Energie z autorizované spotřeby	Energie dodaná odběratelům	Minimální požadovaná energie
				Nadbytečná energie*
			Energie ztracená	... v potrubí*
				... ve ventilech
... v čerpadlech				
	... turbínách			
Umělá vstupní energie	Energie ze ztrát vody	Energie zpětně získaná	... z autorizované spotřeby	
			... z vodních ztrát	
		Energie ztracená skrze ztráty vody	Energie v uzlech, kde se vyskytují ztráty vody*	
			Energie ztracená (potrubí, čerpadla, ventily, turbíny)*	
Poznámka: *) Potřebuje hydraulický model				

Po výpočtu členů v tabulce se provede hodnocení energetické náročnosti dle navržených ukazatelů:

E1 – Specifická přebytečná energie vody vstupující do systému [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$] – potenciální teoretická úspora, nelze však vzít v úvahu snížení ztrát, proto se nedoporučuje používat pro systémy s různou úrovní ztrát.

E2 – Specifická přebytečná energie fakturované vody [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$] – použitím fakturované vody lze zohlednit snížení ztrát a porovnat systémy s různou úrovní ztrát.

E3 – Poměr maximální přebytečné energie [-] – celková teoretická přebytečná potenciální energie.

Při vyhodnocení se porovnávají dosažené hodnoty. U indikátoru E1 a E2 nižší hodnota znamená vyšší účinnost. U indikátoru E3, který je vždycky větší než 1, čím blíže je k číslu 1, tím lepší výsledek.

Classification of water supply systems based on energy efficiency

Autor G. M. Lima [17] navrhuje ukazatele, které lze použít pro co nejvíce vodárenských systémů. Ohodnocení a porovnání lze provést bez matematického modelu, avšak metodika doporučuje provedení měření účinnosti čerpacích stanic. Navržené ukazatele jsou:

EI – Index účinnosti [%] – vyjadřuje účinnost stávajících čerpadel.

RC – Kapacita vodojemů [%] – vyjadřuje kapacitu vodojemů a čerpacích stanic během špičkového odběru.

RI – Drsnostní index [%] – posuzuje zvýšení drsnosti starého inkrustovaného potrubí v porovnání s novým.

CLI – Ztráta vody na přípojku [$\text{l.příp.}^{-1}.\text{den}^{-1}$] – posuzuje skutečné i zdánlivé ztráty vody ze systému.

Procentuální ukazatele mají maximální a nejpříznivější hodnotu 100 %, 0 % je nejnejpříznivější a nejnižší možná. Klasifikace ztráty vody na přípojku je rozdělením do kategorií A-E. Kategorie A je do $100 \text{ l.příp.}^{-1}.\text{den}^{-1}$, B je v rozmezí 100 až $200 \text{ l.příp.}^{-1}.\text{den}^{-1}$, C je v rozmezí 200 až $300 \text{ l.příp.}^{-1}.\text{den}^{-1}$, D je v rozmezí 300 až $400 \text{ l.příp.}^{-1}.\text{den}^{-1}$, E je vyšší než $400 \text{ l.příp.}^{-1}.\text{den}^{-1}$.

2.2.3 Srovnání technického stavu

Technický stav je velmi důležitou složkou hodnocení vodárenského systému, promítá se totiž do provozních parametrů i energetické účinnosti. Proto by systémy měly být porovnávány včetně technického stavu. Problémem může být ohodnocení z důvodu náročnosti na vstupní data.

TEA Water

Metodika TEA Water [18] pracuje s předběžným hodnocením, proto není tak náročná na čas a vstupní data, ale je dostatečně přesná pro popis technického stavu systému. Hodnotí se sedm částí – modulů: vodní zdroje, úpravny vod, příváděcí řady, vodojemy, čerpací stanice, vodovodní síť a vodovodní řady.

U každého z nich se nadále zkoumají dvě části: stavebně-technická a provozně-technologická. Konkrétní technické ukazatele jsou definovány, přičemž každý ukazatel má stanoveny faktory. Faktory jsou jediná úroveň, ve které se přímo hodnotí stav posuzované infrastruktury. Z nich se následně vypočítává hodnocení ukazatelů, částí i celého objektu.

Výsledkem je zařazení do jedné ze šesti kategorií. Kategorie A-F vyjadřuje technický stav, kde A je nejlepší možný výsledek, kategorie F znamená neakceptovatelný stav. Poslední kategorie N znamená, že nebylo vloženo dostatečné množství dat.

3 OPTIMALIZACE TLAKOVÝCH POMĚRŮ

Optimalizací tlaků v drtivé většině případů rozumíme jejich snižování. Důvody jsou primárně ekonomické, ale v některých jiných zemích, potýkajících se s nedostatkem vody, mohou být také existenční.

Jako definici tlakové optimalizace uvádí Thornton a Lambert [19]:

„Způsob řízení tlaků v systému na optimální hodnoty, zajišťující dostatečnou a efektivní dodávku k legitimnímu užívání a uživatelům, přičemž redukuje zbytečné nebo nadbytečné tlaky, odstraňující přechodné a závadné jevy v kontrole tlakových pásem, které způsobují zbytečné úniky ze systému.“ [19]

Tito autoři uvádějí i další pozitiva:

- Méně objevených závad, nízké ceny oprav, kratší opravy a jejich menší zpoždování.
- Méně neobjevených závad, snížení růstu ztrát, méně zásahů, menší objem úniků, snížení nákladů na údržbu.
- Redukce investičních nákladů, jak při stavbě nových sítí, tak při výměně stávajících.

Jiní autoři se na problematiku dívají z pohledu celkového energetického auditu, tj. snaží se snížit celkovou energetickou náročnost fungování systému. Vilanova a Balestieri [20] uvádějí přejetých 6 zásahových úrovní:

- Úroveň 1, odstranění ztrát – jedná se o nejevidentnější způsob zásahu, příkladem je snížení úniků netěsností potrubí.
- Úroveň 2, zvětšení účinnosti jednotek spotřebovávajících energii – opatření zaměřené na zlepšení technologie procesů, příkladem je náhrada starého čerpadla novým, efektivnějším.
- Úroveň 3, zvětšení účinnosti jednotek generujících energii – sladění spotřeby a výroby energie, příkladem je osazení čerpadel fungujících jako generátor do systému.
- Úroveň 4, redukce energetické náročnosti, provedení technologie – příkladem je kvalitnější trubní materiál, prodlužující životnost díla.
- Úroveň 5, disputace de/centralizace, zvážení celkového fungování systému – příkladem je vybudování nového zdroje vody místo přivádění vody z daleka. I když toto řešení není v našich podmínkách příliš reálné.
- Úroveň 6, změna chování spotřebitelů – příkladem je šetření vodou koncovými spotřebiteli.

Tito autoři se nadále zabývají konkrétními možnostmi snížení energetické náročnosti:

- Zpětné získávání hydroenergie – použití mikroturbín osazených v systému k výrobě elektrické energie, mimo samotnou výrobu elektřiny toto opatření může také fungovat jako tlakový kontrolní systém, nahrazující tlakové redukční ventily. Toto řešení je ekonomicky výhodné, protože nezbytné komponenty už jsou v typickém vodovodním systému přítomny.
- Řízení tlaků a ztrát vody – „Ztráty vody“ jsou termín zastřešující různé děje v systému, způsobující rozdíl v objemech mezi vodou vyrobenou k realizaci a vodou fakturovanou celkem. Ztrát se nelze zcela vyvarovat, mohou být pouze minimalizovány. Zahrnují úniky z vodojemů, úniky z potrubí a vodovodní sítě,

nefyzikální ztráty zastoupené chybami v měření fakturace. Pro tuto práci přepokládáme, že ztráty z potrubí jsou ty hlavní. Kontrola tlaků je ekonomicky efektivní způsob k redukci úniků vody z vodovodní sítě. Dále má za důsledek snížení výskytu nových úniků a protržení potrubí, přidružených cen oprav, výskytu přerušení dodávky vody.

- Provozní optimalizace – týká se převážně nastavení doby čerpání vody, ale také například nastavení redukčních ventilů či udržování jistých provozních hladin ve vodojemech.
- Použití efektivních čerpadel – vyhnout se tomu, aby čerpadla fungovala mimo své hydraulické optimum.
- Použití čerpadel s proměnnými otáčkami – frekvenční měniče jsou energeticky efektivní alternativa pro ovládání průtoků.
- Optimalizace akumulační kapacity a provozu vodojemů – vhodné je udržování hladiny ve vodojemu na co nejvyšší úrovni v nešpičkové době a vypnutí nátoky do vodojemu ve špičce.

Sumarizaci benefitů vlivu tlakového managementu shrnul také Lambert [21].

Tabulka 3.1: Benefity tlakového managementu [21]

Tlakový management – redukce excesivních průměrných a maximálních tlaků						
Úsporné benefity		Obslužné benefity			Zákaznické benefity	
Redukované proudění		Redukovaný výskyt prasklin a úniků				
Redukce spotřeby	Redukovaný výtok z poruch	Redukované ceny oprav, údržby a servisu	Odklad rekonstrukcí a prodloužení životnosti	Redukovaná cena aktivní kontroly úniků	Méně stížností zákazníků	Méně problémů na rozvodech a zařízeních zákazníků

3.1 VLIV TLAKU NA VELIKOST ODBĚRU VODY Z VODOVODNÍ SÍTĚ

Kromě veskrze pozitivních důsledků tlakové optimalizace může mít změna tlakových poměrů i pro provozovatele nežádoucí vliv. Ovlivní totiž nejenom vodu nefakturovanou, ale i vodu fakturovanou.

3.1.1 Výtok kontrolovaný – u spotřebitele

Jedná se o odebrání vody ze sítě odběratelem. Laicky řečeno, když si doma někdo „pustí kohoutek“.

Pro přiblížení závislosti průtoku na tlakové výšce bude použit Torricelliho vzorec pro výtok malým otvorem [22], který je odvozen z Bernoulliho rovnice. Dalšími zjednodušeními budou zanedbání přítokové rychlosti, zanedbání ztrát na výtoku a stejné tlaky na hladině a u otvoru.

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (3.1)$$

kde Q ... průtok [m^3/s],

μ ... součinitel výtoku [-],

S ... plocha otvoru [m^2],

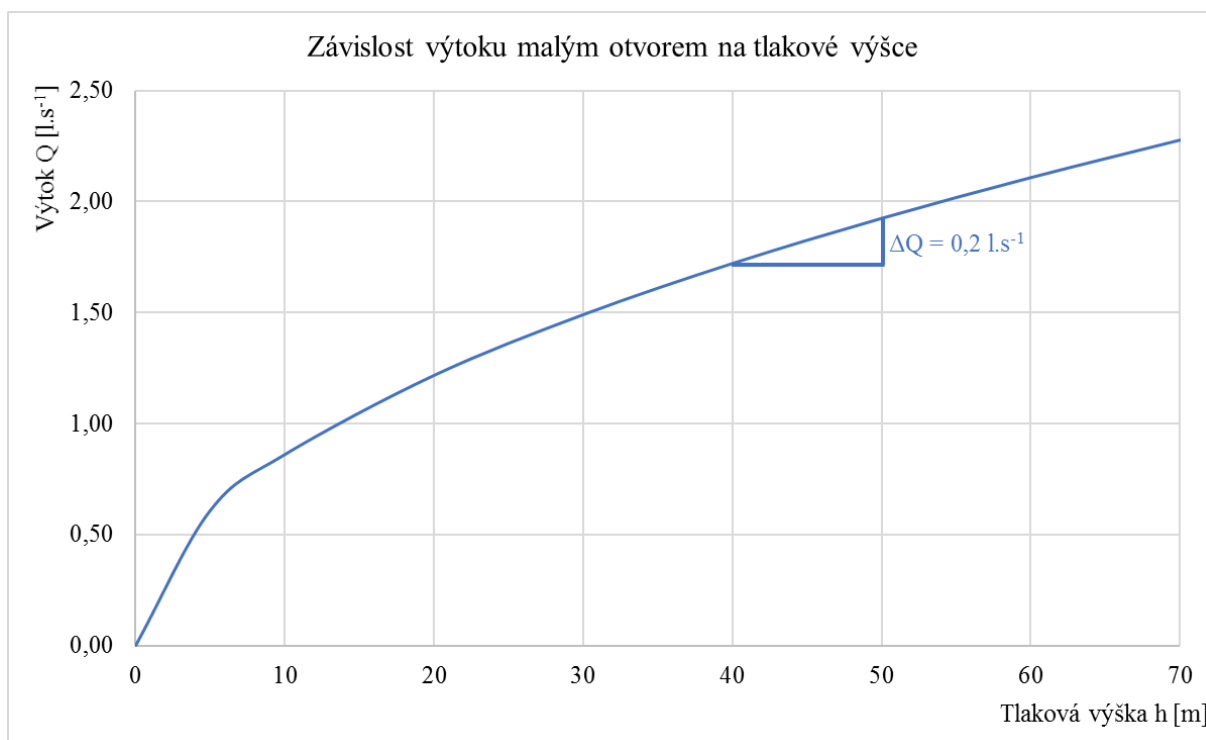
g ... gravitační zrychlení [m/s^2],

h ... výška hladiny nad otvorem [m].

Pro výpočet následující tabulky a grafu byly použity tyto hodnoty: $\mu = 0,614$; $S = 0,0001 \text{ m}^2$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; h dle tabulky.

Tabulka 3.2: Závislost výtoku malým otvorem na tlakové výšce

h [m]	70	60	50	40	30	20	10	5	0
Q [m^3/s]	0,0023	0,0021	0,0019	0,0017	0,0015	0,0012	0,0009	0,0006	0,0000
Q [l/s]	2,28	2,11	1,92	1,72	1,49	1,22	0,86	0,61	0,00



Obrázek 3.1: Graf závislosti výtoku malým otvorem na tlakové výšce

Například snížení tlakové výšky z 50 m v. sl. na 40 m v. sl. znamená snížení odběru o 0,2 litru za sekundu, což znamená rozdíl 10 %. Tlaky ale nemají vliv na všechny odběry, některé spotřebiče (např. pračka, myčka, záchodová nádržka...) odebírají vodu objemově. Tlak tedy ovlivňuje pouze přímý odběr (např. sprcha, umyvadlo, dřez...).

V jedné studii [23] bylo provedeno přesné měření pro spotřebiče s 598 odběrateli ovlivněnými tlakem (bez vlastní ATS), kde byly navýšeny tlaky ze 32 m na 39 m v. sl. Spotřeba vody ve spotřebiči, měřeno na vodoměrech odběratelů, stoupla o 11 %.

Změny tlakových poměrů ovlivní odběry vody fakturované, s čímž by provozovatelé měli počítat, pokud se rozhodnou zasahovat do tlakových poměrů.

3.1.2 Výtok nekontrolovaný – ztráty poruchami na potrubí

Pro výpočet následující tabulky byl použit vzorec 3.1. Byly použity tyto hodnoty: $\mu = 0,614$; $h = 50$ m; $g = 9,81$ m/s²; S dle tabulky. Otvor je kruhový. Smyslem tabulky je ukázat, jakých hodnot mohou dosahovat ztráty vody za rok i z malého otvoru. Ze 7 mm otvoru za rok unikne více než 23 tisíc metrů krychlových vody [22].

Tabulka 3.3: Závislost výtoku malým otvorem na velikosti otvoru

Průměr otvoru	mm	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7
Q	l/s	0,004	0,015	0,034	0,060	0,094	0,136	0,242	0,377	0,543	0,740
	l/hod	14	54	122	217	340	489	870	1 359	1 956	2 663
	m ³ /den	0,33	1,30	2,93	5,22	8,15	11,74	20,87	32,61	46,96	63,91
	m ³ /rok	119	476	1 071	1 904	2 975	4 285	7 617	11 902	17 139	23 328

Cassa podrobně zkoumal úniky vody z potrubí skrze různé typy otvorů a trhlin u různých materiálů [24]. Zkoumal tři typy otvorů: kruhové otvory, podélné trhliny, obvodové trhliny. Z materiálů se zabýval: ocelí, litinou, uPVC a azbesto-cementem. Jeho hlavním předmětem zkoumání byl vliv změny tlaků na úniky těmito otvory. Mimo očekávaných rozdílů mezi materiály (nejmenší úniky jsou u azbestovo-cementového potrubí, největší u uPVC) dospěl k dalším poznatkům:

- s rostoucí velikostí otvoru a délkou trhliny rostou úniky lineárně,
- u obvodových trhlin záleží na napětí v potrubí, pokud je kolmé na trhlínu – trhlína se otevírá a úniky jsou větší, pokud v potrubí působí napětí ve směru trhliny – trhlína se uzavírá a úniky se snižují,
- u podélných trhlin napětí v potrubí nemá vliv na úniky,
- u kruhových otvorů nemají změny tlaků vliv na exponent úniků,
- u trhlin změna tlaku ovlivňuje exponent úniků.

Exponent úniků

Rovnice 3.1 nebývá v praxi příliš používána. Užívá se obecnější rovnice úniků [25]:

$$Q = C \cdot h^{N_1}, \quad (3.2)$$

kde Q ... průtok [m³/s],

C ... koeficient úniku [-],

N₁ ... exponent úniku [-],

h ... výška hladiny nad otvorem [m].

Obvykle uvažovaná hodnota exponentu N₁ je 0,5. Nicméně různí autoři studií zjistili exponenty výrazně větší, až 2,79 [25]. Existují čtyři faktory ovlivňující hodnotu koeficientu: hydraulika úniku, materiál potrubí, hydraulika zeminy, potřeba vody. Nejvýznamnějším faktorem je materiál potrubí, protože ovlivňuje změnu velikosti otvoru při změně tlaku. Podrobně se tímto problémem zabýval Cassa [26].

3.2 ZMĚNY TLAKOVÝCH POMĚRŮ

3.2.1 Využití malých turbín pro redukci tlaků

Zpětné získávání energie ve vodárenství pomocí turbín není žádnou novinkou, ale jejich obvyklé umístění jsou přiváděcí řady, které mají velký energetický potenciál. V posledních letech však vznikají výzkumy ohledně umístění malých turbín místo redukčních ventilů, to znamená mezi jednotlivými tlakovými pásmy. Nejobvyklejší jsou zpětně protékající čerpadla (PAT = Pump As Turbine), protože jde o zcela obvyklé vodárenské zařízení. Ale mohou být použity i další typy turbín jako například Francisova či Peltonova. Zkoumáním různých typů turbín pro využití ve vodárenských sítích se zabývali Wieprecht a Kramer [27].

Zjistili, že využití turbín ve vodárenských sítích je možné, ale narazili na několik problémů:

- Nelze vždy zajistit rovné úseky před turbínou, avšak nedochází kvůli tomu k výrazné změně účinnosti.
- Zvířený odtok z turbíny má vliv na měření průtoků, ale záleží na vzdálenosti mezi turbínou a průtokoměrem, případně mohou být použity usměrňovače proudu.
- Pro kvantifikaci energetického potenciálu zatím existují jen hrubé odhady.
- Zejména v oblasti malých výkonů je realizace získávání energie nákladově velmi citlivá.
- Kvůli časově rozdílným odběrům vody často kolísají energetické potenciály.

Energie vyrobená mikroturbínou se může vhodně využít pro napájení vodárenských elektrických zařízení (např. měření, dálkové ovládání aj.) v místech, kam není přivedena elektrická energie.

3.2.2 Použití šoupat pro regulaci tlaků

Šoupata jsou přítomná v každé vodárenské síti pro případnou potřebu zastavení proudění, ať už v místech větvení potrubí či určitých vzdálenostech na úsecích. Fungují pouze v režimu plně otevřeno/zavřeno. Manipulace i pouze s jedním ventilem ovlivní celou vodárenskou síť a proudění v ní. Výhodou tohoto řešení jsou minimální náklady, protože ventily už jsou v síti přítomné. Popsaná metoda lze však použít pouze pro okružní síť a/nebo síť napájené z více zdrojů [20].

3.2.3 Změny v režimech vodojemů

Pravděpodobně nejvýraznějším opatřením pro změnu tlakových poměrů je výstavba nového vodojemu. Nový vodojem zcela změní tlakové poměry v síti. Ovšem tato varianta je dosti nákladná.

U stávajících vodojemů lze změnit režim provozu. I když toto opatření je většinou zaměřeno na snížení finanční náročnosti čerpání vody s využitím nešpičkové doby elektrické energie, lze časy čerpání ovlivnit také tlaky v síti. Zásahem do režimu funkce vodojemu jsou i změny objemů, a tedy výšky hladin. Z důvodu konstantního snižování spotřeby vody jsou vodojemy předimenzovány, proto může být tato možnost reálným opatřením [20].

3.2.4 Změny v rozvodné síti

Změny v trasách potrubí, jejich propojení a/nebo samotného potrubí. Při navrhování vodárenské soustavy je primární optimalizace zaměřena na cenu, jak prováděcí, tak i

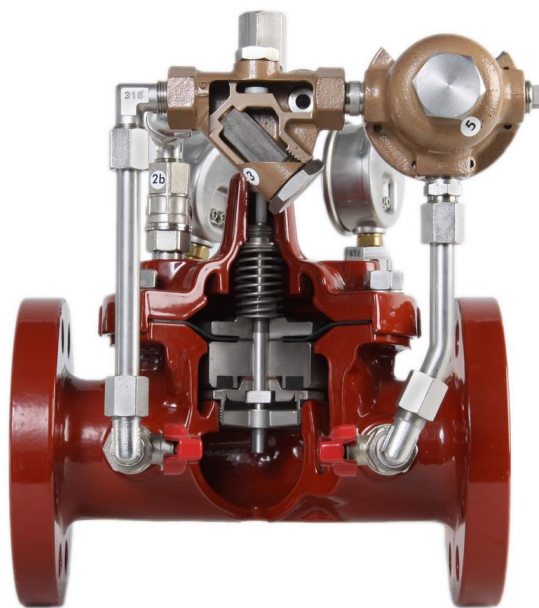
provozní. Energetická efektivnost systému je druhořadým problémem. Následné snahy o změny v tlakových poměrech jsou výsledkem snahy o minimalizaci provozních nákladů. Vhodnějším přístupem by bylo brát systém zásobování vodou jako multi-objektivní problém, jehož cílem by bylo „maximalizovat užitek sítě“ [20].

V praxi se při navrhování setkávají dva moduly [20]:

- Optimalizační modul, který tvoří algoritmy zodpovědné za optimální řešení objektivních funkcí (např. minimalizaci nákladů).
- Hydraulický simulační modul, který vytváří simulaci systémových podmínek, dle zákonů zachování hmotnosti a zachování energie, a poskytuje hydraulické charakteristiky sítě.

3.2.5 Tlakové redukční ventily

Redukce tlaků ve vodovodní síti se ve většině případů provádí pomocí tlakových redukčních ventilů (PRV = Pressure Reduction Valve). Tento způsob je však energeticky nevýhodný, protože při něm dochází k neúčinnému maření energie, která je do systému problematicky dodávána. Přesto se však jedná o jedno z nejjednodušších a nejméně nákladných řešení pro tlakovou optimalizaci.



Obrázek 3.2: Řez PRV [28]

Redukčním ventilem je výstupní tlak redukován na konstantní hodnotu, aniž by byl závislý na vstupním tlaku. To je pro použití ve vodárenství ideální, protože tlaky v síti neustále kolísají. Ventily mohou být i elektronicky ovládané a fungovat jen za určitých podmínek, pak se nazývají APM (Advanced Pressure Management – Pokročilé ovládání tlaků) [28]:

- Časové – mechanika ventilu je napojena na časovač.
- Průtočné – ventil je v reálném čase ovládán dle měřeného průtoku, je nutné osazení průtokoměru.
- Dálkově tlakové – V určitém místě sítě, obvykle v tom nejkritičtějším, je osazen tlakový senzor. V případě dosažení dané hodnoty tlaku v tomto místě, ventil je spuštěn.

Problémem při použití tlakových redukčních ventilů je jejich umístění, velmi proměnné odběry ze sítě totiž mění pozice ideálních bodů. Nevhodně umístěný PRV může negativně ovlivnit kvalitu vody, rovnoměrný odběr ze sítě a trvanlivost potrubí.

Existuje velké množství různých typů PRV, které mají různé využití. Hlavními funkcemi PRV jsou [28]:

- ochrana vodovodní sítě,
- regulace vodovodní sítě,
- ochrana potrubí a armatur,
- hlídání hladiny,
- dálkové ovládání sítě.

Ventil funguje na principu odporu pružiny proti pístu, na který působí výstupní tlak. Pokud by výstupní tlak nabyl větší hodnoty, než jaká je nastavena, ventil se uzavře, čímž tlak klesne. Tento neustálý děj udržuje výstupní tlak na nastavené hodnotě.

Pro návrh ventilu je třeba znát vstupní tlak, výstupní tlak a maximální průtok. Následně se posuzuje stupeň otevření při určitém průtoku, maximální rychlost proudění, ztráta [29].

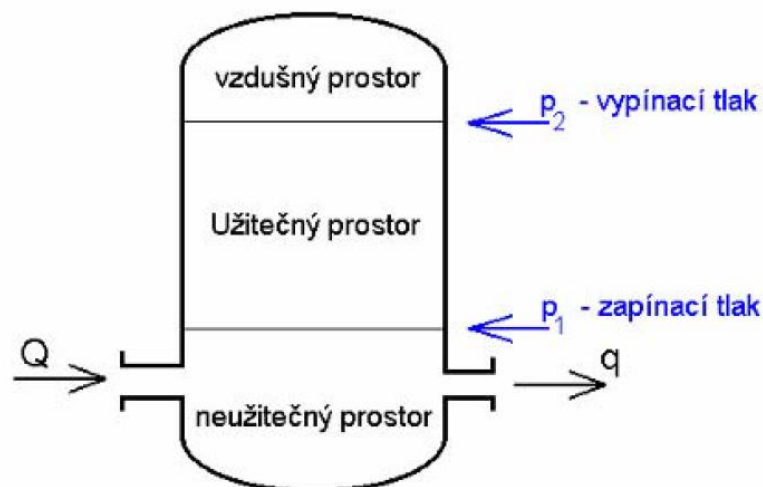
Charakterizujícím parametrem PRV je koeficient průtočnosti C_v , jehož definice je: průtok, který vytváří na plně otevřeném ventilu ztrátu 1 bar. Křivka závislosti C_v na celkovém zdvihu určuje průtočnost ventilem pro konkrétní zdvih [29].

Typy PRV jsou blíže přiblíženy v kapitole 3.4.1 Typy PRV regulací.

3.2.6 Automatické tlakové stanice

Pokud je třeba tlaky v síti zvýšit, lze do systému osadit automatickou tlakovou stanici (ATS, někdy také ZČS – zesilovací čerpací stanice). Jedná se o čerpadlo či soustavu čerpadel, které zvyšují tlak v síti za nimi. ATS se ideálně osazuje do míst, kde se skutečné tlaky v síti přibližují dolní hranici ideálního tlaku 0,35 MPa, aby byly zachovány výhodné tlakové poměry před ATS [30].

Spouštěcím impulsem je pokles tlaku. V tom okamžiku se spustí čerpadlo, které zvýší tlak vody. Obvykle je v sestavě ATS tlaková nádoba, která umožňuje na krátkou dobu (v řádech minut) udržet tlak nad požadovaným minimem bez nutnosti neustálého spouštění čerpadla. Po opětovném poklesu tlaku se znovu spustí čerpadlo a tlak se opět zvýší.



Obrázek 3.3: Princip ATS [30]

Výhody ATS [30]:

- nižší investiční náklady oproti vodojemu,
- nenáročnost na umístění,
- hygienické důvody (voda nepřichází do kontaktu s ovzduším),
- snadná montáž,
- trvalý výkon při stejnoměrném i kolísavém odběru.

Nevýhody ATS [30]:

- strojní vybavení musí být dimenzováno na špičkovou potřebu,
- nemožnost volby čerpání mimo energetických špiček,
- při přerušení dodávky elektřiny je téměř okamžitě přerušena dodávka vody,
- při menší vydatnosti zdroje, než je špičková potřeba, je nutné vybudovat akumulaci nádrž,
- spotřeba elektřiny je někdy větší než při čerpání do vodojemu,
- špičková potřeba může být i několikanásobná.

3.2.7 Tlaková pásma

Rozdělení sítě pomocí tlakové regulace na jednotlivá hydraulicky oddělená území patří k základním způsobům tlakové optimalizace. Území musí mít pevné a definované hranice. Mělo by probíhat kontinuální měření přítoku a odtoku. Při rozdělování sítě do jednotlivých tlakových pásem by mělo být bráno v potaz velké množství faktorů: geografická plocha, délka sítě, množství propojení, topologie sítě (množství přítoků, spojení s přiléhajícími pásmy, okrajové podmínky), elevace, typ spotřebního profilu (rovnoměrný, pravidelně proměnný v čase, nepravidelně proměnný v čase), kvalita vody a další [31].

Abychom mohli síť rozčlenit do jednotlivých pásem, musíme znát základní hydraulické hodnoty v síti. Informace o tlakových a průtokových poměrech v celé síti lze získat měřením, ale získávání údajů pro celou síť by bylo velmi ekonomicky náročné. Proto se používá matematické modelování, ve vodárenství nazývané „hydraulická analýza“. Ta je podrobněji přiblížena v kapitole 4.

Obvyklý přístup k členění sítě na DMA (District Metered Area – Okrskové měřící pásmo) a PMA (Pressure Managed Area – Tlakově řízené pásmo) je postaven hlavně na geografické ploše, délce potrubí, množství přípojek a nemovitostí. Nejčastěji používaným parametrem je množství přípojek, ale v místech s malou hustotou přípojek je délka potrubí spolehlivějším ukazatelem. Délka potrubí je také vhodným indikátorem, pokud jsou v oblasti významné ztráty třením [31].

Jeden z možných konceptů pro určování velikosti DMA je dle doby trvání úniků. Obsahuje tři komponenty:

- Doba zjištění
- Doba lokalizace
- Doba opravy

Další možnou metodou pro určování velikosti DMA je dle tří ekonomických intervenčních předpokladů.

Tradičně, dvě charakteristiky byly spojovány s pásmy – jediný přítok a pevné hranice. Jejich aplikace je úspěšná, neboť usnadňují měření průtoků a vodní audit. Nicméně obě charakteristiky znamenají také nevýhody, např. suboptimální tlakovou optimalizaci, sníženou

odolnost k poruše, neefektivní reakce na speciální průtokové podmínky (hašení požáru), a ovlivnění kvality vody (více slepých konců). V posledních letech se objevily dva inovativní přístupy k problému: vícenásobné přítoky s FM (Flow-based Modulation) ovládáním a koncept dynamické topologie [31].

Vícenásobné přítoky s APM (Advanced Pressure Management) metodami

Jeden z přístupů je aplikován v Severní Americe, převážně kvůli požárním požadavkům na síť. Řešení spočívá v určení jednoho APM ventilu jako primárního regulačního elementu, zatímco ostatní ventily jsou přidružené anebo podpůrné s fixním průtokem. Za normálních podmínek funguje pouze primární ventil. Během špičkových odběrů, anebo požáru, se otevřou i ostatní ventily [31].

Někteří výzkumníci [31] se pokoušeli o začlenění vícenásobného přítoku do pásma pomocí většího počtu APM ventilů. Testovali dvě strategie: dva FM ventily a jeden FM a jeden TM (Time-Based Modulation) ventil. Avšak při aplikaci první strategie zjistili, že vznikne „houpací“ efekt, který vede ke kompletnímu uzavření jednoho ventilu. Ve druhé strategii byl TM ventil pouštěn v určitých časech, přebíral primární průtokovou funkci a FM ventil mohl fungovat jako pomocný v případě mimořádných okolností. Později bylo u problému dvou FM ventilů zjištěno, že ventily nesmí operovat samostatně, ale jejich činnost musí být regulována dle součtu celkového průtoku skrze oba ventily, aby správně ovlivňovaly tlaky v síti podle aktuální potřeby.

Dynamická topologie

Konflikt mezi potřebami DMA a PMA vedl k hledání alternativ permanentních hranic pásem. Jedna z nových alternativ je implementace otevřených a adaptivních pásem. To umožňuje agregaci původních DMA do větších tlakových oblastí pro zlepšení tlakové optimalizace a kvůli noční nadbytečnosti. V roce 2010 zahájila jedna Španělská společnost v několika městech projekt Micrometering District Area Enabler Project, který spouští hydraulické regulátory v nočních hodinách. Jejich spuštění rozdělí síť do nové DMA struktury. Ale primárním důvodem spuštění tohoto projektu bylo snížení úniků za minimálních nočních průtoků [31].

3.3 POTŘEBA A SPOTŘEBA VODY

3.3.1 Potřeba vody

„Množství vody udávané za časovou jednotku potřebné ve zdroji pro zajištění dodávky vody pro odběratele, stanovuje se většinou výpočtem, návrhová hodnota pro návrh jednotlivých částí (prvků) distribučního systému.“ [30]

Potřeba vody je primárním parametrem pro návrh vodovodní sítě. Určuje se výpočtem, nicméně v současnosti není k dispozici aktuální ucelená metodika pro výpočet potřeby vody. Starší dokumenty, ze kterých lze rámcově vycházet, jsou Směrnice Ministerstva lesního a vodního hospodářství ČSR č. 9/1973 a Metodický pokyn ministerstva zemědělství vydaný v roce 1985. Aktuálnějším podkladem je prováděcí vyhláška č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu.

Při výpočtu potřeby vody se zohledňuje charakter zástavby, množství zásobovaných lidí, přítomnost velkoodběratele a jeho charakter, velikost obce, spotřeba vody u stávajícího vodovodu, požární požadavky, plánovaná expanze, stav vodovodní sítě aj.

3.3.2 Spotřeba vody

„Množství vody skutečně odebrané z vodovodního zařízení za určité časové období.“ [30]

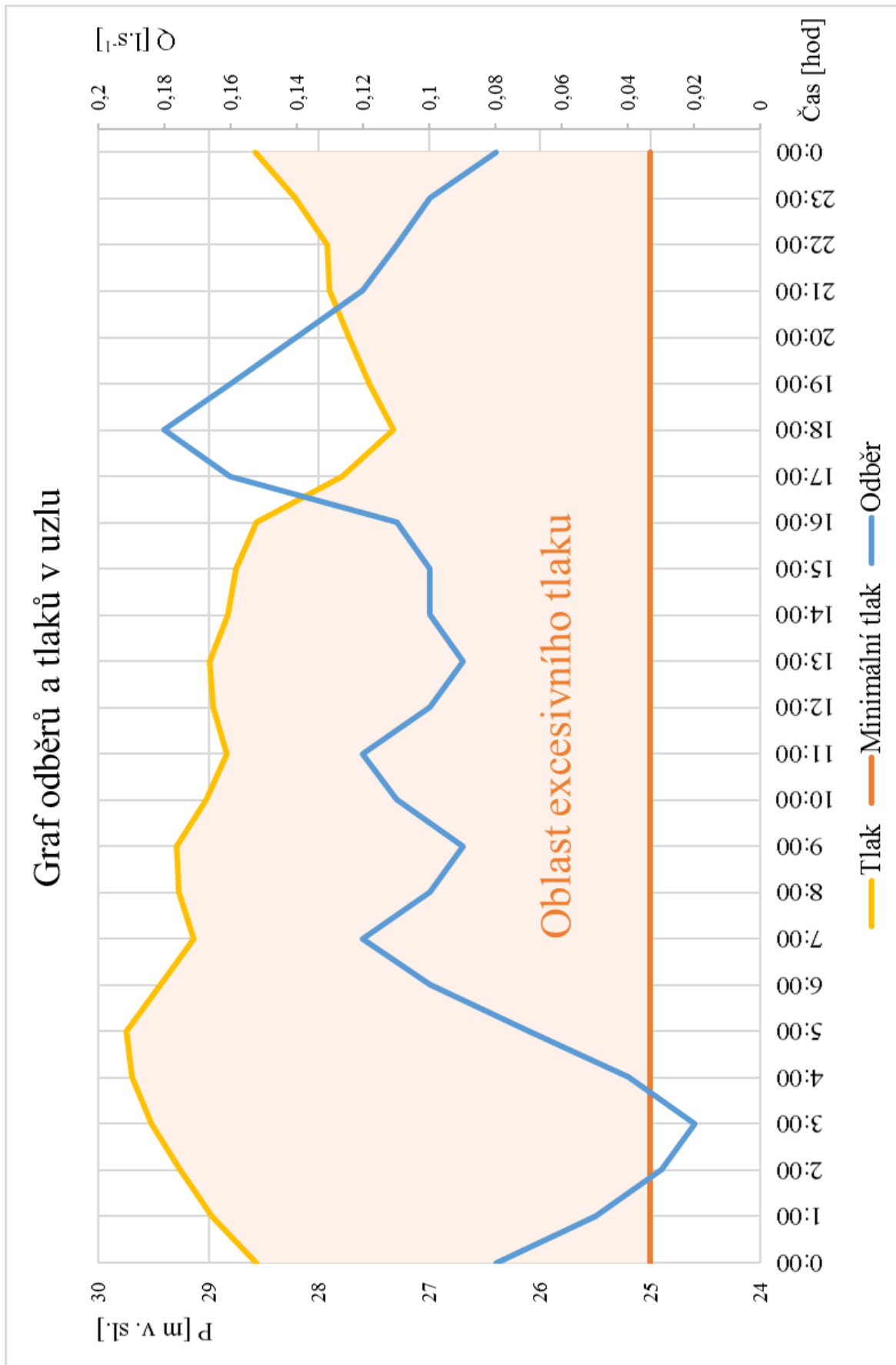
Zjišťuje se měřením. Vychází z provozní evidence stávající sítě.

Spotřeba vody je značně kolísavá. Na velikost spotřeby vody má vliv charakter zástavby, velikost obce a další obdobné parametry, ale také např. roční období, den v týdnu, denní hodina, počasí a mnohé další.

Typický průběh grafu spotřeby vody (odběr) pro obytnou zástavbu je uveden na obrázku 3.4. Během nočních hodin spotřeba vody klesá a dosahuje denního minima. Ráno, když lidé vstávají, se spotřeba zvyšuje a dochází k první denní špičce, pak spotřeba trochu klesá. Další špička bývá okolo oběda, kdy lidé vaří a jedí. Denní maxima jsou v brzkých večerních hodinách v době večerů a noční hygieny.

Graf zohledňuje i tlaky. Odběry a tlaky jsou totiž na sobě navzájem závislé. Čím vyšší odběr, tím nižší tlak. „Oblast excesivního tlaku“ v grafu vyznačuje tlak, který překročil legislativně požadovanou hodnotu hydrodynamického tlaku, tj. 25 m v. sl. Tato oblast je pro potřebu této práce velmi podstatná, neboť tyto excesivní tlaky mohou být ovlivňovány tlakovou optimalizací.

Hodnoty v grafu jsou získány z uzlu z modelu, který je podrobněji popsán v kapitole 4.



Obrázek 3.4: Graf odběrů a tlaků

3.4 ANALÝZA PŘÍPADOVÝCH STUDIÍ

Případovými studii tlakové optimalizace se zabýval Vicente [31], v následující tabulce jsou přiblíženy Evropské studie. Kromě autora, státu a místa je vyznačeno i zdali se jedná pouze o model, nebo o reálnou aplikaci, typ regulace tlaků a zamýšlený cíl.

Tabulka 3.4: Případové studie – Evropa [31]

Reference	Rok	Země	Město	Studie	Regulace	Cíle
Charalambous	2007	Kypr	Limassol	R	FO, FM	L, B
Kovac	2007	Bosna a Hercegovina	Grazanica	R	FO, FM	L, B
Kovac	2007	Chorvatsko	Zagreb	R	FO, FM	L, B
Award	2008	Spojené království	Yorkshire	M	FO, TM, FM	L, B, C
Fantozzi	2009	Itálie	Reggio Emilia	R	RNM	L, B, C
Miguel a Rodriguez	2009	Španělsko	Madrid	R	FO, TM, FM, RNM	L
VAG	2009	Slovensko	Bardejov	R	RNM	L, B
Award	2009	Spojené království	Yorkshire	M	FO, TM	L, B, C
Li	2010	Spojené království	-	M	FM	L
Nicolini	2010	Itálie	Udine	M	FO	L
AbdelMeguid	2011	Spojené království	Oldham	M	TM, FM	L
Dimitrov	2011	Bulharsko	Burgas	R	FO	L
I2O Water	2011	Spojené království	London	R	RNM	L, B
Paskalev	2011	Bulharsko	Razgrad	R	FO	L
Ristovski	2011	Makedonie	Skopje	R	FM	L
Fontana	2012	Itálie	Napoli	R, M	FO	L
Babic	2014	Srbsko	Belgrade	R	FO	L, C
Kanakoudis	2014	Řecko	Kos a Kozani	R, M	FO, TM	L, C
Wright	2014	Spojené království	-	R, M	FO, FM	L
Aqualogy	2015	Španělsko	Murcia	R	FO	L, B
Martinez-Codina	2015	Španělsko	Madrid	R, M	FO	B

Studie: implementace případové studie, R = reálná, M = v hydraulickém modelu

Regulace: užití typy, FO = fixed outlet, TM = time-based, FM = flow-based, RNM = remote node-based

Cíle: L = leakage, redukce úniků, B = burst, snížení výskytu poruch, C = consumption, redukce spotřeby

Z analýzy je patrné, že prakticky ve všech případech bylo cílem snížení ztrát vody. V některých případech existovaly i další cíle jako snížení nových prasknutí potrubí a redukce spotřeby.

3.4.1 Typy PRV regulací

Fixed outlet (FO) – fixní výstup

Tradiční a nejobvyklejší režim fungování PRV. Běžné typy těchto ventilů fungují na hydraulickém principu, tj. jsou samoregulační. Fixed outlet PRV funguje na principu udržování konstantního tlaku, na definované hodnotě, v síti za ventilem. V případě poklesu tlaku se ventil otevře a médium proudí za ventil, dokud v síti za ventilem nenastane definovaný tlak, tím se ventil opět uzavře. Velkou výhodou tohoto typu je, že může fungovat na čistě hydraulickém principu, nemusí k němu být přivedena elektřina. Také cena těchto ventilů je obvykle nižší než u ostatních typů.

Tento typ je vhodný použít tehdy, kdy je tlaková ztráta mezi PRV a kritickým uzlem malá. To může být způsobeno např. malou oblastí, malými odběry, předimenzovanou sítí, minimálním rozdílem v elevaci aj. Nadále je tento typ PRV vhodné využít, pokud je třeba snížit spotřebu vody [31].

Time-Based Modulation (TM) – Časově řízená modulace

Tyto PRV jsou ovládané elektronicky. Tomuto typu ventilu postačuje lokální elektronická jednotka s časovačem s předem definovanými fixními časy, kdy má ventil fungovat.

Výhodou tohoto typu je levnější cena než u FM, protože časové ovladače nejsou tak drahé a není třeba dalších zařízení (průtokoměry) jako u FM modulace. Vhodné využití pro tento typ je u oblastí sítě se stabilním profilem anebo s pravidelně se opakujícím průběhem spotřeby. Je vhodný u sítě, kde jsou minimální tlakové ztráty, avšak v tomto případě je také typ FO možná alternativa. TM je nevhodné použít, pokud síť může být zatížena krizovou situací [31].

Flow-Based modulation (FM) – Průtokově řízená modulace

Elektronicky lokálně ovládané. Tyto PRV fungují v reálném čase, musí být napojeny na průtokoměr. Ventil funguje dle požadavků sítě. Tlak v síti za ventilem je určen tlakově-průtokovou křivkou obsaženou v ovladači.

Toto řešení nabízí spoustu benefitů. Největší výhodou je adaptibilita na nároky sítě v reálném čase, což je velmi vhodné u neočekávaných nárazových událostí (požární odběr). Adaptibilita je také užitečná, pokud se poptávková křivka během dne mění. FM se může adaptovat na potřebu uživatelů v jakémkoliv okamžiku, poskytovat maximální tlak během špiček a minimální hodnoty během nízkých odběrů, což redukuje úniky a poruchy. FM také adresuje významné tlakové ztráty, čímž může zajišťovat požadovaný tlak v kritickém místě [31].

Remote Node-Based modulation (RNM) – Dálkově ovládaný dle uzlu

Tento PRV redukuje tlak takovým způsobem, aby v místě kritického bodu sítě (uzel, ve kterém se během dne vyskytne nejnižší tlak) byl tlak nad požadovaným minimem. Kritické místo musí být osazeno senzorem a ten dálkově spojen s PRV.

Jedná se o nejefektivnější metodu pro zákazníky, v síti je neustále minimální tlak, proto je doporučeno užití v případech, kdy je požadavek na nejnižší možné tlaky primárním zájmem. RNM je výhodné u spotřebišť s proměnnými nároky na odběry i pokud jsou velké tlakové ztráty. Na rozdíl od FM je RNM použitelné i v případě, kdy by jen obtížně šla vytvořit tlakově-průtoková křivka (např. velkoodběratel s náhodnými odběry) [31].

3.4.2 Cíle optimalizací

Redukce úniků vody

Všechny studie se zaměřily na redukci úniků vody. V některých to byl jediný cíl.

Snížení výskytu poruch

Dalším cílem v případových studiích bylo snižování výskytů praskání potrubí.

Snížení spotřeby

V několika případech byly studie prováděny i s cílem snížení spotřeby vody.

4 PŘÍPADOVÁ STUDIE – TESTOVÁNÍ

4.1 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Vodovodní síť je tlakový trubní systém, pro který lze využít matematické modelování. Při zpracování této kapitoly bylo použito více materiálů [30, 32, 33, 34, 35].

U vodovodní sítě se můžeme setkat se dvěma typy modelů [32]:

- Hydraulická analýza
- Kvalitativní analýza

Kvalitativní analýza se používá pro modelování kvality vody a jejího stáří. Je nástavbou k hydraulické analýze, protože vyžaduje navíc znalosti o proudění a míšení kapalin spolu se znalostmi o průběhu chemických reakcí ve vodě [32].

V této práci se dále budu zabývat pouze hydraulickou analýzou. Cílem hydraulické analýzy je získání informací o tlakových a průtokových poměrech v síti, zejména pro potřeby provozování a řízení stávajících distribučních systémů, projektování nových rozvodných potrubí nebo rekonstrukcí, případně také rozšiřování a napojování nových odběratelů. Teoreticky by bylo možné provést měření přímo na síti a získat tak reálné informace o průtokových poměrech, ale měření pro celou síť by bylo extrémně ekonomicky náročné. Z tohoto důvodu se při modelování reálné sítě nejprve vytvoří hrubý model dle dostupných dat a následně se verifikuje a kalibruje na základě měření ve vhodných bodech na síti. Tento způsob je sice méně přesný než přímé měření, ale získáme tak informace o celé síti.

4.1.1 Typy hydraulické analýzy

Hydraulická analýza může být provedena pro různé typy zatěžovacích stavů a/nebo proudění. Tři základní typy jsou statická, kvazi-dynamická a dynamická [32].

Statická hydraulická analýza

V daném časovém úseku je konkrétní okamžitý zatěžovací stav odběrů na síti neměnný. Jedná se tedy o ustálené proudění.

Kvazi-dynamická hydraulická analýza

Jedná se o posloupnost statických analýz pro určitý počet časových intervalů. Změny parametrů probíhají pouze na rozhraní jednotlivých časových intervalů. Posuzované časové úseky jsou obvykle delší (den, týden) a časové intervaly jsou zpravidla stejně dlouhé (hodina).

Dynamická hydraulická analýza

Bývá používána pro relativně krátké časové úseky s velmi krátkými intervaly (sekundy). Využívá se například při analýze vodního rázu (neustálené proudění).

4.1.2 Potřebná data

Principem matematického modelování je soustava rovnic, ať už algebraických, diferenciálních nebo integrálních. Ty jsou doplněny počátečními a okrajovými podmínkami. Musíme tedy znát základní hydraulická, topologická a provozní data o modelované síti. Pro následnou kalibraci potřebujeme přesné hodnoty získané měřeními na síti [30].

Pro potřeby modelování se dopouštíme zjednodušování fyzikálních zákonitostí. Pracujeme s ideální kapalinou, která je definována jako dokonale nestlačitelná a s nulovým vnitřním třením.

Data pro modelování

- Geometrie sítě – polohy, výšky, směry, délky,
- Hydraulické parametry – dimenze, materiál, drsnost potrubí,
- Informace o objektech – vodojemy, čerpadla, redukční ventily, uzávěry atd.,
- Odběry a vtoky.

Data pro kalibraci

- Hydraulické údaje o vybraných prvcích sítě – průtok, tlak,
- Přesné hodnoty odběrů a vtoků.

4.1.3 Zadávání odběrů

Kvůli velkému množství odběrných míst (přípojek) není možno zadávat každý odběr jako samostatný uzel. Rozsah sítě by neúměrně narůstal. Proto se jako uzlové odběry zadávají pouze významní odběratelé (např. průmysl, zemědělství, nemocnice apod.). Jednotlivé malé odběry se v rámci trubního úseku přesouvají do jeho krajních uzlů. Pro určení odběrů v uzlech se používá schematizace rozdělení odběru celé sítě. Nejčastěji se používají metody: metoda redukovaných délek, metoda dvou součinitelů [30].

Metoda redukovaných délek

U této metody se každému trubnímu úseku přiřadí redukční součinitel, který se určí dle hustoty a výšky zástavby. Tímto součinitelem se vynásobí skutečné délky úseků. Dostaneme tak redukovanou délku úseku. Celkový odběr vydělíme sumou všech redukovaných délek a získáme tak specifickou potřebu sítě. Pro získání odběru konkrétního úseku stačí vynásobit redukovanou délku úseku se specifickou potřebou sítě.

Metoda dvou součinitelů

Tato metoda se používá, pokud jsou k dispozici podrobné podklady o odběrech, a lze tedy ke každé přípojce přiřadit např. počet zásobovaných obyvatel, počet bytových jednotek, plochu zástavby atd. Každému úseku tak můžeme přiřadit dva součinitele. První vyjadřuje počet obyvatel/bytových jednotek/plochu zástavby. Druhý je specifická potřeba vody na jednotku prvního součinitele. Tyto dva součinitele vynásobíme mezi sebou. Celkový odběr vydělíme sumou všech výsledných součinů a získáme tak specifickou potřebu sítě. Pro získání odběru konkrétního úseku stačí vynásobit součin součinitelů úseku se specifickou potřebou sítě.

4.1.4 Základní podmínky pro hydraulickou analýzu okruhových sítí

Hydraulická analýza okruhových tlakových sítí s ideální kapalinou je založena na splnění tří podmínek, které jsou vyjádřením základních fyzikálních zákonů.

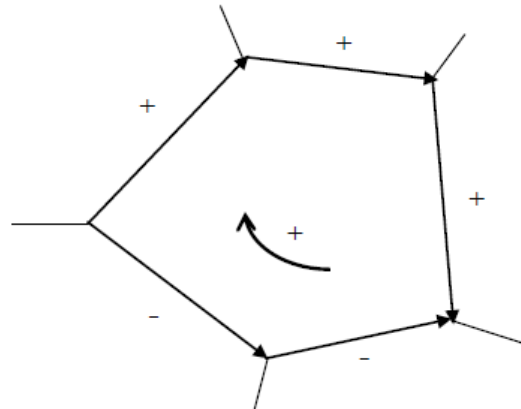
Uzlová podmínka

„Vyjadřuje zákon zachování hmoty a říká, že součet všech přítoků (vtoků) do každého uzlu sítě se musí rovnat součtu odběrů (odtoků) z uzlu.“ [30]

Okruhová podmínka

„Vyjadřuje zákon zachování energie a říká, že součet tlakových ztrát přes všechny úseky tvořící nezávislý okruh při zvolené kruhové orientaci je roven nule.“ [30]

Orientaci volíme obvykle kladnou ve směru pohybu hodinových ručiček. Pokud směr průtoku souhlasí s orientací, označíme ztrátu kladně. Pokud je směr průtoku proti zvolené orientaci, označíme jej záporně [30].



Obrázek 4.1: Příklad zvolené orientace u okruhové podmínky [30]

Hydraulická podmínka

„Hydraulická podmínka (stavová rovnice) udává vztah mezi tlakovou ztrátou h a průtokem Q v trubním úseku.“ [30]

Tato podmínka vyjadřuje vznik ztrát třením po délce.

4.1.5 Metody hydraulické analýzy průtoků

Pro hydraulickou analýzu trubních tlakových sítí s ideální kapalinou se nejčastěji používají dva typy metod iterační a gradientní [33, 34, 35].

Iterační metody

Podstatou je numerické řešení soustavy lineárních rovnic, které se sestaví na základě podmínek a stavové rovnice. Principem iterace je odhad některých veličin, aby splňovaly alespoň dvě ze tří podmínek a postupným zpřesňováním dosáhneme platnosti i podmínky třetí. Je výhodné, dosáhne-li metoda požadované přesnosti s co nejmenším množstvím iteračních kroků. Mezi iterační metody patří:

- Metoda vyrovnání ztrátových výšek – odhadují se průtoky a jejich směr, aby byla splněna uzlová podmínka. Pak se vypočítá ztrátová výška a podle ní se určí opravné průtoky. Proces se opakuje, dokud není dosaženo požadované shody.
- Metoda vyrovnání průtoků – odhadují se ztrátové výšky a směry průtoků, aby byla splněna okruhová podmínka. Pak se vypočítá průtok a podle něj se určí opravné ztrátové výšky. Proces se opakuje, dokud není dosaženo požadované shody.
- Metoda vyrovnání odporových činitelů – odhadují se zároveň průtoky i tlakové ztráty, aby byla splněna okruhová a uzlová podmínka. Pak se zpřesňují průtoky i tlakové ztráty, dokud není splněna i hydraulická podmínka.

Gradientní metody

Tato metoda iteračně hledá řešení soustavy rovnic, sestavených pomocí uzlové a hydraulické podmínky. Výpočtem jsou stanovovány uzlové tlaky a průtoky. Aby mohl výpočet proběhnout, je nutné síť rozdělit na uzly a úseky. Na začátku výpočtu je odhadnut průtok v každém úseku, v tomto okamžiku nemusí být ještě splněna uzlová podmínka. V následujícím iteračním postupu výpočtu se tyto hodnoty v každém kroku zpřesňují, dokud nesplní danou podmínku s určitou přesností. Výpočet spočívá v řešení soustavy nelineárních rovnic. Výsledkem jsou hodnoty tlaků, z nichž se určují nové hodnoty průtoků. Výpočet probíhá, dokud shoda není menší než dostatečně malé číslo. V programu EPANET, který gradientní metodu používá, je to hodnota 0,001.

4.1.6 Princip výpočtu

Matematické modely pro hydraulickou analýzu pracují na dvou základních principech. První je model řízený odběrem, druhý je model řízený tlakem [33, 34, 35].

Model řízený odběrem (DDM = Demand Driven Model)

Pro daný zatěžovací stav je třeba určit uzlové odběry. Na základě odběrů jsou vypočítávány průtoky v úsecích, z nich následně ztráty na úsecích a z nich dále hydrodynamický přetlak v uzlech. Základním předpokladem je, že se odběr realizuje v plném rozsahu, bez ohledu na tlak v síti, což je ovšem zjednodušující předpoklad. Ve skutečnosti je průtok závislý na tlaku. Kontrolou správnosti výpočtu mohou být hodnoty tlaků v uzlech. Při nesprávném nastavení mohou být zobrazeny jako záporné číslo, což samozřejmě není možné.

Model řízený tlakem (PDM = Pressure Driven Model)

U těchto modelů je postup opačný. Napřed definujeme v určených místech síť tlaky a z nich se odvodí průtoky a odběry na síti. Na rozdíl od předchozího modelu zde dochází k poklesu odběrů při poklesu tlaků.

4.2 EPANET 2.0

Jedná se o volně dostupnou aplikaci Agentury na ochranu životního prostředí Spojených států amerických (United States Environmental Protection Agency = US EPA). Aplikace je ke stažení na webových stránkách této agentury [36, 37].

Tento software slouží pro modelování statického i kvazi-dynamického proudění v tlakových trubních systémech. Umožňuje simulaci hydraulických i kvalitativních parametrů Newtonovských kapalin. EPANET 2.0 je model řízený odběrem a pro výpočet používá gradientní metodu [30].

4.2.1 O aplikaci

Pracovní prostředí aplikace umožňuje zadávání dat a tvorbu modelu. Jako podklad můžeme použít mapy či schémata ve formátech bmp, emf, wmf v souřadném systému X, Y. Nadále můžeme provádět editaci dat, simulace, vyhledávání ve výsledcích, prohlížení a export výsledků v podobě barevných map, grafů a tabulek [30].

EPANET 2.0 umožňuje modely sestavovat z následujících prvků: trubní úseky, uzly, čerpadla, vodojemy, ventily, nádrže. Matematická simulace vyhodnotí pro každý úsek průtok, pro každý uzel hydrodynamický přetlak, nadále hladiny ve vodojemech a koncentrace

chemických látek v síti. Také lze simulovat stáří vody v síti a trasování (pohyb pomyslné nekonečně malé částice v potrubí – šíření znečištění) [30].

Aplikace je celosvětová, proto se musíme rozhodnout, jaké jednotky a rovnice chceme při výpočtu používat. Na začátku modelování musíme vytvořit síť a zadat všechny známé geometrické, hydraulické a objektové parametry. Následně musíme zadat přítoky a odběry v jednotlivých uzlech sítě. Po zadání všech hodnot nutných pro výpočet, můžeme spustit simulaci. Pokud aplikace nenarazí na nějaký problém, v tom případě se objeví chybové hlášení, získáme vypočítanou síť.

EPANET 2.0 umožňuje [30]:

- analyzovat trubní síť jakékoliv velikosti,
- volbu jednotek (jednotky SI nebo imperiální),
- volbu vztahu pro výpočet tlakových ztrát třením po délce (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Chezy-Manning),
- zohlednit místní ztráty v tvarovkách a armaturách,
- simulovat čerpadlo s konstantními i proměnlivými otáčkami,
- stanovit čerpací náklady,
- simulovat některé typy regulačních armatur,
- vytvoření jakéhokoliv tvaru komory vodojemu zadáním křivky objemů,
- simulovat více typů uzlových odběrů, každý s jiným časovým průběhem,
- simulovat tlakově závislý uzlový odběr,
- vytváření pravidel pro automatické řízení systému,
- modelovat trasování – šíření látky v potrubí, jejíž koncentrace se nemění,
- modelovat šíření látky, jejíž koncentrace se v čase mění,
- analyzovat stáří vody v síti,
- stanovit procentuální odtok z daného uzlu do všech ostatních uzlů sítě,
- simulovat reakci média se stěnami potrubí,
- a další.

4.3 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Studie bude provedena na modelu fiktivní sítě. Základ modelu je stažen z výukové webové stránky [38] o programu EPANET 2.0. Tento model je následně upraven pro potřeby této práce.

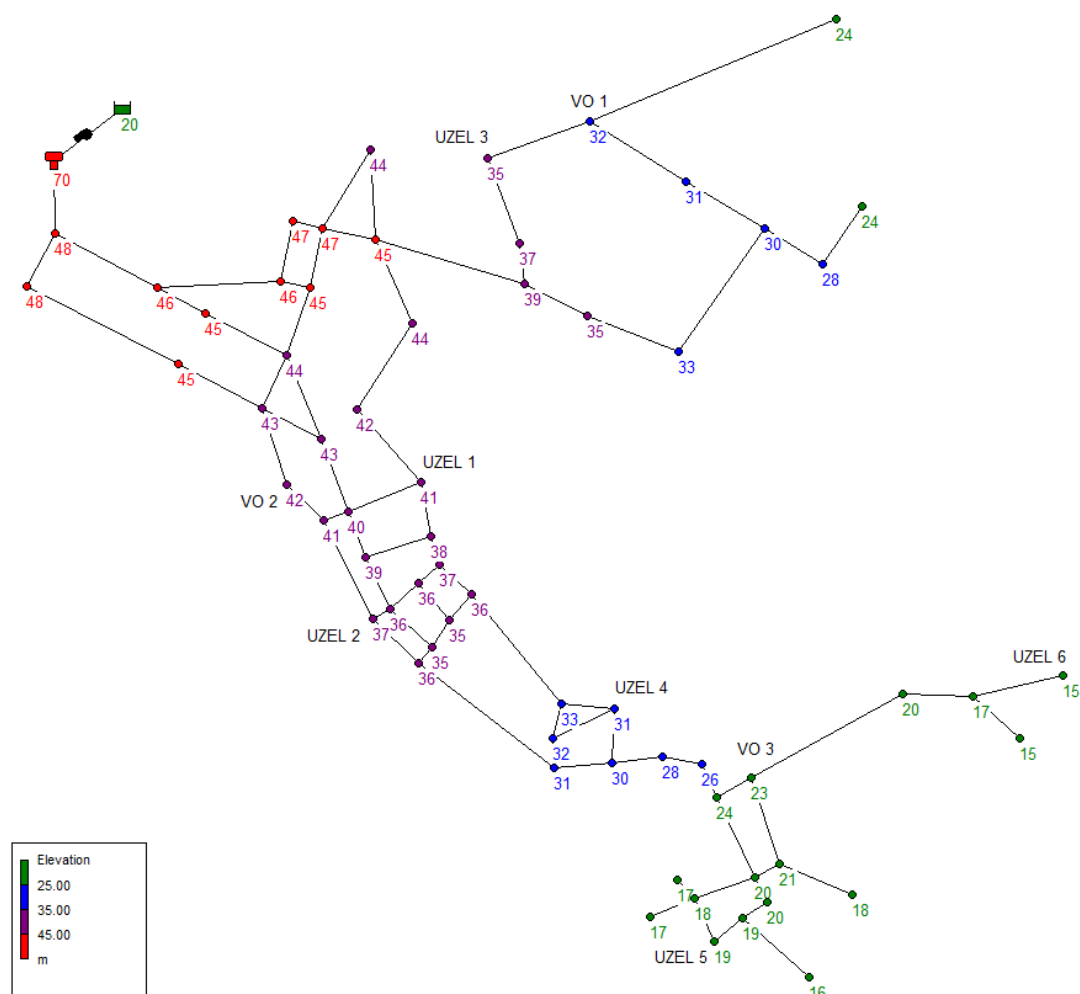
Ve výchozím stavu modelu je nevyhovující situace z hlediska tlakových poměrů. Sice jsou ve všech místech sítě splněny legislativní tlakové požadavky, avšak někde jsou tlaky zbytečně vysoké, celé území se nachází v jednom tlakovém pásmu. Cílem této studie je navrhnout opatření a zhodnotit jeho vliv na síť.

4.3.1 Výchozí stav – Varianta 0

Vodovodní síť je zásobována z jednoho vodojemu. Do tohoto vodojemu je voda čerpána z rezervoáru, čerpání probíhá v nočních hodinách od 22:00 do 6:00. Minimální hladina ve vodojemu je 3 m, maximální hladina je 6 m. Výška hladiny se v průběhu dne pohybuje mezi těmito dvěma extrémy.

Výškové uspořádání

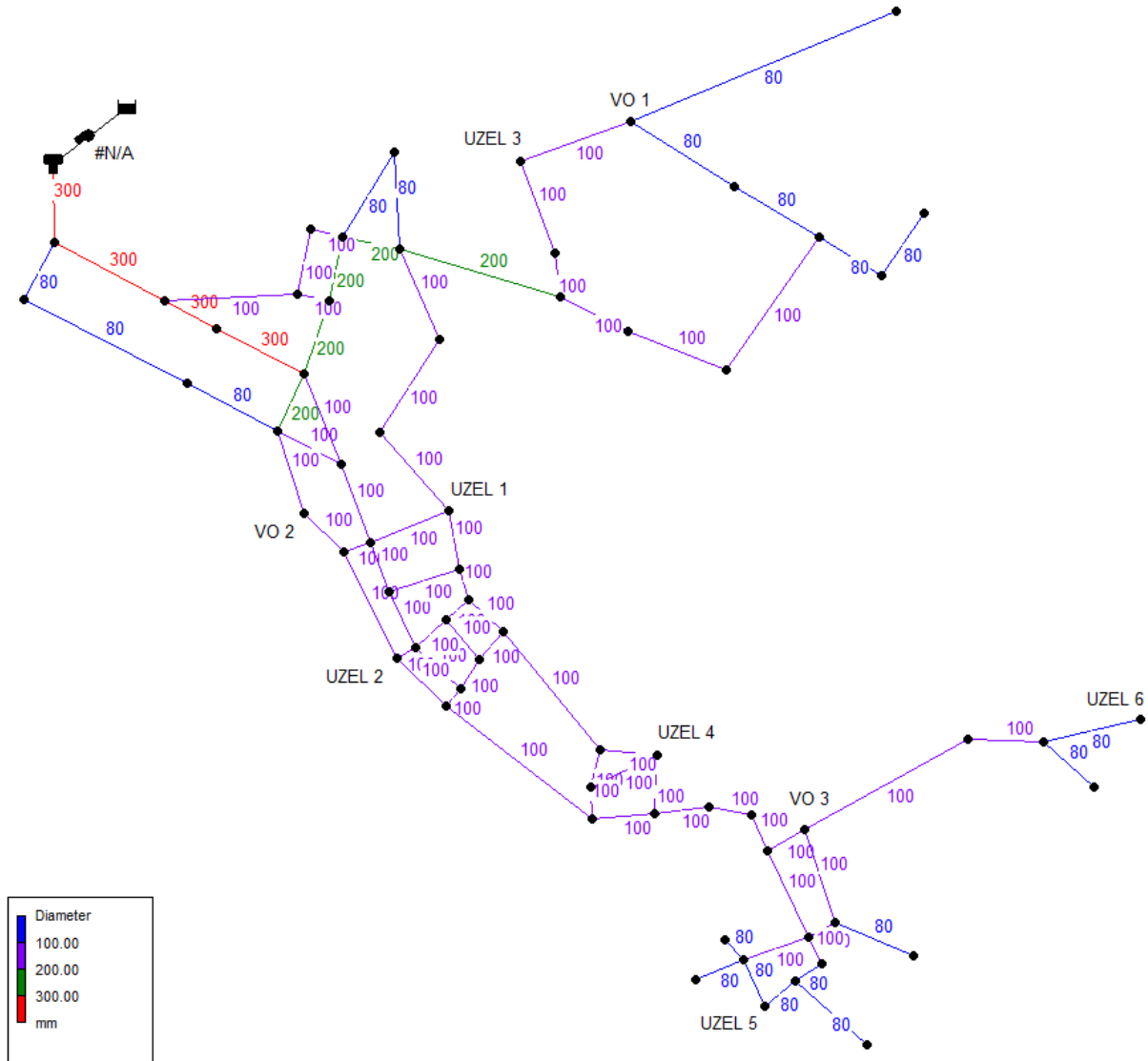
Vodojem leží na kótě 70 m nad srovnávací rovinou. Reliéf je svažité a klesá směrem doprava a dolů (ve smyslu orientace schématu). Přesné hodnoty elevace uzlů jsou vidět na obrázku 4.2. V síti se nachází 64 uzlů.



Obrázek 4.2: Elevace uzlů

Dimenze potrubí

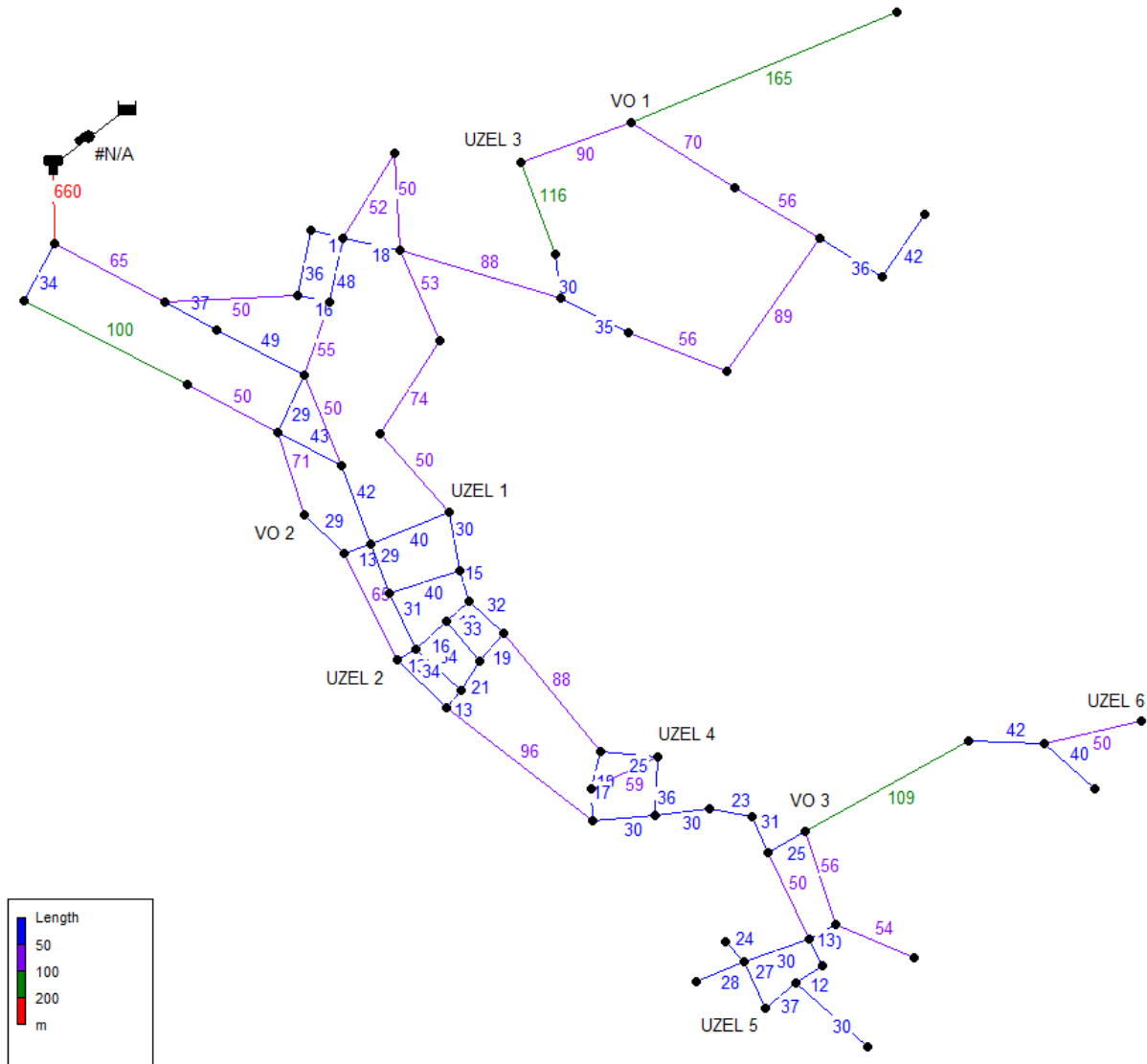
Dimenze potrubí v síti jsou DN 80, DN 100, DN 200, DN 300, jejich rozdělení v síti je na obrázku 4.3. Dimenze byly navrženy tak, aby tlakové ztráty při proudění vody byly minimální. Rychlost proudění za normálních podmínek (během denních maximálních odběrů) nepřesahuje $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, obvyklá rychlost je kolem $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V některých úsecích sítě, obzvláště okrajových částech, voda dosahuje nízkých rychlostí až $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Důvodem je dimenze DN 80, která je vyžadována jako minimum pro zásobování požární vodou.



Obrázek 4.3: Dimenze úseků

Délky potrubí

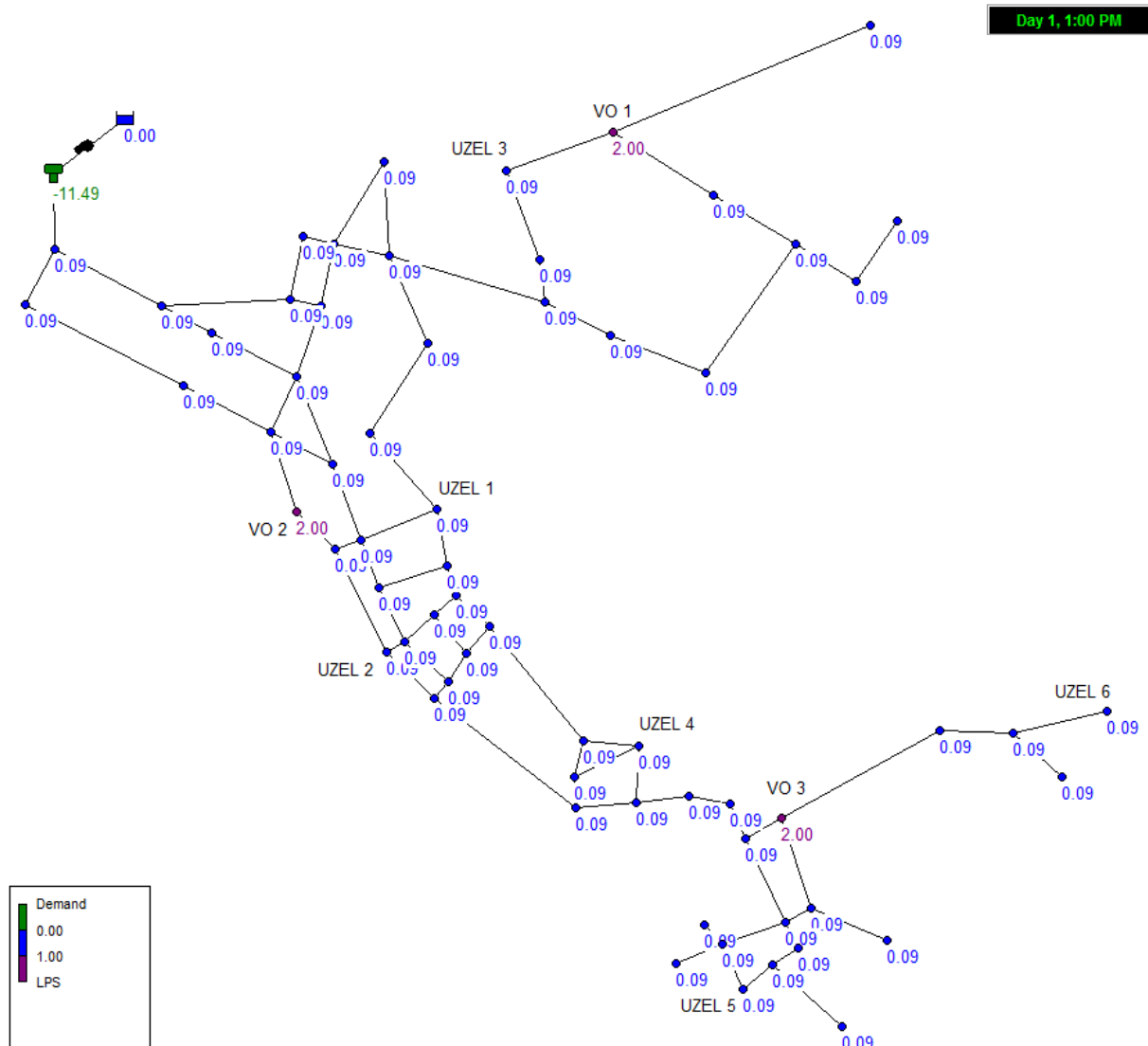
Přívodní potrubí od vodojemu do prvního uzlu sítě měří 660 m. Všechny ostatní úseky si poměrově odpovídají (čím delší čára úseku, tím delší skutečná velikost). Délky jednotlivých úseků jsou patrné z obrázku 4.4. Pro výpočet ztrát třením po délce byl použit vzorec Darcy-Weisbach s koeficientem drsnosti 6 mm u všech úseků potrubí.



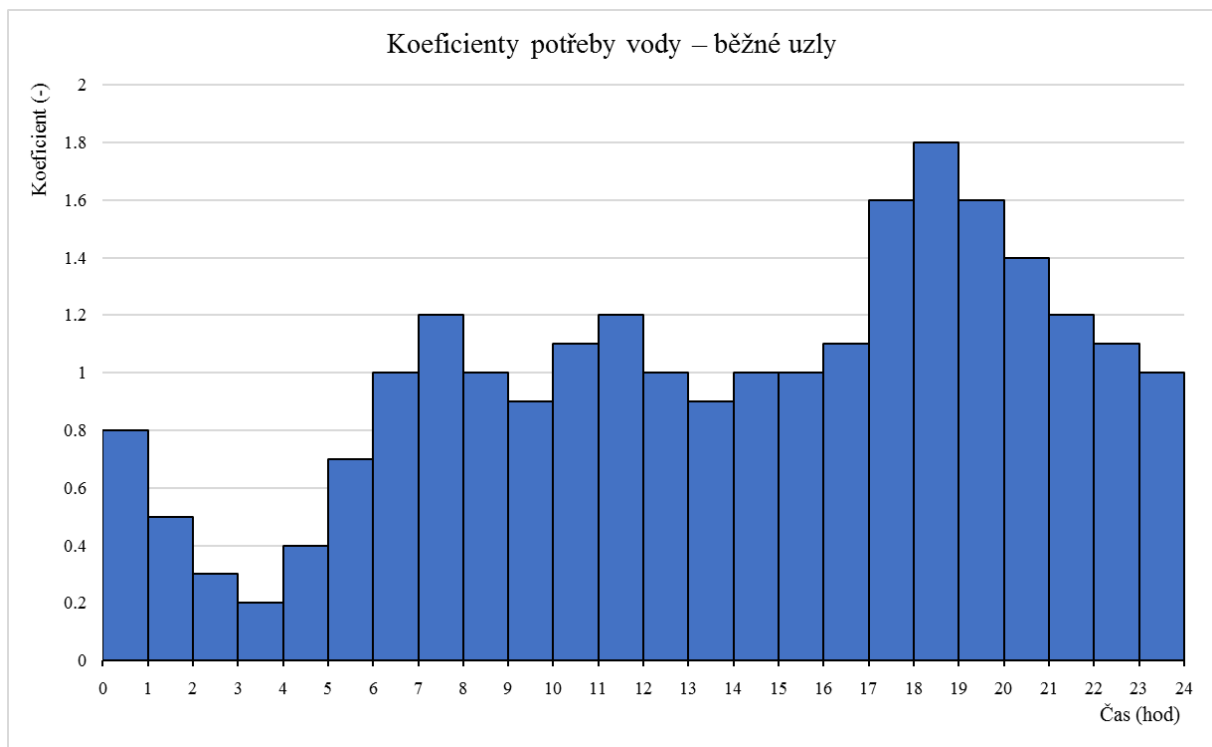
Obrázek 4.4: Délky úseků

Odběry

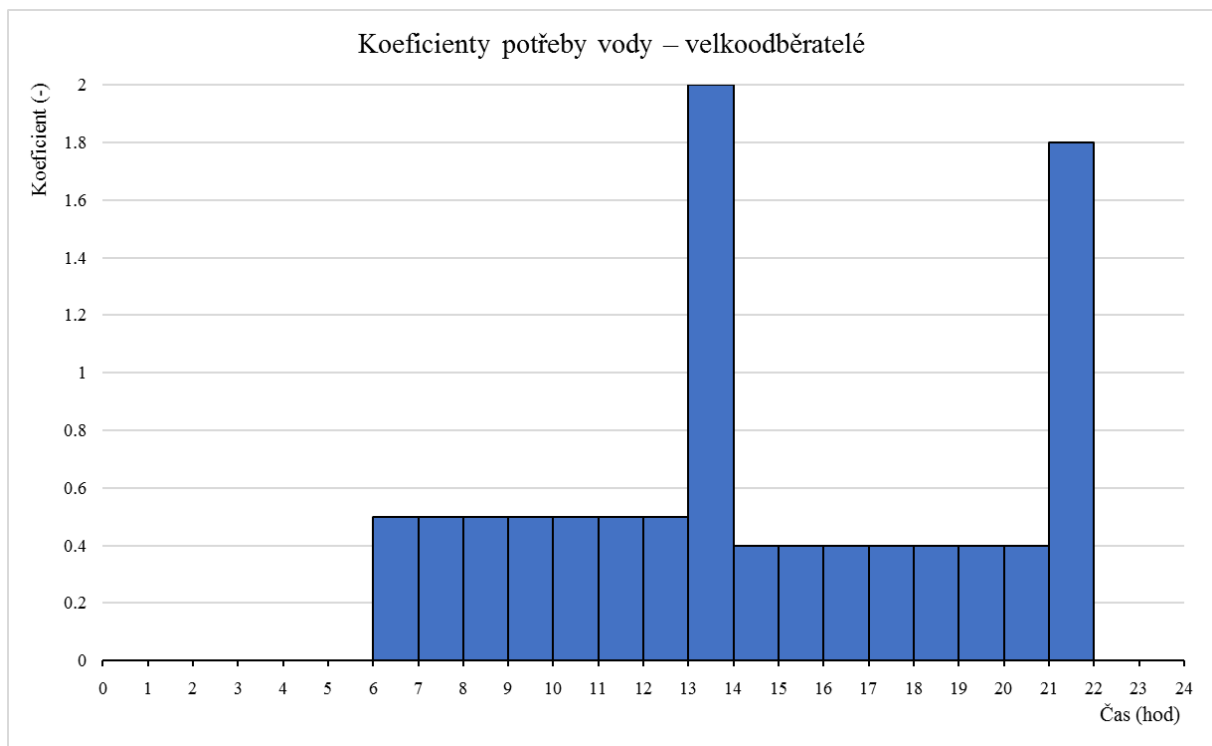
Pro zjednodušení úlohy a větší názornost je skoro ve všech uzlech sítě stejný základní odběr $0,1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (hodnota je přemrštěná pro takto velké spotřebiště, důvodem této volby je požadavek na výrazné kolísání tlaků). Tento základní odběr je modifikován násobitelem, který vyjadřuje změnu potřeby vody v průběhu dne. Grafické vyjádření změn potřeby vody v průběhu dne je znázorněno na obrázku 4.6. Ve třech uzlech sítě označených VO (velkoodběratel) je základní odběr $1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a změna potřeby vody v čase je graficky znázorněna na obrázku 4.7. Tento graf potřeby vody během dne simuluje dvousměnný průmyslový provoz, kde se na konci směny pracovníci myjí. V čase 13:00 dosahují velkoodběratelé svých maximálních odběrů.



Obrázek 4.5: Odběry v uzlech v čase 13:00



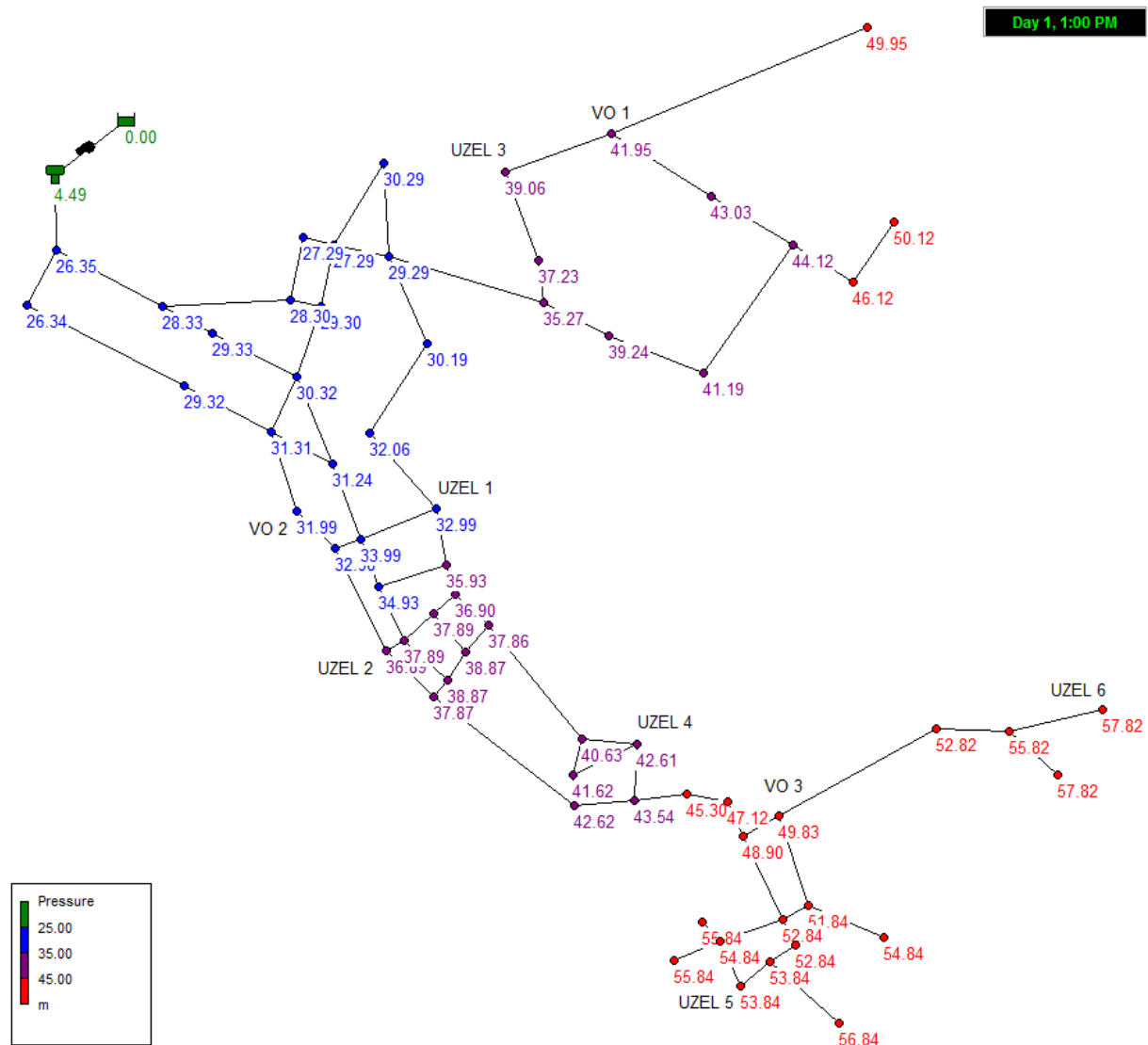
Obrázek 4.6: Koeficienty vyjadřující změnu potřeby vody v průběhu dne – běžné uzly



Obrázek 4.7: Koeficienty vyjadřující změnu potřeby vody v průběhu dne – velkoodběratelé

Tlakové poměry

Celá síť se nachází v jednom tlakovém pásmu, proto tlak v uzlech nabývá hodnot mezi 25 až 60 m v. sl. Tlak v uzlech se mění v průběhu dne, na obrázku 4.8 je zobrazen tlak v uzlech v čase 13:00. Tento čas je zvolen, protože velkoobjemové odběry v něm dosahují svých maximálních hodnot. Ve schématu jsou také vyznačeny zájmové uzly, u kterých bude blíže zkoumán vliv navržených opatření na tlakové poměry. Byly vybrány 2 uzly z „červeného“ intervalu, 3 uzly z „fialového“ intervalu a 1 uzel z „modrého“ intervalu. Hodnoty těchto intervalů jsou patrné z obrázku 4.8. Pro každý z těchto uzlů je v kapitole 4.3.5 uveden graf kolísání tlaků v průběhu dne pro všechny navržené varianty.



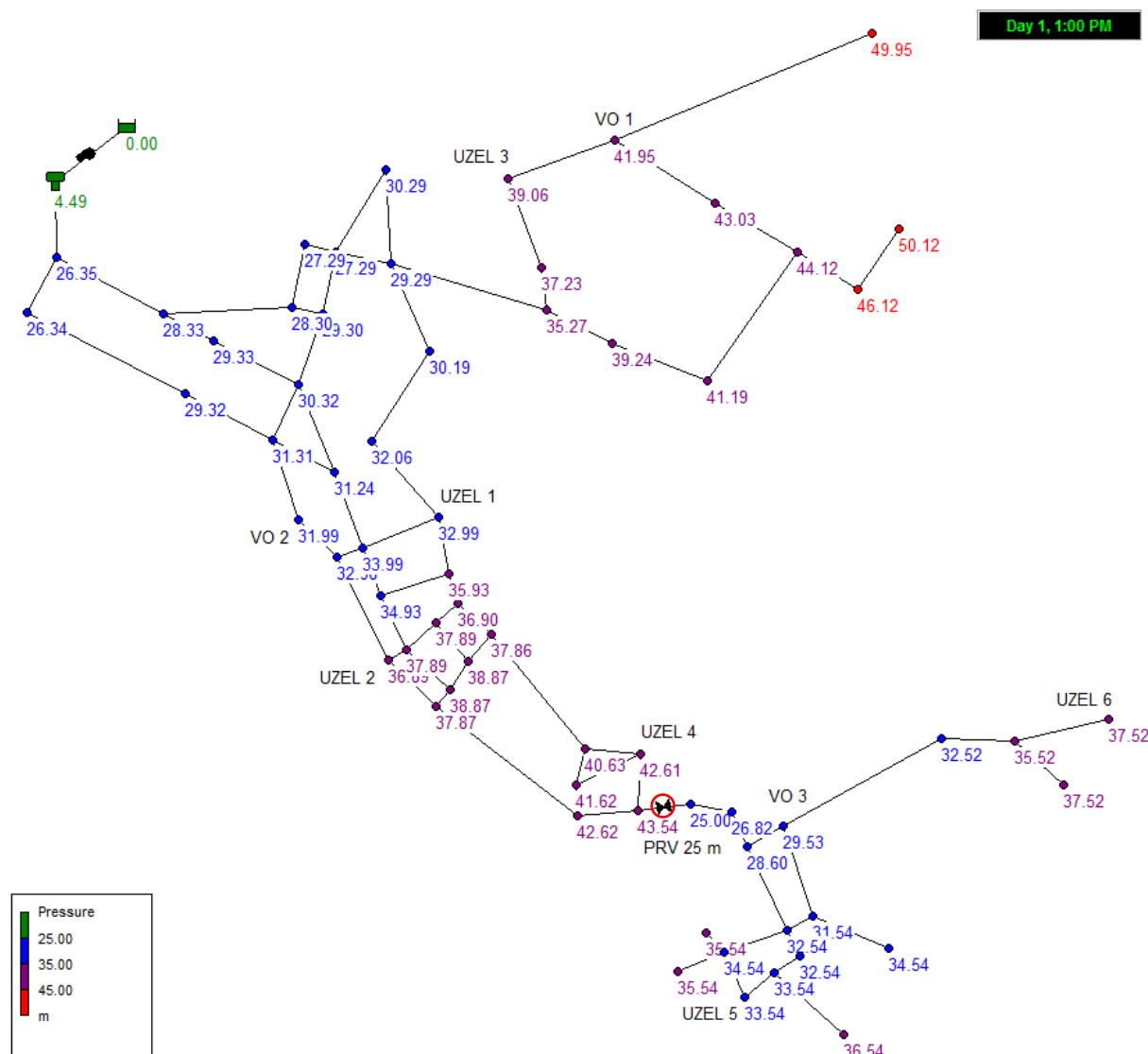
Obrázek 4.8: Tlakové poměry v uzlech v čase 13:00 – Varianta 0

4.3.2 Navržené opatření – Varianta A

Varianta A spočívá ve zcela minimálním zásahu do sítě. V síti je pouze umístěn jeden tlakový redukční ventil (označený červeným kolečkem) nastavený na výstupní tlak 25 m v. sl. Do schématu nebylo jinak zasaženo, všechny úseky zůstaly stejné jako ve výchozím stavu. Vliv tohoto opatření je na obrázku 4.9.

Při umístění PRV je pro jeho správné fungování důležitá tlaková diference mezi vstupním a výstupním tlakem. Byla brána minimální nutná hodnota diference 5 m v. sl.

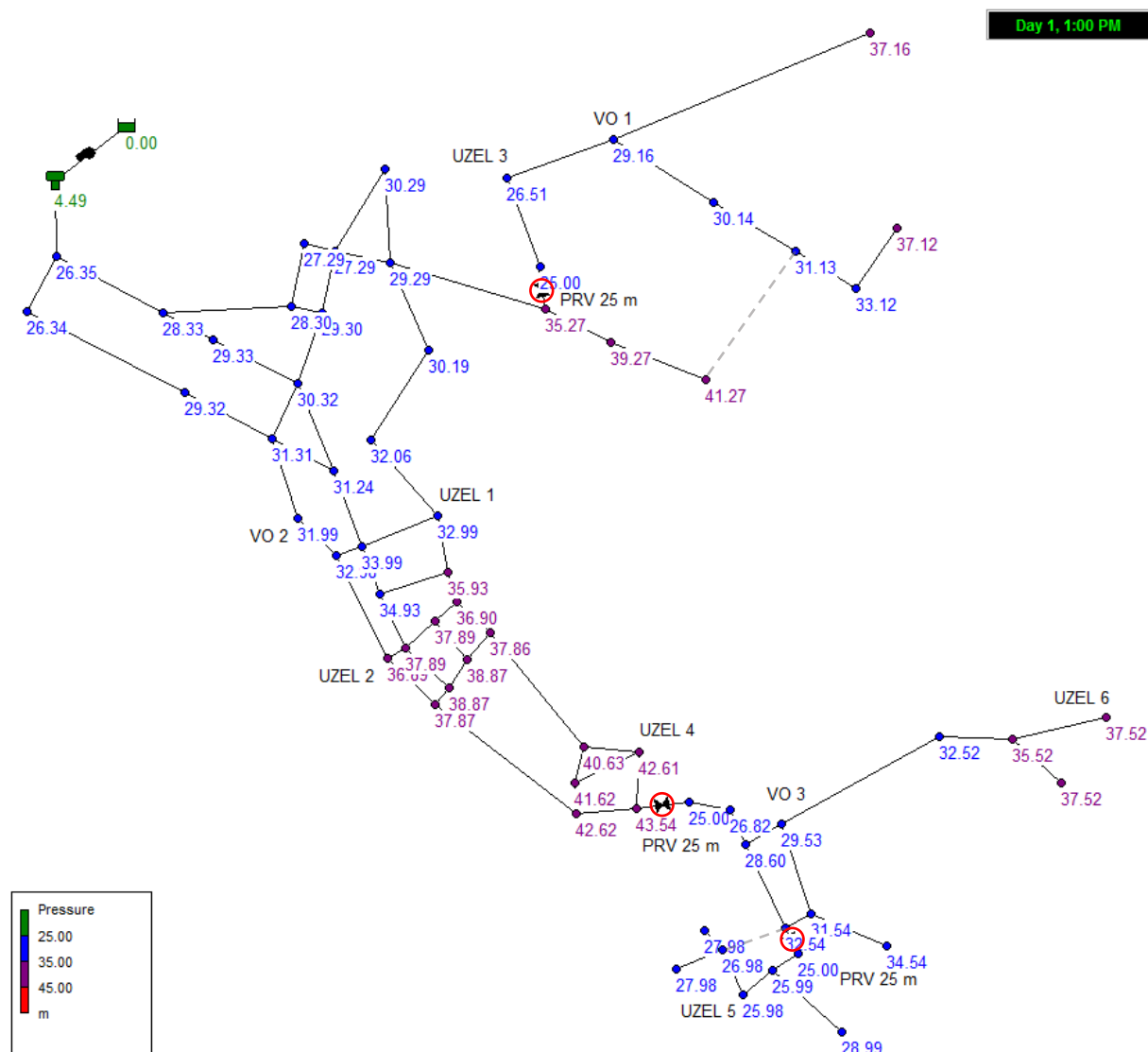
Toto opatření využilo vhodné členění sítě a rozdělilo ji na 2 tlaková pásma. Celkem toto opatření ovlivnilo 18 uzlů. Výsledkem je odbourání všech tlaků nad 45 m v. sl. v pravé spodní části schématu. Kolísání tlaků v uzlech za PRV bylo významně ovlivněno, například u uzlu 6 tlak původně kolísal o cca 3 m v. sl., po použití PRV kolísá o cca 0,5 m v. sl. Uzel 6 je také nejnižším místem sítě, tlak zde klesnul oproti původní variantě o cca 20,3 m v. sl.



Obrázek 4.9: Tlakové poměry v uzlech v čase 13:00 – varianta A

4.3.3 Navržené opatření – Varianta B

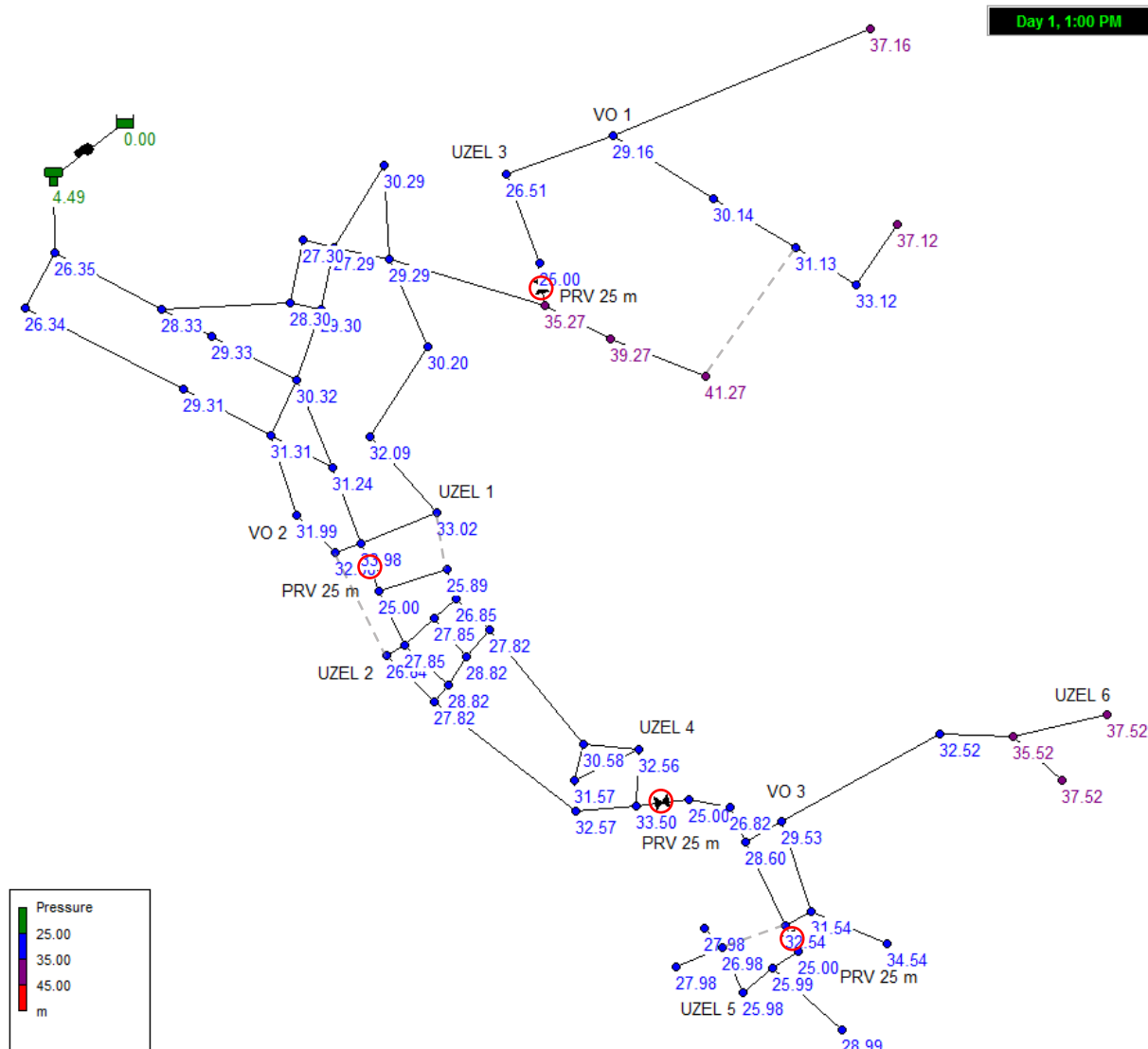
Do sítě byly provedeny výraznější zásahy, byly odebírány dva úseky (vyznačeny šedou čárkovanou čarou), aby voda neproudila v okruzích a mohly tak být umístěny další PRV, jeden do horní pravé části, druhý do spodní části schématu. Jejich umístění je vyznačeno červeným kolečkem, protože popisy uzlů je překrývají. Celkově se nyní v síti nachází tři PRV, z nichž každý byl nastaven na výstupní tlak 25 m v. sl. Tyto zásahy ovlivnily tlakové výšky, maximální dosahovaná tlaková výška v redukovaných pásmech je cca 37 m v. sl., a také kolísání tlaků v uzlech za PRV. Ty nyní kolísají v průběhu dne v řádu jednotek centimetrů. Celkem byly ovlivněno 26 uzlů. Opatřením byla síť rozdělena na 4 tlaková pásma. V nejspodnější části schématu v uzlech poklesly tlaky, oproti původní variantě, až o cca 27 m v. sl., v pravé horní části až o 13 m v. sl.



Obrázek 4.10: Tlakové poměry v uzlech v čase 13:00 – varianta B

4.3.4 Navržení opatření – Varianta C

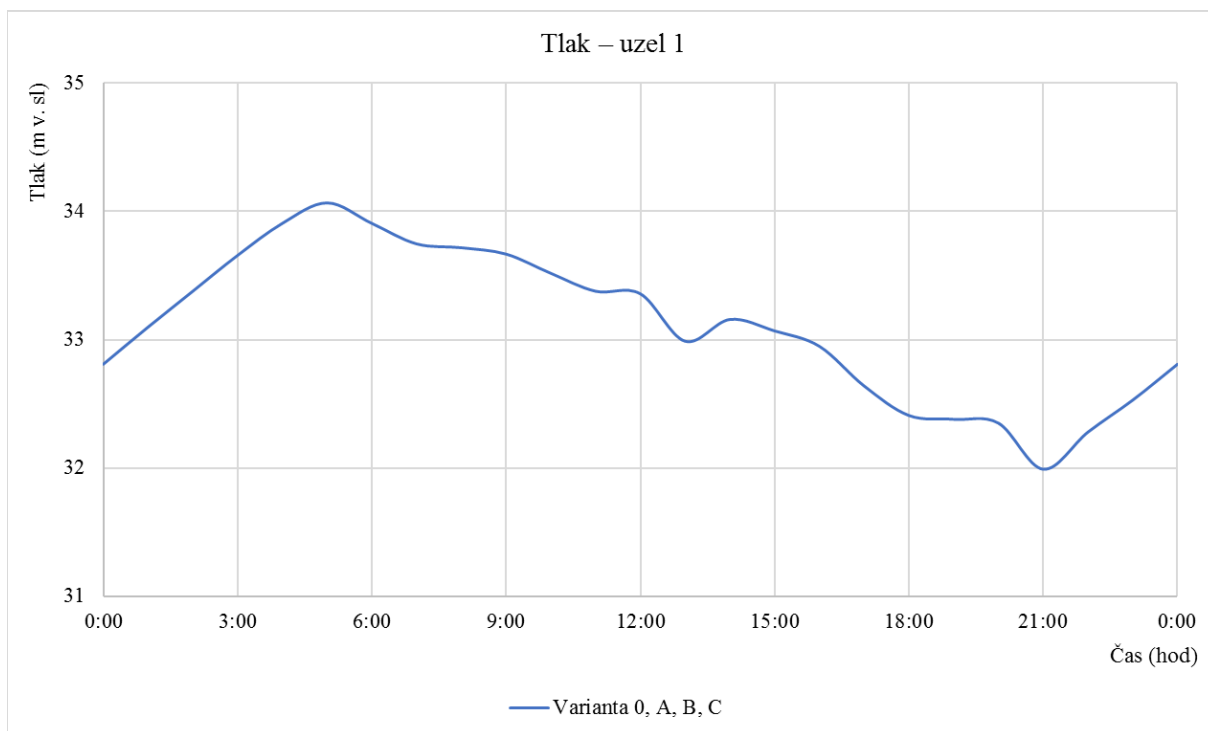
Síť byla dále upravena, okruhový charakter sítě ve střední části byl zredukován pro možnost umístění dalšího PRV, odebrané úseky jsou vyznačeny šedou čárkovanou čarou. V síti jsou nyní 4 PRV (označeny červeným kolečkem), všechny nastaveny na výstupní tlak 25 m v. sl. Síť je rozdělena na 5 tlakových pásem. Oproti předchozí variantě jsou navíc ovlivněny tlaky ve střední části schématu u dalších 15 uzlů. Celkem je tedy redukován tlak u 41 uzlů. Většina uzlů v této variantě má nižší tlak než 35 m v. sl.



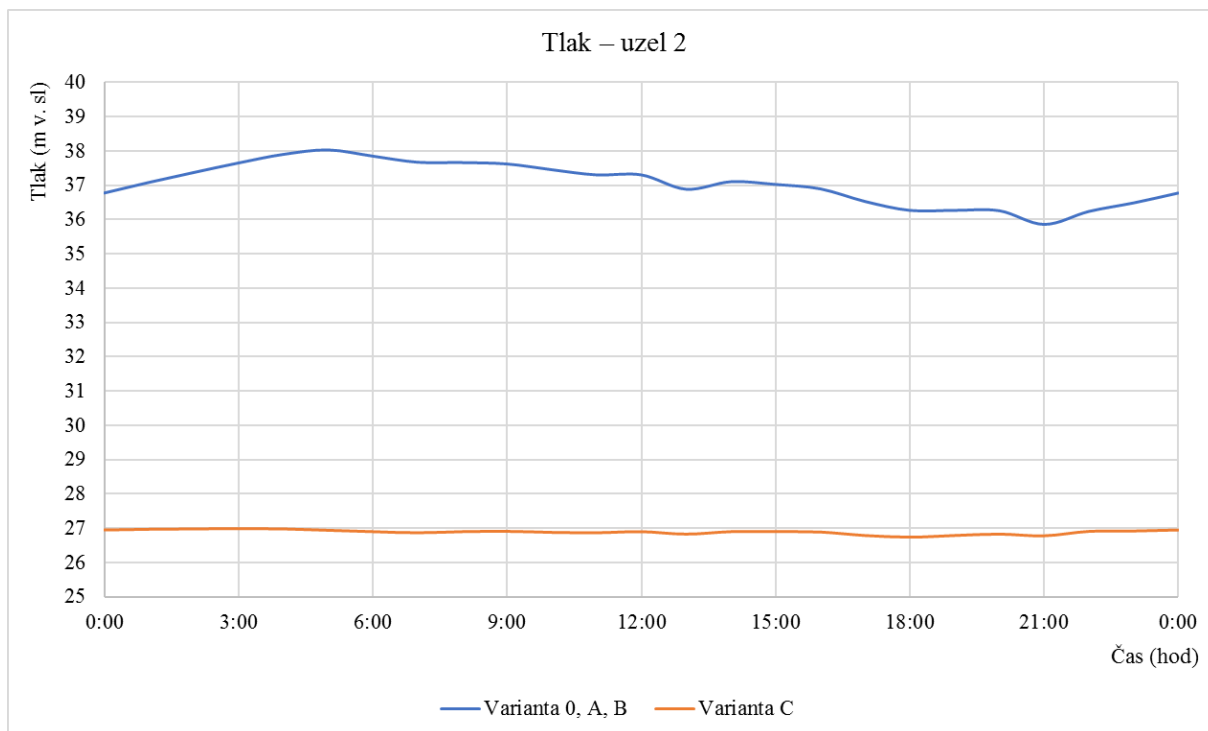
Obrázek 4.11: Tlakové poměry v uzlech v čase 13:00 – varianta C

4.3.5 Tlaky v zájmových uzlech

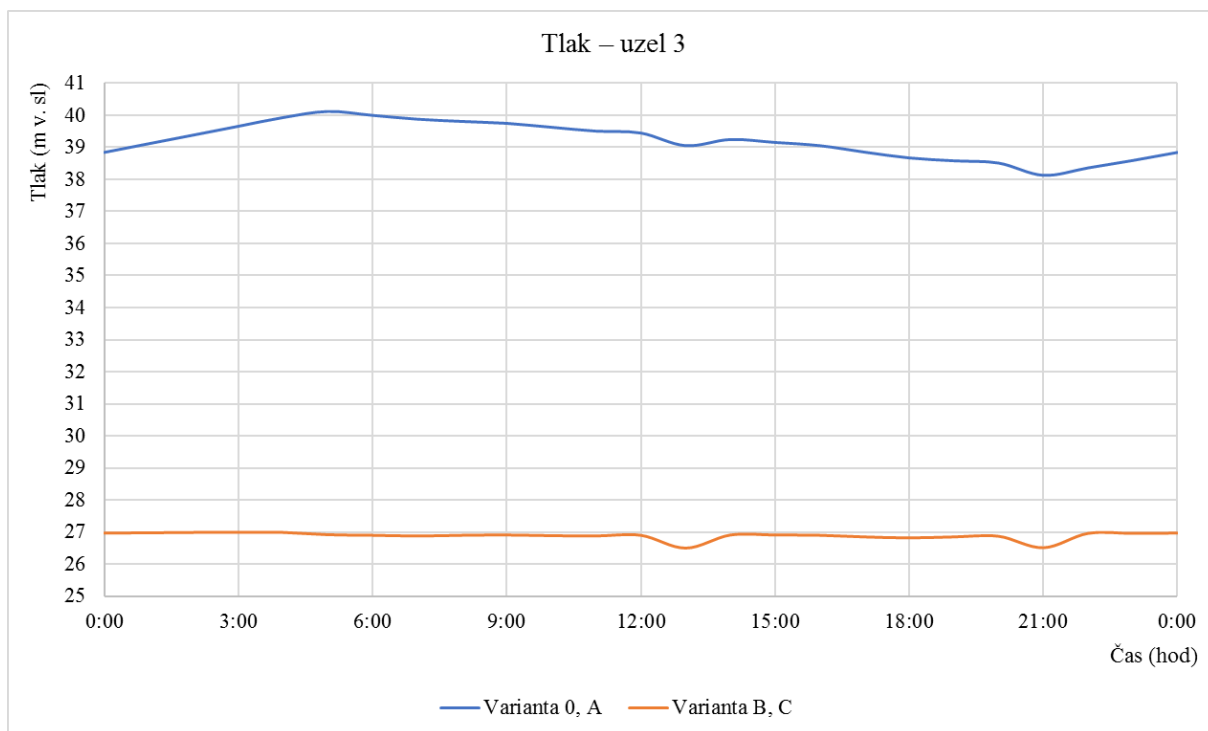
Pro větší přehlednost a možnost srovnání jsou změny tlaků pro jednotlivé varianty uvedeny v jednom grafu pro každý zájmový uzel. V mnoha případech linie grafů splývají, protože tlaky nebyly nijak ovlivněny. V uzlech za PRV byly tlaky výrazně zredukovány, také mnohem méně kolísají.



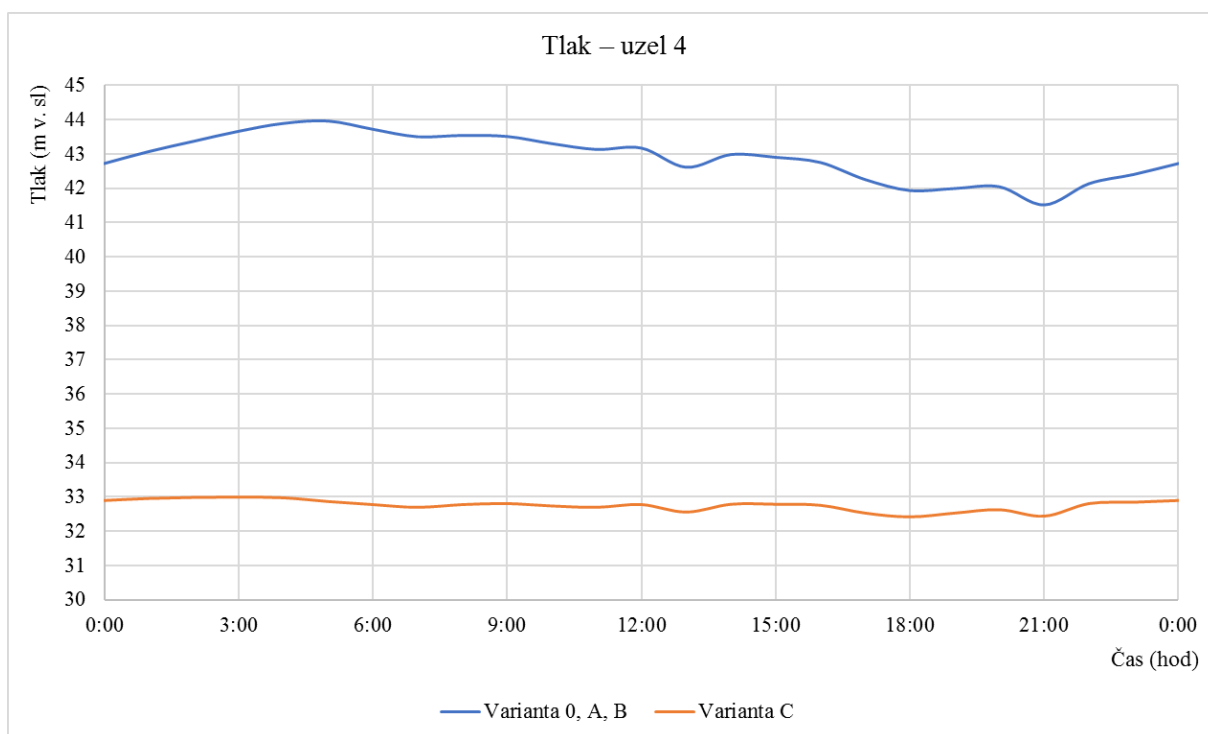
Obrázek 4.12: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 1



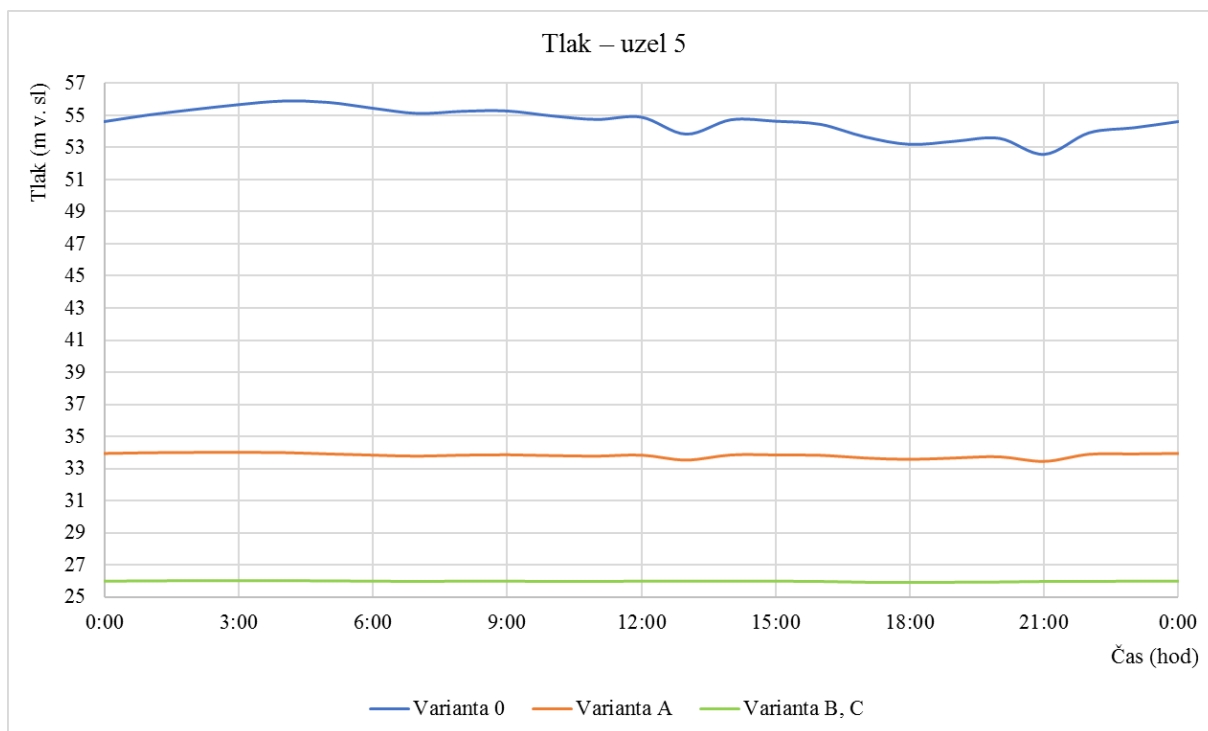
Obrázek 4.13: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 2



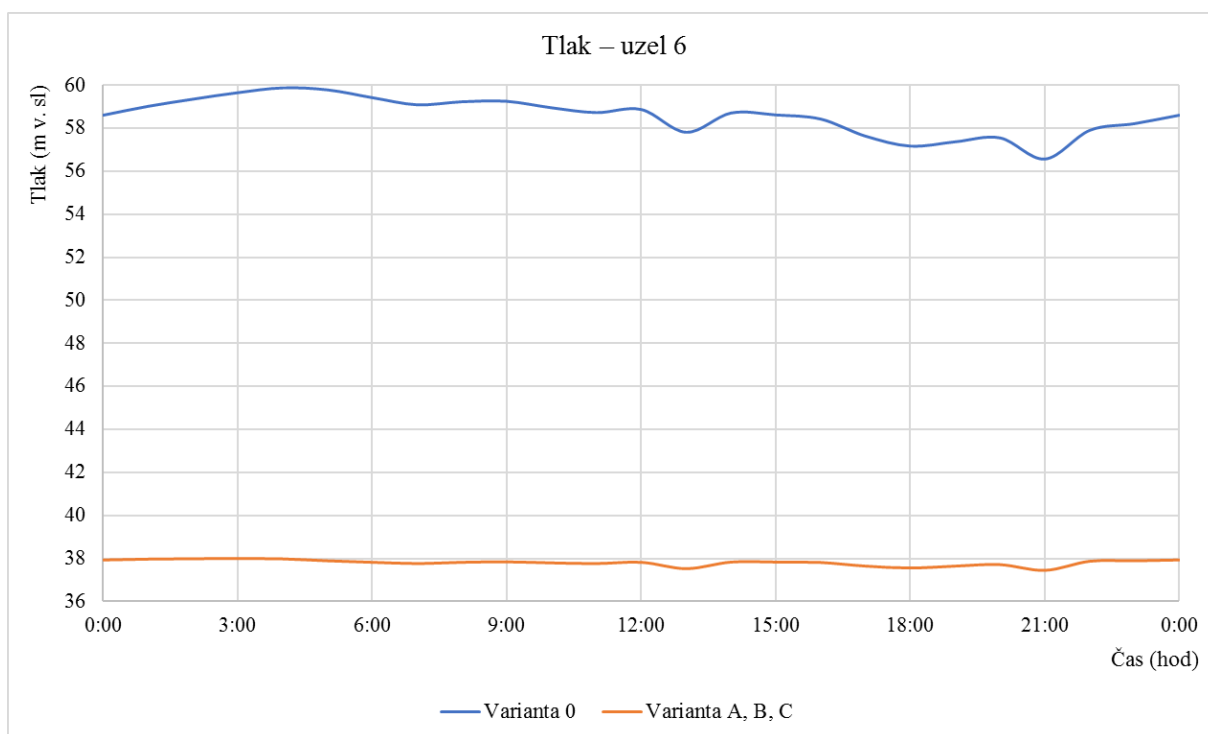
Obrázek 4.14: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 3



Obrázek 4.15: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 4



Obrázek 4.16: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 5



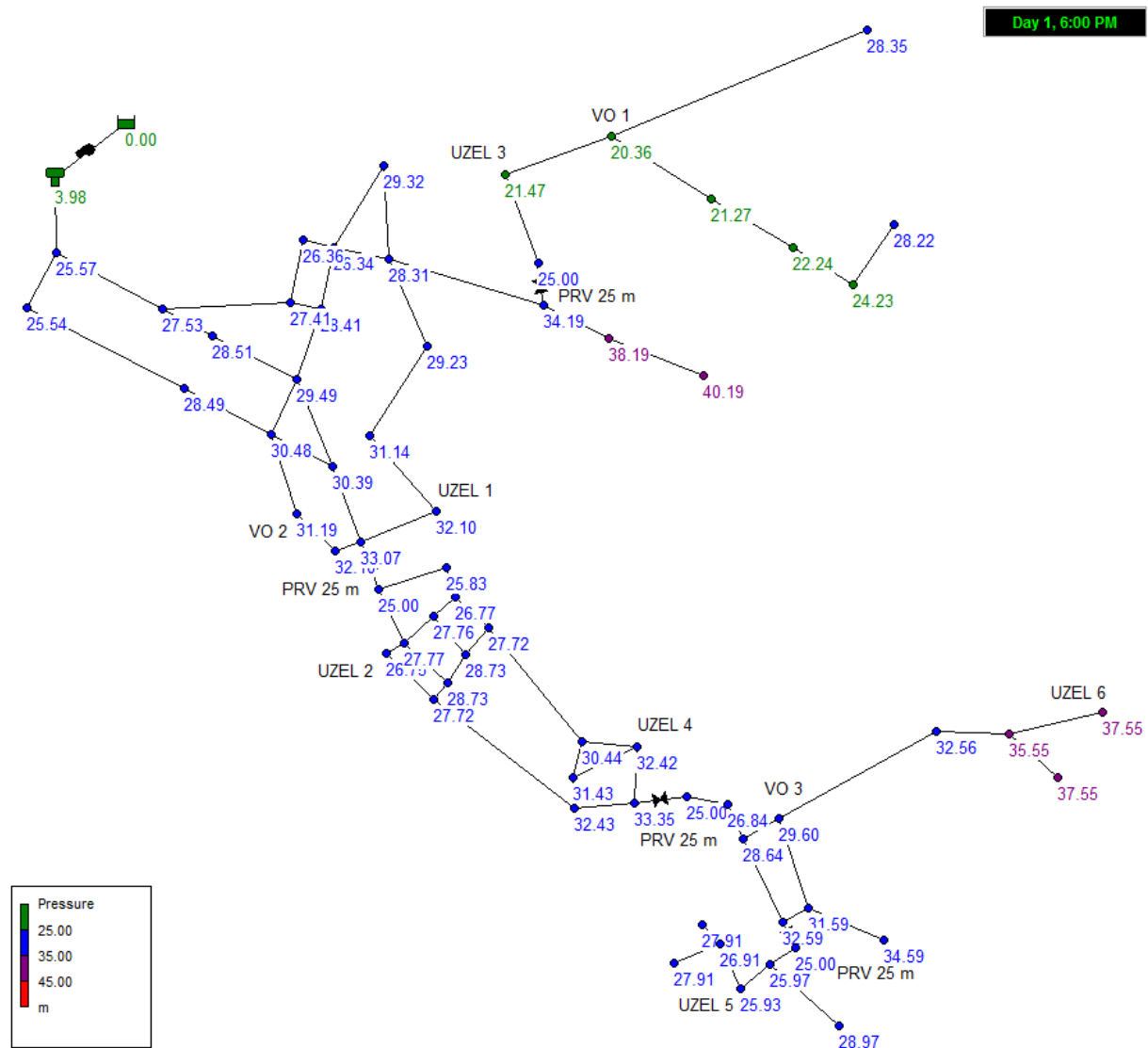
Obrázek 4.17: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 6

4.3.6 Požární událost – Varianta D

V případě požáru může vodovod sloužit jako zdroj požární vody. Požární odběr dalece přesahuje obvyklé zatížení sítě (pokud se jedná o malou síť). Významně ovlivní proudění vody i tlakové poměry. Cílem této varianty je zjistit, zdali zásahy do sítě negativně neovlivnily funkčnost vodovodu jako zdroje požární vody.

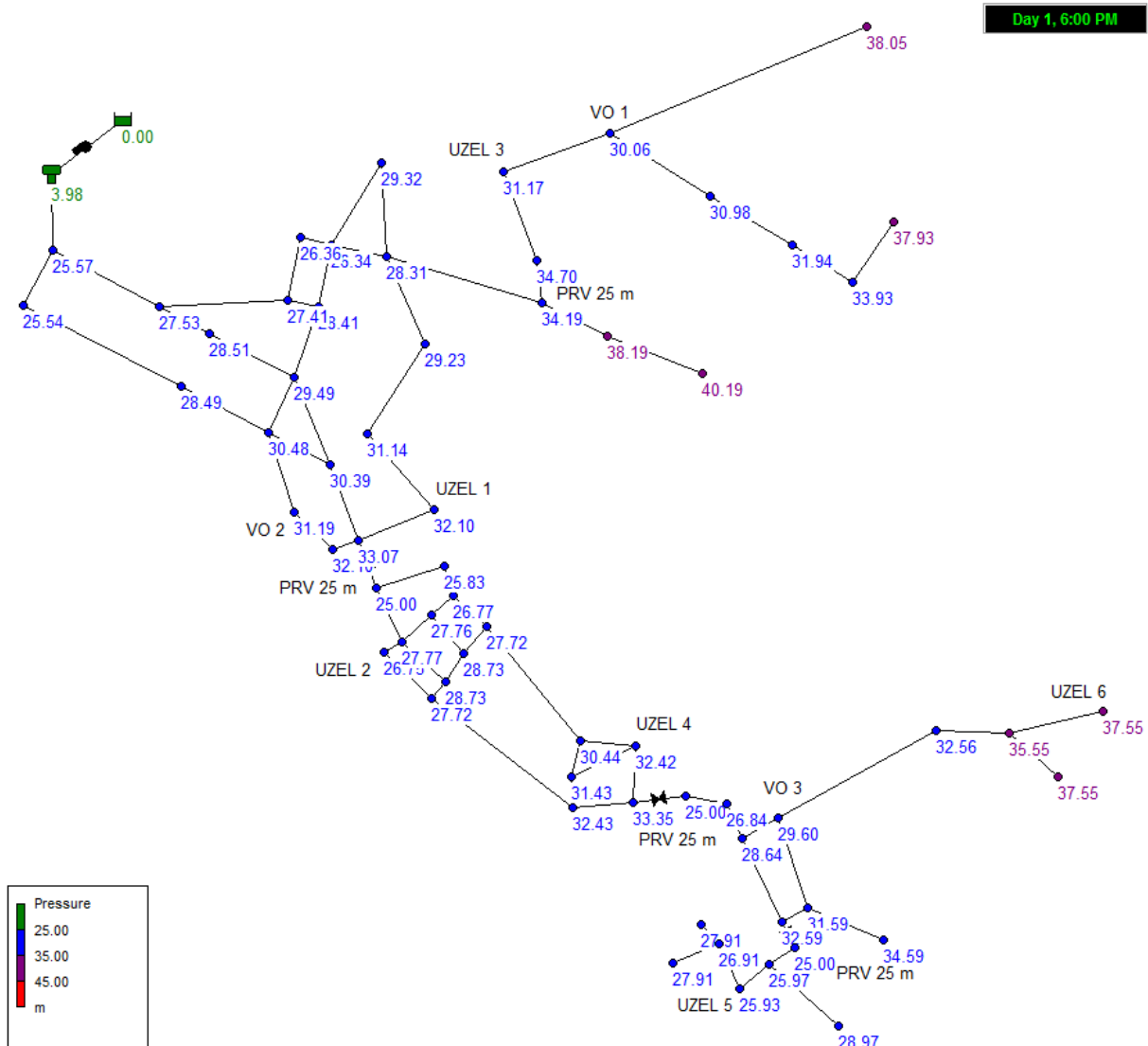
Ve variantě C, ve které bylo do sítě nejvíce zasaženo navrženými opatřeními, budou provedeny dvě nezávislé simulace požáru. Lokality požárního odběru byly zvoleny uzly, na kterých je realizován odběr vody pro velkoodběratele VO 1 a VO 3. Důvody pro tuto volbu jsou dva dle [5]. První je, že v těchto uzlech jsou ideálně splněny požadavky na maximální vzdálenost od hydrantu k zástavbě typu rodinného domu i v krajních uzlech sítě. Druhý je, že požadavek na vzdálenost hydrantu od výrobních a nevýrobních objektů je menší než u rodinné zástavby. Požár je simulován v čase maximálních odběrů v síti – v 18:00. Požární odběr je $7,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Maximální rychlost proudění vody v potrubí je $1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Varianta D1 – požární odběr v uzlu VO 1



Obrázek 4.18: Požární odběr v uzlu VO 1 v čase 18:00 – varianta D1 (PRV aktivní)

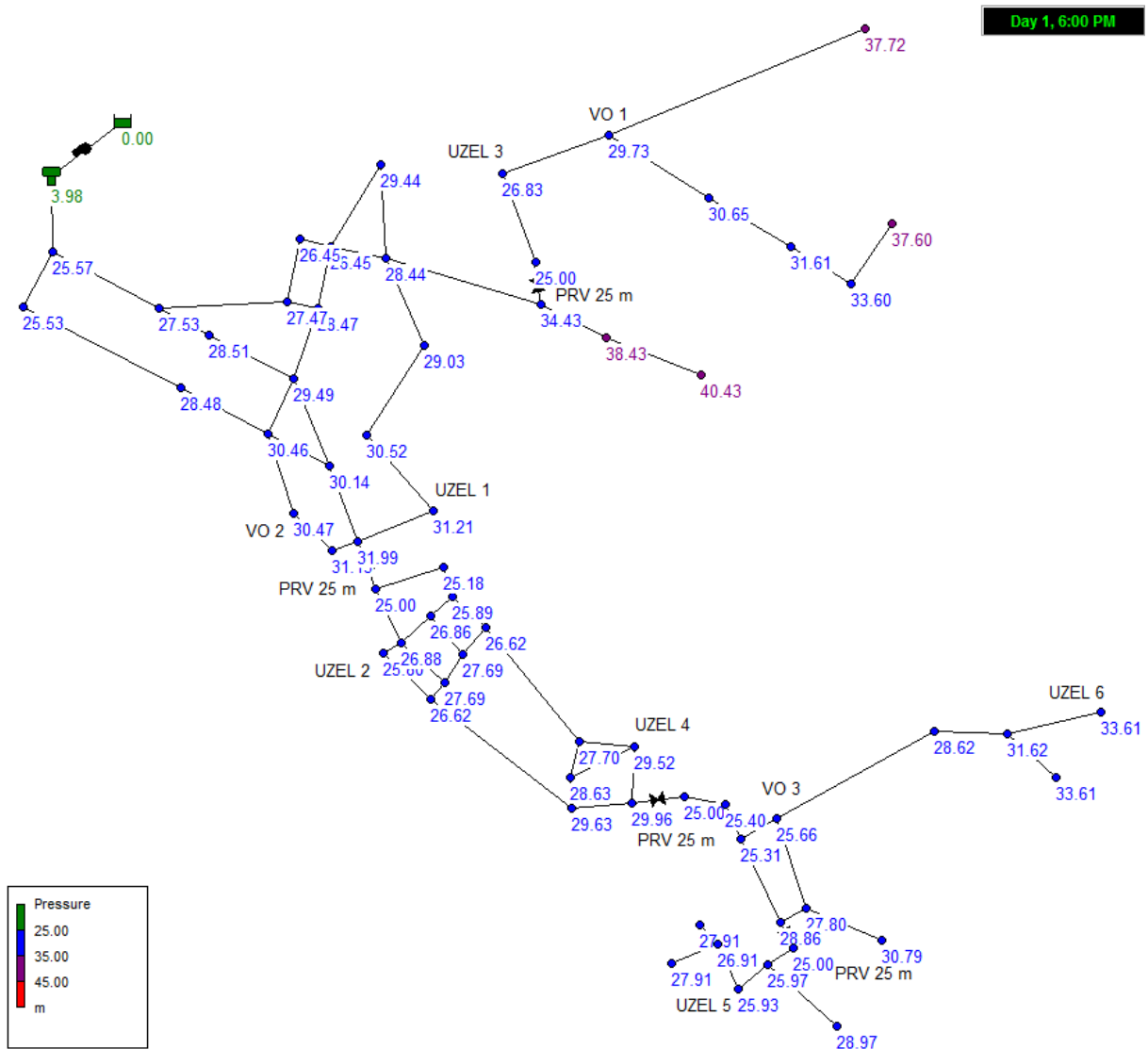
Ve schématu z modelu na obrázku 4.18 vidíme, jaký nastal problém – v některých uzlech sítě poklesl tlak pod minimální požadovanou hodnotu 25 m v. sl. Řešením je omezení funkce PRV. Možným způsobem je PRV dálkově ovládaný hasičskou centrálou nebo PRV automaticky reagující na změnu průtokových poměrů. Na obrázku 4.19 je stejná zátěžová situace, ventil je však plně otevřen. Uzly nyní splňují požadavek na minimální tlak.



Obrázek 4.19: Požární odběr v uzlu VO 1 v čase 18:00 – varianta D1 (PRV deaktivován)

Varianta D2 – požární odběr v uzlu VO 3

Při odběru požární vody v uzlu VO 3 síť splňuje tlakové požadavky, není třeba žádného zvláštního opatření. Situace je zobrazena na obrázku 4.20.



Obrázek 4.20: Požární odběr v uzlu VO 3 v čase 18:00 – varianta D2 (PRV aktivní)

4.3.7 Shrnutí a zhodnocení

V této práci je posuzováno primárně hledisko tlakové. Pro vyhodnocení vlivu opatření na tlakové poměry v síti a možnost srovnání variant mezi sebou bude použit vzorec [39]:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{24} (P_1 - P_2), \quad (4.1)$$

kde ΔP ... celková tlaková diference v síti [m v. sl.],

n ... počet uzlů v síti [-],

P_1 ... tlak v uzlu [m v. sl.],

P_2 ... minimální legislativně požadovaný tlak [m v. sl.].

Tabulka 4.1: Posouzení diferencí tlaků ve variantách

Čas	ΔP_j (m v. sl.)			
	Varianta 0	Varianta A	Varianta B	Varianta C
0:00	1011,96	639,78	489,08	341,74
1:00	1032,32	653,45	500,56	348,95
2:00	1051,02	666,53	511,48	355,69
3:00	1069,06	679,36	522,08	362,18
4:00	1084,98	690,98	531,64	367,90
5:00	1091,51	697,48	536,42	370,14
6:00	1078,54	689,71	529,69	365,60
7:00	1065,94	681,90	522,98	361,19
8:00	1066,54	681,07	522,56	361,27
9:00	1064,10	678,74	520,77	360,35
10:00	1052,41	671,51	514,52	356,19
11:00	1042,67	665,19	509,19	352,85
12:00	1043,33	664,41	508,79	352,94
13:00	1009,53	644,13	489,12	338,60
14:00	1031,02	655,27	501,35	348,56
15:00	1025,62	651,40	498,16	346,63
16:00	1017,01	645,83	493,39	343,59
17:00	990,86	630,69	480,15	334,53
18:00	972,91	619,58	470,58	328,20
19:00	973,89	618,53	470,12	328,42
20:00	974,81	617,53	469,60	328,55
21:00	942,27	597,71	450,75	315,00
22:00	976,14	615,42	468,64	328,99
23:00	992,85	626,92	478,27	335,00
0:00	1011,96	639,78	489,08	341,74
$\Sigma \Delta P_j$	25673,25	16322,90	12478,97	8674,80

Z tabulky je patrné, o kolik jsou v uzlech překročeny legislativně vyžadované hodnoty hydrodynamického tlaku, jedná se o diferenci mezi skutečným tlakem v uzlech a požadavkem na minimální tlak. Ve sloupcích jsou zaneseny součty diferencí tlaků všech 64 uzlů v síti pro jednotlivé varianty. Na řádcích jsou uvedeny difference tlaků v jednotlivých časech simulace. Na posledním řádku se nachází sumy těchto diferencí tlaků ve všech uzlech a časech.

Dalším hodnotícím faktorem bude vliv opatření na spotřebu vody. Pro výpočet bude použit vzorec 3.2. Budou použity hodnoty: $C = 0,0005$, $N_1 = 0,5$, h dle tlakových výšek jednotlivých uzlů v různých variantách. Tímto vzorcem se vyjádří výtok z původní neupravené varianty a ověřované varianty pro všechny uzly ve všech časech. Diferenci mezi původní a ověřovanou variantou vyjádříme procentuálně. Procento pak vztáhneme na původní odběr a dostaneme snížený odběr. Pouze polovina spotřeby vody bude brána jako závislá na tlaku. Výsledek bude vyjádřen jako suma všech odběrů ve všech časech pro všechny varianty, tj. celková denní spotřeba vody. Je nutné podotknout, že výsledek bude spíše orientační. Pro přesnější výsledek by bylo nutné vytvořit model řízený tlakem, což přesahuje rámec této práce.

Tabulka 4.2: Posouzení změn odběrů ve variantách

Čas	Varianta 0		Varianta A		Varianta B		Varianta C	
	%	Q [m ³ .hod ⁻¹]	%	Q [m ³ .hod ⁻¹]	%	Q [m ³ .hod ⁻¹]	%	Q [m ³ .hod ⁻¹]
0:00	100,00	17,57	96,97	17,04	95,51	16,78	93,92	16,50
1:00	100,00	10,98	96,93	10,64	95,46	10,48	93,84	10,30
2:00	100,00	6,59	96,90	6,38	95,42	6,29	93,75	6,18
3:00	100,00	4,39	96,87	4,25	95,37	4,19	93,68	4,11
4:00	100,00	8,78	96,85	8,51	95,34	8,37	93,61	8,22
5:00	100,00	20,77	96,84	20,12	95,32	19,80	93,56	19,43
6:00	100,00	27,36	96,87	26,50	95,35	26,09	93,61	25,61
7:00	100,00	31,75	96,89	30,76	95,38	30,28	93,66	29,74
8:00	100,00	27,36	96,89	26,51	95,38	26,09	93,66	25,63
9:00	100,00	25,16	96,89	24,38	95,38	24,00	93,67	23,57
10:00	100,00	29,56	96,91	28,64	95,41	28,20	93,72	27,70
11:00	100,00	31,75	96,93	30,78	95,43	30,30	93,76	29,77
12:00	100,00	27,36	96,92	26,52	95,43	26,11	93,76	25,65
13:00	100,00	41,36	96,98	40,12	95,48	39,50	93,86	38,82
14:00	100,00	26,28	96,94	25,48	95,46	25,09	93,82	24,66
15:00	100,00	26,28	96,95	25,48	95,48	25,09	93,85	24,66
16:00	100,00	28,48	96,97	27,61	95,50	27,19	93,88	26,73
17:00	100,00	39,46	97,02	38,28	95,56	37,70	93,98	37,08
18:00	100,00	43,85	97,06	42,56	95,61	41,92	94,05	41,24
19:00	100,00	39,46	97,05	38,29	95,60	37,72	94,05	37,11
20:00	100,00	35,06	97,04	34,03	95,60	33,52	94,06	32,98
21:00	100,00	45,79	97,10	44,46	95,66	43,80	94,16	43,12
22:00	100,00	24,16	97,03	23,44	95,60	23,09	94,08	22,72
23:00	100,00	21,96	97,00	21,30	95,56	20,99	94,00	20,64
0:00	100,00	17,57	96,97	17,04	95,51	16,78	93,92	16,50
Průměr	100,00	-	96,95	-	95,47	-	93,84	-
ΣV[m³]	-	659,09	-	639,11	-	629,39	-	618,69

Varianta 0

Ve výchozím stavu je na síti během jediného dne více než 25,6 km zbytečných tlakových výšek. Nejradikálnější varianta C tuto hodnotu zmenší na 8,6 km. Ale i méně nekompromisní varianty představují výrazné redukce tlaků v síti.

Celková spotřeba vody v síti za den je cca 659 m³. Jedná se o vodu fakturovanou, voda nefakturovaná není nijak uvažována. Při průměrné ceně v ČR 83 Kč za 1 m³[40] je celková cena spotřebované vody za rok cca 19 964 000 Kč (poznámka: spotřeba je přemrštěná pro takto malé spotřebiště, důvodem jsou nereálně vysoké odběry v uzlech, které byly zvoleny záměrně tak velké pro větší kolísání tlaků v síti).

Varianta A

Varianta A spočívá v umístění jednoho PRV do sítě. Toto řešení vhodně využívá topologii, může být aplikováno bez zásahu do členění sítě. Výsledkem je významné snížení tlaků v nejproblematičtějším místě, kde tlak dosahoval téměř hodnot 60 m v. sl. Toto opatření je prakticky nezbytné, pokud má být v síti tlak redukován. Suma všech diferencí tlakových výšek je snížena o cca 9,3 km proti původní variantě.

Spotřeba vody za den klesla na cca 639 m³, což je o 3,05 % (20 m³) méně než v původní variantě. Za rok je spotřebováno méně vody, snížení spotřeby vyjádřené finančně je o cca 606 000 Kč za rok méně.

Varianta B

Ve Variantě B jsou v síti umístěny celkem 3 PRV. Bylo třeba odebrat dva úseky, aby šlo PRV umístit, čímž byla narušena okružová topologie sítě, nicméně zásah nebyl nijak radikální. Dva přidané ventily ovlivňují tlaky v nejvzdálenějších a nejnižších místech sítě. Jedná se o okrajové uzly, proto je ovlivněných uzlů relativně málo, a je třeba zvážit, zdali se toto řešení ekonomicky vyplatí. Suma všech diferencí tlakových výšek je snížena o cca 13,2 km proti původní variantě.

Denní spotřeba vody se snížila na cca 629 m³, což je pokles o 4,53 % (30 m³), než bylo původně. Finančně vyjádřený rozdíl za rok dělá cca 909 000 Kč.

Varianta C

Ve variantě C jsou osazeny 4 PRV, a skoro všechny tlaky v uzlech jsou zredukovány pod hodnotu 35 m v. sl. Tato hodnota ale bývá uvažována jako dolní hranice intervalu ideálního tlaku. Je proto na zvážení, zdali by tato varianta byla vhodným řešením. Dalším aspektem je odbourání okružové topologie sítě ve střední části, je otázkou, zdali je to optimální situace. Tlaky jsou zredukovány extrémně, celková suma všech tlakových diferencí je o cca 17,0 km nižší než původní varianta.

Spotřeba vody klesla o 6,16 % (41 m³) za den. Za rok je tedy fakturováno méně vody v hodnotě cca 1 242 000 Kč.

Pokud bychom požadovali čistě tlakovou minimalizaci, tak varianta C nabízí nejlepší výsledek. Nicméně celá problematika byla značně zjednodušena a při tlakové optimalizace reálné sítě by bylo třeba posoudit mnoho dalších faktorů.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou tlakové optimalizace vodovodních sítí.

Je zde přiblížen legislativní rámec požadavků na tlakové poměry v České republice a z důvodu možnosti porovnání i ve vybraných cizích zemích (Slovenská republika, Anglie a Wales, USA – Georgie, Austrálie a Nový Zéland). V této souvislosti jsou uvedeny konkrétní výňatky z norem a požadované hodnoty.

Dále jsou zde popsány možné způsoby ohodnocení fungování sítě (benchmarking) a možnosti srovnávání systémů mezi sebou. Benchmarking je nutný pro zjištění, v jakém stavu se systém nachází a jaké jsou jeho parametry. Tyto přístupy se snaží o objektivizaci vhodných ukazatelů, aby bylo možné porovnávat systémy, které jsou zcela unikátní. Jsou popsány tři základní přístupy k benchmarkingu: všeobecný benchmarking (hodnotící celý systém a provozní parametry), energetický benchmarking (hodnotící energetickou náročnost systému), technický benchmarking (hodnotící technický stav).

Následně jsou objasněny důvody pro tlakovou optimalizaci, tedy jaká pozitiva přináší. Poté je přiblížen vliv změn tlaků na výtok ze systému, a to jak výtok kontrolovaný (odběr u spotřebitele), tak i nekontrolovaný (ztráty a úniky). U úniků jsou stručně popsány různé druhy otvorů a jaký vliv na ně má změna tlakových poměrů.

V další části jsou uvedeny způsoby změny tlakových poměrů: využití malých turbín, použití odpojovacích ventilů, změny v režimech vodojemů, změny v rozvodné síti, použití tlakových redukčních ventilů, zapojení zesilovací čerpací stanice, rozdělení sítě na tlaková pásma.

Dále jsou uvedeny Evropské případové studie, které vznikly v posledních letech pro účely tlakové optimalizace.

Hlavní část práce je věnována případové studii. Na začátku tohoto oddílu jsou uvedeny teoretické základy matematického modelování hydraulických sítí. Část dále pokračuje popisem programu EPANET 2.0, který umožňuje vytvářet hydraulický model vodovodní sítě. Samotná případová studie popisuje fiktivní vodovodní síť ve výchozím stavu. Následně jsou provedeny tři varianty navržených opatření pro snížení tlaků v uzlech sítě. Důsledky těchto opatření jsou ukázány na celkovém pohledu na síť a v šesti vybraných uzlech jsou graficky zobrazeny změny v průběhu dne. Je ověřen vliv požárního odběru, Na závěr jsou uvedeny celkové sumy změn diferencí tlaků pro různé varianty a je provedeno jejich srovnání. Dalším hodnotícím faktorem je vliv změn tlaků na spotřebu vody fakturované.

Bakalářská práce splnila cíle, které jsou popsány v zadání a v úvodní části. Při srovnávání legislativ různých států bylo zjištěno, že se požadavky na tlaky ve vodovodu v zahraničí příliš neliší od těch aplikovaných v České republice. Kapitola o benchmarkingu může být užitečným nástrojem při zjišťování, jak moc je nějaká síť vhodná pro tlakovou optimalizaci a kolik je u ní prostoru ke zlepšení. Je popsán mechanismus děje, kterého se mohou provozovatelé vodovodů obávat – vliv snížení tlaků na množství odběrů (i úniků) vody ze sítě. Nejpodstatnější částí práce je nejspíše popis způsobů tlakové optimalizace. Uvádí klasické hojně aplikované prostředky, ale také nové přístupy různých autorů k problematice. Případová studie je spíše ilustrativní, představuje převážně schopnosti programu EPANET 2.0, ale i jakých výsledků lze tlakovou optimalizací dosáhnout.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č.274 ze dne 10.července 2001 o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2001, částka 104. Dostupný z: <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=3682>
- [2] ČSN EN 805. *Vodárenství – Požadavky na vnější sítě a jejich součásti*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2001.
- [3] ČSN 75 5401. *Navrhování vodovodního potrubí*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2007.
- [4] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 428/2001 Sb.* In: . 2001.
- [5] ČSN 73 0873. *Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003.
- [6] SUCHÁČEK, Tomáš a Ladislav TUHOVČÁK. Hydraulické okrajové podmínky pro optimalizaci tlakových poměrů ve vodárenských sítích. *JUNIORSTAV*. 2017, **2017**, 8.
- [7] STN 75 5401:1989, *Navrhovanie vodovodných potrubí*.
- [8] UNITED KINGDOM. 2008 No. 594 WATER INDUSTRY, ENGLAND AND WALES: The Water Supply and Sewerage Services (Customer Service Standards) Regulations 2008. In: *London: UK by The Stationery Office Limited*, 2008. Dostupné z: http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2008/594/pdfs/ukxi_20080594_en.pdf
- [9] GEORGIE, USA. MINIMUM STANDARDS FOR PUBLIC WATER SYSTEMS. In: *Atlanta: Georgia Environmental Protection Division*, 2000. Dostupné z: http://epd.georgia.gov/sites/epd.georgia.gov/files/related_files/site_page/standards.pdf
- [10] Plumbing and drainage: Part 1: Water service. *Sydney, N.S.W: Standards Australia International, 2003. Australia Standards/New Zeland Standards*. ISBN 07-337-5475-9. Dostupné také z: <https://law.resource.org/pub/nz/ibr/as-nzs.3500.1.2003.pdf>
- [11] SYDNEY WATER. *Getting connected* [online]. Sydney. Dostupné z: https://www.sydneywater.com.au/web/groups/publicwebcontent/documents/document/zgrf/mdq1/~edisp/dd_045161.pdf
- [12] SUCHÁČEK, Tomáš, Ladislav TUHOVČÁK a Jan RUČKA. Možnosti srovnání vodárenských systémů a provozovatelů. *SOVAK*. 2017, **2017**(2), 4.
- [13] WaBe: O projektu. *WaBe* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.wabe.cz/index.php/o-projektu>
- [14] CABRERA, Enrique, Miguel A. PARDO, Ricardo COBACHO a Enrique CABRERA JR. Energy Audit of Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2010, **136**(6), 669-677. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077. ISSN 0733-9496. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000077](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077)
- [15] BOLOGNESI, A., C. BRAGALLI, C. LENZI a S. ARTINA. Energy Efficiency Optimization in Water Distribution Systems. *Procedia Engineering*. 2014, **70**, 181-190. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.021. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187770581400023X>

- [16] MAMADE, A., D. LOUREIRO, D. COVAS a H. ALEGRE. Energy Auditing as a Tool for Improving Service Efficiency of Water Supply Systems. *Procedia Engineering*. 2014, **89**, 557-564. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.478. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814025934>
- [17] LIMA, G. M., A. N. C. VIANA, R. S. C. DIAS JUNIOR a E. LUVIZOTTO JUNIOR. Classification of water supply systems based on energy efficiency. *Water Science and Technology: Water Supply*. 2015, **15**(6), 1193-1199. DOI: 10.2166/ws.2015.082. ISSN 1606-9749. Dostupné také z: <http://ws.iwaponline.com/cgi/doi/10.2166/ws.2015.082>
- [18] TEA Water [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.teawater.cz/>
- [19] THORNTON, J. a A. LAMBERT. Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. *Paper to IWA Special Conference "Leakage 2005"*. Halifax, Canada, 2005.
- [20] NOGUEIRA VILANOVA, Mateus Ricardo a José Antônio PERRELLA BALESTIERI. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, **30**, 701-714. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.024. ISSN 13640321. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113007739>
- [21] LAMBERT, Allan, Marco FANTOZZI a Julian THORNTON. Practical approaches to modeling leakage and pressure management in distribution systems – progress since 2005. *12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013*. Perugia, Italy, 2013, 11.
- [22] RACLAVSKÝ, J., L. TUHOVČÁK a S. MALANÍK. *Rekonstrukce vodohospodářských sítí*. 1. Brno: VUT v Brně: FAST, 2006.
- [23] CONEJOS, María Pilar, Fernando Martínez ALZAMORA a Joan Carles ALONSO. A Water Distribution System Model to Simulate Critical Scenarios by Considering Both Leakage and Pressure Dependent Demands. *Procedia Engineering*. 2017, **186**, 380-387. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.234. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817313838>
- [24] CASSA, A. M. a J. E. VAN ZYL. A Numerical Investigation into the Behaviour of Cracks in uPVC Pipes under Pressure. *Water Distribution Systems Analysis 2008*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2009, 1-8. DOI: 10.1061/41024(340)65. ISBN 9780784410240. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41024\(340\)65](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41024(340)65)
- [25] CASSA, A.M. a J.E. VAN ZYL. Predicting the Leakage Exponents of Elastically Deforming Cracks in Pipes. *Procedia Engineering*. 2014, **70**, 302-310. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.034. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814000368>
- [26] CASSA, A. M., J. E. VAN ZYL a R. F. LAUBSCHER. A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water Journal*. 2010, **7**(2), 109-120. DOI: 10.1080/15730620903447613. ISSN 1573-062x. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15730620903447613>
- [27] BENEŠ, J. Výzkum možností využití malých turbín ve vodárenských sítích. *SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací*. 2014, **2014**(3), 22-25.

- [28] *ATJ special, s.r.o.: Regulační ventily* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.atj.cz/regulacni-ventily>
- [29] ŠEVČÍK, Jiří. *Tlakové redukční ventily CLA-VAL* [přednáška]. Ostrovačice: ATJ special, s.r.o., 24. dubna 2017.
- [30] TUHOVČÁK, L., P. ADLER, T. KUČERA a J. RACLAVSKÝ. *Vodárenství: B. Doprava vody*. 1. Brno: VUT v Brně: Akademické nakladatelství CERM, s r. o., 2006.
- [31] VICENTE, D. J., L. GARROTE, R. SÁNCHEZ a D. SANTILLÁN. Pressure Management in Water Distribution Systems: Current Status, Proposals, and Future Trends. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2016, **142**(2), 04015061-. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000589. ISSN 0733-9496. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000589](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000589)
- [32] KUČERA, Tomáš. *Hydraulická analýza vodovodních sítí. Vodovod.info - vodárenský informační portál*[online]. Dostupný z WWW: <http://www.vodovod.info>. ISSN 1804-7157.
- [33] HOFMANNOVÁ, Lenka. *Hydraulická analýza vodovodní sítě sídliště Brno - Bystrc*. Brno, 2014. 68 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.
- [34] 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.
- [35] Bc. Tomáš Sucháček *Optimalizace tlakových poměrů ve vodovodní síti obce Střelná*. Brno, 2015. 103 s., 23 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.
- [36] EPANET: Software That Models the Hydraulic and Water Quality Behavior of Water Distribution Piping Systems [online]. 2008 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- [37] ROSSMAN, Lewis A. *EPANET 2 Users manual*. United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [38] *Epanet.js: Net3.inp* [online]. 2013 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://epanet.de/js/>
- [39] TRICARICO, C., M.S. MORLEY, R. GARGANO, Z. KAPELAN, G. DE MARINIS, D. SAVIĆ a F. GRANATA. Integrated Optimal Cost and Pressure Management for Water Distribution Systems. *Procedia Engineering*. 2014, **70**, 1659-1668. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.183. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814001854>
- [40] Ceny vody 2016. *Vakinfo.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.vakinfo.cz/vodovody/ceny-vody-2016>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Shrnutí legislativních požadavků na tlak ve vybraných zemích [6]	12
Tabulka 2.2: Rozdělení druhů energie [14].....	15
Tabulka 2.3: Energetická bilance [16]	16
Tabulka 3.1: Benefity tlakového managementu [21]	19
Tabulka 3.2: Závislost výtoku malým otvorem na tlakové výšce.....	20
Tabulka 3.3: Závislost výtoku malým otvorem na velikosti otvoru	21
Tabulka 3.4: Případové studie – Evropa [31].....	29
Tabulka 4.1: Posouzení diferencí tlaků ve variantách.....	51
Tabulka 4.2: Posouzení změn odběrů ve variantách	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3.1: Graf závislosti výtoku malým otvorem na tlakové výšce.....	20
Obrázek 3.2: Řez PRV [28].....	23
Obrázek 3.3: Princip ATS [30]	24
Obrázek 3.4: Graf odběrů a tlaků	28
Obrázek 4.1: Příklad zvolené orientace u okružové podmínky [30].....	33
Obrázek 4.2: Elevace uzlů.....	36
Obrázek 4.3: Dimenze úseků	37
Obrázek 4.4: Délky úseků	38
Obrázek 4.5: Odběry v uzlech v čase 13:00	39
Obrázek 4.6: Koeficienty vyjadřující změnu potřeby vody v průběhu dne – běžné uzly	40
Obrázek 4.7: Koeficienty vyjadřující změnu potřeby vody v průběhu dne – velkoodběratelé	40
Obrázek 4.8: Tlakové poměry v uzlech v čase 13:00 – Varianta 0.....	41
Obrázek 4.9: Tlakové poměry v uzlech v čase 13:00 – varianta A.....	42
Obrázek 4.10: Tlakové poměry v uzlech v čase 13:00 – varianta B	43
Obrázek 4.11: Tlakové poměry v uzlech v čase 13:00 – varianta C	44
Obrázek 4.12: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 1	45
Obrázek 4.13: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 2	45
Obrázek 4.14: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 3	46
Obrázek 4.15: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 4.....	46
Obrázek 4.16: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 5	47
Obrázek 4.17: Kolísání tlaků v průběhu dne v uzlu 6.....	47
Obrázek 4.18: Požární odběr v uzlu VO 1 v čase 18:00 – varianta D1 (PRV aktivní).....	48
Obrázek 4.19: Požární odběr v uzlu VO 1 v čase 18:00 – varianta D1 (PRV deaktivován) ...	49
Obrázek 4.20: Požární odběr v uzlu VO 3 v čase 18:00 – varianta D2 (PRV aktivní).....	50

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

IBNET	The international benchmarking network for water and sanitation utilities
EBC	European benchmarking co-operation
WaBe	Water Benchmarking
E_{input}	vstupní energie
E_N	přírodní energie
E_P	vnesená energie
E_U	energie dodávána odběratelům
E_L	energie ve ztrátách vody
E_F	energie ztracená třením
E_{output}	energie vystupující ze systému
$E_{dissipated}$	energie ztracená
NEE	Network energy efficiency – energetická účinnost sítě
LEE	Leak energy efficiency – energetická účinnost (náročnost) ztrát
PEE	Pumping energy efficiency – energetická účinnost čerpadel.
WSSE	Water supply energy efficiency – energetická efektivnost zásobování vodou
E_1	Specifická přebytečná energie vody vstupující do systému [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$]
E_2	Specifická přebytečná energie fakturované vody [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$]
E_3	Poměr maximální přebytečné energie [-]
EI	Index účinnosti [%]
RC	Kapacita vodojemů [%]
RI	Drsnostní index [%]
CLI	Ztráta vody na přípojku [$\text{l}\cdot\text{příp.}^{-1}\cdot\text{den}^{-1}$]
Q	průtok [m^3/s]
μ	součinitel výtoku [-]
S	plocha otvoru [m^2]
g	gravitační zrychlení [m/s^2]
h	výška hladiny nad otvorem [m]
C	koeficient úniku [-]
N_1	exponent úniku [-]
PAT	Pump As Turbine – čerpadlo jako turbína
PRV	Pressure Reduction Valve – tlakový redukční ventil
APM	Advanced Pressure Management
C_v	koeficient průtočnosti [-]

ATS	Automatické tlakové stanice
ZČS	zesilovací čerpací stanice
DMA	District Metered Area – okrskové měřicí pásmo
PMA	Pressure Managed Area – Tlakově řízené pásmo
FM	Flow-based Modulation – Průtokově řízená modulace
TM	Time-Based Modulation – Časově řízená modulace
R	tlak [m v. sl.]
R	reálná implementace případové studie
M	implementace v hydraulickém modelu
FO	fixed outlet – fixní výstup
RNM	remote node-based – dálkově ovládaný dle uzlu
L	leakage – redukce úniků
B	burst – snížení výskytu poruch
C	consumption – redukce spotřeby
DDM	Demand Driven Model – Model řízený odběrem
PDM	Pressure Driven Model – Model řízený tlakem
DN	jmenovitá světlost
VO	velkoodběratel
ΔP	celková tlaková diference v síti [m v. sl.]
n	počet uzlů v síti [-]
P_1	tlak v uzlu [m v. sl.]
P_2	minimální legislativně požadovaný tlak [m v. sl.]

SUMMARY

This bachelor thesis deals with the issues of pressure optimization of water distribution networks.

It presents the legislative framework of requirements on pressure conditions in the Czech Republic and, for the sake of comparison, also in selected foreign countries (the Slovak Republic, England and Wales, the USA - Georgia, Australia and New Zealand). Specific excerpts from the regulations and the required values are listed.

Furthermore, the thesis describes possible ways of evaluating the functioning of the network (benchmarking) and possibilities of comparing the individual systems with each other. Benchmarking is required to determine the status of the system and its parameters. These approaches seek to objectify appropriate indicators in order to compare systems that are completely unique. Three basic approaches to benchmarking are described: general benchmarking, energy benchmarking, technical benchmarking.

Subsequently, the reasons for pressure optimization are explained – namely which positives it brings. After that, the effect of the changes of pressure on the system outlet is approximated in the case of both outflow controlled (consumer consumption) and outflow uncontrolled (losses and leaks). For leakage, various types of holes are briefly described, including the influence of pressure variations on each type.

In the next part, different ways of changing the pressure conditions are presented: use of small turbines, use of disconnecting valves, changes in water reservoir modes, changes in the network, use of pressure reducing valves, connection of amplifying pumping station, division of the network into pressure zones.

Hereinafter, the European case studies that have emerged in recent years are listed for pressure optimization purposes.

The main part of the thesis is devoted to the case study. Theoretical basics of mathematical modeling of hydraulic networks are presented first. The section proceeds to describing the EPANET 2.0 program, which makes it possible to create a hydraulic model of the water supply network. The case study itself describes a fictional water distribution network in its original state. Subsequently, three variants of the proposed measures to reduce the pressure at the nodes of the network are implemented. The consequences of these actions are shown in the overall view of the network and changes in the six selected nodes during the day are graphically displayed. Finally, the total sums of the variations in the excess pressure for the different variants are shown and a comparison is made between them. Another assessment factor is the impact of changes in pressures on water consumption invoiced.