



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 DISTRIBUČNÍCH SYSTÉMECH**

PRESSURE OPTIMISATION IN WATER SUPPLY SYSTEMS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Tomáš Sucháček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV TUHOVČÁK, CSc.

BRNO 2020

ABSTRAKTY A KLÍČOVÁ SLOVA

Abstrakt

Tato disertační práce je zaměřena na problematiku optimalizace tlakových poměrů ve vodovodní síti. Je provedena podrobná teoretická a kritická rešerše současného stavu problematiky a jsou označeny oblasti, ve kterých je nedostatečná oblast poznání tzv. „knowledge gap“.

Jsou prezentovány navržené experimenty pro stanovení závislosti spotřeby vody na tlakových poměrech. Je uveden popis a provedení jednotlivých experimentů, které byly provedeny na vodovodní přípojce, v celém tlakovém pásmu a v laboratoři na hydraulickém okruhu. Je popsán způsob experimentálního stanovení matematické závislosti spotřeby vody na tlaku tak, aby ho bylo možno využít pro optimalizační úlohy, kde je uvažována spotřeba jako optimalizační kritérium.

Jsou vyhodnoceny výsledky jednotlivých experimentů a provedena kritická diskuse k dosaženým výsledkům. Na závěr jsou porovnány dosažené výsledky s hodnotami zjištěnými v podrobné provedené rešerši.

Klíčová slova

Optimalizace, vodovodní síť, spotřeba vody, odběr vody, tlak, závislost

Abstract

This thesis is focused on the optimization of pressure conditions in the water supply network. There is a deep theoretical and critical search of the state of the art and there are fields where there is an insufficient field of knowledge, the so-called "knowledge gap".

Experiments are proposed here to determine the dependence of water consumption on pressure conditions. There is a description of experiments and way how it was carried out, which were carried out on the water connection, in the pressure zone and in the laboratory on the hydraulic loop. There is proposed a methodology of experimental determination of the mathematical dependence of water consumption on pressure so that it can be used for optimization problems, where consumption is considered as an optimization criterion.

The results of individual experiments are evaluated and a critical discussion of the achieved results is carried out. Finally, the achieved results are compared with the values found in a deep literature search.

Keywords

Optimisation, water network, water consumption, water demand, pressure, dependency

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	CÍLE PRÁCE	5
3	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
3.1	ZTRÁTY VODY	7
3.2	SPOTŘEBA VODY	8
3.3	PORUCHOVOST POTRUBÍ	10
4	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A PŘÍPADOVÉ STUDIE	11
4.1	LABORATORNÍ MĚŘENÍ – LABORATOŘ ÚVHO	11
4.1.1	Návrh experimentálního měření	12
4.1.2	Metodika vyhodnocení	13
4.1.3	Vyhodnocení experimentu	14
4.2	MĚŘENÍ NA VODOVODNÍ PŘÍPOJCE	15
4.2.1	Případová studie	16
4.2.2	Návrh experimentálního měření	16
4.2.3	Vyhodnocení experimentu	18
4.3	MĚŘENÍ V TLAKOVÉM PÁSMU	21
4.3.1	Případová studie	21
4.3.2	Návrh vyhodnocení experimentu	23
4.3.3	Vyhodnocení experimentu	23
5	DISKUZE	25
6	ZÁVĚR	26
7	POUŽITÁ LITERATURA	27
	SEZNAM TABULEK	31
	SEZNAM OBRÁZKŮ	32
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	33
	SEZNAM PŘÍLOH	35

1 ÚVOD

Voda je naprosto nezpochybnitelně základní a nenahraditelnou surovinou, bez které není možný žádný život. Z tohoto důvodu by jí měla být věnována také patřičná pozornost a její ochraně by měl být přikládán odpovídající význam. Význam vody je v různých částech světa velmi různý, stejně jako je velice různé její rozložení v rámci světa. Jsou oblasti, kde je vody značný přebytek po dobu celého roku a je vnímána jako samozřejmost. Naproti tomu ve světě existují oblasti, v nichž je voda extrémně vzácná a nezřídka kdy se o kontrolu nad vodou, respektive kontrolou vodních zdrojů vedou dokonce válečné konflikty.

Optimalizace tlakových poměrů se vždy skládá z určitého počtu kritérií (minimálně však jednoho). U každého optimalizačního kritéria je pak nezbytné znát jeho chování, respektive odpověď na změnu nastavení parametrů. To znamená, že je potřeba znát matematický popis tohoto chování, respektive závislosti jednotlivých kritérií na vstupních parametrech. V rámci zaměření této práce se jedná zejména o závislosti jednotlivých kritérií na tlakových poměrech ve vodovodní síti. Jelikož tlak ve vodovodu je prakticky jediná veličina, kterou je možné přímo měnit, a má vliv na ekologickou a ekonomickou efektivitu dané vodovodní sítě.

V celosvětovém měřítku jsou nejčastěji používanými optimalizačními kritérii pro distribuci vody spojené s tlakovými poměry ztráty vody a poruchovost. Ne tak často se jako optimalizační kritérium vyskytuje spotřeba vody, což je kritérium, dle názoru autora této práce, neméně důležité. Jeho důležitost je možné demonstrovat jednoduchým příkladem, kdy se změnou tlaku dojde k redukci ztrát o 50 % a spotřeby jen o 10 %. Avšak při úvaze, že ztráty tvoří 15 % a spotřeba 85 % z vyrobené vody, znamená redukce ztrát snížení vyrobené vody o 7,5 %, ovšem redukce spotřeby znamená snížení o 8 % z vody vyrobené. Tato oblast je velmi málo probádaná. Zejména v oblasti reálných experimentálních studií je extrémní nedostatek validních dat. Jelikož optimalizace tlakových poměrů ve vodovodu je velmi obsírná tematika, bylo zvoleno pro další podrobné studium téma spotřeby vody, kde bude mít tato práce a publikace s ní spojené největší přínos.

Byly provedeny tři různé experimenty. U každého experimentu byl autorem této práce navržen experiment jako takový, provedení experimentu, způsob vyhodnocení a u dvou ze tří také reálné provedení experimentálních činností, vyhodnocení výsledků a vyvození závěrů. Jednalo se o laboratorní experimentální měření, měření na jedné vodovodní přípojce a měření v celém tlakovém pásmu.

2 CÍLE PRÁCE

Hlavní cíl této disertační práce byl upřesněn po provedení literární rešerše a identifikaci tzv. „*knowledge gap*“. Tímto cílem bylo experimentálně stanovit matematickou závislost spotřeby vody na tlakových poměrech za použití takového matematického vyjádření, jenž umožňuje porovnání s výsledky z literatury, a hlavně **umožňuje použití těchto výsledků v optimalizačních úlohách se spotřebou vody jako optimalizačním kritériem**. Zároveň bylo cílem tyto experimenty provést a zdokumentovat tak, aby byla umožněna vědecká replikabilita provedených experimentů.

V rámci této práce se jednalo o následující konkrétní činnosti a požadované výstupy:

- Komplexní návrh experimentálního laboratorního měření pro ověření hodnot daných literaturou
 - Návrh způsobu měření
 - Návrh způsobu vyhodnocení
 - Porovnání výsledků s literaturou
- Komplexní návrh dlouhodobého experimentu pro měření na jedné vodovodní přípojce, respektive vybraného odběratele
 - Návrh délky měření
 - Návrh způsobu měření
 - Návrh způsobu provádění změny tlaku
 - Návrh způsobu vyhodnocení
 - Realizace experimentálního měření
 - Vyhodnocení a porovnání výsledků s literaturou
- Komplexní návrh dlouhodobého experimentu pro měření v jednom tlakovém pásmu
 - Návrh délky měření
 - Návrh způsobu měření
 - Návrh způsobu provádění změny tlaku
 - Návrh způsobu vyhodnocení
 - Realizace experimentálního měření
 - Vyhodnocení a porovnání výsledků s literaturou

V neposlední řadě bylo dílčím cílem také stanovit doporučení pro další výzkum ve sledované oblasti poznání.

3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Na základě provedené podrobné rešerše je v práci věnována pozornost především třem oblastem souvisejícím s tlakovými poměry, které respektují stávající světové trendy. Jedná se o ztráty vody, spotřebu vody a poruchovost potrubí.

Objem dodané vody do sítě za jednotku času je provozní parametr každého vodovodního systému. Velká pozornost je věnována optimalizaci tlakových poměrů zejména z hlediska snížení ztrát vody. Prvním krokem při snižování ztrát vody obvykle bývá revize tlakových poměrů a jejich následná úprava tak, aby byly ve spotřebišti zajištěny tlakové poměry dle legislativy a zároveň aby byla zachována hydraulická kapacita potrubí. Ve většině případů se tlaky v síti snižují tak, aby se docílilo nižších ztrát vody a nižší poruchovosti potrubí. Evidentně ale při snížení tlaku dojde také k poklesu části vody fakturované jednotlivým spotřebitelům respektive spotřeby vody. Snižování tlaků v síti má tedy pozitivní dopad na ztráty vody, ale současně negativní dopad na objem fakturované vody a ekonomický výsledek hospodaření společnosti. Provozovatelé vodovodní sítě při řešení této optimalizační úlohy akcentují dle zkušeností autora této práce následující kritéria, která jsou podle priority řazena sestupně:

- (1) ekonomické hledisko – problematika ztrát vody je řešena přísně ekonomickým pohledem. Vždy se kalkuluje efektivita každého navrženého opatření z hlediska hospodaření společnosti. Opatření s negativním ekonomickým dopadem se realizují pouze za podmínky, že generují velmi výrazný přínos jiný, než ekonomický (např. ekologický)
- (2) ekologické hledisko – je-li to v dané situaci relevantní problém, zohledňuje se kapacita vodního zdroje. Snížení ztrát vody představuje snížení zatížení zdroje a ekosystému jako celku;
- (3) jakost dopravované vody – snížením ztrát vody dojde ke snížení pohybu vody v síti, zvýšení stáří vody a ve specifických případech může dojít k vyšší frekvenci stížností na její jakost. Toto hledisko je vždy zohledňováno individuálně s ohledem na konkrétní situaci
- (4) prestiž společnosti – poslední z hlediska priorit, ale stále relevantní kritérium. Výkonnostní ukazatele provozních společností jsou každoročně publikovány v celostátní oborové ročence. Je prestižní záležitostí dosahovat v kategorii ztrát vody vynikajících výsledků.

3.1 ZTRÁTY VODY

Snižování ztrát vody je jistě v celosvětovém měřítku věnována zdaleka velká pozornost, a to jak při implementaci „pressure managementu“ do praxe, tak také na úrovni výzkumných a vědeckých prací. Velkou pozornost ztráty vody stále poutají kvůli jejich výši v celosvětovém měřítku. Ztráty vody se občas nepřesně vyjadřují jako voda nefakturovaná a například dle (Wu, 2011) výše nefakturované vody kolísá mezi několika procenty z vyrobené vody až téměř k polovině veškeré vody v závislosti na systému. Celosvětově pak odhaduje nefakturovanou vodu na úrovni 27 % (Wu, 2011).

Obecně lze říci, že ztráty vody jsou závislé pouze na fyzikálních parametrech, nikoliv jak je tomu u spotřeby vody i na mnoha dalších socioekonomických a klimatologických faktorech. Podstata závislosti ztrát vody na tlakových poměrech tkví v tom, že se jedná o výtok hydraulický malým otvorem. Tomu odpovídá vztah používaný pro této závislost například dle (De Paola, 2012):

$$Q = a * P^b \quad (3.1)$$

Kde Q je průtok [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P je tlak [MPa], a je koeficient [-] a b je exponent [-]. Pro praktické použití pro predikci změny ztrát se změnou tlaku se však nejčastěji používá vztah navržený v rámci konceptu „Fixed And Variable Area Discharges“ (FAVAD) a to (Lambert, 2000):

$$L_1 = L_0 \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N1} \quad (3.2)$$

Kde L_0 je průtok před změnou tlaku [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P_0 je původní tlak před změnou tlaku [m v. sl.], L_1 je ztrátový průtok po změně tlaku [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P_1 je tlak po změně tlaku [m v. sl.] a $N1$ je ztrátový exponent [-]. Důležité je poznamenat, že tlak, který se v rovnici uvádí, je tzv. „Average Zone Point (AZP)“ dle (ILMSS, 2019). Hodnota koeficientu $N3$ se obvykle pohybuje od 0,5 po 1,5 (výjimečně až 2,5). Hodnotu koeficientu $N1$ lze buď odhadnout, nebo přesněji stanovit dle (Lambert, 2013) a to zvlášť pro systém se ztrátami nízkými (3.3) a vysokými (3.4):

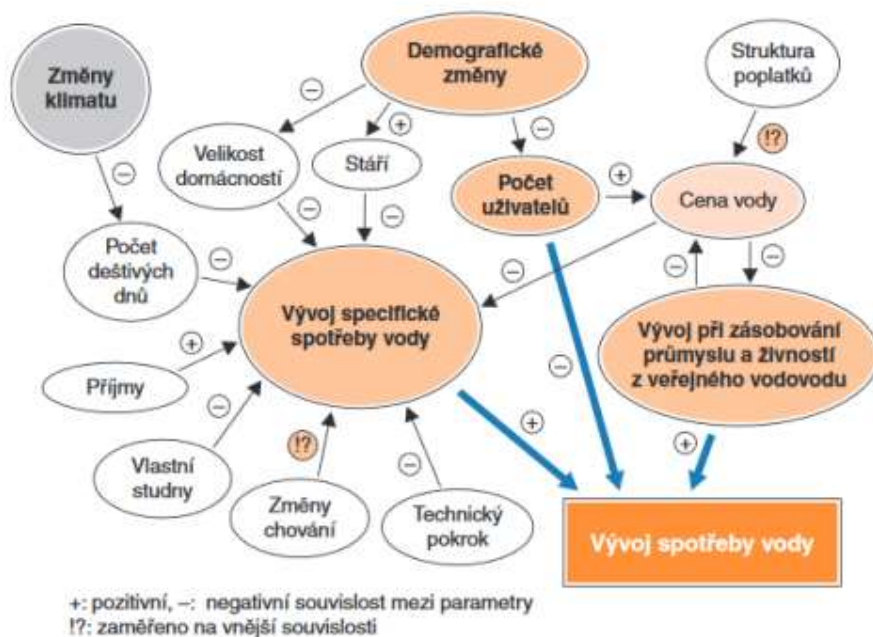
$$N1 = 1,5 - \left(1 - \frac{0,65}{ILLI} \right) * p \quad (3.3)$$

$$N1 = 1,5 - \left(1 - \frac{0,667 * ICF}{ILLI} \right) * p \quad (3.4)$$

Kde $N1$ je ztrátový exponent [-], $ILLI$ je Infrastructure Leakage Index [-], ICF je Infrastructure Condition Factor [-] ve smyslu (Lambert, 2012) a p je procento detekovatelných ztrát [-] na tzv. „rigid pipes“, což jsou vodovodní potrubí z neohybatelného materiálu.

3.2 SPOTŘEBA VODY

Při optimalizaci tlakových poměrů je nezbytné vzít v úvahu dopad změny tlaku na spotřebu vody. Aby mohla být spotřeba vody zahrnuta jako kritérium při optimalizaci tlakových poměrů, je nezbytné ji matematicky popsat, jako funkci tlaku. Tento matematický popis komplikuje její stochastická povaha, což je patrné například dle (Gurung, 2014). Další komplikací je, že na spotřebu vody má vliv vícero faktorů než jenom tlakové poměry. Několik předcházejících studií ukázalo, že spotřeba je ovlivněna cenou vody (Dalhuisen, 2003), a také klimatologickými faktory (Praskievicz, 2009). Zároveň však byl jednoznačně potvrzen vliv tlaku (Wagner, 1988). Je potřeba také zmínit, že závislost na různých faktorech je pro každý typ odběratele různá například dle (Hussien, 2016). Pro ukázkou, jak je provázaná spotřeba vody s různými faktory, je zde uvedeno schéma na Obr 3.1.



Obr 3.1 Faktory ovlivňující spotřebu vody

Jak bylo zmíněno výše, spotřebu vody ovlivňuje mnoho faktorů a nelze globálně říci, který má vždy největší dopad, jelikož každý vodovodní systém je unikátní. Vlivu tlakových poměrů na spotřebu není v našich podmínkách věnováno mnoho pozornosti také z důvodu, že se spotřebovaná voda nepovažuje z environmentálního pohledu za „vyplývanou“. Z tohoto pohledu existuje mnoho úhlů pohledu, z nichž každý má své zastánce. Je zde potřeba položit otázku, zda-li je snižování spotřeby žádoucí. Z pohledu autora této práce by mělo být zájmem každého provozovatele maximálně snižovat množství spotřebované vody, ovšem v žádném

případě by nemělo dojít ke snížení spotřeby pod takovou mez, která by negativně ovlivnila zdravotní stav či komfort odběratele. Tlakem je ovlivnitelná pouze určitá část spotřeby vody ze sítě. Podle (Giustolisi, 2012) je tlakem ovlivnitelná spotřeba pro lidské potřeby a například dle (Cubillo, 2008) je 30% z celkové spotřeby ovlivnitelné tlakem. Obdobné závěry prezentuje také (Beal, 2011). Spotřebu vody je možné rozdělit na objemovou část spotřeby, která proběhne nezávisle na tlaku (pokud tlak nepoklesne pod minimální hodnotu, která zaručí dodání požadovaného množství vody), a také na časově řízenou spotřebu, která naopak může být ovlivněna tlakem. Dále se spotřeba rozděluje na spotřebu „uvnitř domu“ a „vně domu“ (Lambert, 2010). Metodika FAVAD (May, 1994) je univerzální metodika, kterou lze použít také pro predikci snížení spotřeby vody při snížení tlaku. Rovnice má velmi podobný tvar jako rovnice pro snižování ztrát v závislosti na tlaku a to (Lambert, 2010):

$$C_1 = C_0 \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N3} \quad (3.5)$$

Kde C_1 je hodnota spotřeby po změně tlaku [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P_1 je tlak po změně tlaku [m v. sl.], C_0 je hodnota spotřeby před změnou tlaku [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P_0 je tlak před změnou tlaku [m v. sl.], $N3$ je exponent pro závislost snížení spotřeby [-].

Pro matematický popis této závislosti za účelem aplikovatelnosti do optimalizačních úloh se používají následující vztahy:

- Lineární průběh – pro vyhodnocení experimentálního měření použil (Meyer, 2018)
- Parabolický průběh bez omezení platnosti – metodika FAVAD (Lambert, 2010)
- Parabolický průběh s omezením platnosti – (Germanopoulos, 1985; Wagner, 1988; Chandapillai, 1991; Fujiwara, 1993; Gupta, 1996)
- Kombinace průběhu s vymezením platnosti – (Bhave, 1981; Shirzhad, 2013)
- Kombinovaný (integrováný) přístup pro ztráty a spotřebu dohromady (Martinez, 1999; Siew, 2010; Conejos, 2019)

Na základě provedené rešerše autor této práce hodnotí jako velmi neprozkoumanou oblast vyžadující hlubší zkoumání, tzv. „*knowledge gap*“, **oblast experimentálních výsledků reálných studií závislosti spotřeby vody na tlakových poměrech**. Z tohoto důvodu je tomuto tématu věnována praktická, respektive experimentální část této práce, což je také z pohledu autora největší přínos této práce.

3.3 PORUCHOVOST POTRUBÍ

Poruchovost není ovlivněna pouze tlakovými poměry, ale také nízkými teplotami, aktivitou podloží a zeminy, v níž je potrubí uloženo, dále pak dopravním zatížením a v neposlední řadě také stáří potrubím, korozi, kvalitou použitých materiálů a kvalitou provedených prací a také způsobem provozování. Přesto je nutné kvantifikovat vztah mezi tlakem v potrubí a poruchovostí, jelikož výše zmíněné faktory není možné při běžném provozu ovlivnit. Poté, co je vybudováno potrubí, lze prakticky měnit jen tlakové poměry. Všechny tyto faktory tedy působí na celkovou výši poruchovosti, ale její změny lze dosáhnout z provozního hlediska jen změnou tlaku. Níže uvedené vztahy jsou tedy stanovovány za neměnného působení výše zmíněných faktorů. Například dopravní zatížení zůstává pořád stejné, ale sleduje se, jak se změní poruchovost při změně tlaku.

Například (Tuhovčák, 2016) bere v úvahu při hodnocení technického stavu trubních materiálů nebo celého tlakového pásma jako celku hodnotu tlaku v síti a to jak hydrostatického tak i kolísání a hydrodynamického tlaku. Dále je také patrná vzájemná korelace tlaku v síti a množství poruch potrubí je možné vidět v (Thornton, 2007), kdy bylo zkoumáno 112 oblastí, kde proběhl „pressure management“ ze 12-ti zemí a bylo jednoznačně prokázáno snížení počtu poruch na vodovodních řadech ale také vodovodních přípojkách. Postupným vývojem v této oblasti, kdy byly postupně prováděny studie (Lambert, 2001; Farley, 2003; Lambert, 2005; Pearson, 2005; Thornton, 2006; Lambert, 2012; Lambert, 2013) až po (Lambert, 2014), kdy byl navržen v současnosti nejpoužívanější vztah pro predikci změny poruchovosti v závislosti na změně tlaku a to:

$$BF_R = \left(1 - \frac{BF_{npd}}{BF_0}\right) * \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^3\right) \quad (3.6)$$

Kde BF_R je redukce poruchovosti [%], BF_{npd} je poruchovost nezávislá na tlaku [$\text{pp.km}^{-1}.\text{rok}^{-1}$], BF_0 je poruchovost před zavedením „pressure managementu“ [$\text{pp.km}^{-1}.\text{rok}^{-1}$], P_1 je tlak po zavedení „pressure managementu“ [m v. sl.], P_0 je tlak před zavedením „pressure managementu“ [m v. sl.]. Dle (Lambert, 2014) je hodnota BF_{npd} bez ohledu na další faktory ovlivňující poruchovost stanovena na 10 poruch. $\text{km}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ pro vodovodní řady a 2 poruchy.1000přípojek $^{-1}.\text{rok}^{-1}$.

4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A PŘÍPADOVÉ STUDIE

V této části jsou stručně popsány provedené experimenty, metodika pro vyhodnocení experimentů a také je ze samotné vyhodnocení pozorovaných hodnot. Jedná se o tři experimenty a to:

- **Experimentální laboratorní měření** v laboratoři Ústavu vodního hospodářství obcí (dále jen „ÚVHO“) – přímo se zde měří závislost průtoku na tlaku u různých typů výtokových armatur, přičemž změna spotřeby je pak dopočtena nepřímo na základě literatury.
- **Experimentální měření na vodovodní přípojce** – spotřeba je zde měřena přímo a jelikož se jedná o dlouhodobý experiment, jsou zde sledovány také vlivy sezónnosti a pro preciznost je také sledován počet osob v dané nemovitosti, ale i vliv tlakových poměrů na průběh realizované spotřeby v čase.
- **Experimentální měření v tlakovém pásmu** – spotřeba zde není měřena přímo, je zde měřen nátok do tlakového pásma, jenž je zároveň měřícím okřskem a na základě odhadu zjednodušujícího předpokladu je stanovena velikost ztrátového průtoku a spotřeba je dopočtena jako rozdíl mezi nátokem a odhadnutým ztrátovým průtokem. Zejména je zde však na základě tohoto zjednodušujícího předpokladu sledován vliv tlakových poměrů na průběh realizované spotřeby v čase.

4.1 LABORATORNÍ MĚŘENÍ – LABORATOŘ ÚVHO

Cílem tohoto experimentu bylo ověřit a stanovit závislost průtoku výtokovými armaturami při různém tlaku. Následně poté stanovit teoretickou změnu spotřeby vody pomocí zjištění v literární rešerši a simulovat tak změnu spotřeby vody u reálných odběratelů. Tento experiment byl navržen autorem této disertační práce, stejně jako potřebné rozšíření a úpravy hydraulického okruhu v laboratoři ÚVHO a zároveň také způsob vyhodnocení experimentu. Praktické provedení experimentu realizoval Ing. Petr Straňák. Zcela detailní popis celého experimentu je tak uveden v jeho diplomové práci (Straňák, 2019).

V úvodu je potřeba zmínit, že již před započtím měření bylo předpokládáno, že zjištěná závislost průtoku armaturou na tlaku by měla odpovídat rovnici výtoku otvorem dle rovnice (3.2), která jde však také zapsat do formy dle (Lambert, 2010) (3.5). Rovnice (3.5) však již počítá se změnou spotřeby nikoliv jen se změnou průtoku, čemuž odpovídá i hodnota koeficientu N_3 .

4.1.1 Návrh experimentálního měření

Hydraulický okruh se nachází v laboratoři ÚVHO v areálu Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně. Původní hydraulický okruh nedovoloval vhodné osazení výtokových armatur a zejména nedovoloval dosahovat tlaků až do 0,60 MPa a zároveň nebylo možné tlak v potrubí regulovat. Autor této práce navrhl rozšíření okruhu, které zmíněné nedostatky odstranilo. Hydraulický okruh je dobře patrný z (Straňák, 2019).

Pro zajištění dostatečné přesnosti a spolehlivosti měření byl průtok vypouštěný z výtokové armatury měřen dvojím měření. Byl použit magneticko-indukční průtokoměr DN50 a objemový vodoměr – suchoběžný vodoměr na studenou vodu, $Q_3 = 6,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, standartní rozsah $Q_3/Q_1 = 160$, který byl napojen na datalogger. Tento datalogger byl vybaven displejem pro zobrazování okamžitých hodnot. Výsledný průtok byl uvažován jako aritmetický průměr ze tří hodnot a to z (1) magneticko-indukčního průtokoměru, (2) objemového vodoměru – z převodníku dataloggeru (okamžitá hodnota zobrazena na displeji) a (3) změřeného objemu – zaznamenan stav na začátku a konci měření, který byl vydělen délkou měření.

Tlak byl měřen na výstupu z regulačního ventilu (informativně) a zejména před výtokem vody z výtokové armatury. Podrobněji je měřicí aparatura popsána v (Straňák, 2019).

Měření závislosti průtoku na tlaku bylo navrženo jako diskrétní, to znamená, že nebylo provedeno měření na celém rozsahu možných tlaků (0,00 – 0,60 MPa), ale byl zvolen pevně stanovený krok a to 0,10 MPa. Měření průtoku na všech armaturách probíhalo v následujících tlakových bodech: 0,10 MPa; 0,20 MPa; 0,30 MPa; 0,40 MPa a 0,60 MPa.

Postup měření tedy probíhal pro každou výtokovou armaturu vždy po určitých cyklech, jejichž posloupnost byla následující:

- 1) Prvotní nastavení výstupního tlaku z regulačního ventilu
- 2) Otevření armatury do požadovaného stupně otevření
- 3) Ustálení průtoku
- 4) Měření tlaku před armaturou
- 5) Úprava výstupního tlaku (bod 3 - 5 se opakuje až do dosažení požadovaného tlaku)
- 6) Započítání měření – zaznamenání stavu vodoměru a zaznamenávání hodnot průtoku
- 7) Ukončení měření – zaznamenání stavu vodoměru

Tento postup se opakuje u všech výtokových armatur až do změření všech potřebných hodnot průtoku. Pro testování bylo vybráno zcela běžně rozšířených 8 výtokových armatur, jejich popis

je možné nalézt v dizertační práci v kapitole 4.1.1. Na následujícím obrázku je ukázka instalace měření v laboratoři.



Obr 4.1 Ukázka instalovaného měření při testování

4.1.2 Metodika vyhodnocení

Získaná měření je nezbytné vyhodnotit, aby bylo možné porovnat zjištěné skutečnosti s hodnotami uváděnými v literatuře. Vyhodnocení bylo dle následujícího postupu:

- Regrese naměřené sady dat dle rovnic (4.1), (4.2) a (4.3) – byly optimalizovány regresní konstanty
- Vytvoření kombinace armatur, stanovení referenčního tlaku (spotřeby) a stanovení koeficientu $N3$ pro jednotlivé kombinace

Pro každou výtokovou armaturu byly měření získány jedna až tři datové sady x , y (tlak, průtok), které vždy obsahovaly 6 hodnot. Tyto hodnoty byly vždy aproximovány třemi různými rovnicemi. Jednalo se o vztahy:

(1) Rovnice dle (Wagner, 1988):

$$q_i^{avl}(P_i) = q_i^{req} \times \begin{cases} 1 & P_i \geq P_i^{ref} \\ \left(\frac{P_i - P_i^{min}}{P_i^{ref} - P_i^{min}} \right)^\alpha & P_i^{min} < P_i < P_i^{ref} \\ 0 & P_i \leq P_i^{min} \end{cases} \quad (4.1)$$

(2) Rovnice dle (De Paola, 2012):

$$Q = a * P^b \quad (4.2)$$

(3) Rovnice dle (Shirzhad, 2013)

$$Q^{avl} = \begin{cases} 0 & \text{když } P \leq 0 \\ 0,176(Q^{req} * P^{0,51}) & \text{když } 0 < P \leq 30 \text{ m} \\ Q^{req}(a + 0,176b * P^{0,51}) & \text{když } 30 < P \leq 100 \text{ m} \\ Q^{req}(a + 1,848b) & \text{když } P > 100 \text{ m} \end{cases} \quad (4.3)$$

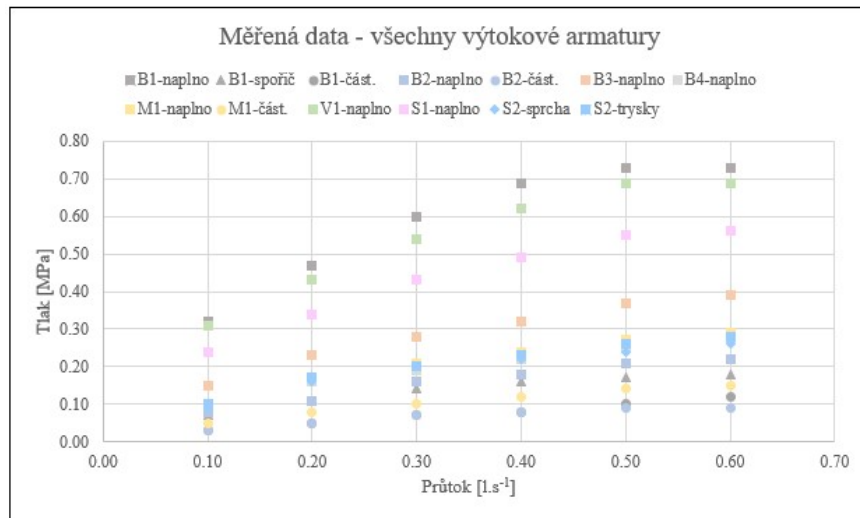
Kde q_i^{avl} je dostupný odběr [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P_i^{ref} je referenční tlak nezbytný k uspokojení požadovaného odběru [m v. sl.], q_i^{ref} je požadovaný odběr [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P_i^{min} je minimální tlak, pod kterým nedojde k žádnému odběru vody [m v. sl.], α je exponent závislosti spotřeby na tlaku [-], P_i je aktuální tlak v i -tém bodu [m v. sl.], Q je průtok [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P je tlak [MPa, bar, m v. sl.], a je koeficient [-], b je exponent [-], Q^{avl} je dostupný průtok na výtokové armatuře [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$], P je tlaková výška [m v. sl.], Q^{req} je požadovaný průtok na výtokové armatuře [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$], a je podíl objemového průtoku [-], b je podíl tlakově-závislého průtoku [-].

Posouzení vhodnosti výše uvedených vztahů pro jednotlivé typy výtokových armatur bylo vyhodnoceno pomocí hodnoty koeficientu determinance R^2 .

Teoretická změna spotřeby se změnou tlaku je vyhodnocena pomocí stanovení hodnoty koeficientu $N3$ pro různé kombinace výtokových armatur, které představují určitou část spotřeby vody. Za tímto účelem byl zvolen postup popsáný v dizertační práci v kapitole 4.1.2.

4.1.3 Vyhodnocení experimentu

Z následujícího obrázku jsou patrné naměřené hodnoty při provedení experimentu u jednotlivých armatur s různým stupněm nastavení armatury.



Obr 4.2 Výsledky měření testovaných armatur

Z následující tabulky je patrné, která regresní rovnice vykazuje dle zvoleného kritéria nejlepší shodu s naměřenými hodnotami.

Poznámka k tabulce: Nejnižší celková čtvercová chyba pro danou výtokovou armaturu a její konfiguraci je vyznačena červeně. U kategorie S2 je pod označením „naplno“ myšlena konfigurace „sprcha“ a označením „část.“ je potom myšlena konfigurace „trysky“.

Tab. 4.1 Souhrnná tabulka celkových čtvercových chyb

Výtoková armatura	Celková čtvercová chyba *1000 (SSE*1000)								
	rovnice (1)			rovnice (2)			rovnice (3)		
	naplno	spořič	část.	naplno	spořič	část.	naplno	spořič	část.
B1	3.56	0.07	0.09	5.89	0.20	0.04	7.78	0.68	1.63
B2	0.27	---	0.07	0.25	---	0.11	2.61	---	0.42
B3	0.14	---	---	0.21	---	---	4.89	---	---
B4	0.04	---	---	0.10	---	---	2.44	---	---
M1	0.04	---	0.03	0.28	---	0.02	3.06	---	1.30
V1	1.78	---	---	2.37	---	---	8.71	---	---
S1	0.74	---	---	1.07	---	---	6.68	---	---
S2	0.21	---	0.07	0.57	---	0.25	1.83	---	2.57

Pro simulaci změny spotřeby byly stanoveny reprezentativní kombinace výtokových armatur, pomocí kterých jsou reprezentovány jednotlivé kategorie spotřeby. Provedenou simulací změny spotřeby vody se změnou tlaku na základě zvolených principů a zjednodušujících předpokladů je možné konstatovat, že pro různé kombinace testovaných armatur, které reprezentovaly jednotlivé kategorie odběru, se hodnota koeficientu N_3 pohybuje v rozmezí **0,208 – 0,232** (postup vyhodnocení viz kapitola dizertační práce 4.1.2). Je nutné podotknout, že výsledek do značné míry závisí na volbě procentuálního poměru spotřeby ovlivnitelné tlakem a části tlakem neovlivnitelné.

4.2 MĚŘENÍ NA VODOVODNÍ PŘÍPOJCE

Cílem tohoto experimentu bylo stanovit hodnotu koeficientu N_3 použitého v konceptu FAVAD ve smyslu (Lambert, 2010). Za tímto účelem nebyl vytvořen nový regresní model, ale byl použit stávající regresní model dle (Lambert, 2010). Jednalo se o rozsáhlou podrobnou studii, kterou autor této práce navrhl, provedl samotný experiment, navrhl způsob vyhodnocení, dále prozkoumat určité vzájemné závislosti a vyhodnotil, provedl kritickou diskusi a vyvodil závěr z vyhodnocených dat. Výsledky této studie byly publikovány v (Ručka, 2018). Jelikož vyhodnocení obsahuje poměrně složitý matematický postup, bylo vyhodnocení provedeno ve spolupráci s Ing. Janem Holešovským, Ph.D. (Ústav matematiky a deskriptivní geometrie, FAST, VUT). V dizertační práci je uvedena pouze vybraná relevantní část z této studie.

Zároveň byl sledován vliv tlakových poměrů na průběh realizované spotřeby v průběhu času. Zjednodušeně řečeno se jedná o to, zda tlak má vliv na to, jestli je nerovnoměrnost spotřeby větší či menší při změně tlakových poměrů, což zahrnovalo sledování průměrných koeficientů nerovnoměrnosti v každém časovém kroku a hodnotu maximálního zjištěného koeficientu v každé kategorii.

4.2.1 Případová studie

Případová studie byla provedena na budově kancelářského typu. Předmětná budova má tři nadzemní podlaží a maximální počet pracovníků je 35. Pracovníci jsou rovnoměrně rozloženi na jednotlivých podlažích. Každé z podlaží je vybaveno stejnými zařizovacími předměty. Toalety jsou vybaveny pouze objemovým splachováním s nádržkovým splachovačem. V budově se nenachází žádné tlakové splachovače. Veškerá spotřeba je „inside the house“ ve smyslu (Lambert, 2010). Charakteristické průtoky pro tuto budovu jsou následující:

Tab. 4.2 Charakteristické průtoky a spotřeba vody pro kancelářskou budovu

Spotřeba vody v pracovních dnech	Minimální spotřeba	Průměrná spotřeba	Maximální spotřeba
Den (pracovní doba)	[litry]	[litry]	[litry]
pondělí + středa (7-17)	608	892	1307
úterý + čtvrtek (7-15)	481	710	1252
pátek (7-13)	307	623	927
všechny dny (7-13)	307	545	982
Hodinová spotřeba – všechny dny	10	91	381

Pracovní doba během jednoho pracovního týdne, který zahrnuje pět pracovních dní, má tři různé délky – pondělí a středa 7:00 – 17:00; úterý a čtvrtek 7:00 – 15:00 a pátek 7:00 – 13:00. Délka pracovních dnů pro jednotlivé dny týdne byla neměnná během celé délky měrné kampaně.

Hlavní část provedeného experimentu byla dlouhodobá měrná kampaň, která byla rozdělena do několika kratších časových cyklů na měřicí cykly. Během jednoho měřicího cyklu bylo nastavení tlakově regulačního ventilu konstantní. Délka měřicího cyklu byla přibližně 14 dní s možnou fluktuací (například období letních prázdnin apod.). Délka cyklu byla nastavena s ohledem na možnost výskytu velmi nízkých nebo velmi vysokých teplot nebo vlhkosti ve více cyklech, jelikož se tyto extrémy vyskytují v kratších intervalech.

Měřicí aparatura byla osazena do vodoměrné šachty na vodovodní přípojce v těsné blízkosti vodovodního řadu. Tato aparatura zahrnovala (ve směru toku vody) měření průtoku, tlakově regulační ventil „PRV“ a měření tlaku. Instalací v těsné blízkosti hlavního řadu bylo dosaženo obdobných podmínek jako při změně tlakových poměrů v celé síti.

4.2.2 Návrh experimentálního měření

Datový soubor tohoto experimentu se skládá z pozorování celkové denní spotřeby vody a tlaku na vodovodní přípojce v době od září 2016 do září 2017. Kromě proměnných, na které bylo měření zaměřeno, jsou dále začleněny do regresního modelu, bylo měření doprovázeno

získáváním dalších metadat. To zahrnovalo aktuální počet zaměstnanců na pracovišti, pracovní dobu (kolísala mezi 6,5 a 10 hodin) and zaznamenávání neobvyklých událostí či režimu v budově, které by mohly významně ovlivnit spotřebu vody.

Nejdříve byla stanovena normalizovaná spotřeba vody vzhledem k aktuálnímu počtu pracovníků a pracovní době. Byl stanoven zjednodušující předpoklad, že počet pracovníků během dne je konstantní. Tím pádem, pro daný den i je normalizovaná spotřeba C_i [$\text{l}\cdot\text{os}^{-1}\cdot\text{hod}^{-1}$] posuzována následovně:

$$C_i = \frac{V_i}{p_i h_i} \quad (4.4)$$

Kde V_i značí celkovou spotřebu [l], p_i je počet pracovníků [os], h_i je počet pracovních hodin během i -tého dne. Toto standardizované množství je považováno za nezávislé na okolnostech v kancelářích. Dále je odkazováno na tuto normalizovanou spotřebu jako na spotřebu.

Pro Zlínský kraj (ČSÚ, 2016) pro skupinu “ostatní odběratelé” byla spotřeba tři roky před provedením experimentu prakticky konstantní. Roční spotřeba ve zvolené administrativní budově se za roky 2015-2017 lišila pouze v řádu desetin procent ($239.6 \text{ m}^3 - 238.3 \text{ m}^3 - 241.1 \text{ m}^3$). Na základě metadat bylo identifikováno několik typů neobvyklých událostí. Zejména byly z datového souboru vyloučeny dny, kdy významný objem vody byl použit pro jiné než rutinní účely během pracovní doby, také kdy došlo k poklesu pracovníků pod 10 % z celkového počtu a také kdy bylo neobvyklé chování spotřeby během dne. Celkem bylo vyřazeno přibližně 9 % pracovních dnů

K posouzení efektů změny tlaku byla použita regresní křivka, přičemž byl optimalizován parametr C_0 a N_3 pomocí metody nejmenších čtverců. Za tímto účelem byla uvažovaná nejdříve lineární regrese. Výkon této lineární regrese byl pak porovnán s užitou nelineární regresí dle konceptu FAVAD:

$$C_i = C_0 \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{N_3} \quad (4.5)$$

Kde C_i je spotřeba. Odhad regresních parametrů je proveden je zjištěn pomocí metody maximální věrohodnosti (ML). Test významnosti a odhady intervalů spolehlivosti pro parametry jsou založeny na statistice poměru věrohodnosti (LR). Postup je popsán v kapitole dizertační práce 4.2.3. Vyhodnocení **nerovnoměrnosti spotřeby** a stanovení sledovaných koeficientů proběhlo dle následujících vztahů:

$$Q_{ij} = Q_{MEAN_i} * c_{ij} \quad (4.6)$$

$$c_{MEAN_{ik}} = \frac{\sum_{j=1}^m c_{ijk}}{m_k} \quad (4.7)$$

$$c_{MAX_i} = \max\{c_{ijk}\} \quad (4.8)$$

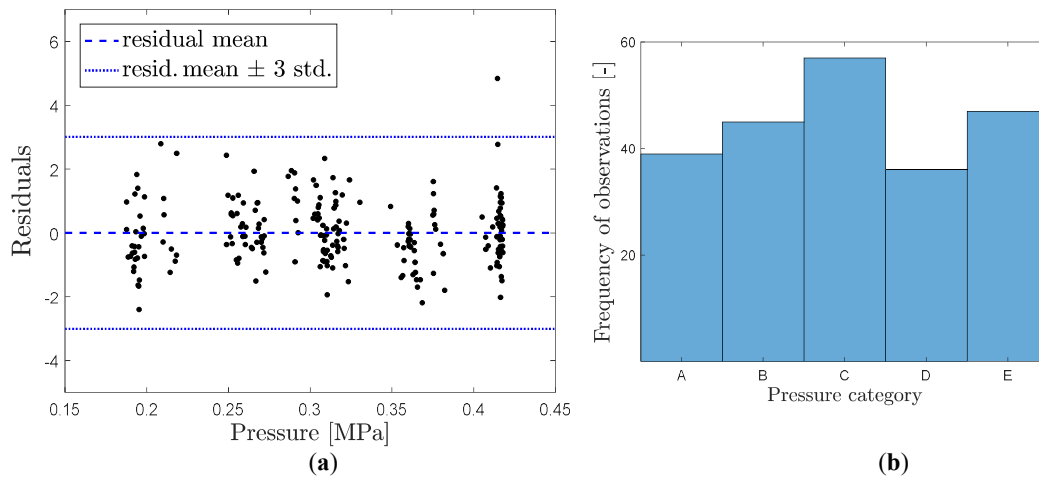
$$\varepsilon_k = \frac{\sum_{i=1}^n (c_{MEAN_{ik}} - 1)^2}{n_t} \quad (4.9)$$

Kde Q_{ij} je naměřená spotřeba [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], Q_{MEAN_i} je průměrná spotřeba [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], c_{ij} je koeficient nerovnoměrnosti spotřeby vody [-], $c_{MEAN_{ik}}$ je průměrný koeficient v kategorii tlaku k v časovém kroku i [-], m_k je celkový počet platných dní v kategorii k [-], c_{MAX_i} je maximální koeficient v kategorii tlaku k [-], c_{ijk} je koeficient nerovnoměrnosti spotřeby vody v kategorii tlaku k v časovém kroku i ve dni j [-], ε_k reprezentuje průměrnou čtvercová odchylka průměrných koeficientů od optimální hodnoty v každém časovém kroku [-] a n_t je počet časových kroků při zvolené délce časového kroku [-].

Pro posouzení vlivu tlakových poměrů na průběh spotřeby vody během dne byl zaveden vztah (4.9), který má reprezentovat odchylku od optimální hodnoty. Tato hodnota je uvažována jako 1,00, protože v případě, že by byla spotřeba konstantní během celého dne, by došlo k neefektivnějšímu využití vodárenské infrastruktury.

4.2.3 Vyhodnocení experimentu

Přímým dosazením do vztahu (4.5) měření spotřeby byla stanovena standardizovaná rezidua regrese. Na Obr 4.3 (a) jsou vyobrazena i s vyznačením jejich průměru a meze spolehlivosti, které jsou stanoveny jako tři směrodatné odchylky odhadnuté z reziduí.

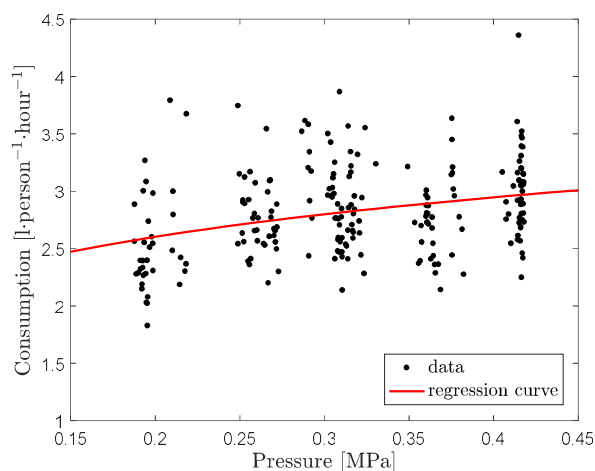


Obr 4.3 Standardizovaná rezidua regrese přímého dosazení do (4.5) (a) a histogram četnosti měření v kategoriích tlaku (b) Izolované pozorování za stanovenými mezemi spolehlivosti indikují, že se jedná o „outlier“ neboli odlehlý bod (10.1.2017). Identifikovaný bod byl vyloučen ze statistického souboru dat. Po aplikaci výše uvedeného postupu na filtraci dat zbylo ve statistickém souboru $n = 224$

pozorování (dní). Na Obr 4.3 (b) je zobrazena četnost pozorování v kategoriích tlaku. Je z něj patrné, že rozdělení je poměrně rovnoměrné.

Před posouzením výkonu lineárního a nelineárního modelu byla provedena jednocestná analýza rozptylu (ANOVA), což zahrnovalo nejprve ověření normality spotřeby v každé kategorii pomocí testů dobré shody. Dále byl posouzen rozptyl rovnosti pozorování spotřeby v jednotlivých kategoriích pomocí Bartlettova a Levenova testu a nebylo zamítnuto, že rozptyl je nezávislý na parametru. V konečném výsledku ANOVA bylo zjištěno, že kategorie se vyznačují významnými rozdíly v očekávaných hodnotách.

Následně byl posouzen výkon lineárního a nelineárního (4.5) regresního modelu pomocí „*k*-fold cross-validation“. Mocnná regrese překonává lineární model. Mocnný model vykazuje vyšší stabilitu, jelikož má mnohem menší směrodatnou odchylku (0,0073 proti 0,0698). Linearizace závislosti spotřeby na tlaku je tedy méně vhodná pro použití než mocnná závislost. Na Obr 4.4 je patrná regresní křivka mocnného modelu pro všechna dostupná validní data. Odhady koeficientů *C0* a *N3* a jejich vlastností jsou v Tab. 4.3. Regresní parametr *N3* se statisticky významně liší od nuly ($\alpha=0,05$). To ukazuje, že mocnná regrese nemůže být redukována na konstantní model, a proto vykazuje významnou závislost mezi pozorovanou spotřebou a tlakem. Test významnosti parametru byl proveden ve smyslu LR statistiky.

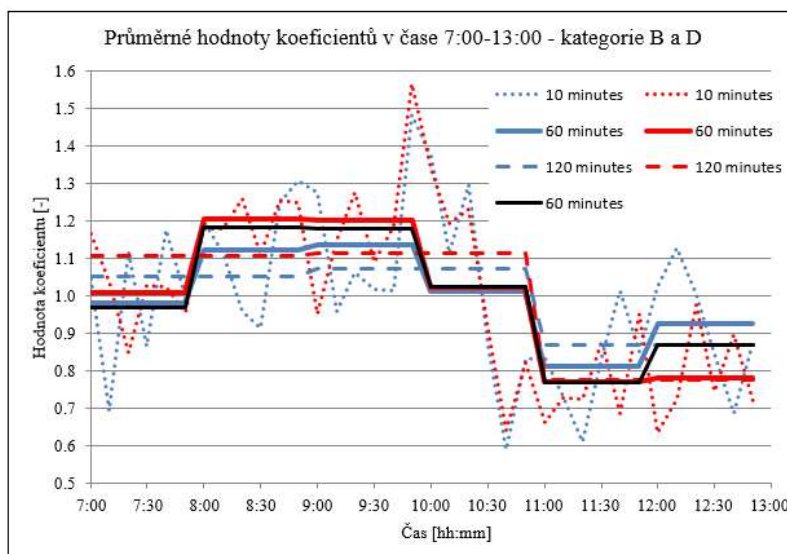


Obr 4.4 Mocnná regrese pro všechna data

Tab. 4.3 Odhadované regresní parametry vzhledem k modelu (4.5): bodové odhady, 95 % IS (interval spolehlivosti), LR statistika a *p*-hodnota významnosti parametru

Regresní Parameter	Odhady			
	Hodnota	95% IS	LR Statistika	<i>p</i> -hodnota významnosti
<i>C0</i>	2.8841	[2.834, 2.935]	-	-
<i>N3</i>	0.1788	[0.116, 0.244]	22.644	<0.0001

Nerovnoměrnost spotřeby byla vyhodnocena dle (4.6), (4.7), (4.8) a (4.9) a to v pracovních hodinách 7:00 až 13:00 (zároveň i zvlášť pro pracovní dny se stejnou délkou, ale toto vyhodnocení je uvedeno v samotném textu dizertační práce) pro všechny dny dohromady. Na Obr 4.5 je ukázka průběhu spotřeby vody během dne při různém tlaku – kategorie B a D. V Tab. 4.4 jsou pak hodnoty odchylky od optimální hodnoty.



Obr 4.5 Průměrné koeficienty v závislosti na tlaku v čase 7:00-13:00 – všechny dny

Tab. 4.4 Průměrné čtvercové odchylky od optimální hodnoty pro různé délky časového kroku

tlak na přípojce [MPa]	Délka časového kroku [min]				
	10	20	30	60	120
< 0.25	0.0560	0.0375	0.0365	0.0220	0.0151
0.25 - 0.30	0.0432	0.0286	0.0250	0.0106	0.0083
0.30 - 0.35	0.0429	0.0340	0.0303	0.0168	0.0142
0.35 - 0.40	0.0516	0.0418	0.0381	0.0263	0.0247
> 0.40	0.0454	0.0374	0.0331	0.0234	0.0179

V rámci práce byla také provedena citlivostní analýza výsledků zjištěných v případové studii měření na přípojce. Tato citlivostní analýza má za cíl stanovit vliv nastavení experimentu na dosažené výsledky. Jedná se o jednu veličinu v rámci metadat (počet pracovníků) a přesnost měření proteklého objemu, což znamená velikost hodnoty pulsu. Jedná se tedy o porovnání dosažených výsledků při uvažování známého počtu pracovníků na směně, při různé velikosti pulsu a také s konstantním počtem pracovníků (jejich počet není znám) v kombinaci s různou velikostí pulsu. Detailně je postup popsán v samotném textu dizertační práce.

Tab. 4.5 Hodnota koeficientu N_3 v závislosti na pulsu

hodnota koeficientu N_3	hodnota pulsu [l]						
	1	2	5	10	20	50	100
bez sledování počtu pracovníků	0,084	0,085	0,085	0,084	0,072	0,089	0,039
počet pracovníků zahrnut	0,179	0,180	0,180	0,179	0,166	0,186	0,138

4.3 MĚŘENÍ V TLAKOVÉM PÁSMU

V této kapitole je popsán návrh metodiky pro provedení experimentálního měření pro jedno ucelené tlakové pásmo, které je zároveň měřicím okrskem. Jako případová studie bylo vybráno malé tlakové pásmo v rámci vodovodní sítě okresního města.

4.3.1 Případová studie

Byla zvolena vodovodní síť jednoho tlakového pásma ve městě Vsetín. Toto město má 26 500 obyvatel a nachází se ve Zlínském kraji v blízkosti česko-slovenských hranic. Schématická topologie sítě tlakového pásma je na Obr 4.6. Je zde také patrné, že předmětné tlakové pásmo je koncová část sítě, přičemž délka sítě je 2013 m. Do tohoto pásma proudí voda přes transportní tlakové pásmo a poté tlakově regulační ventil („PRV“). V tomto pásmu převažuje odběr vody pro domácnosti a počet přípojek je 68, které zásobují 832 obyvatel. Nadmořská výška je pak 340,00 - 362,50 m n. m.



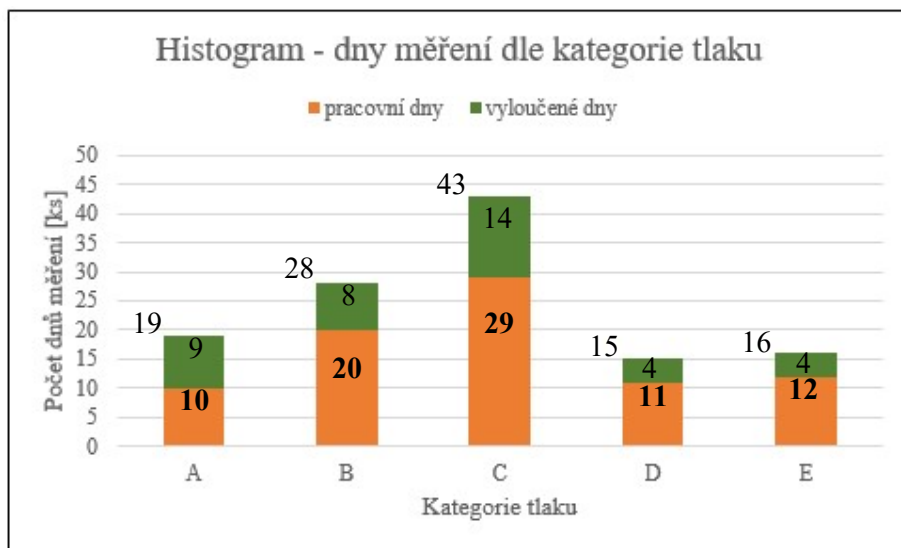
Obr 4.6 Charakteristika zástavby a topologie sítě předmětného tlakového pásma

Měrná kampaň v případové studii byla rozdělena do několika kratších měřicích cyklů, jejichž délka byla obdobná jako v (Ručka, 2018) a to cca 14 dní. To odpovídá přibližně 10-ti pracovním dnům a 4 dnům pracovního klidu. Měrná kampaň trvala v době 1.1.2018 – 1.5.2018, což odpovídá 121 dnům. Měřicí aparatura se skládá z tlakově regulačního ventilu (PRV; CLAVAL, typ NGE, DN 50), vodoměru s generátorem pulsu (puls 10 l) a technického zařízení pro

přenos dat a také hydrantového tlakového čidla. PRV a vodoměr byly umístěny v armaturní podzemní šachtě, tlakové čidlo je umístěno ve zvoleném podzemním hydrantu (tlakové čidlo s integrovaným senzorem tlaku s možným rozsahem měření 0,0-1,0 MPa a přesností 0,0025 MPa). Toto místo je patrné z Obr 4.6.

Pro nastavení PRV platí omezující podmínky pro minimální i maximální výstupní tlak. Tyto omezující podmínky stanovuje legislativa. Maximální přetlak v nejnižších místech vodovodní sítě každého tlakového pásma nesmí převyšovat hodnotu **0,60 MPa**. V odůvodněných případech se může zvýšit na **0,70 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**. Na základě těchto požadavků bylo možné použít hodnotu výstupního tlaku v rozsahu 0,10-0,53 MPa.

Pro výpočet spotřeby vody (bez ztrát vody) je zaveden zjednodušující předpoklad, přičemž jeho podstatou je, že nedochází ke zdatelnému kolísání tlaku v tlakovém pásmu. Jelikož se zde vodovodní síť dělí na dvě v podstatě hydraulicky nezávislé větve, byl krátkodobě měřen tlak i na větvi, na které není umístěno dlouhodobé měření (viz Obr 4.6). Maximální kolísání tlaku, respektive rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou v permanentním měřicím místě, bylo 0,018 MPa. Tato hodnota nebyla překročena ani při krátkodobém měření na druhé větvi sítě. Na Obr 4.7 je patrné rozdělení platných i neplatných dní do jednotlivých kategorií.



Obr 4.7 Histogram platných dnů v jednotlivých kategoriích

4.3.2 Návrh vyhodnocení experimentu

Postup navrženého vyhodnocení experimentu je popsán v kapitole dizertační práce 4.3.3. Zde je uvedena pouze rovnice uvažovaná pro nelineární regresi pozorované spotřeby vody dle konceptu FAVAD a to:

$$C_j' = C_0 \left(\frac{P_j}{P_0} \right)^{N_3} \quad (4.10)$$

Kde C_j' je odhadovaná spotřeba [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], C_0 a je hodnota spotřeby před změnou tlaku [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], P_0 je tlak před změnou tlaku [MPa], N_3 je exponent pro závislost snížení spotřeby [-]

4.3.3 Vyhodnocení experimentu

Minimální noční průtoky byly stanoveny dle rovnice:

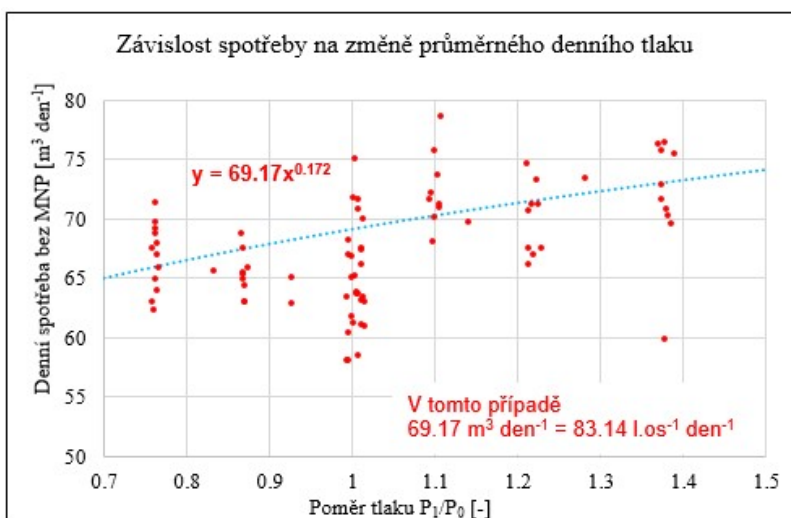
$$MNP_k = \min\{Q_{ijk}\} \quad (4.11)$$

Kde MNP_k je MNP v kategorii k a Q_{ijk} je průtok [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$] a je zde znatelný nárůst hodnoty MNP se zvyšujícím se průměrným tlakem. MNP jsou uvažovány v hodinových intervalech, ale pro porovnání jsou zde také zjištěné minimální průměrné průtoky v dané kategorii tlaku v denním časovém období 01:00 – 04:00. Tedy v čase, kdy se spotřeba vody (bez ztrát) obecně uvažuje jako minimální. Následující tabulka prezentuje dosažené výsledky.

Tab. 4.6 MNP a průměrný noční průtok v kategoriích tlaku

Kategorie průměrného tlaku	A	B	C	D	E
MNP [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	0.167	0.100	0.100	0.067	0.067
Minimální průtok (průměr 01:00 - 04:00) [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	0.167	0.128	0.111	0.094	0.089

Před samotnou aproximací ve smyslu regresní rovnice (4.10) a odhadu neznámých parametrů (C_0 a N_3) byla provedena filtrace obdobně jako v kapitole 4.2. Žádný bod nebyl identifikován jako „outlier“. Na Obr 4.8 je vykreslena křivka (4.10) aproximovaná na všechna platná data. Odhady regresních parametrů a jejich vlastnosti jsou shrnuty v Tab. 4.7. Regresní parametr N_3 se statisticky významně liší od nuly (na hladině významnosti 0,05). To ukazuje, že mocninná regrese nemůže být redukována na konstantní model, a proto vykazuje významnou závislost mezi pozorovanou spotřebou a tlakem. Test významnosti parametru byl proveden ve smyslu LR statistiky.

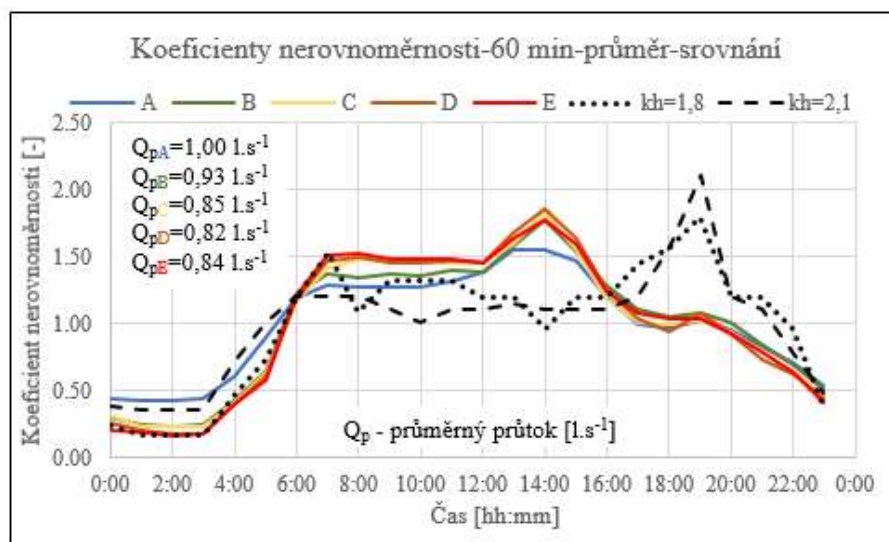


Obr 4.8 Mocnná regrese pomocí modelu (4.10) pro všechna data

Tab. 4.7 Odhadované regresní parametry vzhledem k modelu (4.10): bodové odhady, 95 % IS (interval spolehlivosti), LR statistika a p-hodnota významnosti parametru

Regresní Parameter	Odhady			
	Hodnota	95% IS	LR Statistika	p-hodnota významnosti
C_0	69.168	[68.245, 70.091]	-	-
N_3	0.172	[0.110, 0.235]	153.91	0

Na základě filtrovaných dat byly vyhodnocovány průběhy nerovnoměrnosti spotřeby vody dle vztahů (4.6), (4.7), (4.8) a (4.9). Pozornost byla věnována především průběhu spotřeby během pracovních dnů. V následujícím grafu jsou pro srovnání uvedeny také průběhy spotřeby vody během dne s historickým dokumentem – Směrnicí č.9 z roku 1973.



Obr 4.9 Koeficienty nerovnoměrnosti – 60 minut – průměr – srovnání

5 DISKUZE

Provedeným experimentálním laboratorním pokusem bylo ověřeno, že průtok výtokovou armaturou je závislý na tlaku a tvar závislosti odpovídá předpokládané rovnici výtoku otvorem. Následným teoretickým postupem byla stanovena hodnota koeficientu $N3$ v rozmezí 0.208 – 0.232. Před jakýmkoliv dalším srovnáváním je nutno kriticky podotknout, že dosažené výsledky jsou zcela závislé na dvou základních určujících faktorech. Těmito faktory jsou rozdělení spotřeby na tlakově ovlivnitelnou a neovlivnitelnou část. V této práci byla použita průměrná hodnota obou částí z provedené literární rešerše a to 51 % : 49 %. Tyto hodnoty se však velmi výrazně liší v závislosti na literárním zdroji. Přestože se jedná o teoretické stanovení koeficientu $N3$, jeho výsledná hodnota se pohybuje v intencích velmi blízkých hodnotám zjištěných v literatuře i hodnotám zjištěných vlastními experimenty.

Analýzou dat získaných měření v rámci případové studie pro administrativní budovu, hodnota koeficientu $N3$, který zavádí koncepcí FAVAD dle (Lambert, 2010), dosahuje hodnoty 0,179. Tato hodnota je oproti očekávání autora této práce poměrně vysoká. V administrativních budovách je totiž poměrně vysoké procento vody z celkové spotřeby použito na splachování WC, přičemž velmi často se jedná o objemový systém splachování s nádržkovým splachovačem. V dokumentu (PUB, 2018) je uvedeno, že spotřeba vody pro splachování toalet ve vládních a soukromých administrativních budovách v Singapuru je 37 % z celkové spotřeby. Stanovená hodnota koeficientu $N3$ v této studii je poměrně vysoká i v porovnání s (Bartlett, 2004), kde byla hodnota $N3$ stanovena na 0,20. To je sice vyšší hodnota, avšak zde se jednalo o studentský kampus, kde je mnohem vyšší podíl spotřeby pro účely osobní hygieny a také například pro zahradní účely a zavlažování, což jsou tlakově závislé části spotřeby.

Další porovnání je možné učinit s hodnotou stanovenou provedeným experimentem pro celé tlakové pásmo, kde byla stanovena hodnota koeficientu $N3$ 0.172. Přestože se jedná o spotřebu především domácností, je tato hodnota blízká hodnotě pro administrativní budovu, což může být způsobeno tím, že v těchto případech je stejně vysoká tlakově neovlivnitelná část spotřeby, přestože je složena z odlišných komponentů. Nicméně i tato hodnota se pohybuje v intencích zjištěných v literatuře, například dle (Garmendia, 2019), kde byla ve velmi podobné studii stanovena hodnota $N3$ 0,22 a 0,26. Hodnoty jsou vyšší, je však nutné podotknout, že byla vyšší i počáteční průměrná spotřeba (20 %) a zároveň byl snížen tlak o 2,6 bar ovšem z 7,3 bar. Porovnání není tedy zcela přesné, jelikož tato studie pracovala s vyššími tlaky. Proto je možné říci, že hodnoty $N3$ jsou velmi podobné hodnotě 0,179.

6 ZÁVĚR

Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že je nedostatek reálných experimentálně stanovených hodnot v oblasti závislosti spotřeby vody na tlakových poměrech ve vodovodu. Autor tedy navrhl tři experimenty, jejichž výsledky jsou v takové formě, která umožní aplikaci do používaných optimalizačních postupů. Toto vycházelo právě z provedené rešerše.

Autorem práce byly navrženy tři odlišné experimenty. Laboratorní měření závislosti průtoku jednotlivými výtokovými armatury ani následné teoretické stanovení změny spotřeby vody se změnou tlaku, dále dlouhodobý experiment sledování spotřeby vody ve zvolené administrativní budově se změnou tlaku a poté také obdobný experiment provedený pro celé tlakové pásmo.

Ve všech experimentech bylo cílem stanovit hodnotu koeficientu N_3 a mimo laboratorní podmínky také sledovat průběh spotřeby vody v čase a stanovit hodnoty charakterizující chování spotřeby vody v čase. Na základě provedených experimentů je možno konstatovat následující (všechny výsledky jsou podrobně diskutovány v předcházející kapitole):

- Z vytvořených kombinací výtokových armatur byla teoreticky stanovena hodnota koeficientu N_3 v rozmezí **0.208 – 0.232**.
- Z měření pro administrativní budovu i celé tlakové pásmo bylo ověřeno, že závislost spotřeby vody na tlaku **má mocninnou** formu.
- Hodnota koeficientu N_3 pro administrativní budovu byla stanovena na **0.179** (95 % IS 0.116 - 0.244)
- Pro administrativní budovu byl pozorován **rostoucí trend** maximálního pozorovaného koeficientu s rostoucím tlakem.
- Hodnota koeficientu N_3 pro tlakové pásmo byla stanovena na **0.172** (95 % IS 0.110 - 0.235)
- Pro tlakové pásmo byla pozorována zřetelná odlišnost průběhu spotřeby vody při nejvyšším tlaku oproti kategoriím s nižším tlakem, které jsou prakticky totožné.

V rámci dalšího výzkumu by tedy bylo vhodné se věnovat následujícím oblastem:

- Provést experimenty pro stanovení koeficientu N_3 pro celé části sítě a zároveň se zaměřením na jednotlivé typy budov.
- U experimentů pro jednotlivé typy budov věnovat pozornost závislosti maximálního koeficientu nerovnoměrnosti na tlakových poměrech.
- Provést experiment pro část vodovodní sítě zaměřený na potvrzení zjištění, že při překročení určité prahové hodnoty tlaku se začne lišit průběh spotřeby vody během dne.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BEAL, C. a R. A. STEWART. *South East Queensland Residential End Use Study: Final Report: Urban Water Security Research Alliance Technical Report No. 47* [online]. 2011 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://www.urbanwateralliance.org.au/publications/UWSRA-tr47.pdf>
- [2] BHAVE, P.R. Node flow analysis of water distribution systems. *Journal of Transportation Engineering*. 1981, **107**(4), 457-467.
- [3] 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* [online]. 2017, **186**, 380-387 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.234. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817313838>
- [4] CUBILLO, F., T. MORENO a S. ORTEGA. *Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid* [online]. Madrid, Canal de Isabel II: Cuadernos 4 de I + D + i, 2008 [cit. 2020-06-22].
- [5] DALHUISEN, J. M., R. J. G. M. FLORAX, H. L. F. DE GROOT a P. NIJKAMP. Price and Income Elasticities of Residential Water Demand: A Meta-Analysis. *Land Economics* [online]. 2003, **79**(2), 292-308 [cit. 2020-06-24]. DOI: 10.2307/3146872. ISSN 0023-7639. Dostupné z: <http://le.uwpress.org/cgi/doi/10.2307/3146872>
- [6] DE PAOLA, F. a M. GIUGNI. Leakages and pressure relation: an experimental research. *Drinking Water Engineering and Science* [online]. 2012, **5**(1), 59-65 [cit. 2020-06-09]. DOI: 10.5194/dwes-5-59-2012. ISSN 1996-9465. Dostupné z: <https://dwes.copernicus.org/articles/5/59/2012/>
- [7] FARLEY, M. a S. TROW. *Losses in water distribution networks*. London, UK: IWA Publishing, 2003. ISBN 1-900222-11-6.
- [8] FUJIWARA, O. a T. GANESHARAJA. Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks. *Journal of Water Resources Research*. 1993, **29**(8), 2917-2924.
- [9] GARMENDIA, M., J. ALMANDOZ, A. ARRIZABALAGA a F. ARREGUI. Pressure management and residential consumption reduction. *Water Supply* [online]. 2019, **19**(1), 236-244 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.2166/ws.2018.071. ISSN 1606-9749. Dostupné z: <https://iwaponline.com/ws/article/19/1/236/39211/Pressure-management-and-residential-consumption>
- [10] GERMANOPOULOS, G. A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Journal of Civil Engineering Systems*. 1985, (2), 171-179.
- [11] GIUSTOLISI, O. a T. M. WALSKI. Demand Components in Water Distribution Network Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management* [online].

- 2012, **138**(4), 356-367 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000187. ISSN 0733-9496. Dostupné z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000187](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000187)
- [12] GUPTA, R. a P.R. BHAVE. Comparison of methods for predicting deficient network performance. *Journal of Water Resources Planning Management*. 1996, **122**(3), 214-217.
- [13] GURUNG, Thulo Ram, Rodney A. STEWART, Ashok K. SHARMA a Cara D. BEAL. Smart meters for enhanced water supply network modelling and infrastructure planning. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2014, **90**, 34-50 [cit. 2020-06-11]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.06.005. ISSN 09213449. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344914001347>
- [14] HUSSIEN, Wa'el A., Fayyaz A. MEMON a Dragan A. SAVIC. Assessing and Modelling the Influence of Household Characteristics on Per Capita Water Consumption. *Water Resources Management* [online]. 2016, **30**(9), 2931-2955 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1007/s11269-016-1314-x. ISSN 0920-4741. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11269-016-1314-x>
- [15] CHANDAPILLAI, J. Realistic simulation of water distribution system. *Journal of Transportation Engineering*. 1991, **117**(2), 258-263.
- [16] ILMSS LTD. GUIDELINES relating to the Assessment and Calculation of AVERAGE PRESSURE in Water Distribution Systems and Zones [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: www.leakssutie.com
- [17] LAMBERT, A. What do we know about Pressure - Leakage Relationships in Distribution Systems? In: *Proceedings of the IWA Specialised Conference 'System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management'*. Brno, Česká republika, 2001, s. 89-96. ISBN 80-7204-197-5.
- [18] LAMBERT, A. a M. FANTOZZI. Recent developments in pressure management. In: *Water Loss 2010*. Sao Paolo, Brazílie, 2010.
- [19] LAMBERT, A., M. FANTOZZI, M. SHEPHERD a J. THORNTON. Practical approaches to modeling leakage and pressure management in distribution systems - Progress since 2005. In: *Proc., 12th Int. Conf. on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013*. Perugia, Itálie, 2013.
- [20] LAMBERT, A. a W. HIRNER. Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. *IWA The Blue Pages* [online]. 2000, (10) [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://waterfund.go.ke/watersource/Downloads/001.%20Losses%20from%20water%20supply%20systems.pdf>
- [21] LAMBERT, A. a J. THORNTON. Progress in practical prediction of pressure:leakage, pressure:burst frequency and pressure:consumption relationships. In: *Leakage 2005: Conference Proceedings*. Halifax, Kanada, 2005.

- [22] LAMBERT, A. a J. THORNTON. Pressure: Bursts relationships: Influence of Pipe Materials, Validation of Scheme Results and Implications of Extended Asset Life. In: *IWA Specialised Conference Water Loss 2012*. Manila, Filipíny, 2012.
- [23] MARTINEZ, Fernando, Pilar CONEJOS a Juan VERCHER. Developing an Integrated Model for Water Distribution Systems Considering Both Distributed Leakage and Pressure-Dependent Demands. *WRPMD'99* [online]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 1999, 1999-06-03, , 1-14 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1061/40430(1999)46. ISBN 978-0-7844-0430-0. Dostupné z: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40430\(1999\)46](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40430(1999)46)
- [24] MAY, J. Pressure dependent leakage. *World Water Environmental Engineering*. 1994, (10).
- [25] MEYER, Niel, Heinz Erasmus JACOBS, Trevor WESTMAN a Ronnie MCKENZIE. The effect of controlled pressure adjustment in an urban water distribution system on household demand. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* [online]. 2018, **67**(3), 218-226 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.2166/aqua.2018.139. ISSN 0003-7214. Dostupné z: <https://iwaponline.com/aqua/article/67/3/218/38116/The-effect-of-controlled-pressure-adjustment-in-an>
- [26] PEARSON, D., M. FANTOZZI, D. SOARES a T. WALDRON. Searching for N2: How does Pressure Reduction Reduce Burst Frequency? In: *Leakage 2005: Conference Proceedings*. Halifax, Kanada, 2005.
- [27] PRASKIEVICZ, Sarah a Heejun CHANG. Identifying the Relationships Between Urban Water Consumption and Weather Variables in Seoul, Korea. *Physical Geography* [online]. 2013, **30**(4), 324-337 [cit. 2020-06-21]. DOI: 10.2747/0272-3646.30.4.324. ISSN 0272-3646. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.2747/0272-3646.30.4.324>
- [28] RATHNAYAKA, Kumudu, Hector MALANO, Shiroma MAHEEPALA, Biju GEORGE, Bandara NAWARATHNA, Meenakshi ARORA a Peter ROBERTS. Seasonal Demand Dynamics of Residential Water End-Uses. *Water* [online]. 2015, **7**(12), 202-216 [cit. 2020-06-24]. DOI: 10.3390/w7010202. ISSN 2073-4441. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2073-4441/7/1/202>
- [29] RUCKA, Jan, Jan HOLESOVSKY, Tomas SUCHACEK a Ladislav TUHOVCAK. An Experimental Water Consumption Regression Model for Typical Administrative Buildings in the Czech Republic. *Water* [online]. 2018, **10**(4) [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.3390/w10040424. ISSN 2073-4441. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/424>
- [30] SHIRZAD, Akbar, Massoud TABESH, Raziye FARMANI a Mirali MOHAMMADI. Pressure-Discharge Relations with Application to Head-Driven Simulation of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* [online]. 2013, **139**(6), 660-670 [cit. 2020-06-22]. DOI:

-
- 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000305. ISSN 0733-9496. Dostupné z:
[http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000305](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000305)
- [31] SIEW, Calvin a Tiku T. TANYIMBOH. Pressure-Dependent EPANET Extension: Pressure-Dependent Demands. *Water Distribution Systems Analysis 2010* [online]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011, 2011-12-21, , 75-84 [cit. 2020-06-25]. DOI: 10.1061/41203(425)9. ISBN 9780784412039. Dostupné z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41203\(425\)9](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41203(425)9)
- [32] Singapore's National Water Agency. Water Efficient Building Design Guide Book, 2nd ed.; PUB, The National Water Agency: Singapore. Available online: https://www.pub.gov.sg/Documents/WEB_Design.pdf
- [33] STRAŇÁK, Petr. *VLIV TLAKOVÝCH POMĚRŮ VE VODOVODNÍ SÍTI NA SPOTŘEBU VODY*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [34] THORNTON, J. a A. LAMBERT. Managing pressures to reduce new break frequencies, and improve infrastructure management. *Water 21* [online]. 2006 [cit. 2019-04-29].
- [35] THORNTON, J. a A. LAMBERT. Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs. In: *Water Loss 2007*. Bucharest, Rumunsko, 2007.
- [36] TUHOVČÁK, Ladislav, Tomáš KUČERA a Tomáš SUCHÁČEK. Hodnocení technického stavu vodárenské infrastruktury. In: *Voda Zlín 2016*. Olomouc: Moravská vodárenská, 2016. ISBN 978-80-905716-2- 4.
- [37] WU, Zheng. *Water Loss Reduction* [online]. Wu Edition. Exton, PA, USA: Bentley Institute Press, 2011 [cit. 2020-06-10]. ISBN 1934493082.
- [38] *Česká republika - Český statistický úřad* [online]. Praha: ČSÚ, 2016 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/en/index.jspx?_afPfm=VYSTUP&_afPfm=VYSTUP-objekt-parametry&pvo=ZPR12&pvokc=&sp=A&katalog=30842&z=T

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Souhrnná tabulka celkových čtvercových chyb	15
Tab. 4.2 Charakteristické průtoky a spotřeba vody pro kancelářskou budovu	16
Tab. 4.3 Odhadované regresní parametry vzhledem k modelu (4.5): bodové odhady, 95 % IS (interval spolehlivosti), LR statistika a p-hodnota významnosti parametru.....	19
Tab. 4.4 Průměrné čtvercové odchylky od optimální hodnoty pro různé délky časového kroku	20
Tab. 4.5 Hodnota koeficientu $N3$ v závislosti na pulsu.....	21
Tab. 4.6 MNP a průměrný noční průtok v kategoriích tlaku	23
Tab. 4.7 Odhadované regresní parametry vzhledem k modelu (4.10): bodové odhady, 95 % IS (interval spolehlivosti), LR statistika a p-hodnota významnosti parametru.....	24

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr 3.1 Faktory ovlivňující spotřebu vody	8
Obr 4.1 Ukázka instalovaného měření při testování	13
Obr 4.2 Výsledky měření testovaných armatur.....	14
Obr 4.3 Standardizovaná rezidua regrese přímého dosazení do (4.5) (a) a histogram četnosti měření v kategoriích tlaku (b)	18
Obr 4.4 Mocninná regrese pro všechna data	19
Obr 4.5 Průměrné koeficienty v závislosti na tlaku v čase 7:00-13:00 – všechny dny.....	20
Obr 4.6 Charakteristika zástavby a topologie sítě předmětného tlakového pásma.....	21
Obr 4.7 Histogram platných dnů v jednotlivých kategoriích	22
Obr 4.8 Mocninná regrese pomocí modelu (4.10) pro všechna data	24
Obr 4.9 Koeficienty nerovnoměrnosti – 60 minut – průměr – srovnání	24

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a \dots$	je koeficient [-]
$a \dots$	je podíl objemového průtoku [-]
ANOVA ...	Analysis Of VAriance
AZP	Average Zone Point
$b \dots$	je exponent [-]
$b \dots$	je podíl tlakově-závislého průtoku [-]
$BF_{npd} \dots$	je frekvence poruch, která není závislá na tlaku [pp.km ⁻¹ .rok ⁻¹]
$BF_R \dots$	je redukce nových poruch nebo poruchovosti [%]
$BF_0 \dots$	je poruchovost před zavedením „pressure managementu“ [pp.km ⁻¹ .rok ⁻¹]
$C_i \dots$	je spotřeba stanovená dle (4.1) [l.os ⁻¹ .hod ⁻¹]
$c_{ij} \dots$	je koeficient nerovnoměrnosti spotřeby vody [-]
$c_{ij} \dots$	je koeficient nerovnoměrnosti spotřeby vody (včetně ztrát) [-]
$c_{ijk} \dots$	je koeficient nerovnoměrnosti spotřeby vody v kategorii tlaku k v časovém kroku i ve dni j [-]
$c_{MAX_i} \dots$	je maximální koeficient v kategorii tlaku k [-]
$c_{MEAN_{ik}} \dots$	je průměrný koeficient v kategorii tlaku k v časovém kroku i [-]
$C_0 \dots$	je hodnota spotřeby před změnou tlaku [l.s ⁻¹]
$C_0, N_3 \dots$	jsou odhadované neznámé regresní parametry [-]
$C_1 \dots$	je hodnota spotřeby po změně tlaku [l.s ⁻¹]
$C'_j \dots$	je odhadovaná spotřeba [l.s ⁻¹]
FAVAD...	Fixed And Variable Area Discharges
$h_i \dots$	je počet pracovních hodin během i -tého dne
ICF ...	je Infrastructure Condition Factor [-]
ILI ...	je Infrastructure Leakage Index [-]
$L_0 \dots$	je ztrátový průtok před změnou tlaku [l.s ⁻¹]
$L_1 \dots$	je ztrátový průtok po změně tlaku [l.s ⁻¹]
$m_k \dots$	je celkový počet platných dní v kategorii k [-]
MNČ ...	metoda nejmenších čtverců

MNP_k ...	je MNP v kategorii k
MSE ...	Mean of Squared Errors
n_t ...	je počet časových kroků při zvolené délce časového kroku [-]
$N1$...	je ztrátový koeficient [-]
$N2$...	je koeficient vyjadřující závislost poruchovosti na tlaku [-]
$N3$...	je exponent pro závislost snížení spotřeby [-]
P ...	je tlak [MPa, bar, m v. sl.]
p ...	je procento detekovatelných ztrát [-]
p_i ...	je počet pracovníků [os]
$p_i = P_i/P_0$...	je normalizovaný tlak [-]
P_i^{min} ...	je minimální tlak, pod kterým nedojde k žádnému odběru vody [m v. sl.]
P_i^{ref} ...	je referenční tlak nezbytný k uspokojení požadovaného odběru [m v. sl.]
p_{min} ...	je rozdíl nadmořských výšek mezi výtokovou armaturou a tlakem na přípojce (v uzlu) [m]
P_0 ...	je původní tlak před změnou tlaku [m v. sl.]
P_1 ...	je tlak po změně tlaku [m v. sl.]
PRV ...	Pressure Reducing Valve
Q^{avl} ...	je dostupný průtok na výtokové armatuře [$m^3 \cdot s^{-1}$]
Q_{ij} ...	je naměřená spotřeba [$l \cdot s^{-1}$]
Q_{ijk} ...	je průtok [$l \cdot s^{-1}$]
Q_{MEAN_i} ...	je průměrná spotřeba [$l \cdot s^{-1}$]
q_i^{avl} ...	je dostupný odběr [$l \cdot s^{-1}$]
q_i^{ref} ...	je požadovaný odběr [$l \cdot s^{-1}$]
Q^{req} ...	je požadovaný průtok na výtokové armatuře [$m^3 \cdot s^{-1}$]
SS ...	Sum of squared errors
SSE ...	Sum of squared errors
V_i ...	značí celkovou spotřebu [l]
α ...	je exponent závislosti spotřeby na tlaku [-]
ε_k ...	reprezentuje průměrnou čtvercová odchylka průměrných koeficientů od optimální hodnoty v každém časovém kroku [-]

SEZNAM PŘÍLOH

Bez příloh.