



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

**MODELOVÁNÍ JAKOSTI VODY VE VODOVODNÍ
SÍTI**

MODELING OF WATER QUALITY IN THE WATER SUPPLY NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

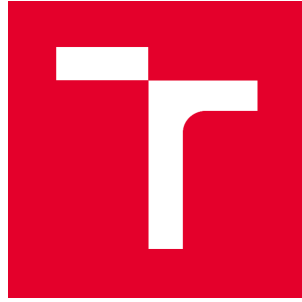
Bc. Petr Dukát

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N0732A260025 Stavební inženýrství – vodní hospodářství a vodní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Petr Dukát
Název	Modelování jakosti vody ve vodovodní síti
Vedoucí práce	Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] Rossman, A. L., 2000: EPANET 2 Users Manual, United States Environmental Protection Agency US E.P.A., USA, 9/2000
- [2] National Research Council of the national academies, 2006: Drinking Water Distribution Systems – Assessing and reducing Risks, the National Academic Press, Washington D.C., ISBN: 0-309-10306-1, 2006
- [3] CLARK, M. R. Modeling Water Quality in Distribution Systems, Second Edition. AWWA, 2012, ISBN 978-1-58321-816-7
- [4] WALSKI, T.M. Standards for Model Calibration. In Proceedings AWWA Computer Conference, 1995, Denver
- [5] SAVIC, D., KAPELAN, Z. Quo vadis water distribution model calibration. In Urban Water Journal, 3/2009, DOI: 10.1080/15730620802613380
- [6] VASCONCELOS, J. J. et al. Characterization and Modeling of Chlorine Decay in Distribution Systems, AWWA Research Foundation AWWARF, USA, 1996, ISBN 0-89867-870-6

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci diplomové práce bude provedena hydraulická analýza vodovodní sítě vybrané obce, přičemž pozornost bude věnována modelování ukazatelů jakosti dopravované pitné vody. Diplomová práce bude obsahovat část teoretickou i praktickou. Bude provedeno měření hydraulických veličin na vodovodní síti, které budou následně použity pro kalibraci simulačního modelu vodovodu. Model vodovodní sítě bude zpracován v simulačním softwarovém nástroji na bázi Epanet 2.0.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá modelováním jakosti vody ve vodovodní síti se zaměřením na stáří vody. V úvodní části práce jsou uvedeny faktory, které vedou ke zvyšování stáří pitné vody ve vodovodních systémech. Teoretická část práce představuje matematické vztahy a logistické kroky, které softwarové nástroje používají k simulaci ukazatelů jakosti vody ve vodovodní síti. V praktické části práce byl zkonstruován hydraulický model skupinového vodovodu o celkové délce 302,1 km. Za účelem kalibrace a verifikace modelu byla na síti provedena rozsáhlá měrná kampaň. Kalibrovaný hydraulický model byl využit k simulaci stáří vody pro stávající stav a další možné scénáře. Výsledky práce odhalily části vodovodní sítě s vysokým stářím vody a mají podpořit progresivní filozofii řízení vodovodních systémů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodovodní síť, spotřeba vody, odběr vody, jakost vody, stáří vody, matematické modelování, hydraulická analýza

ABSTRACT

This thesis looks at water quality modelling in the water network, focusing on water age. The initial part of the work identifies the factors that lead to an increase in water age in water supply networks. The theoretical part of the work presents the mathematical relationships and logistical steps that software tools apply to simulate water quality indicators in a water supply network. In the practical part of the work, a hydraulic model of a water distribution system with a total length of 302,1 km was constructed. Measurement campaign was carried out to calibrate and verify created hydraulic model. Using this hydraulic model, water age for existing and possible scenarios was simulated. The results of the work have revealed parts of the water supply network containing high water age and are intended to encourage the progressive water distribution systems management philosophy.

KEYWORDS

Water supply network, water consumption, water demand, water quality, water age, mathematical modeling, hydraulic analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

DUKÁT, Petr. *Modelování jakosti ve vodovodní síti*, Brno 2022. 88 s., 48 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Modelování jakosti ve vodovodní síti* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Petr Dukát
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Modelování jakosti ve vodovodní síti* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Petr Dukát
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chci poděkovat vedoucímu Ing. Janu Ručkovi, Ph.D., za odborné vedení této diplomové práce.

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
1.1	STÁVAJÍCÍ STAV PROBLEMATIKY, DŮVODY ŘEŠENÍ	3
1.1.1	Ekonomické faktory ovlivňující spotřebu vody	3
1.1.2	Společenské faktory ovlivňující spotřebu vody	3
1.1.3	Dopady snižování odběrů z vodovodních sítí	4
1.1.4	Vliv stáří vody na celkovou jakost.....	5
1.2	CÍL PRÁCE.....	7
2	MODELOVÁNÍ JAKOSTI VE VODOVODNÍ SÍTI	8
2.1	MODELOVÁNÍ UKAZATELŮ JAKOSTI VODY	8
2.1.1	Základní názvosloví	8
2.1.2	Matematický popis procesů ovlivňujících jakost vody.....	9
2.1.3	Lagrangeovy souřadnice	11
2.2	MODELOVÁNÍ JAKOSTI VODY VE VODOVODNÍM SYSTÉMU	12
2.2.1	Matematický popis procesů modelování jakosti vody ve vodovodních distribučních systémech.....	13
2.2.2	Možnosti modelování jakosti ve vodovodní síti	14
2.2.3	Vývojový diagram simulace jakosti vody ve vodovodní síti	15
2.3	SOFTWAREVÉ NÁSTROJE PRO SIMULACI UKAZATELŮ JAKOSTI VODY.....	16
2.3.1	EPANET	16
2.3.2	QUALNET	23
2.3.3	WaterGEMS	23
2.3.4	H2ONet Multi-Species eXtension (MSX)	23
3	HYDRAULICKÝ SIMULAČNÍ MODEL SKUPINOVÉHO VODOVODU	24
3.1	VSTUPNÍ PODKLADY A INFORMACE.....	24
3.2	ANALÝZA SPOTŘEBY VODY SKUPINOVÉHO VODOVODU	26
3.2.1	Spotřeba vody v měřících okrcích.....	27
3.2.2	Časový průběh spotřeby v měřících okrcích.....	28
3.2.3	Spotřeba pitné vody velkoodběrateli.....	37
3.3	SESTAVENÍ HYDRAULICKÉHO MODELU	37
3.3.1	Hydraulická drsnost potrubí	37
3.3.2	Vnitřní profily, materiál a stáří potrubí	38
3.3.3	Další parametry hydraulické analýzy	40
3.3.4	Koeficienty nerovnoměrnosti odberu vody	40
3.4	MĚRNÁ KAMPAŇ	45
3.4.1	Etapizace dle tlakových pásem	46
3.4.2	Zpracování dat měrné kampaně	47

3.5	VÝSLEDKY KALIBRACE HYDRAULICKÉHO MODELU.....	49
3.5.1	Kalibrace vybraného kalibračního celku	50
3.5.2	Výsledky kalibrace – průtoky.....	51
3.5.3	Výsledky kalibrace – tlaky	52
3.5.4	Vyhodnocení výsledků kalibrace	53
4	MODELOVÁNÍ JAKOSTI VODY VE SKUPINOVÉM VODOVODU	54
4.1	MODELOVÁNÍ STÁŘÍ VODY PRO STÁVAJÍCÍ STAV	54
4.1.1	Výsledky simulace stáří vody pro stávající stav	55
4.1.2	Úseky s vysokým stářím vody	56
4.1.3	Vyhodnocení modelování stáří vody pro stávající stav	57
4.2	SIMULACE DOPADŮ SNIŽOVÁNÍ SPOTŘEBY VODY	57
4.2.1	Rozdělení uzlových odběrů ze sítě dle jejich typu.....	58
4.2.2	Simulované scénáře snižování spotřeby vody.....	60
4.2.3	Výsledky analýzy stáří vody pro jednotlivé scénáře.....	61
4.3	SOUHRN VÝSLEDKŮ MODELOVÁNÍ STÁŘÍ VODY VE SKUPINOVÉM VODOVODU.....	72
4.3.1	Porovnání výsledků jednotlivých scénářů	73
4.3.2	Průměrné maximální stáří vody v síti dle zvolených scénářů	73
5	DISKUZE.....	74
6	ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ.....	76
7	POUŽITÁ LITERATURA	78
	SEZNAM TABULEK.....	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	84
	SEZNAM PŘÍLOH	87
	SUMMARY.....	88

1 ÚVOD

Voda je základní a nenahraditelná surovina. Dostatek kvalitních vodních zdrojů je spojován s fungováním společnosti, její expanzí a má vliv na všechny odvětví lidské činnosti. S nedostatkem vody je naopak spojována chudoba, šíření nemocí a další faktory, které brání místnímu rozvoji. Moderní západní společnost vnímá dostatek vody jako samozřejmost. V jiných částech světa však můžeme setkat s oblastmi, které trpí jejím nedostatkem, a to jak kvůli vysychání zdrojů, tak problémům spojeným s chybějící infrastrukturou. Česká republika se vlivem globálních klimatických změn setkává s nedostatkem vody stále častěji. V letech 2012 až 2018 došlo v České republice k jedenácti výraznějším případům zemědělského sucha, které v důsledku nedostatku vody v krajině způsobilo globální problémy především v zemědělství, ovocnářství a lesnictví, ale také lokální problémy spojené s kolísáním zásob pitné vody [1]. Právě lokální výpadky dodávek pitné vody opakovaně přitahují pozornost veřejnoprávních i soukromých médií, která medializací problémů spojených s nedostatkem vody v krajině vytváří společenské téma. I díky této medializaci si široká veřejnost stále více uvědomuje svou potencionální zranitelnost v důsledku nedostatku vody. V liberálně demokratické společnosti tento veřejný zájem zase automaticky přitahuje zájmy politiků, zákonodárných nebo výkonných orgánů, kteří se snaží nabídnou řešení problému nastavením pravidel pro efektivní a hospodárné hospodaření s vodou.

Efektivní hospodaření ve vodohospodářství je nicméně komplikované z důvodu vyskytujících se protichůdných stavů. Vylepšení jednoho požadavku (kritéria) může znamenat zhoršení kritéria jiného. Jako příklad může sloužit změna tlaku ve vodovodní síti. Dojde-li ke zvýšení tlaků ve vodovodní síti, bude důsledkem zvýšení objemu fakturované vody, resp. vody odebrané na straně jedné. Na straně druhé však zároveň dojde ke zvýšení ztrát vody a také ke zvýšení poruchovosti potrubí. Vyvážení těchto tří základních ukazatelů je velmi složitým a komplikovaným procesem, jelikož hledat optimální nastavení systému lze vždy z více hledisek. Například z ekonomického a ekologického pohledu je jednoznačným zájmem snižování ztrát vody. Avšak v době snižujících se odběrů vody (ve smyslu spotřeby) např. větším využitím dešťové vody na místo vody pitné je důležitým hlediskem jakost vody ve vodovodu. V rámci jakosti vody je často sledovaným a simulovaným parametrem stáří vody v síti (viz. kap 1.1.4). Stáří vody je ale pro změnu ovlivňováno ztrátami vody v potrubí, přičemž vyšší ztráty vody znamenají častější obměnu vody v potrubí, resp. snížení stáří vody. Proto je důležité studovat vlivy jednotlivých komponent odběrů vody na jakostní ukazatele vody, aby bylo možné určit významnost a důležitost jednotlivých komponent a jejich vzájemnou interakci. Modifikace tlaků v síti za účelem snížení ztrát může mít tedy za následek zvýšené stáří vody a s tím spojenou zvýšenou frekvenci proplachování vodovodní sítě. To může v konečné fázi znamenat i vyšší spotřebu vody než před provedením modifikace. Proto je vždy nutné nalézt kompromis v konfiguraci a nastavení provozu. [2]

K nalezení tohoto kompromisu vedoucím k efektivní konfiguraci vodárenského systému může pomoci matematické modelování. S rozvojem výpočetní techniky souvisí stále častější aplikace matematických modelů. Matematické modelování lze popsat jako zjednodušené zobrazení reálného stavu, jehož výsledná přesnost je ovlivněná mírou

zjednodušení, kterou se rozumí stupeň shody mezi chováním modelu a skutečností. Matematické modely lze také využít k simulaci stavů a procesů ve vodovodních systémech. [3]

Využití matematických modelů vodovodních sítí může být různé. Od optimalizace stávajících stavů, simulace hydraulických změn před plánovanou rekonstrukcí a po ní, až po kompletní projektování nových vodovodů. Funkční matematické modely simulují v celém systému základní hydraulické ukazatele, které jsou podstatné pro provozovatele vodovodů. U stávajících systémů lze tyto hodnoty samozřejmě získat přímým měřením na síti. Jejich simulace je však ekonomicky výhodná. [4]

Matematické modely se také používají k modelování jakostních ukazatelů ve vodovodních systémech. Model jakosti vody dokáže simulovat tvorbu a chování rozpuštěných i nerozpuštěných látek ve vodovodním systému. V praxi jsou tyto látky například jemné neuzpevněné sedimenty. Prostorová a časová diskreditace je zásadní pro modelování pohybu látek ve vodovodním potrubí. Sofistikovaným využitím algoritmů pro modelování jakosti je pak simulace stáří vody ve vodovodním systému. [5]

Tato diplomová práce se kompletně zabývá modelováním jakosti vody ve vodovodní síti z teoretického i praktického hlediska. První část práce se zaměřuje na teorii modelování jakosti vody ve vodovodní síti. Obsahuje přehled základního názvosloví obecného modelování jakosti, teoretické základy odvození vztahů aplikací zákona zachování hmotnosti a výhody využití lagrangeových souřadnic. Pozornost je věnována různým možnostem modelování jakosti ve vodovodních systémech. Je zde zobrazen vývojový diagram, který chronologicky popisuje jednotlivé procesy vedoucí k sestavení funkčního modelu jakosti vodovodní sítě. Teoretická část se zabývá také matematickými popisy procesů ovlivňujících jakost vody v distribučních systémech a dostupnými softwarovými nástroji.

Druhá část práce je věnována sestavení a kalibraci matematického modelu skupinového vodovodu v softwarovém nástroji EPANET. Jsou zde uvedeny všechny vstupní podklady použité ke tvorbě konstrukce hydraulického modelu. Tyto údaje byly pečlivě analyzovány a zpracovány. Zpracováním poskytnutých podkladů byly získány přehledné informace o síti, mezi které např. patří zastoupení dimenzí, materiálů a stáří potrubí. Důraz je kladen zejména podrobné analýze spotřeby vody skupinového vodovodu, která je pro model jakosti zásadní. Je popsána rozsáhlá měrná kampaň na vodovodní síti a metodika jejího zpracování. Závěrečná část kapitoly je věnována kalibraci hydraulického modelu a jeho výsledkům.

Třetí část práce přímo navazuje na část druhou. Verifikovaný hydraulický model byl využit k modelování jakosti vody se zaměřením na stáří vody. V celém skupinovém vodovodu byla provedena simulace stáří vody pro stávající stav. Vodovod byl také podroben řadě testů v rámci scénářů zvolených tak, aby odrážely dopady dalšího snižování spotřeby a zjistily její vliv na stáří vody v síti. Výsledky simulace stáří vody pak byly porovnávány pomocí statistických údajů a grafického zobrazení v GIS.

Závěrečnou část práce tvoří diskuze, která se v souvislostech vyjadřuje k zjištěným poznatkům a výsledkům práce.

1.1 STÁVAJÍCÍ STAV PROBLEMATIKY, DŮVODY ŘEŠENÍ

V České republice je vybudováno 79 tisíc km vodovodní sítě, která zásobuje pitnou vodou 94,6 % obyvatel republiky [6]. Tyto sítě byly navrženy dle norem a technických standardů platných v době jejich výstavby. Jedním z nejdůležitějších parametrů při návrhu vodovodních sítí je jmenovitá světlost potrubí (DN), která má přímý vliv na hydraulické poměry v systému popsaném rovnicí kontinuity. Jmenovitá světlost ovlivňuje celkový objem vody v potrubí a rychlost proudění. Rychlost proudění má vliv na celkové stáří vody (čas potřebný k přepravě upravené vody k odběrateli). Návrh jmenovité světlosti nových vodovodů by měl reflektovat potřebu vody v místě vznikající zástavby. Reálná spotřeba pitné vody se však může lišit, a navíc se v průběhu času měnit. [7]

1.1.1 Ekonomické faktory ovlivňující spotřebu vody

Statistické údaje z následující tabulky ukazují, že průměrná denní spotřeba vody na osobu a den klesla za posledních 30 let přibližně o polovinu a její cena se i po zohlednění inflace zvýšila téměř o 800 %. Rostoucí cena vody tedy způsobena nejen inflací, ale celkovou porevoluční změnou filozofie ve vodárenství, která zahrnovala privatizaci vodárenských společností a výrazné snížení jejich státních dotací. Údaje Českého statistického úřadu ukazují, že průměrná denní spotřeba vody se v ČR se v roce 2020 pohybuje kolem 90 litrů na osobu a den, zatímco v roce 1989 to byl téměř dvojnásobek. [7]

Tab. 1: Vývoj specifické spotřeby vody a cen vodného a stočného v ČR [7]

Rok	Spotřeba	Vodné	Stočné	Celkově	V cenách roku 2020 ¹⁾
-	$l \cdot (\text{os} \cdot \text{den})^{-1}$	$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$
1989	170,90	1,90	0	1,90	11,24
1995	121,00	10,82	8,09	18,90	40,41
2000	107,40	18,38	14,70	33,08	51,02
2010	89,50	30,91	28,93	60,90	71,38
2020	90,00	45,27	42,07	88,99	88,99

Pozn.: ¹⁾ přibližná cena po zohlednění inflace

Další pokles spotřeby vody by navíc mohly zapříčinit rostoucí ceny energií. Vodné a stočné společně s platbami za energie jsou součástí výdajů domácností na bydlení, které se budou muset přizpůsobit vyvíjející se situaci na trhu. Rostoucí ceny energií by zároveň mohly mít negativní vliv na samotnou cenu pitné vody, a to kvůli rostoucím energetickým nákladům na její úpravu a dopravu. [8]

1.1.2 Společenské faktory ovlivňující spotřebu vody

Jak už bylo v této práci zmíněno, medializace problému nedostatku vody v krajině a případů lokálních výpadků dodávek pitné vody stále více motivuje domácnosti k šetrnému hospodaření s vodou, což se může projevit snížením spotřeby pitné vody odebírané z vodovodního řádu. Medializaci využívají i prodejci různých výrobků, které po

osazení na výtokové armatury vnitřní rozvodů způsobují snížení spotřeby vody, čehož je zpravidla dosaženo pouhým zmenšením průtočné plochy výtokové armatury. [9]

Množství vody odebrané z vodovodní sítě závisí také na demografickém vývoji v dané lokalitě. Přírůstek a úbytek populace ovlivňuje spotřebu vody a tím i stáří vody ve vodovodní síti. Demografická změna posledních let potvrzuje dlouhodobý trend migrace do velkých měst a úbytku obyvatel v okresních městech a malých obcích. Například ve městech Jihomoravského kraje došlo roce 2020 k demografické změně v řádu desítek procent. Největší přírůstek obyvatel byl zaznamenán v Pohořelicích, které leží v příznivých dojezdových vzdálenostech Brna (přírůstek 23 %), naopak největší úbytek v Jevišovicích u Znojma (úbytek 15 %). Přírůstek počtu obyvatel ve městech Jihomoravského kraje je způsoben výhradně migrací obyvatel dle zmíněného trendu. Bez migrace by se počet obyvatel ve městech JMK přirozenou cestou snížil. [10]

Obecnou závažnost situace podtrhuje také skutečnost, že vedení některých okresních měst a malých obcí (zejména těch, které nejsou satelity velkých měst) nabízí svým stávajícím i novým obyvatelům různé bonusy, které je motivují k tomu, aby v dané lokalitě žili. [11]

Dotační program Dešťovka

Od srpna 2017 vyzývá Ministerstvo životního prostředí prostřednictvím Státního fondu životního prostředí České republiky vlastníky a stavitele domů k udržitelnému a efektivnímu hospodaření s vodou až 50% dotací z celkových způsobilých výdajů, aby tak podpořilo další snižování spotřeby vody. Celkem lze v programu Dešťovka čerpat až 440 mil. Kč na projekty zaměřené na zachycování dešťové vody jak pro údržbu venkovní zeleně, tak pro splachování domácností a další účely, kdy zachycená srážková voda může nahradit pitnou vodu. To má ale za následek další snižování spotřeby vody z vodovodních sítí a růst stáří dodávané pitné vody. [12]

1.1.3 Dopady snižování odběrů z vodovodních sítí

Jakost vody určené k zásobování obyvatel ČR pitnou vodou je stanovena vyhláškou č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozhas kontroly pitné vody. Vyhláška mimo jiné uvádí, že pitná voda by měla mít pro spotřebitele přijatelný vzhled, pach a chuť. Jmenovitě ale nestanovuje maximální stáří pitné vody. [13]

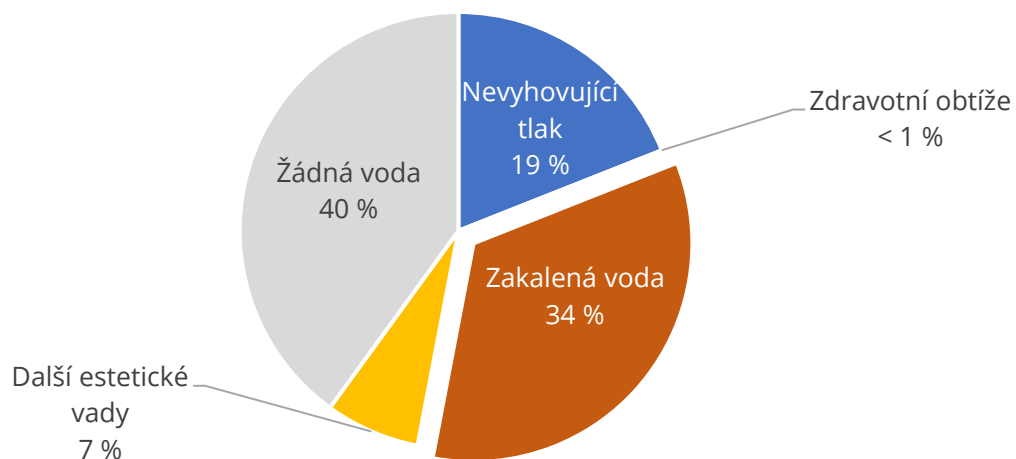
Stáří vody je přitom jedním z faktorů, které přímo ovlivňují jakost dodávané pitné vody a může výrazně ovlivnit právě její vzhled, pach a chuť. S rostoucím stářím vody se také snižuje potřebná koncentrace dezinfekčního činidla a voda může být více ohrožena kontaminací množením mikroorganismů. S rostoucím stářím vody vodovodu je navíc do sítě nutné dávkovat více dezinfekčního činidla, které může mít negativní vliv na chuť a pach vody v určitých oblastech sítě. [14]

Jak již uvádí tato práce, specifická spotřeba vody na obyvatele se v průběhu času mění v závislosti na více faktorech. Celková porevoluční změna filozofie ve vodárenství způsobila změnu předpokládaného trendu rostoucí spotřeby vody, kterou předrevoluční

normy, vodárenské společnosti a projekční kanceláře nepředpokládaly. Dnešní sítě jsou tedy předdimenzované a vyskytují se v nich úseky s nízkou rychlostí proudění, která zvyšuje stáří vody sítí a ovlivňuje jakost dodávané pitné vody. [14]

Předdimenzované potrubí a nízké rychlosti proudění navíc podporuje hromadění a usazování jemných nebezpečných materiálů na stěnách potrubí. Navzdory stále sofistikovanějším procesům úpravy zůstává v upravené vodě malé množství částic. Zdrojem znečištění může být zdroj surové vody nebo samotné procesy úpravy vody, při kterých látka může vniknout do systému. Může se jednat například o částice aktivního uhlí nebo zbytky koagulačních hydrolyzujících činidel na bázi hliníku. Částice mohou vznikat i během distribuce v důsledku srážení a flokulačních procesů, separace v potrubí vytvořených biofilmů a korozních jevů stárnoucích potrubí. [15]

Resuspendace tohoto jemného nebezpečného materiálu, který se v potrubí hromadí v důsledku nízkých rychlostí během provozu vodovodu, způsobuje tzv. zákalovou událost, která vede k legislativně nevyhovující zakalené vodě v síti. K zákalové události po významné a neobvyklé hydraulické změně ve vodovodním řadu, která je způsobena změnou přirozených průtoků v daném úseku vodovodní sítě. Nepřirozené objemové průtoky mohou být způsobeny např. poruchami potrubí, požárními odběry, sezónními plněním bazénů a jinými nepravidelnými jevy. [16]



Obr. 1: Typické rozdělení stížností zákazníků vodárenských společností [16]

1.1.4 Vliv stáří vody na celkovou jakost

Stáří vody je hlavním indikátorem vedoucím ke zhoršování jakosti ve vodovodních systémech. To je způsobeno zejména interakcí vody se stěnou potrubí a reakcemi, které probíhají v distribuované pitné vodě. Jak voda proudí vodovodním systémem, prochází různými chemickými, fyzikálními a senzorickými změnami. Jak už bylo uvedeno, stáří vody závisí na spotřebě vody a dimenzích systému. S rostoucí spotřebou vody se zkracuje doba, po kterou je voda distribuční soustavě dopravována a exponována. Jevy připisované stáří vody ve vodovodním systému:

- Chemické
 - tvorba vedlejších produktů dezinfekce
 - dezinfekční rozpad
 - vliv koroze potrubí
- Biologické
 - nitrifikace
 - dezinfekce vedlejších produktů biodegradace
 - množení mikroorganismů
- Fyzikální
 - zvyšování teploty
 - usazování jemného neuzpevněného sedimentu
 - zákal

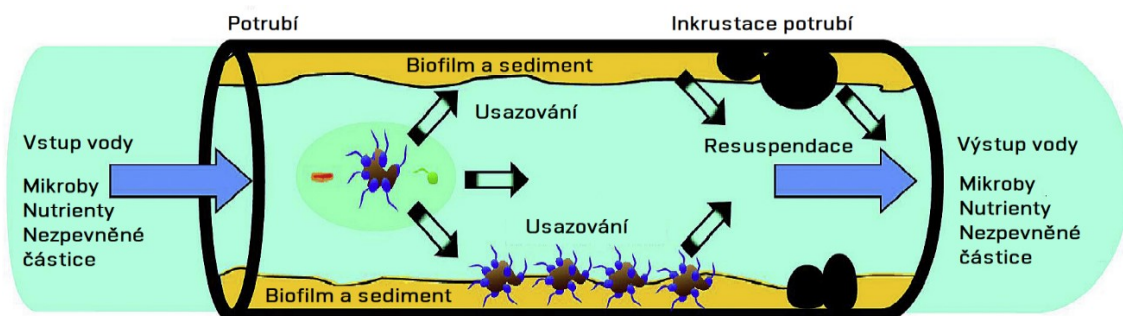
[17]

Tvorba vedlejších produktů dezinfekce

Dezinfekční prostředky mohou reagovat s přirozeně se vyskytujícími látkami v pitné vodě za vzniku organických a vedlejších produktů dezinfekce. Potenciální vznik vedlejších produktů závisí na několika chemických a fyzikálních vlastnostech, včetně typu organických látek, typu anorganických parametrů, pH, teploty, úrovně zbytkové dezinfekce a celkové hodnoty stáří vody. Jak voda stárne, může se zvyšovat produkce dezinfekčních vedlejších produktů. V letních měsících mohou vyšší teploty vést k vyšší produkci těchto produktů. Vyšší teplota vody také často vyžaduje větší dezinfekční dávku potřebnou k zabezpečení upravené vody, což zase vede k vyššímu množství potenciálních vedlejších produktů. [17]

Nitrifikace a množení mikroorganismů

Nitrifikace je mikrobiální proces, při němž se snižuje obsah dusíku (především amoniaku), který následně oxiduje na dusitany a dusičnany. Nitrifikující bakterie jsou pomalu rostoucí mikroorganismy. Problémy s nitrifikací se obvykle vyskytují v předdimenzovaných úsecích potrubí s nízkými průtoky. Existuje řada faktorů, které ovlivňují mikrobiální růst, ale většina z nich je přímo spojena se zvýšeným stářím vody a s tím související teplotou vody a následnou tvorbou biofilmů. [17]

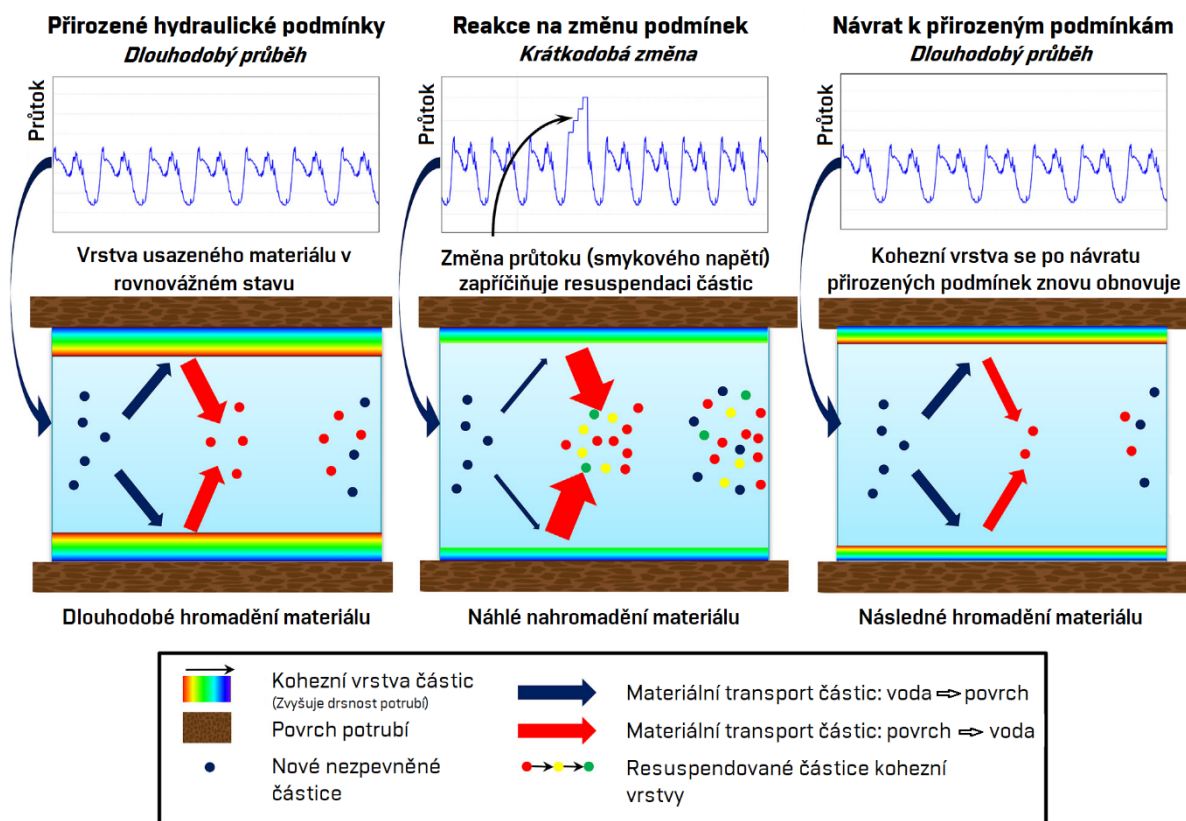


Obr. 2: Hromadění jemného neuzpevněného materiálu v potrubí [15], [19]

Usazování sedimentu, tvorba biofilmu a zákal

Jemný nezpevněný materiál se po svém vniku do vodovodu přizpůsobí hydraulickým podmínkám v síti, za kterých se buď usazuje, nebo resuspenduje. Za stabilních podmínek v síti má nízký průtok neustále za následek sedimentaci jemného nezpevněného sedimentu. Když se tyto průtoky náhle změní, změnou smykového napětí se sedimentovaný materiál resuspenduje a dochází k zákalové události, zbarvení vody a legislativně nevyhovující jakosti. [18]

Sedimentační pokusy rozvířeného nezpevněného sedimentu získaného řízeným proplachem vodovodní sítě pak dokazují, že následná opětovná sedimentace jemného materiálu může trvat i několik dní, po nichž (bez zásahu správce sítě a bez provedení proplachu zasaženého úseku potrubí) mohou odběratelé pitné vody spotřebovávat legislativně nevyhovující pitnou vodu. [19]



Obr. 3: Vlastnosti jemných nezpevněných částic [18], [19]

1.2 CÍL PRÁCE

V rámci diplomové práce byla provedena hydraulická analýza vodovodní sítě vybraného vodovodu, přičemž pozornost byla věnována modelování ukazatelů jakosti dopravované pitné vody se zaměřením na stáří vody. Diplomová práce obsahuje část teoretickou i praktickou. Bylo provedeno měření hydraulických veličin na vodovodní síti, které byly následně použity pro kalibraci simulačního modelu vodovodu. Model vodovodní sítě je zpracován v simulačním softwarovém nástroji na bázi EPANET.

2 MODELOVÁNÍ JAKOSTI VE VODOVODNÍ SÍTI

Problematice modelování jakosti vody ve vodovodních sítích byla v posledních letech věnována značná pozornost. Důvodem je především dostupnost softwarových nástrojů, celkový rozvoj výpočetní techniky a zmíněný důraz na řešení problémů souvisejících s jakostí vody v sítích. Základním cílem a motivací vodárenských společností k vývoji hydraulických modelů a modelů jakosti je vytvoření rozhodovacího aparátu pro efektivní využití finančních prostředků k optimalizaci vodovodu. [20]

2.1 MODELOVÁNÍ UKAZATELŮ JAKOSTI VODY

Kombinace výkonné výpočetní techniky a aplikace numerické matematiky umožňuje řešit úlohy transportu a interakce rozpuštěných i nerozpuštěných látek. Výpočetní modely lze použít k modelování jakosti povrchových vodních zdrojů, ale také vody ve vodovodním potrubí. [20]

2.1.1 Základní názvosloví

Použitá terminologie vychází z Českých státních a oborových norem.

- **Advekce (konvence)** – pohyb látky ve směru proudění, rychlost částic je stejná jako rychlost proudící vody.
- **Aproximace** – zjednodušený popis skutečného procesu. Umožňuje náhled přibližného řešení.
- **Difuze molekulární** – Je charakterizovaná součinitelem molekulární difuze. Vlivem gradientu koncentrace dochází k pohybu rozpuštěných látek z míst s vyšší koncentrací do míst s koncentrací nižší.
- **Disperze (turbulentní difuze)** – fluktuace částic, které se pohybují různými směry a rychlostmi. Zahrnuje vliv hydrodynamické disperze a molekulární difuze. Je charakterizována součinitelem disperze.
- **Diskretizace časová** – určení časového kroku, na kterém je hledáno řešení úlohy.
- **Diskretizace prostorová** – určení prostorového kroku (počtu uzlů), na kterém je úloha řešena.
- **Disperze hydrodynamická** – příčný a podélný rozptyl rozpuštěné látky při proudění. Jednotlivé částice nesledují pouze proudnici, ale důsledkem pulzací rychlosti a koncentrace látky dochází k pozvolnému šíření látky všemi směry.
- **Doba zdržení** – doba, po kterou se kapalina zdrží v systému. V souvislosti s vodovodním potrubím se označuje jako stáří vody.
- **Jakost vody** – charakteristika složení a vlastností vody vyjádřená fyzikálními, chemickými a biologickými ukazateli.
- **Koncentrace** – podíl množství sledované dané látky v soustavě. Podle způsobu vyjádření rozlišujeme koncentraci hmotnostní, objemovou a molární.
- **Model matematický** – popis určitého výseku vnějšího světa matematickými prostředky.
- **Model numerický** – číselné vyjádření matematického modelu. Vzniká dosažením numerických hodnot do výpočtového modelu.

- **Transport látky** – přenos látky ve vodě advekcí a disperzí.
- **Úloha stacionární** – úloha, která má okrajové podmínky a stavové veličiny nezávislé na čase.
- **Úloha nestacionární** – úloha, která má okrajové podmínky i hledané stavové veličiny závislé na čase.
- **Vnos (aplikace)** – vniknutí dané látky do systému. Je charakterizován místem, časem zahájení a ukončení, délkou trvání a vlastnostmi vnesené látky.
- **Zdroj znečištění** – zdroj, z kterého do systému vstupují znečišťující složky. Dělíme ho na zdroj bodový a nebodový (plošný).

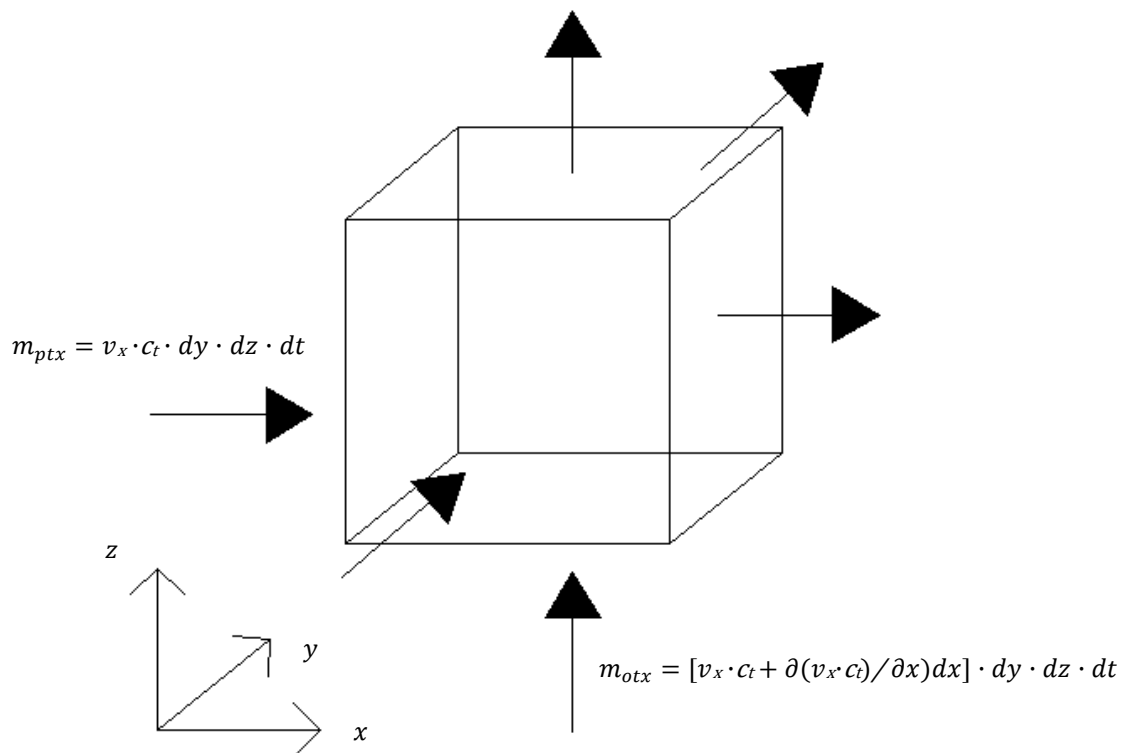
[20]

2.1.2 Matematický popis procesů ovlivňujících jakost vody

Časoprostorové šíření sledované látky se dá matematicky popsat pomocí zákona zachování hmotnosti. Rovnici vyjadřující zákon zachování hmotnosti lze odvodit dle průchodu sledované látky kontrolním objemem kapaliny. [20]

Advekce

Advekce je jev, který způsobuje, že se látka pohybuje ve směru toku proudění. Rychlost částic je stejná jako rychlost vody. Změna hmotnosti vstupující a vystupující látky ve směru x za jednotku času může být vyjádřena jako jejich rozdíl. [20]



Obr. 4: Schéma kontrolního objemu pro odvození advektivního členu [20]

$$m_{ptx} = v_x \cdot c_t \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (2.1)$$

$$m_{otx} = v_x \cdot c_t \cdot dy \cdot dz \cdot dt + \frac{\partial (v_x \cdot c_t \cdot dy \cdot dz \cdot dt)}{\partial x} \cdot dx \quad (2.2)$$

$$m_{ptx} - m_{otx} = -\frac{\partial (v_x \cdot c_t)}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (2.3)$$

kde:

m_{ptx} = hmotnosti přitékající látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]

m_{otx} = hmotnost odtékající látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]

c_t = okamžitá hodnota koncentrace sledované látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v_x = vektor rychlosti vody

[20]

Analogicky je možné vyjádřit všechny změny objemu ve všech směrech. V jednotkovém čase se hmotnost sledované látky mění o:

$$\Delta m_t = -\frac{\partial (v_x \cdot c_t)}{\partial x} - \frac{\partial (v_y \cdot c_t)}{\partial y} - \frac{\partial (v_z \cdot c_t)}{\partial z} \quad (2.4)$$

kde:

Δm_t = změna hmotnosti sledované látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]

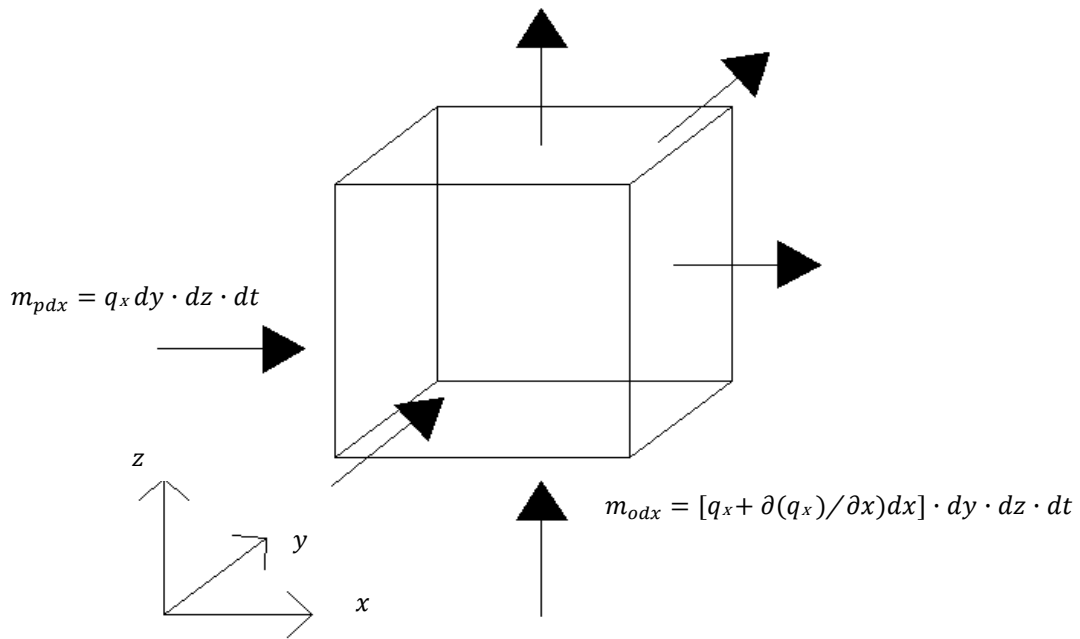
c_t = okamžitá hodnota koncentrace sledované látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v_i = vektor rychlosti vody

[20]

Disperze látek ve vodním prostředí

Spolu s advekcí tvoří disperze základní mechanismus pohybu částic ve vodním prostředí. Směšování, víření a turbulence má za následek snížení hodnot maximální koncentrace rozpuštěné látky, která se v důsledku nerovnoměrného rozložení rychlosti proudění a rozdílu v koncentraci rozpuštěné látky šíří disperzí, tedy k fluktuaci částic, které se pohybují různými směry a různými rychlostmi. [20]



Obr. 5: Schéma kontrolního objemu pro odvození difuzního členu [20]

$$\Delta m_h = -\frac{\partial(v_{px} \cdot c)}{\partial x} - \frac{\partial(v_{py} \cdot c)}{\partial y} - \frac{\partial(v_{pz} \cdot c)}{\partial z} - \frac{\partial(\overline{v'_x \cdot c'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{v'_y \cdot c'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{v'_z \cdot c'})}{\partial z} \quad (2.5)$$

kde:

Δm_h = změna hmotnosti sledované látky z důvodu disperze [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]

c = okamžitá hodnota koncentrace sledované látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v_i = vektor rychlosti vody

$\overline{v'_x \cdot c'}$ = časová střední hodnota součinu pulzace rychlosti a koncentrace [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

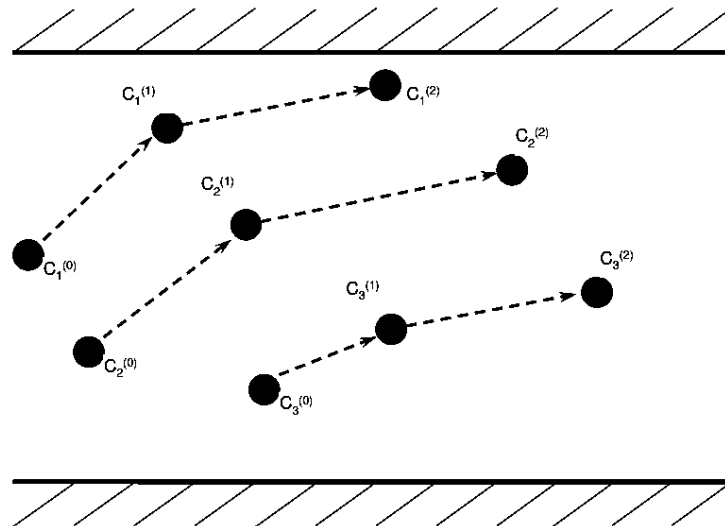
[20]

2.1.3 Lagrangeovy souřadnice

Pro sledování přetváření kontinua lze použít různé systémy rovnic, které zahrnují Langrangeovy a Eulerovy souřadnice. V případě modelování jakosti je však třeba sledovat pohyb každé částice jako funkci času ve výpočtovém modelu, proto je vhodné použít Langrangeovy souřadnice. V Lagrangeově souřadnicovém systému je známá poloha částice v čase t založena na její počáteční poloze v čase t_0 . V Lagrangeově souřadnicovém systému jsou nezávislými proměnnými:

- Známé souřadnice částic v čase t_0 , které slouží jako identifikátor částice
- Čas t

[21]



Obr. 6: Lagrangeovy souřadnice [21]

2.2 MODELOVÁNÍ JAKOSTI VODY VE VODOVODNÍM SYSTÉMU

Matematické modely simulující hydraulické ukazatele ve vodovodních sítích byly poprvé použity počátkem 90. let. Tyto hydraulické modely byly postupně vylepšovány a rozšiřovány o další možnosti simulace, které zahrnují simulace jakostních ukazatelů. Kromě základních hydraulických rovnic (např. Chezy-Maning, Darcy-Weisbach) používaných k určení hydraulickým parametrům používá model jakosti matematické rovnice, které jsou založeny na principech zákona zachování hmotnosti. Tyto matematické modely jsou pak schopny simulovat vlastnosti transportu látek ve vodovodním systému za těchto předpokladů:

- **Advektivní transport hmoty v potrubí** – rozpuštěná látka se v potrubí pohybuje stejnou rychlostí jako kapalina, přičemž může docházet k jejímu růstu nebo rozpadu. Tyto změny lze modelovat za předpokladu, že známe koeficient rozpadu/růstu simulované látky v objemovém průtoku.
- **Reakce se stěnami potrubí** – pitná voda je při její dopravě ve stálém kontaktu se stěnou potrubí. Reakce vyvolané tímto kontaktem lze modelovat za předpokladu, že známe koeficient rozpadu/růstu sledované látky u stěny potrubí.
- **Okamžité mísení vody v trubních armaturách** – pro následující matematické vztahy simulující jakost vody se předpokládá, že ve výpočtových uzlech, kde dochází k mísení ze dvou nebo více zdrojů (kromě uzlů označených jako akumulární nádrže), je mísení vždy úplné a okamžité. Koncentrace látky po smísení je tedy pouze koncentrací podle směšovacích rovnic.
- **Zanedbání podélné disperze v síti** – podélná disperze sice není důležitým transportním mechanismem v turbulentním proudění, které je v sítích za běžných provozních podmínkách obvyklé, ale za určitých podmínek k ní může dojít.

[22]

2.2.1 Matematický popis procesů modelování jakosti vody ve vodovodních distribučních systémech

Modelování jakosti vody v rámci distribuční soustavy musí splňovat podmínky stanovené zákonem o zachování hmotnosti. V tomto případě jde o určení množství konkrétní láky (vody), která se pohybuje systémem od místa vstupu do systému (zdroje vody) až ke konečnému zákazníkovi. Tento systém je založen na třech podmínkách:

1. Zachování hmotnosti v diferenciálních délkách potrubí
2. Kompletní a okamžité mísení vody ve výpočtových uzlech
3. Zvolení odpovídající hodnoty změny hmotnosti sledované látky

Za těchto podmínek pak lze změnu koncentrace látky vyjádřit pomocí následující diferenciální rovnice:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -v_i \frac{\partial c_i}{\partial x} + \Delta m_t(c_i) \quad (2.6)$$

kde:

c_i = okamžitá hodnota koncentrace sledované látky v čase t [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

v_i = vektor rychlosti vody [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Δm_t = změna hmotnosti sledované látky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]

[22]

Tato rovnice nám ukazuje, že rychlost, jakou se mění hmotnost sledované látky v určitém úseku potrubí, se rovná rozdílu hmotnostního průtoku vstupujícího a vystupujícího z úseku, ke kterému je přičtená/odečtená změna hmotnosti sledované látky. Podle uvedeného vývojového diagramu předpokládáme, že hodnoty průtoků jsou známy z hydraulického modelu sítě. Abychom tuto rovnici vyřešili, potřebujeme znát koncentraci látky C_j v bodě $x = 0$ pro všechny časy t (okrajová podmínka) a hodnotu okamžité koncentrace sledované látky c_i . [22]

V uzlech výpočtového modelu, které přijímají hmotnostní průtok ze dvou nebo více úseků se mísení kapaliny považuje za úplné a okamžité. Koncentrace látky ve vodě, vystupující ze směšovacího uzlu, je tedy prostým součtem koncentrací ze vstupujících úseků. [22]

Pro konkrétní výpočtový uzel k lze tedy napsat:

$$c_{j|x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j c_{j|x=L_j} + Q_{k,ext} c_{k,ext}}{\sum_{j \in I_k} Q_j + Q_{k,ext}} \quad (2.7)$$

kde:

j = úsek potrubí vystupující ze směšovacího uzlu k

I_k = sada úseků vstupujících do směšovacího uzlu k

L_j = délka úseku j [m]

Q_j	=	objemový průtok úseku j [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	
$Q_{k,ext}$	=	objemový průtok vstupující z externího zdroje [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	
$c_{k,ext}$	=	okamžitá hodnota koncentrace sledované látky v externím zdroji [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	
$c_{j x=0}$	=	okamžitá hodnota koncentrace látky na vstupu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	
$c_{j x=L}$	=	okamžitá hodnota koncentrace látky na výstupu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	
			[22]

Směšování kapalin z různých zdrojů v akumulacích nádrží je definováno jako:

$$\frac{dV_s}{dt} = \sum_k Q_{ks} - \sum_i Q_{sj} \quad (2.8)$$

$$\frac{d(V_s \cdot c_s)}{dt} = \sum_k Q_{ks} \cdot c_{ks} |_{x=L} - \sum_i Q_{sj} \cdot c_s + k_{ij}(c_s) \quad (2.9)$$

kde:

c_s	=	okamžitá hodnota koncentrace látky v nádrži s [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
dt	=	změna v čase [s]
Q_{ks}	=	objemový průtok vstupující do nádrže [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
Q_{sj}	=	objemový průtok vystupující z nádrže [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
dV_s	=	změna akumulacího objemu v nádrži [m^3]
V_s	=	akumulací objem v nádrži [m^3]
c_{ks}	=	okamžitá hodnota koncentrace látky na výstupu z nádrže [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
k_{ij}	=	koeficient rozpadu mezi uzly i a j [s^{-1}]

[22]

Tyto rovnice teoreticky popisují základní matematické principy modelování jakosti vody ve vodovodní síti. Jejich aplikace tvoří softwarové nástroje, které umožňují modelování pro širokou odbornou veřejnost bez nutné znalosti těchto vztahů.

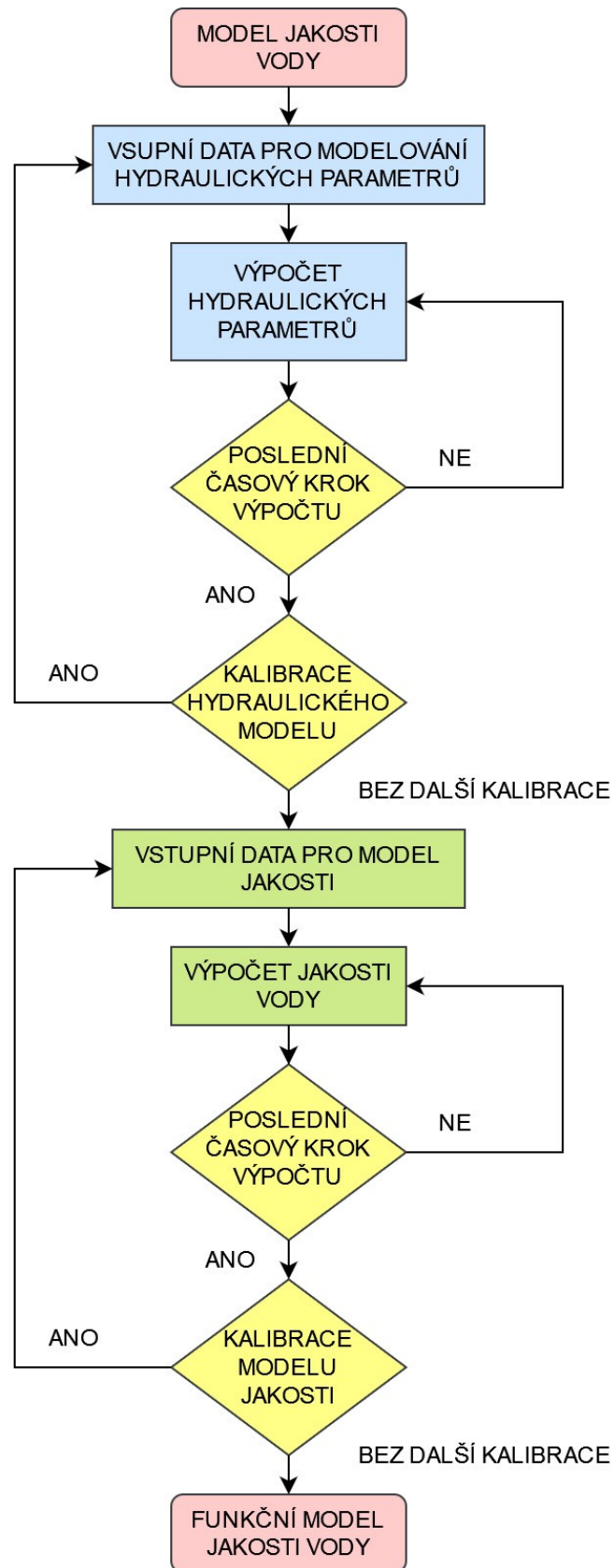
2.2.2 Možnosti modelování jakosti ve vodovodní síti

Modely simulující jakostní ukazatele vody využívají výstupy hydraulických modelů, které doplňují o možnost modelovat advektivní šíření ve vodovodním systému. Mezi tyto možnosti v praxi patří:

- Sledování využití jednotlivých zdrojů u sítí s více zdroji vody
- Simulace stáří vody (doby zdržení v systému)
- Simulace koncentrací a šíření nereaktivních látek
- Simulace koncentrací a šíření reaktivních látek

Kalibrací modelu porovnáním výsledků matematického modelu se skutečnými hodnotami získanými měřeními na síti a provedením kalibračních zásahů lze dosáhnout kvalitní aproximace skutečných stavů v celém systému.

2.2.3 Vývojový diagram simulace jakosti vody ve vodovodní síti



Obr. 7: Vývojový diagram simulace jakosti vody ve vodovodní síti [27]

2.3 SOFTWAREVÉ NÁSTROJE PRO SIMULACI UKAZATELŮ JAKOSTI VODY

Vodárenské sítě se v průběhu jejich provozu neustále přizpůsobují podmínkám, kterým jsou vystaveny. Bez ohledu na to, zda se jedná o hromadění jemného nebezpečného materiálu, nebo vznik vedlejších produktů dezinfekce, musí vodovod plnit všechny své zásobovací funkce, pro které byl určen. Riziko ohrožení jakosti pitné vody lze minimalizovat zajištěním dostatečného objemového průtoku v potrubí, který omezuje dobu zdržení upravené vody v systému. S ohledem na neustále se měnící spotřebu vody by možnost modelovat praktické i teoretické scénáře umožnila ověřit všechny funkce vodovodu. Z těchto důvodů multioborový tým výzkumníků, inženýrů a programátorů aplikoval výše uvedené matematické vztahy a vznikl veřejně dostupný software EPANET, který je postupně vylepšován o různé možnosti modelování jakostních ukazatelů ve vodovodní síti. Poslední aktualizace programu proběhla 23. 7. 2020. [22], [23]

V současnosti existuje široká škála softwarových nástrojů pro modelování jakosti ve vodovodních systémech. Jen některé jsou volně přístupné a mají otevřený zdrojový kód (open source), většina je dostupná za poplatek. Každý software má svá specifika, výhody a nevýhody. Většina těchto programů je nicméně postavena na základě veřejně dostupného modelu EPANET, který rozšiřují o další funkce.

2.3.1 EPANET

Jedná se o klíčový open source softwarový nástroj s otevřeným zdrojovým kódem pro simulaci hydraulických a kvalitativních ukazatelů v tlakových vodovodních systémech. Kostrou výpočtového modelu je síť tvořená jednotlivě propojenými úseky (vodovodní potrubí) a uzly (armatury, akumulční nádrže, čerpadla, zdroje vody). Tyto uzly jsou ve vypočteném modelu identifikovány souřadnicemi XY, které lze zadat v běžně užívaném souřadnicovém systému pro konkrétní lokalitu. Program tak mimo jiné umožňuje propojení a plně využití všech možností GIS. Úseky modelu pak tvoří vazby mezi jednotlivými uzly v síti. Všechny uzly a úseky modelu musí obsahovat informace potřebné pro výpočet. Příkladem jsou nadmořské výšky uzlů, délky, jmenovité světlosti a uzlové odběry. Po této prostorové a časové diskreditaci model simuluje hydraulické ukazatele proudící vody v každém jednotlivém uzlu a úseku sítě. Po zadání dalších hodnot může EPANET simulovat ukazatele jakosti vody ve vodovodním systému, které zahrnují koncentraci látek a její trasování. Kromě toho umožňuje interní aplikaci výpočtových vztahů k simulaci stáří vody a sledování šíření vody z jednotlivých vodních zdrojů. [23]

EPANET je navržen jako nástroj pro lepší pochopení vnitřního fungování tlakových vodárenských systémů. V praxi může být využit pro mnoho aplikací. Podobné analýzy vodních systémů mohou například vést k volbě alternativních strategií řízení jakosti vody v celém systému, které zahrnují:

- Změna zdrojů vody simulací usměrnění proudění.
- Optimalizace provozních hladin akumulčních nádrží.
- Optimalizace čerpání do akumulčních nádrží.
- Řízené proplachy vodovodních sítí.

[22], [23]

EPANET funguje na běžně používaných operačních systémech a obsahuje přehledné uživatelské prostředí pro zadávání všech potřebných parametrů sítě. Program také obsahuje přehledné grafické zobrazení výsledků všech simulací, automatické vytváření grafů podle zadaných požadavků a vytváření datových tabulek. Program má také rozsáhlé možnosti exportu vypočítaných dat, která mohou být dále analyzována. [23]

Hydraulický model EPANET

Přesná diskreditace a verifikovaný hydraulický model je předpokladem kvalitního modelování jakosti vody. [20]

EPANET používá pro výpočet hydraulických ukazatelů v síti základní hydraulické rovnice. Hydraulický model simuluje hydrodynamické tlaky ve výpočtových uzlech, objemové průtoky a rychlosti proudění v úsecích ve vybraných časových krocích. Následným porovnáním vypočtených a reálně naměřených hodnot lze po kalibračních zásazích dosáhnout kvalitní aproximace skutečného stavu. [24]

Model jakosti vody EPANET

Model jakosti vody využívá výstupy hydraulické analýzy sítě, matematickou aplikaci zákona o zachování hmotnosti, aplikaci Langrangeových souřadnic a zadaných vlastností simulované látky pro modelování jakostních ukazatelů v síti. Jednodimenzionální model jakosti během simulace sleduje změny koncentrací simulované látky v síti v čase a prostoru. V závislosti na zvoleném časovém kroku pak simulace vyvolá reakce vedoucí ke změně koncentrací sledované látky. Do výpočtové paměti programu se pak запиše minimální, průměrná, nebo maximální okamžitá koncentrace simulované látky pro všechny uzly a úseky v síti. [25]

Simulovaná látka se v potrubí pohybuje stejnou rychlostí a směrem jako nosná proudící voda. Zároveň se v látce dochází k simulaci reakcí, které způsobují růst, nebo ztrátu jejich koncentrací. Vzhledem k tomu, že prostorová disperze látky není za běžných podmínek ve vodovodní síti relevantní, program zanedbává prostorové šíření látky a zabývá se pouze jejím advektivním přenosem. Ten je v modelu řešen aplikací rovnice 2.6., která určuje okamžitou hodnotu koncentrace sledované látky v prostoru a čase. [26]

V uzlech sítě přijímajících objemový průtok ze dvou nebo více úseků se mísení kapaliny považuje za úplné a okamžité. Okamžitá hodnota koncentrace sledované látky v proudící vodě se modeluje jako vážený průměr koncentrací látek vstupujících do objemů v následující části sítě a je definována rovnicí 2.7. [26]

Mezní podmínky pro jednotlivé úseky potrubí jsou spojeny s koncentracemi v hraničních uzlech těchto úseků. Rovnice 2.6 a 2.7 tak tvoří spojenou množinu diferenciálních a algebraických rovnic ve všech výpočtových bodech sítě. Tyto rovnice jsou v rámci programu EPANET řešeny metodou diskrétních objemů. [22]

Výpočet jakosti nesmí v žádném výpočtovém úseku vést k situaci, kdy by vypočtený hmotnostní průtok překročil fyzický objem potrubí v daném úseku. Proto časový krok dt_{wq} nemůže být větší než nejkratší doba průtoku ze všech úseků v síti.

$$dt_{wq} = \text{Min} \left(\frac{V_{ij}}{Q_{ij}} \right) \text{ pro všechny úseky } i, j \quad (2.10)$$

kde:

dt_{wq} = časový krok výpočtu jakosti [s]

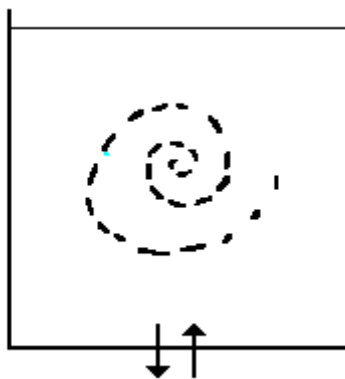
V_{ij} = objem v potrubí v úseku mezi uzly i, j [m^3]

Q_{ji} = objemový průtok v potrubí v úseku mezi uzly i, j [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

[22]

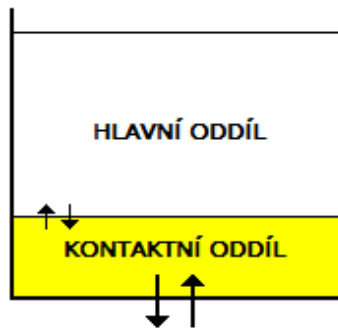
Kdykoliv během simulace dojde k obrácenému směru proudění, model výpočtu jakosti se této změně přizpůsobí. Není tak závislý na směru proudění v určitém čase, ale přizpůsobuje se aktuálním hydraulickým podmínkám. [25]

V uzlech sítě, které jsou v programu definovány jako akumulční nádrže nabízí EPANET různé možnosti simulace mísení kapalin. První a často používanou možností je kompletní míchání. Mnoho vodojemů totiž v praxi funguje za provozních podmínek, kdy dochází k dostatečnému promíchání v důsledku smykového napětí vody. Kompletní mísení je v programu řešeno použitím rovnice 2.8. [26]



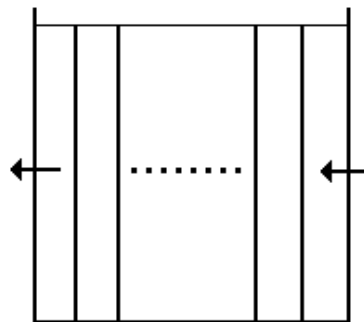
Obr. 8: Znárodnění předpokladu kompletního mísení ve vodojemu [25]

Další možností je tzn. dvou oddílový model míchání. Ten rozděluje akumulční objem na dva oddíly, v nichž dochází k úplnému promíchání kapaliny jednotlivě. Voda vstupující do vodojemu se smíchá pouze s vodou v prvním kontaktním oddílu. Po splnění stanovených kritérií se voda z kontaktního oddílu mísí s vodou v oddílu hlavním. Naopak voda z vodojemu vystupující uplatňuje tento postup v opačném pořadí. Dvou oddílový model je v programu řešen rozšířením rovnice 2.8. [25]



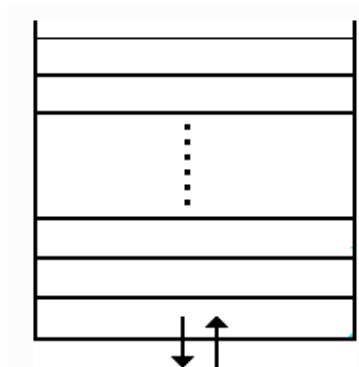
Obr. 9: Znáznornění předpokladu dvou oddílového mísení ve vodojemu [25]

Model FIFO (first-in first-out) pro změnu předpokládá, že během doby zdržení vody v nádrži nedochází k žádnému mísení distribuované vody. Voda vstupuje do nádrže v jednotlivých oddílech, které mají na vstupu a výstupu stejné parametry. Tato metoda je vhodná hlavně pro členité vodojemy. [25]



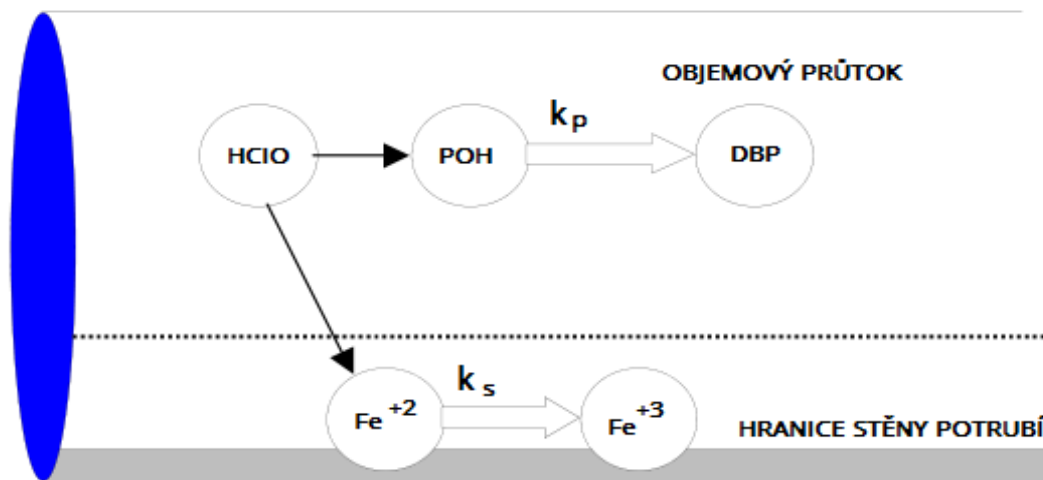
Obr. 10: Znáznornění modelu mísení Plug Flow – FIFO [25]

Podobně se na otázku mísení vody v akumulacích nádržích dívá model mísení LIFO (last-in first-out), který také nepočítá s mísením vody. Na rozdíl od předchozího modelu jsou však oddíly rozděleny do jednotlivých úrovní, ve kterých do vodojemu vstupují v pořadí a vystupují v pořadí opačném. Tato metoda může například dobře simulovat chování vody v podlouhlých trubních vodojemech za spotřebištěm. [25]



Obr. 11: Znáznornění modelu mísení Plug Flow – LIFO [25]

EPANET může simulovat růst nebo ztrátu koncentrací látek proudících vodovodním systémem. Model jakosti nabízí možnost zohlednit rozdílný růst koncentrace v růstných částech potrubí. Rychlost změny koncentrace látky se může v různých částech potrubí lišit. Příklad znázorněný na obrátku níže ukazuje prostorové rozdělení potrubí a reakci volného chloru (HClO) s přírodní organickou hmotou (POH), která vytváří vedlejší produkt dezinfekce (DBP). Naopak v prostoru u stěny potrubí v příkladu může kontakt volného chloru se stěnou potrubí způsobit oxidaci železa a uvolnění jemného neuzpevněného materiálu. Model jakosti EPANET to zohledňuje oddělenou možností diskreditace těchto jevů. [25]



Obr. 12: Reakční zóny v potrubí [25]

Model jakosti zohledňuje reakce vyskytující se v objemovém průtoku podle kinetiky n -tého řádu, u které předpokládá, že okamžitá rychlost změny hmotnosti R je závislá podle následující rovnice:

$$R = k_p \cdot C^n \quad (2.11)$$

kde:

R = rychlost změny hmotnosti sledované látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]

k_p = koeficient rozpadu sledované látky [s^{-1}]

C^n = okamžitá hodnota koncentrace sledované látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

[25]

Pro koeficient rozkladu sledované látky k_p je koncentrační jednotka umocněna mocninou n -tého řádu dělenou časem. To urychluje rozpad/růst simulované látky v závislosti na celkové velikosti reakce. [25]

Změna koncentrace, ke níž dochází v blízkosti stěn potrubí závisí na okamžité hodnotě koncentrace sledované látky vyjádřené jako:

$$R = \left(\frac{A}{V}\right) k_s \cdot c^n \quad (2.12)$$

kde:

- R = rychlost změny hmotnosti sledované látky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]
 A = rekční plocha [m^2]
 V = objem vody v potrubí [m^3]
 k_s = koeficient rozpadu sledované látky u stěny potrubí [s^{-1}]
 c^n = okamžitá hodnota koncentrace sledované látky [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]

[25]

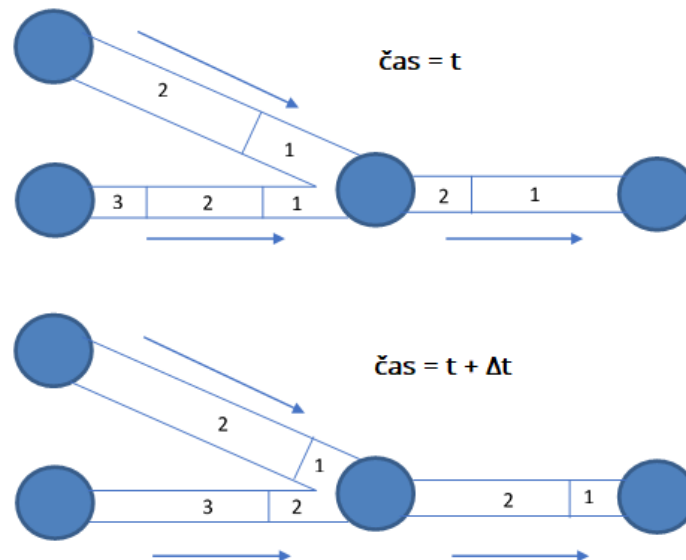
Koeficient rozpadu sledované látky u stěn potrubí k_s by měl zohlednit veškerá omezení, která brání přenosu hmotnosti mezi stěnou potrubí a objemovým průtokem. Model jakosti EPANET pracuje s vstupní hodnotou molekulární difuzivity a zohledňuje typ proudění dle Reynoldse. Koeficient může rovněž záviset na materiálu a stáří potrubí, nebo teplotě vody. Drsnost kovových potrubí se zvyšuje se zvyšujícím se stářím v důsledku inkrustací. Závislost mezi materiálem, stářím a drsností potrubí ovlivňuje reaktivitu stěny potrubí s některými chemickými látkami, zejména chlorem a dezinfekčními činidly. [25]

Jak bylo uvedeno, model jakosti vody EPANET používá Lagrangeův přístup ke sledování prostorové a časové polohy modelované látky. Velikost jednotlivých segmentů se liší v závislosti na zvoleném časovém kroku, který je obvykle mnohem kratší než hydraulický časový krok. Celkový objem každého segmentu modelu jakosti se tedy nemění, ale dělí se další segmenty, které neustále mění svou polohu v závislosti na směru proudění. V každém takovém časovém kroku se však odehrávají následující kroky:

1. Jakost vody je v každém segmentu simulována tak, aby se zohlednila jakákoliv reakce, která se mohla v časovém kroku objevit.
2. Pro každý výpočtový uzel v topologickém pořadí (dle směru proudění) platí:
 - Pokud se jedná o akumulární nádrž, voda z předních segmentů vstupuje do výpočtového uzlu a provádí se výpočet jakosti dle zvolené metodiky.
 - Pokud se jedná o směšovací uzel, jeho jakost je vypočtena dle uvedených směšovacích rovnic.
 - Hodnota okamžité koncentrace sledované látky se mění v závislosti na koncentraci vstupů.
 - Objemy nových segmentů se rovnají součinu objemového průtoku úseku a časového kroku. Pro snížení celkového počtu segmentů ve výpočtu se nové segmenty vytvářejí pouze v případě, že nově vypočtená jakost není v předem určené toleranci. Pokud je jakost ve specifikované toleranci, stávající a nové segmenty se spojí.

[26]

Tyto procesy se opakují pro každý časový krok výpočtu jakosti vody. Na začátku dalšího hydraulického časového kroku má každá část potrubí, ve které dochází k změně směru proudění opačné pořadí svých segmentů. Po změně směru proudění jsou všechny uzly v modelu nově topologicky seřazeny. Topologické třídění uzlů umožňuje modelu dobře sledovat advektivní transport sledované látky i v situacích, kdy dochází k častým změnám směru proudění. Při spuštění výpočtu modelu jakosti je každý úsek sítě tvořen pouze jedním segmentem. [26]



Obr. 13: Zobrazení Lagrangeovy metody řešení [26]

Kromě transportu částic může EPANET modelovat stáří vody v celém vodovodním systému. Stáří vody je doba zdržení vody v systému. Předpokládá se, že nově upravená voda vstupuje do sítě v nulovém stáří. Stáří vody poskytuje jednoduché, nespecifické měřítko celkové jakosti dodávané pitné vody. Při modelování stáří vody používá EPANET vztahy navržené tak, aby simulovaly advektivní šíření látky ve vodovodním potrubí, které aplikuje stejně, jako by se jednalo o šíření reaktivní látky, s tím rozdílem, že její růst se řídí kinetikou nultého řádu se změnou hmotnosti sledované látky rovnající se jedné. V důsledku toho je každou sekundou v systému voda o jednu sekundu starší. [25]

EPANET může také sledovat šíření vody z jednotlivých vodních zdrojů vodovodní sítě. Stejně jako u modelování stáří vody jde o interní použití výpočtových vztahů programu k určení prostorového rozložení vody v síti. Model během simulace sleduje šíření vody v síti ze stanovených zdrojových uzlů, které mohou v praxi zahrnovat jak povrchové, tak podzemní zdroje vody. Monitorování zdrojů je užitečným nástrojem pro analýzu distribučních systémů čerpajících vodu ze dvou nebo více různých zdrojů. Tato simulace může ukázat směry, kterými se voda z daného zdroje šíří sítí ve srovnání s jinými zdroji. [25]

2.3.2 QUALNET

Qualnet dokáže předpovědět prostorové a časové rozložení zbytků chloru ve vodovodní síti za pomalu se měnících nestabilních podmínek proudění. Na rozdíl od jiných dostupných modelů, které používají simulace podmínek ustáleného proudění, QUALNET používá plošný systém pro výpočet nestabilních podmínek průtoku a zabránění rozpadu chloru během těchto podmínek síti. Při spuštění modelu se nejprve analyzuje vodovodní síť, aby se zjistily počáteční podmínky rovnovážného stavu. Pomalu se měnící podmínky se pak vypočítají numerickým integrováním řídicích rovnic pomocí výchozího konečného rozdílu, což je schéma podléhající příslušným mezním podmínkám. Po výpočet koncentrace chloru v čase během průtoku potrubím se používá jednorozměrná disperzní rovnice, která předpokládá rychlost rozpadu prvního řádu. [22]

2.3.3 WaterGEMS

WaterGEMS je všestranný modelovací software vodovodních systémů. Jeho hlavní výhodou je široké uživatelské prostředí a uživatelská podpora, která je zajištěna poskytovatelem placené licence. K dalším výhodám patří především lepší možnost prezentace vypočtených dat bez nutnosti dalšího zpracování a přímá schopnost pracovat v GIS. WaterGEMS také umožňuje simulaci sítě v reálném čase při připojení k dispečerskému řízení SCADA. [27]

2.3.4 H2ONet Multi-Species eXtension (MSX)

Jedná se o kompletní softwarový nástroj pro modelování, analýzu a navrhování distribučních sítí. Výhodou programu je schopnost integrace s AutoCAD a GIS. Modelování jakosti je v H2ONet zastoupeno především zdokonaleným modelem simulujícím pohyb jemných neztvrdlých částic, které se kvůli gravitaci a dalším silám usazují na stěnách potrubí a po resuspendaci se šíří vodovodním systémem, což negativně ovlivňuje jakost dodávané vody. [28]

3 HYDRAULICKÝ SIMULAČNÍ MODEL SKUPINOVÉHO VODOVODU

Verifikovaný hydraulický model a přesná diskreditace je předpokladem pro kvalitní modelování jakosti vody. [20]

V rámci této práce byl sestaven hydraulický simulační model distribuční vodovodní sítě Skupinového vodovodu okresního města a přilehlých obcí v délce potrubí 302,1 km. Model zahrnuje všechna tlaková pásma a důležité objekty vodovodu, kterými jsou vodojemy, čerpací stanice, automatické tlakové stanice, redukční ventily a vodní zdroje. Model neobsahuje vodovodní přípojky ani vnitřní vodovody. Na základě měření tlaků a průtoků v síti byl model verifikován pro 24 časových kroků a reprezentuje chování vodovodní sítě během jednoho reprezentativního dne. Jedná se tedy o kvazi-stacionární model pro 24 hodinových kroků. Pro simulaci stáří vody byl tento reprezentativní den využit 14krát, což odpovídá 336 časovým krokům s délkou 1 hodina. S využitím tohoto modelu bylo mimo rozsah této práce následně provedeno technické posouzení vodovodní sítě, jehož cílem bylo nalezení možností optimalizovat provozní parametry vodovodní sítě a zvýšení jakosti dopravované pitné vody. V rámci této diplomové práce byly všechny použité údaje anonymizovány.

3.1 VSTUPNÍ PODKLADY A INFORMACE

Pro sestavení hydraulického modelu byly použity následující podklady a informace:

- **Topologie sítě pro hydraulický model** – digitální verze situace distribučních vodovodních řadů, mapa materiálů a profilů potrubí. Exportováno z GIS, který je ve správě provozovatele skupinového vodovodu.
- **Ruční mapy vodovodní sítě** – pro kontrolu správnost DN, materiálu a stáří potrubí byly použity ruční mapy sítě. Při nesouladu mapy a údajů v GIS byl preferován údaj z GIS.
- **Šoupátková mapa** – do topologie vodovodní sítě byly vyznačeny všechny uzávěry na síti, které jsou zavřené nebo v poruše.
- **Charakter zástavby** – každý úsek vodovodní sítě byl ohodnocen podle hustoty osídlení (odběry domácností).
- **Výškopis a polohopis spotřebiště** – byl dodán polohopis a výškopis spotřebiště. Údaje byly převzaty z GIS, který je ve správě provozovatele skupinového vodovodu.
- **Místní šetření** – v rámci místního šetření byly v doprovodu pracovníků provozu vodovodu podrobně prohlédnuty všechny důležité objekty na síti.
- **Údaje z dispečinku** – z dispečinku provozovatele byly exportovány záznamy měření důležitých veličin pro jednotlivé objekty. Jednalo se zejména o záznamy průtoků vody významnými objekty.
- **Měrná kampaň** – v období tří měsíců byla provedena plošná měrná kampaň, při které na 100 vybraných místech vodovodní sítě probíhalo měření tlaků hydrantovými tlakovými čidly SebaLog P3. Jednalo o podzemní hydranty. Toto měření bylo použito k verifikaci a kalibraci vytvořeného hydraulického modelu.

Skupinový vodovod tvoří 37 tlakových pásem. Zdrojem vody je místní vodárenská nádrž, z které je surová voda čerpána do místní úpravný vody a distribuována vodovodní sítí k odběratelům.

Tab. 2: Přehled tlakových pásem (TP) skupinového vodovodu

č. TP	Napájecí uzel (č. TP)	Kóta dna [m n. m.]	Kóta hladiny [m n. m.]	Celkový objem akumulace [m ³]
1	Vodárenská nádrž	331,87 ²⁾	332,06 ²⁾	---
2	2	330,00	332,00	500
3	3	400,00 ²⁾	442,00 ²⁾	---
4	4	356,00	362,47 ¹⁾	4 000
5	3	314,66	319,66 ¹⁾	4 000
6	3	---	292,98 ²⁾	---
7	3	---	299,04 ²⁾	---
8	3	---	265,83 ²⁾	---
9	9	263,90	268,87 ¹⁾	1 400
10	9	274,34 ²⁾	282,23 ²⁾	---
11	9	278,21 ²⁾	285,34 ²⁾	---
12	12	377,80	381,19 ¹⁾	2 000
13	12	402,60 ²⁾	406,00 ²⁾	---
14	15	424,17 ²⁾	440,31 ²⁾	---
15	15	397,20	401,95 ¹⁾	300
16	15	---	372,27 ²⁾	---
17	21	385,60 ²⁾	387,25 ²⁾	---
18	19	403,00 ²⁾	408,00 ²⁾	---
19	19	382,50	387,44 ¹⁾	100
20	21	392,53 ²⁾	397,12 ²⁾	---
21	21	368,10	373,17 ¹⁾	500
22	22	343,00	346,00 ¹⁾	500
23	22	369,21 ²⁾	376,04 ²⁾	---
24	12	---	374,27 ²⁾	---
25	12	---	359,72 ²⁾	---
26	26	327,50	332,67 ¹⁾	300
27	27	285,75	291,13 ¹⁾	500
28	27	---	271,59 ²⁾	---

č. TP	Napájecí uzel (č. TP)	Kóta dna [m n. m.]	Kóta hladiny [m n. m.]	Celkový objem akumulace [m ³]
29	26	---	354,03 ²⁾	---
30	9	334,70 ²⁾	351,70 ²⁾	---
31	31	332,70	335,53 ¹⁾	100
32	31	361,83 ²⁾	365,73 ²⁾	---
33	33	341,20	347,43 ¹⁾	150
34	33	370,50 ²⁾	375,50 ²⁾	---
35	33	---	298,20 ²⁾	---
36	36	255,35	261,30 ¹⁾	50
37	22	---	337,52 ²⁾	---

Pozn.: ¹⁾ Jedná se o kótu hladiny ve vodojemu zjištěnou na základě měrné kampaně, ²⁾ jedná se kótu polohy tlakové čáry (u ATS spínací/vypínací tlak, u ČS při nečerpání/čerpání a u RV jde o kótu tlakové čáry výstupního tlaku)

Situace skupinového vodovodu byla dle poskytnutých podkladů graficky zpracována v GIS a podrobně jí zobrazuje příloha č. 1

3.2 ANALÝZA SPOTŘEBY VODY SKUPINOVÉHO VODOVODU

V rámci analýzy spotřeby vody ve spotřebišti byly ze všech dostupných dat měření průtoků zpracovány průměrné hodinové průtoky v období jednoho kalendářního roku. Provozovatel skupinového vodovodu provádí rutinně měření průtoků na všech důležitých objektech distribuční sítě a veškerá měření jsou ukládána v centrálním dispečinku. Mezi tyto data patří údaje z průtokoměrů umístěných ve vodovodních šachtách, vodojemech, čerpacích stanicích a dalších. Tato naměřená data byla z databáze exportována v podobě hodinových průměrů a použita pro analýzu spotřeby vody v jednotlivých měřících okřscích vodovodní sítě. Výsledkem této analýzy je sada odběrových křivek pro každý stanovený měřící okrsek, které charakterizují časový průběh průměrné spotřeby vody v jednotlivých měřících okřscích v průběhu jednoho dne – 24hodinových kroků. Tyto charakteristické křivky byly vloženy do matematického modelu vodovodu. Zároveň byly pro každý měřící okrsek vyhodnoceny základní ukazatele nerovnoměrnosti odběru vody. Podrobné výsledky k jednotlivým měřícím okřskům a velkoodběratelům uvádějí následující kapitoly. Do spotřeby v jednotlivých měřících okřscích byla zahrnuta i spotřeba velkoodběratelů v příslušných měřících okřscích. Velkoodběratelé jsou dle množství jejich odběrů graficky zobrazení v Příloze č. 1.

Skupinový vodovod obsahuje celkově 71 průtokoměrů, které byly použity pro vyhodnocení spotřeby vody. Hodnoty tranzitních průtoků byly stanoveny vyhodnocením průtoků z měřících míst v předávacích místech na hranici analyzovaného skupinového vodovodu.

3.2.1 Spotřeba vody v měřících okresech

Tab. 3: Přehled spotřeby vody v jednotlivých MO – výsledky analýzy spotřeby vody

Číslo měřícího okrsku	Zahrnuje TP	Q_p [$l \cdot s^{-1}$]	Q_d [$m^3 \cdot den^{-1}$]	Q_h [$l \cdot s^{-1}$]	Den Q_d	Délka sítě [m]	Číslo křivky v modelu
1	1, 2	0,38 ¹⁾	---	---	---	3 879	1
2	5	0,25 ¹⁾	---	---	---	2 390	2
3	5	0,15	---	---	---	906	3
4	12	0,30	125,0	2,09	3.6.	1 583	4
5	13	0,77 ¹⁾	---	---	---	9 498	5
6	15,16	1,43	266,3	4,43	6.7.	12 280	6
7	14	0,16	54,6	0,83	2.9.	2 433	7
8	14	0,23	75,9	1,15	29.6.	5 537	8
9	12	1,00	354,9	4,21	15.6.	8 319	9
10	17	0,05	---	---	---	813	10
11	18	0,03	6,6	0,14	2.6.	283	11
12	19	0,31	42,8	0,76	9.6.	1 968	12
13	20	0,41	73,8	2,01	6.5.	7 845	13
14	21	0,69	97,7	2,51	9.6.	6 215	14
15	21	0,42	73,4	2,26	5.6.	3 471	15
16	22,23,37	0,92	245,4	3,31	13.6.	7 847	16
17	12,24,25	5,82	641,8	12,49	18.6.	18 899	17
18	12	0,37	---	---	---	1 544	18
19	33,34	0,69	75,2	2,22	28.12.	8 915	19
20	33	0,05	---	---	---	3 443	20
21	35	0,46	74,4	---	---	5 184	21
22	36	0,15	49,4	0,82	30.5.	3 576	22
23	29	1,25	232,5	3,81	9.6.	6 433	23
24	26	0,84	209,8	3,52	14.6.	5 290	24
25	26	1,08	198,5	3,26	13.6.	5 526	25
26	4	16,30	1998,6	30,28	30.8.	30 849	26
27	4	3,87	503,6	7,58	15.1.	6 559	27
28	3	15,90	1655,2	32,83	26.7.	31 129	28

Číslo měřicího okrsku	Zahrnuje TP	Q_p [l·s ⁻¹]	Q_d [m ³ ·den ⁻¹]	Q_h [l·s ⁻¹]	Den Q_d	Délka sítě [m]	Číslo křivky v modelu
29	3	1,88	205,9	4,21	26.8.	3 680	29
30	7	1,10	142,8	2,53	16.6.	2 741	30
31	8	3,21	375,2	6,83	26.6.	10 818	31
32	3	0,11	---	---	---	2 688	32
33	27	0,46	660,1	13,36	23.3.	5 440	33
34	28	0,43	88,4	1,82	8.6.	2 369	34
35	9	8,94	1306,6	21,23	22.9.	16 459	35
36	9,10,11	2,56	547,5	17,06	26.6.	14 061	36
37	30	0,29	---	---	---	2 167	37
38	31	0,55	51,5	2,37	14.12.	3 852	38
39	32	0,36	71,6	1,11	2.6.	1 380	39
40	9	1,63	218,1	10,97	24.7.	8 328	40
41	9	0,53	117,8	2,15	6.7.	6 322	41
42	9	1,15	190,7	3,20	5.7.	5 494	42
43	9	0,17	20,5	0,48	29.9.	4 964	43
44	9	0,98	170,6	2,54	4.6.	4 443	44
45	9	2,51	360,0	4,74	22.4.	4 328	45
		81,14	---	---		302 148 ²⁾	m

Pozn.: ¹⁾ Jedná se o odhad průměrného odběru ze sítě (spotřeba + ztráty). Nebylo možné určit hodnotu přesněji a v jednotlivých časových krocích, jelikož měření na přítoku do akumulace je buď chybné nebo neexistuje. ²⁾ Jedná se o délku vodovodu, která je uvažována v matematickém modelu stávajícího stavu.

Hodnoty průtoků Q_p , Q_d , a Q_h , byly stanoveny vyhodnocením průtoků z měřících míst, které byly exportovány z databáze dispečinku ve formě hodinových průtoků za období jednoho kalendářního roku.

3.2.2 Časový průběh spotřeby v měřících okscích

Následující vybrané tabulky uvádějí charakteristické hodnoty spotřeby vody a také množství spotřebované vody v jednotlivých dnech během kalendářního roku. Dále jsou vypočteny charakteristické průběhy spotřeby dle průměrných dnů. V grafech jsou rozlišeny jednotlivé dny na bezporuchové a s poruchou. Poruchou je myšlen stav, po kterém vnikla fyzická porucha vodovodu, nebo bylo datovou analýzou zjištěno, že v některý den došlo k poruše měření. Poruchový den byl z dalšího zpracování vyřazen.

Tab. 4: Přehled počtu validních dní v jednotlivých měřicích okrscích

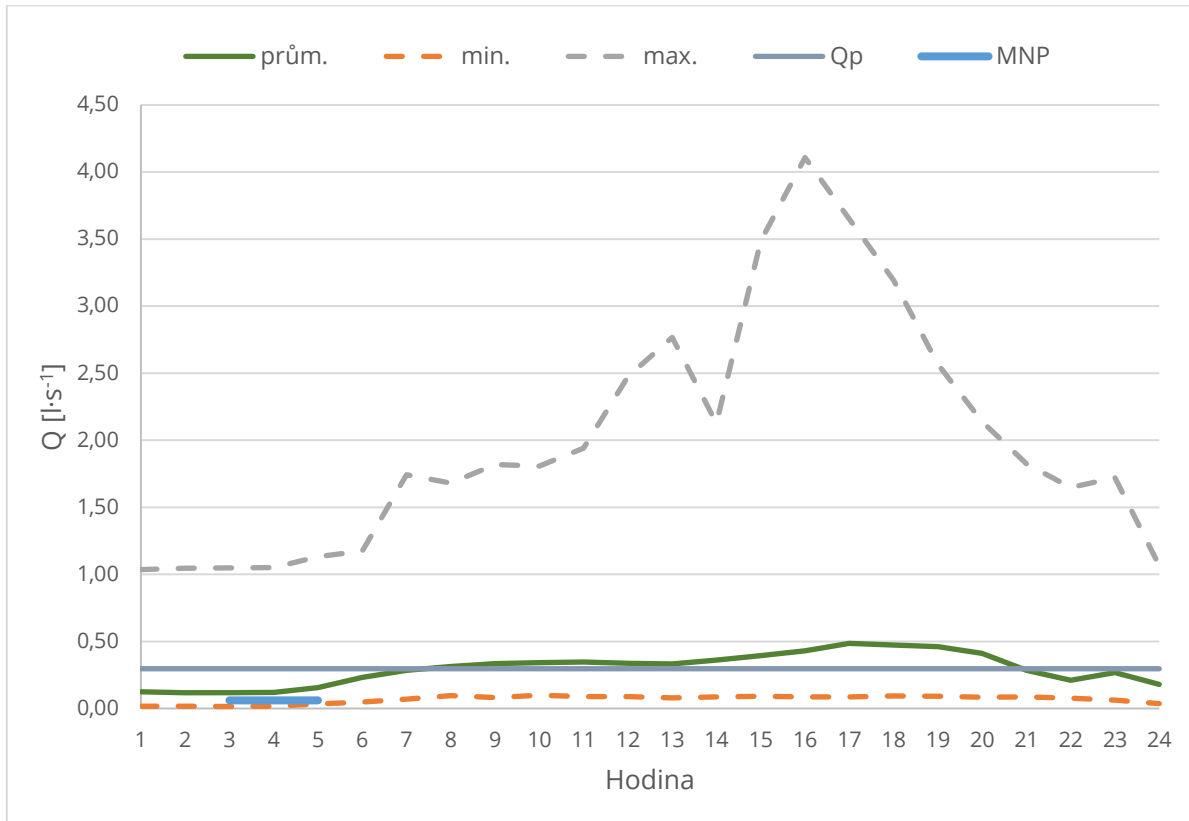
MO	Bezpor. dny za rok	% z celkového počtu dní	MO	Bezpor. dny za rok	% z celkového počtu dní	MO	Bezpor. dny za rok	% z celkového počtu dní
1	0	0	16	364	100	31	303	83
2	0	0	17	259	71	32	0	0
3	0	0	18	39	11	33	3	1
4	365	100	19	14	4	34	313	86
5	0	0	20	0	0	35	94	26
6	362	99	21	13	4	36	79	22
7	363	99	22	365	100	37	0	0
8	364	100	23	347	95	38	2	1
9	201	55	24	352	96	39	365	100
10	0	0	25	275	75	40	172	47
11	223	61	26	267	73	41	309	85
12	179	49	27	274	75	42	26	7
13	334	92	28	14	4	43	246	67
14	150	41	29	33	9	44	301	82
15	116	32	30	346	95	45	345	95

Pozn.: U měřicích okrsků 1, 2, 3, 5, 10, 18, 20, 32 a 37 je velmi nízký (či nulový) počet validních dnů z důvodu, že se jedná o měřicí okrsky ukončené v akumulaci, do níž není měřen přítok a není tak možné vyhodnotit průběh spotřeby.

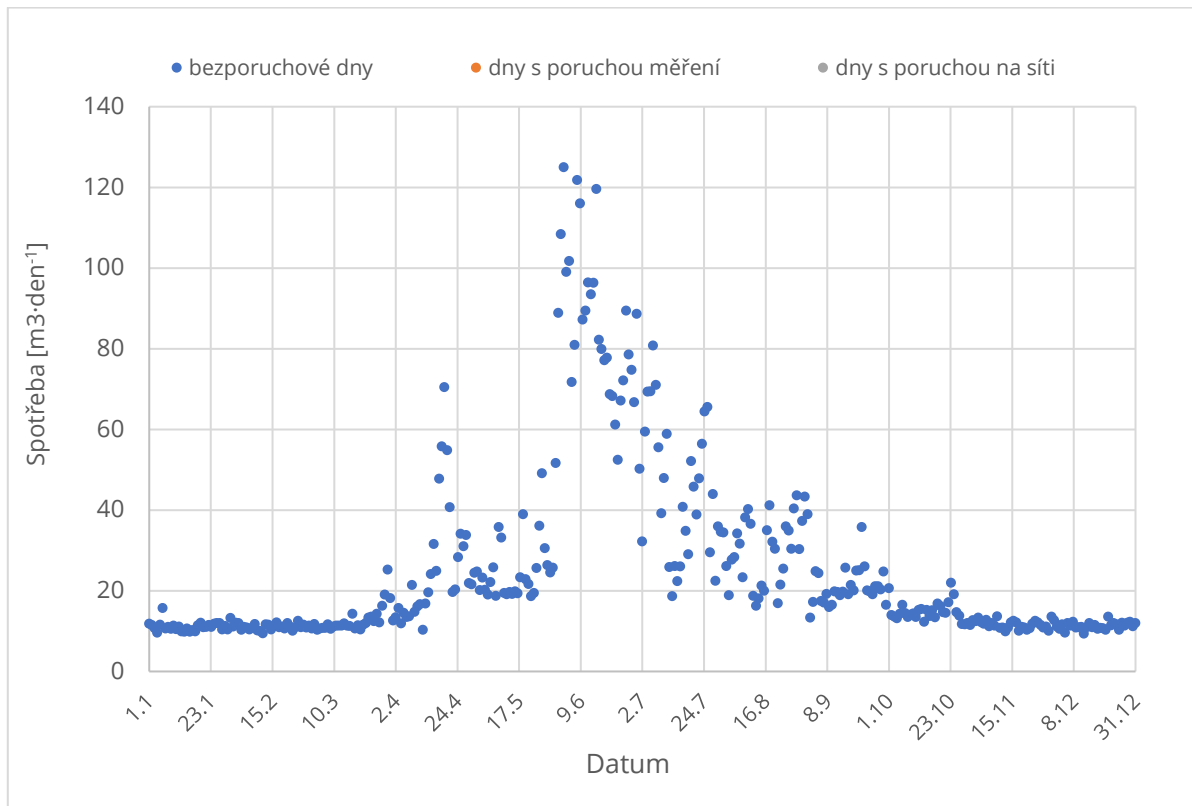
Vybrané měřicí okrsky s charakteristickými hodnotami a průběhem spotřeby

Tab. 5: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 4

Měřicí okrsek – MO 4		Pracovní dny	Dny pracovního klidu	Všechny dny
Q_p	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,28	0,33	0,30
Q_d	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	1,45	1,41	1,45
	$[\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}]$	125,0	121,8	125
Q_{dmin}	$[\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}]$			9,30
Q_h	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$			2,09
Q_{MAX}	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$			4,11
MNP	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$			0,06
% Q_p	[%]			20,4
k_h	[-]			1,45
k_d	[-]	5,15	4,26	4,88



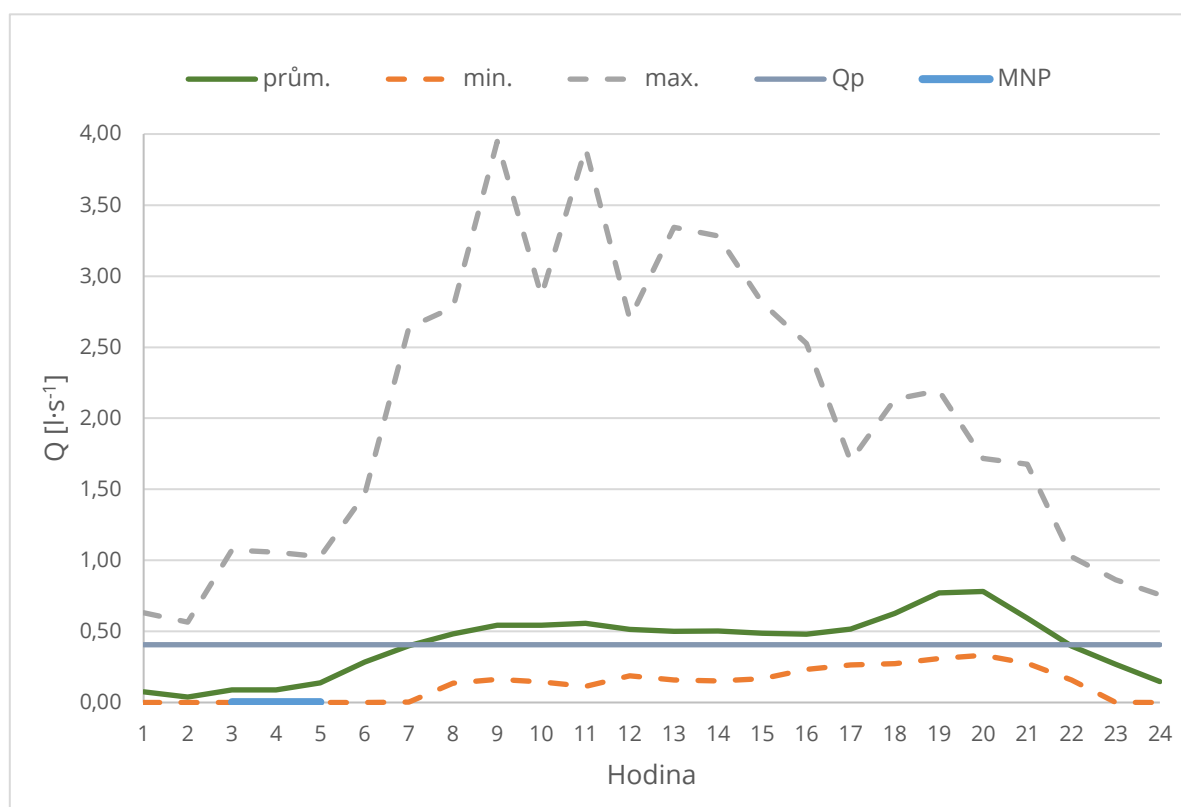
Obr. 14: Průběh spotřeby vody průměrného dne – MO č. 4



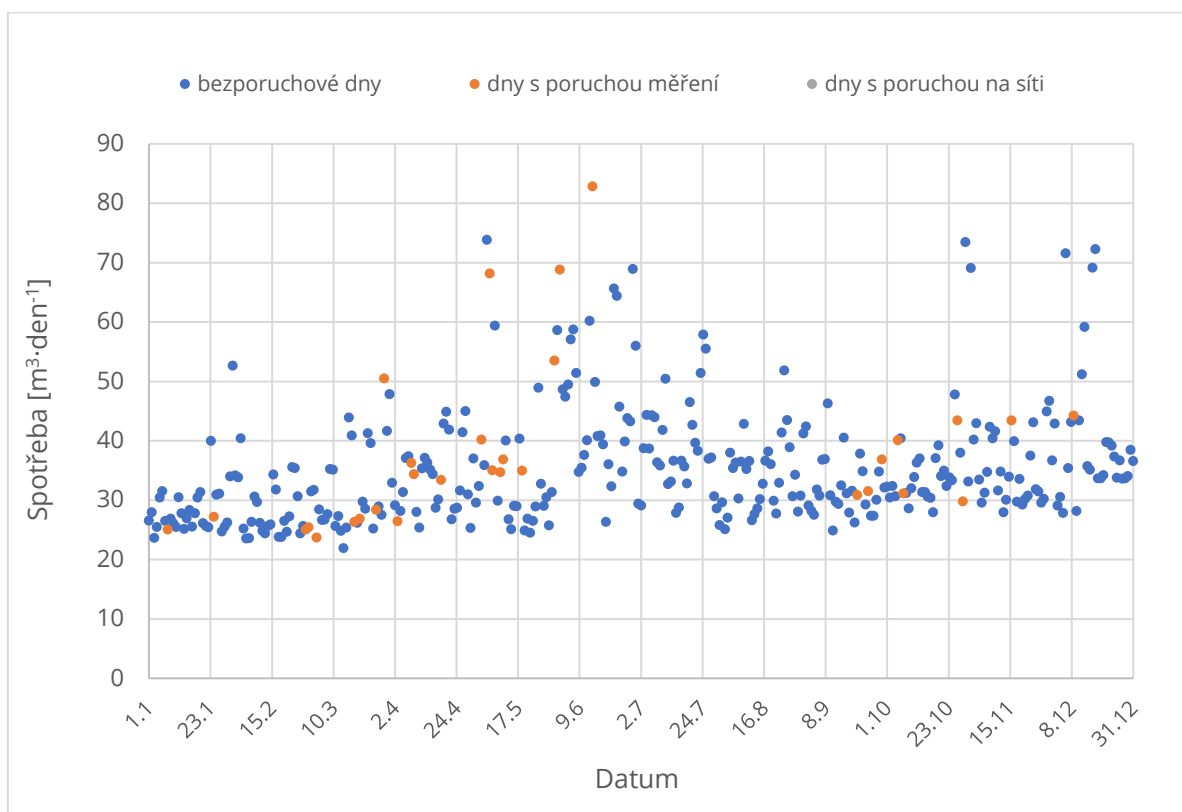
Obr. 15: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 4

Tab. 6: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 13

Měřicí okrksek – MO 13		Pracovní dny	Dny pracovního klidu	Všechny dny
Q_p	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,39	0,45	0,41
Q_d	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,85	0,80	0,85
	$[\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}]$	73,8	68,9	73,8
Q_{dmin}	$[\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}]$			21,9
Q_h	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$			2,01
Q_{MAX}	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$			3,95
MNP	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$			0,00
% Q_p	[%]			0,70
k_h	[-]			2,35
k_d	[-]	2,21	1,76	2,10



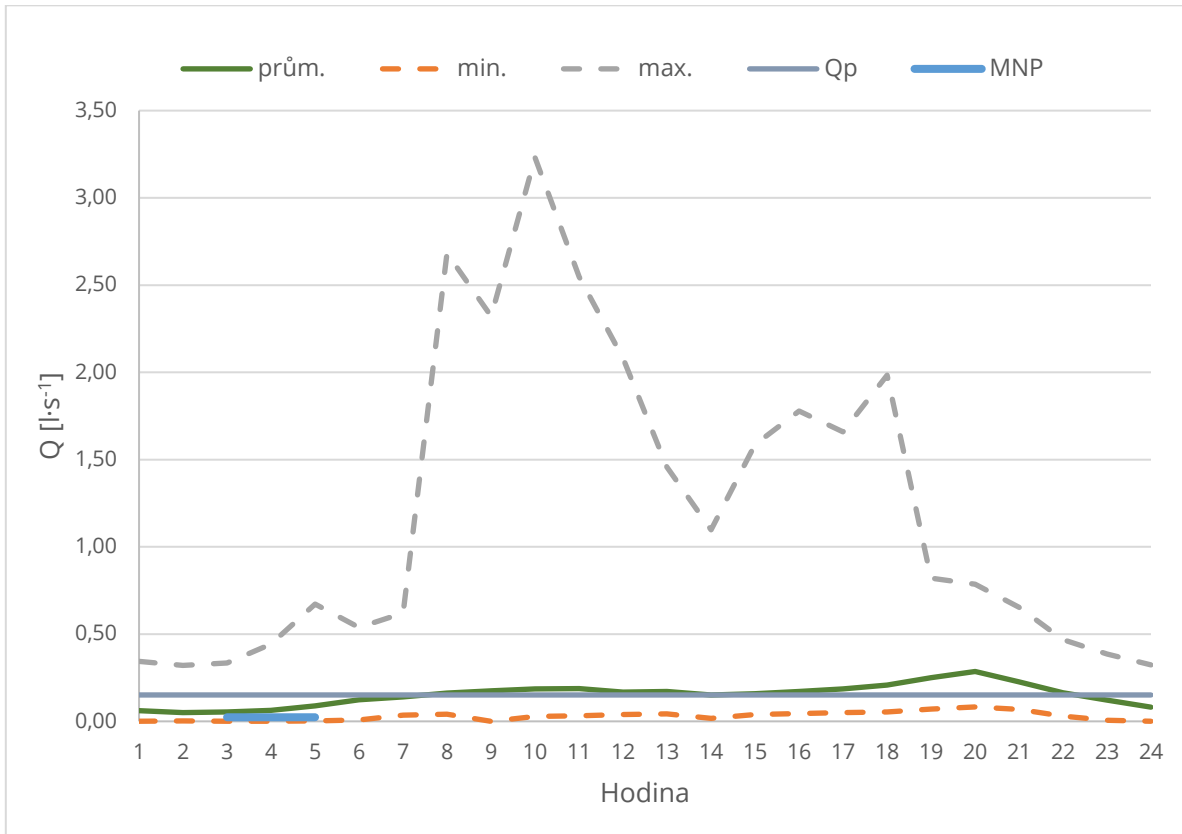
Obr. 16: Průběh spotřeby vody během průměrného dne – MO č. 13



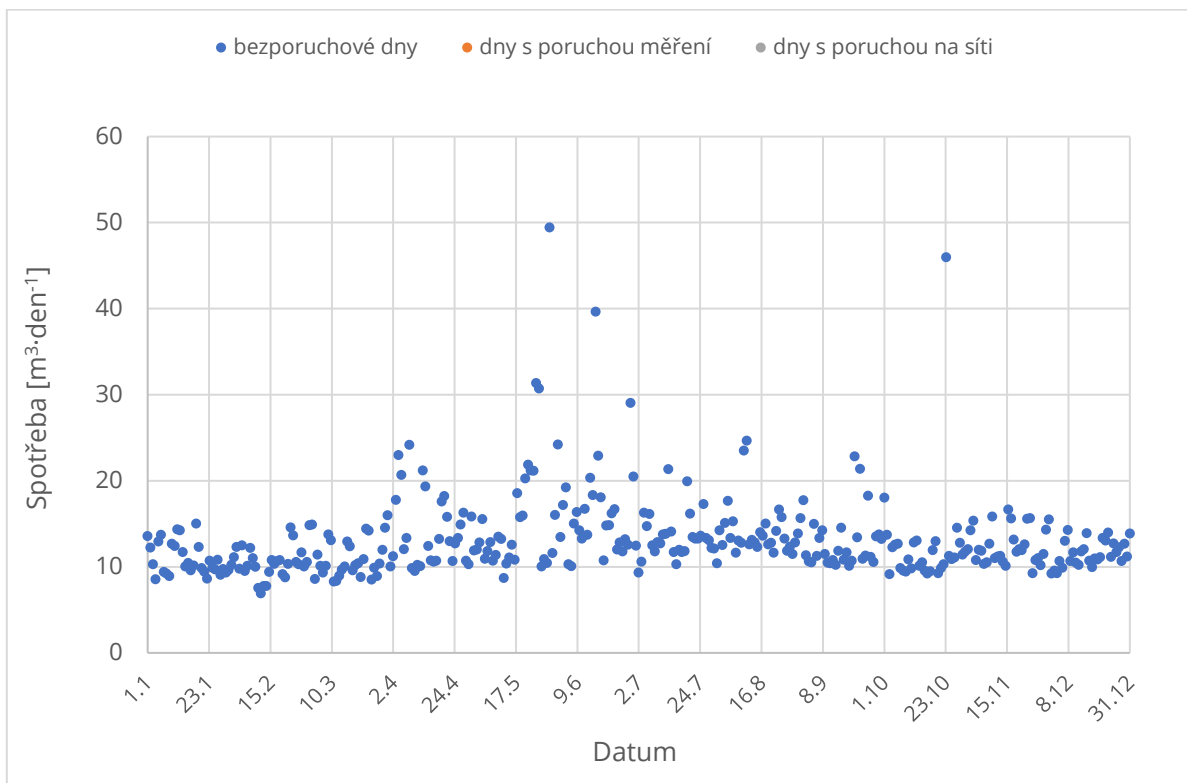
Obr. 17: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 13

Tab. 7: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 22

Měřicí okresek – MO 22		Pracovní dny	Dny pracovního klidu	Všechny dny
Q_p	$[l \cdot s^{-1}]$	0,14	0,18	0,15
Q_d	$[l \cdot s^{-1}]$	0,57	0,46	0,57
	$[m^3 \cdot d^{-1}]$	49,4	39,7	49,4
Q_{dmin}	$[m^3 \cdot d^{-1}]$			6,90
Q_h	$[l \cdot s^{-1}]$			0,82
Q_{MAX}	$[l \cdot s^{-1}]$			3,23
MNP	$[l \cdot s^{-1}]$			0,02
$\% Q_p$	$[\%]$			15,4
k_h	$[-]$			1,43
k_d	$[-]$	4,10	2,60	3,79



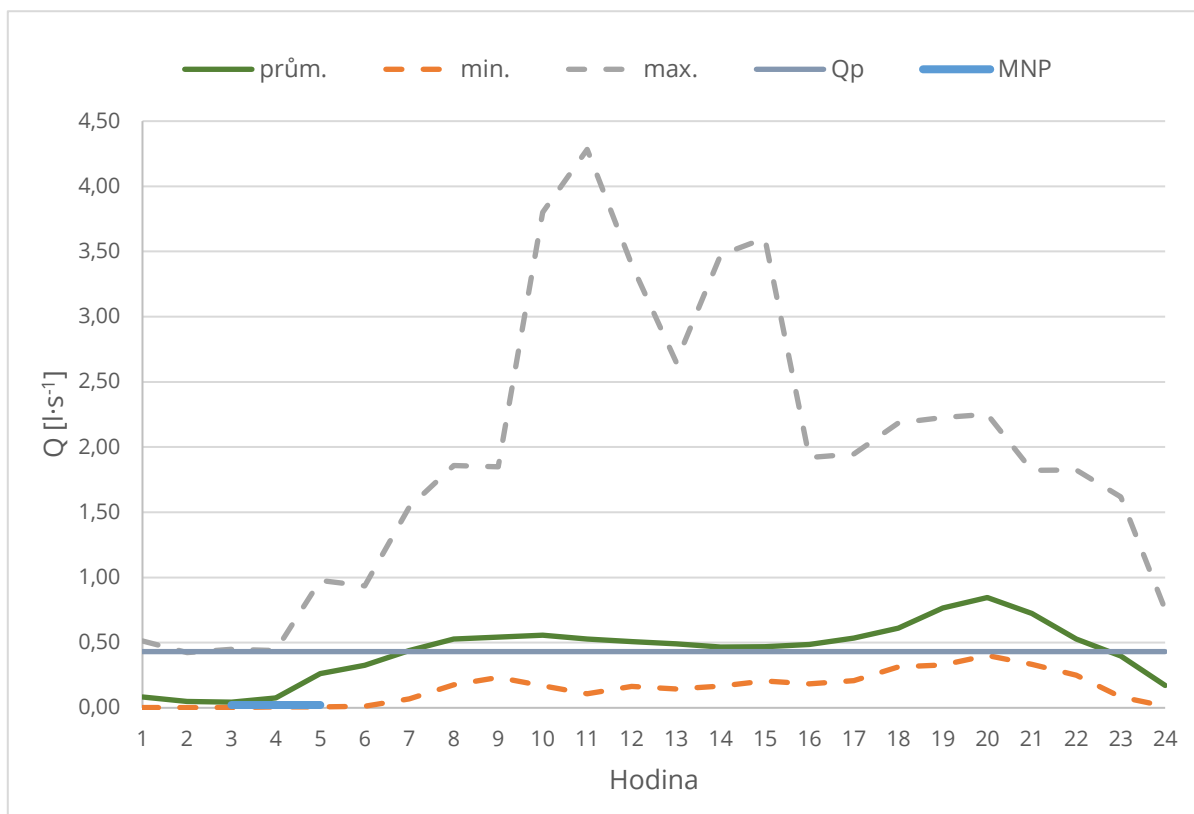
Obr. 18: Průběh spotřeby vody během průměrného dne – MO č. 22



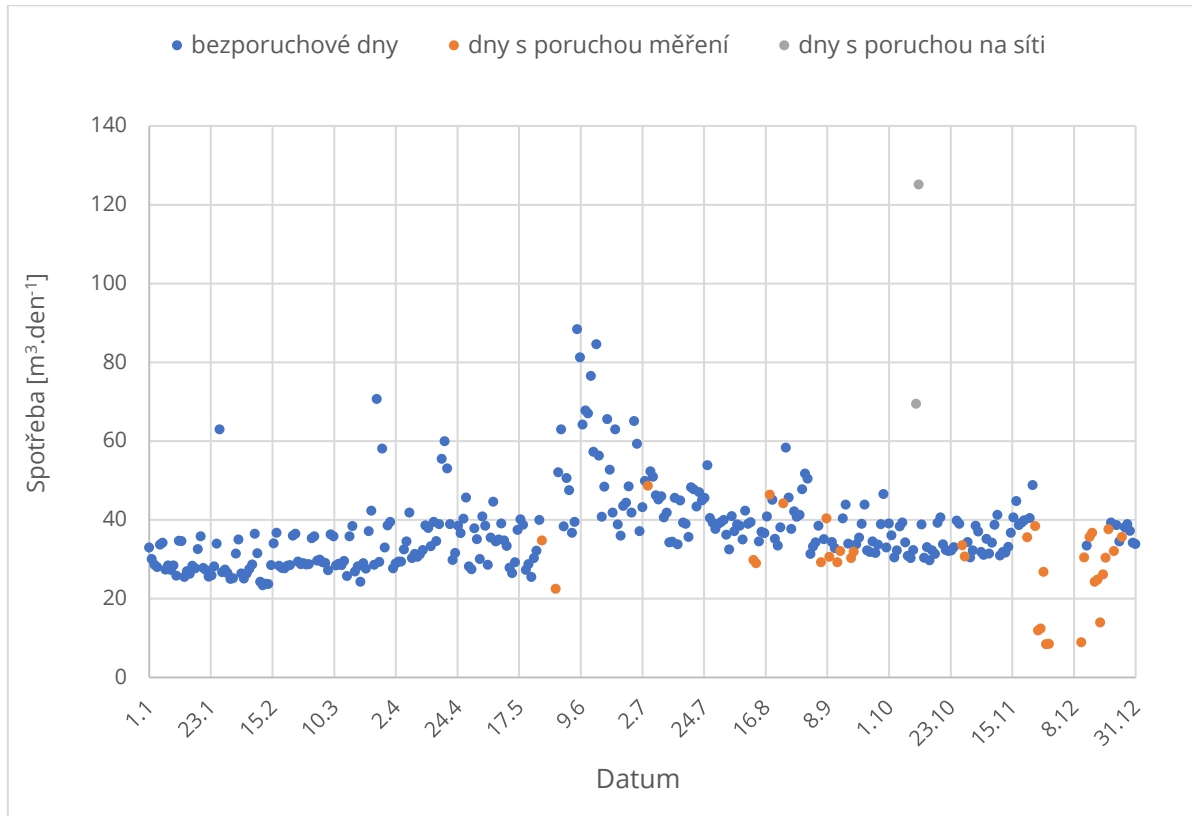
Obr. 19: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 22

Tab. 8: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 34

Měřicí okrssek – MO 34		Pracovní dny	Dny pracovního klidu	Všechny dny
Q_p	[l·s ⁻¹]	0,40	0,50	0,43
Q_d	[l·s ⁻¹]	0,88	1,02	1,02
	[m ³ ·d ⁻¹]	76,5	88,4	88,4
Q_{dmin}	[m ³ ·d ⁻¹]			23,4
Q_h	[l·s ⁻¹]			1,82
Q_{MAX}	[l·s ⁻¹]			4,28
MNP	[l·s ⁻¹]			0,02
% Q_p	[%]			5,00
k_h	[-]			1,78
k_d	[-]	2,21	2,06	2,37



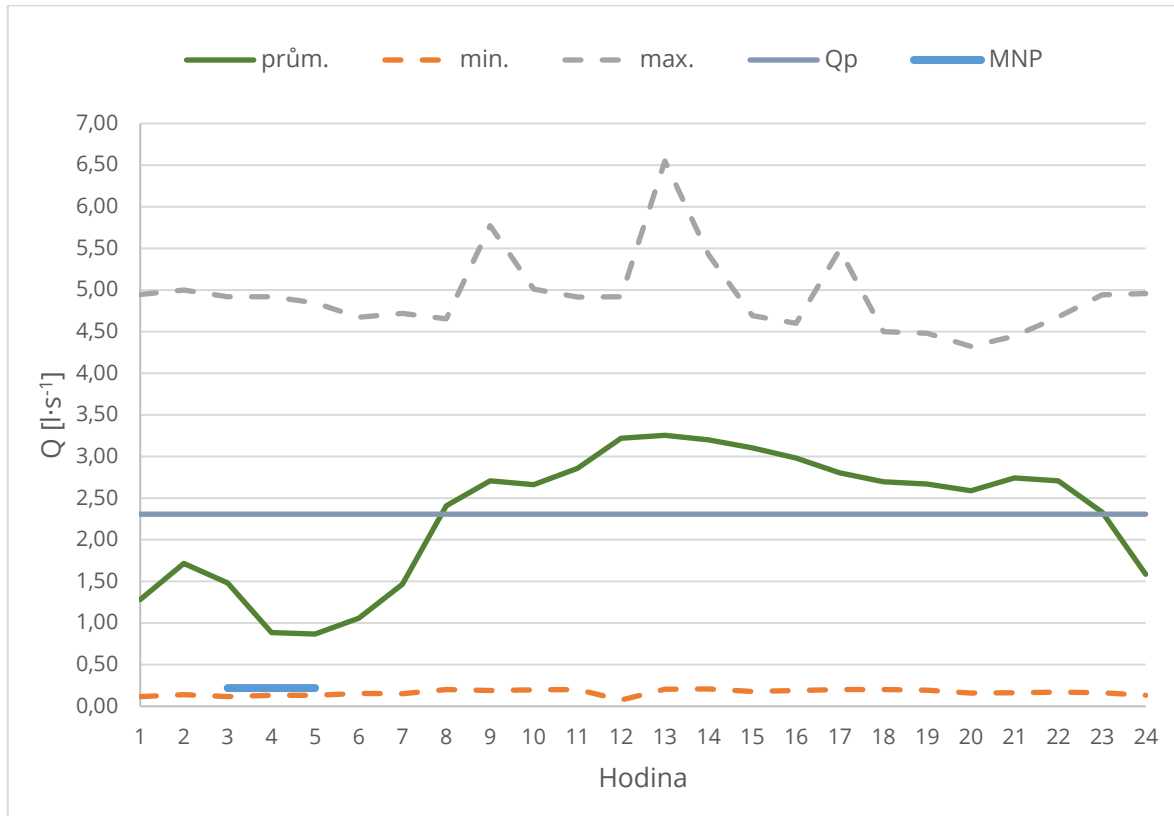
Obr. 20: Průběh spotřeby vody během průměrného dne – MO č. 34



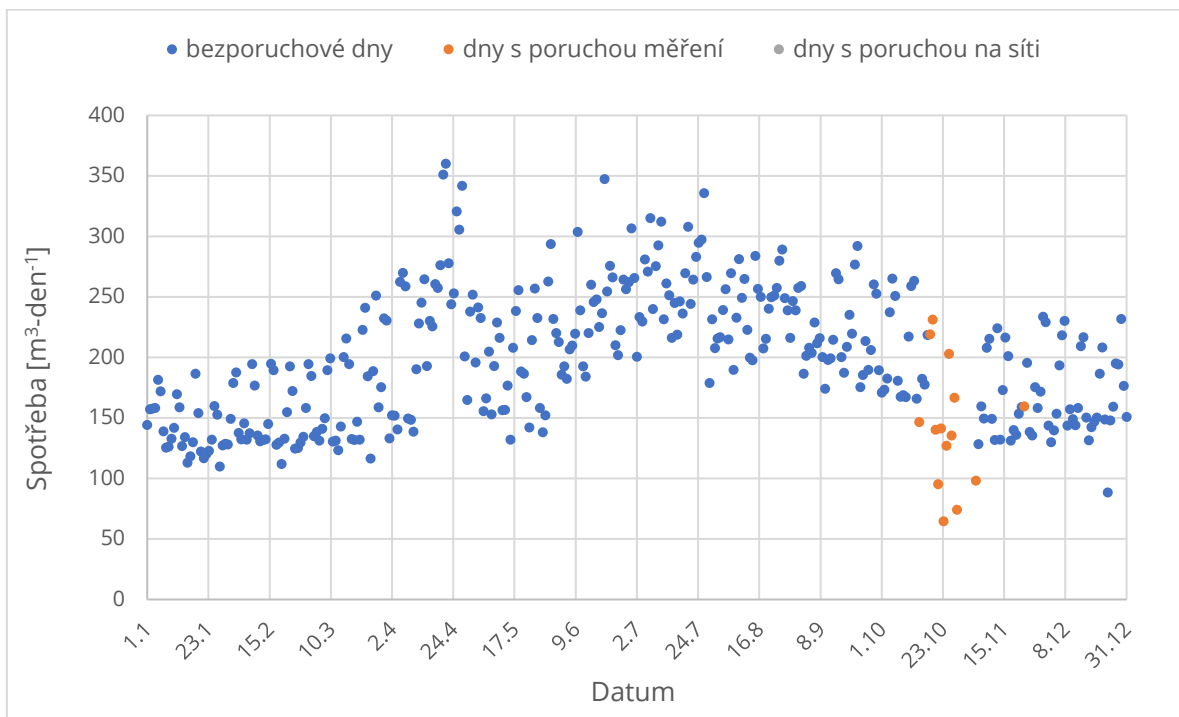
Obr. 21: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 34

Tab. 9: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 45

Měřicí okresek – MO 45		Pracovní dny	Dny pracovního klidu	Všechny dny
Q_p	$[l \cdot s^{-1}]$	2,14	2,68	2,31
Q_d	$[l \cdot s^{-1}]$	4,02	4,17	4,17
	$[m^3 \cdot d^{-1}]$	347,5	360,0	360,0
Q_{dmin}	$[m^3 \cdot d^{-1}]$			88,3
Q_h	$[l \cdot s^{-1}]$			4,74
Q_{MAX}	$[l \cdot s^{-1}]$			6,55
MNP	$[l \cdot s^{-1}]$			0,02
$\% Q_p$	$[\%]$			0,90
k_h	$[-]$			1,14
k_d	$[-]$	1,88	1,55	1,81



Obr. 22: Průběh spotřeby vody během průměrného dne – MO č. 45



Obr. 23: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 45

3.2.3 Spotřeba pitné vody velkoodběrateli

Za velkoodběratele byl považován odběratel, jehož odběry mají významný hydraulický dopad na distribuční síť. Tyto odběry jsou do modelu následně zadávány jako jednotlivé uzlové odběry s definovaným průběhem spotřeby vody. V této práci byli jako velkoodběratelé stanoveni ti odběratelé, kteří splňovali následující kritéria:

- Roční (či kratší) bilance (fakturované vody) spotřeby dosáhla průměrně alespoň $0,10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$
- Na přípojce je osazeno kontinuální měření průtoku (chytré vodoměry)

U velkoodběratelů, kde je informace o množství odebrané vody pouze z roční bilance byl stanoven průběh spotřeby vody v čase synteticky s přihlédnutím k typu velkoodběratele. U velkoodběratelů s kontinuálním měřením je stanoven průběh spotřeby v čase obdobně jako u měřících okrsků. To znamená, že byl vytvořen charakteristický průběh pro 24 časových kroků s délkou časového kroku 1 hodina.

Tab. 10: Spotřeba vybraných velkoodběratelů

Velkoodběratel	Spotřeba [m ³ ·den ⁻¹]	Spotřeba [l·s ⁻¹]	TP	MO	Číslo křivky	Označení
Místní nemocnice	165,5	1,92	4	27	46	VO-VB-1
Nákupní centrum	118,3	1,37	9	45	47	VO-PR-2
Výroba zdravotniky	115,1	1,33	3	28	48	VO-PR-3
Výroba netkaných textilií	91,5	1,06	24	17	49	VO-PR-4

Poznámka: VB – veřejná vybavenost, PR – průmysl

3.3 SESTAVENÍ HYDRAULICKÉHO MODELU

Dle uvedených dostupných dat byl sestaven hydraulický simulační model celé vodovodní sítě skupinového vodovodu, který zahrnuje všechny úseky potrubí a důležité objekty. Model nezahrnuje domovní přípojky ani vnitřní vodovody. Jedná se kvazi-dynamický model, který je kompatibilní se softwarovým nástrojem EPANET 2.2 a charakterizuje chování systému v průběhu jednoho dne. Následující údaje popisují určení jednotlivých dílčích parametrů výpočtu.

3.3.1 Hydraulická drsnost potrubí

Hydraulické ztráty třením po délce jsou v modelu počítány dle vztahu Darcy-Weisbach. Absolutní hydraulická drsnost potrubí k byla stanovena pro každý trubní úsek na základě jeho stáří a materiálu a zahrnuje také místní ztráty. Drsnosti jednotlivých skupin potrubí byly stanoveny na základě předchozích zkušeností vedoucího diplomové práce a jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 11: Hydraulická drsnost potrubí podle materiálu a stáří potrubí

Materiál / rok položení	≤ 1950	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2020
AC	---	---	0,3	---	---	---	---
ETE	---	---	0,3	---	---	---	---
LT	11,0	10,0	8,0	6,0	3,0	2,5	1,5
OC	12,1	10,1	8,1	6,1	5,0	4,0	2,1
PE	---	0,24	0,22	0,19	0,17	0,14	0,11
PVC	---	---	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25
TLT	---	9,0	7,0	5,5	2,5	2,0	1,0

Poznámka: AC - azbestocement, ETE - eternit, LT - šedá litina, OC - ocel, PE - polyetylén, PVC - polyvinylchlorid, TLT - tvárná litina

3.3.2 Vnitřní profily, materiál a stáří potrubí

Vnitřní profily trubních úseků, materiál a rok jejich položení byly převzaty z GIS databáze správce sítě. Celkové délky jednotlivých skupin potrubí uvádí následující tabulky. Uvedené přehledy nezahrnují vodovodní přípojky. Celkový objem vody v trubní síti v rozsahu modelu je 6 605 m³.

Tab. 12: Celková délka jednotlivých skupin potrubí podle DN a materiálu potrubí

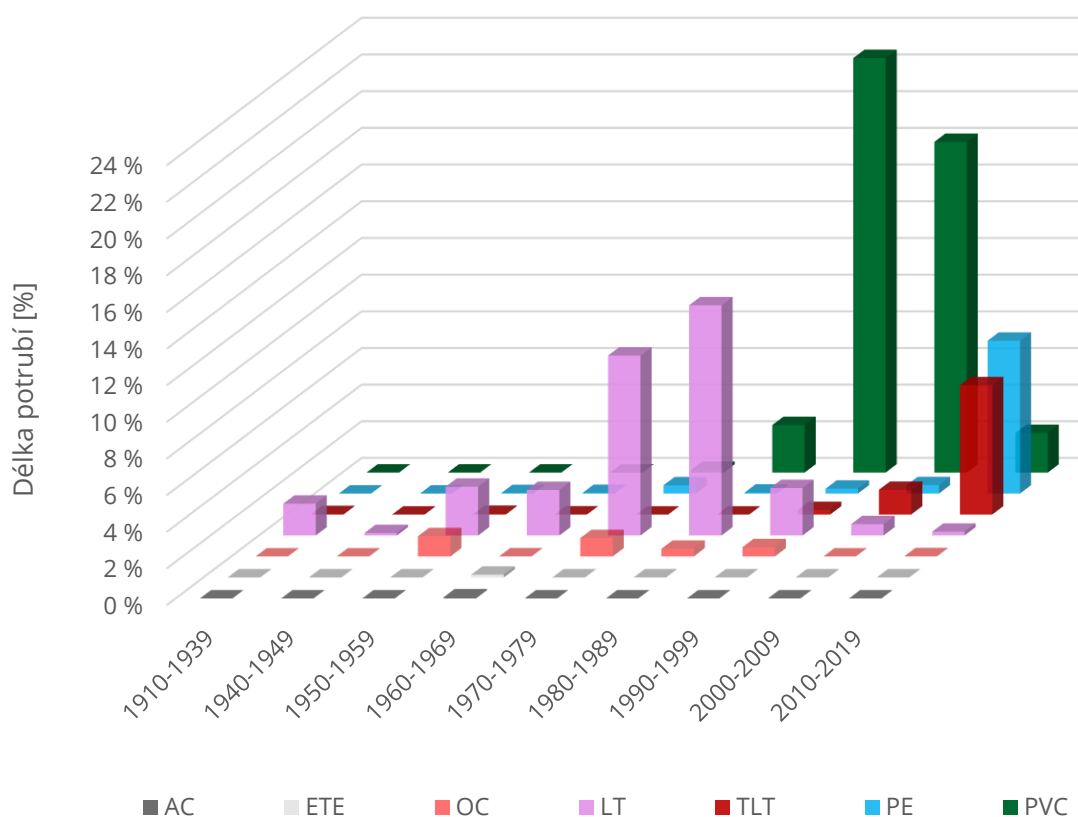
DN / materiál	≤ 100 [m]	101–300 [m]	301–500 [m]	> 500 [m]	Celkem [m]
AC	0	186	0	0	186
ETE	0	461	0	0	461
LT	37 876	50 608	10 209	531	99 224
OC	507	5 458	2 965	334	9 264
PE	2 945	26 116	0	0	29 061
PVC	58 135	79 463	0	0	137 598
TLT	2 306	23 602	445	0	26 353
Celkem	101 769	185 894	13 619	865	302 148

Poznámka: AC - azbestocement, ETE - eternit, LT - šedá litina, OC - ocel, PE - polyetylén, PVC - polyvinylchlorid, TLT - tvárná litina

Tab. 13: Celková délka jednotlivých skupin podle potrubí dle stáří

Materiál / rok položení	1910–1949 [m]	1950–1959 [m]	1960–1969 [m]	1970–1979 [m]	1980–1989 [m]	1990–1999 [m]	2000–2009 [m]	2010–2019 [m]	Celková délka [m]
AC	0	0	186	0	0	0	0	0	186
ETE	0	0	461	0	0	0	0	0	461
LT	5 654	8 047	7 520	29 689	37 971	7 837	1 876	631	99 225
OC	0	3 346	20	3 038	1 269	1 532	6	52	9 264
PE	0	67	89	1 359	157	801	1 376	25 212	29 061
PVC	0	0	0	451	7 835	68 298	54 492	6 522	137 598
TLT	72	115	10	0	0	752	4 078	21 327	26 353
Celkem	5 726	11 575	8 286	34 537	47 232	79 219	61 828	53 745	302 148
%	1,9	3,8	2,7	11,5	15,6	26,2	20,5	17,8	100

Poznámka: AC - azbestocement, ETE - eternit, LT - šedá litina, OC - ocel, PE - polyetylén, PVC - polyvinylchlorid, TLT - tvárná litina



Obr. 24: Zastoupení materiálů potrubí dle stáří

3.3.3 Další parametry hydraulické analýzy

Uzlové odběry vody ze sítě reprezentují odběry vody domácnostmi, průmyslem i přímé ztráty vody ze sítě. Z celkového odběru vody z napájecího uzlu tlakového pásma (respektive měřícího okrsku) byly uzlové odběry rozděleny do 4 kategorií odběru:

- Ztráty vody – rozdělení do jednotlivých uzlů dle délky přiléhajících úseků
- Spotřeba vody – transformováno do jednotlivých uzlů pomocí součinitele, který reprezentuje množství fakturované vody v přiléhajících úsecích
- Spotřeba velkoodběratelů – zadáváno jednotlivě do odpovídajících uzlů s přihlédnutím místa napojení velkoodběratele na vodovodní řad.
- Tranzitní odběry – vloženy jako samostatný uzlový odběr v místě ukončení hydraulického modelu sítě

3.3.4 Koeficienty nerovnoměrnosti odberu vody

Následující tabulka a graf zobrazují koeficienty nerovnoměrnosti odběru vody pro každý časový krok během dne. Jedná se o koeficienty, jejichž hodnoty jsou stanoveny z pracovních dnů i dnů pracovního klidu dohromady, avšak bez uvažování poruchových dnů.

Tab. 14: Koeficienty nerovnoměrnosti odběru – MO č. 1-13

Typ odběru	Měřící okrsek (MO)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ID křivky/hodina													
0-1	1,00	1,00	1,00	0,27	0,13	0,30	0,17	0,16	0,52	1,00	0,21	0,10	0,18
1-2	1,00	1,00	1,00	0,24	0,03	0,19	0,04	0,10	0,40	1,00	0,19	0,08	0,09
2-3	1,00	1,00	1,00	0,24	0,16	0,15	0,02	0,08	0,30	1,00	0,16	0,00	0,21
3-4	1,00	1,00	1,00	0,26	0,16	0,18	0,09	0,14	0,37	1,00	0,28	0,06	0,21
4-5	1,00	1,00	1,00	0,40	0,29	0,33	0,23	0,29	0,57	1,00	0,70	0,32	0,34
5-6	1,00	1,00	1,00	0,73	0,67	0,66	0,46	0,55	0,75	1,00	1,20	0,64	0,69
6-7	1,00	1,00	1,00	0,95	0,97	1,02	0,79	0,84	0,96	1,00	1,17	0,89	0,98
7-8	1,00	1,00	1,00	1,07	1,19	1,23	1,13	1,12	1,18	1,00	1,14	1,13	1,18
8-9	1,00	1,00	1,00	1,16	1,35	1,28	1,46	1,35	1,32	1,00	1,27	1,32	1,33
9-10	1,00	1,00	1,00	1,19	1,35	1,31	1,42	1,39	1,27	1,00	1,24	1,34	1,33
10-11	1,00	1,00	1,00	1,22	1,38	1,34	1,40	1,33	1,20	1,00	1,09	1,29	1,36
11-12	1,00	1,00	1,00	1,17	1,27	1,28	1,38	1,34	1,22	1,00	0,97	1,28	1,26
12-13	1,00	1,00	1,00	1,15	1,24	1,22	1,16	1,32	1,12	1,00	0,91	1,04	1,23
13-14	1,00	1,00	1,00	1,27	1,24	1,13	1,08	1,13	1,06	1,00	0,99	1,01	1,23
14-15	1,00	1,00	1,00	1,41	1,21	1,15	1,16	1,17	1,09	1,00	1,10	0,99	1,19
15-16	1,00	1,00	1,00	1,56	1,19	1,20	1,29	1,28	1,15	1,00	1,08	1,10	1,17
16-17	1,00	1,00	1,00	1,80	1,28	1,27	1,37	1,37	1,17	1,00	1,20	1,28	1,27
17-18	1,00	1,00	1,00	1,75	1,57	1,38	1,50	1,62	1,24	1,00	1,40	1,44	1,53

18-19	1,00	1,00	1,00	1,70	1,95	1,57	1,74	1,83	1,55	1,00	1,72	2,07	1,89
19-20	1,00	1,00	1,00	1,49	1,97	1,71	1,85	1,90	1,57	1,00	1,81	2,46	1,91
20-21	1,00	1,00	1,00	0,95	1,48	1,47	1,65	1,57	1,45	1,00	1,61	1,85	1,45
21-22	1,00	1,00	1,00	0,64	0,97	1,17	1,33	1,08	1,12	1,00	1,22	1,20	0,97
22-23	1,00	1,00	1,00	0,88	0,63	0,89	0,86	0,70	0,84	1,00	0,85	0,73	0,66
23-24	1,00	1,00	1,00	0,50	0,32	0,55	0,45	0,35	0,59	1,00	0,51	0,40	0,36

Tab. 15: Koeficienty nerovnoměrnosti odběru – MO č. 14-26

Typ odběru	Měřící okresek (MO)												
	ID křivky/hodina	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0-1	0,21	0,40	0,26	0,21	1,00	0,33	1,00	0,32	0,30	0,23	0,21	0,26	0,16
1-2	0,16	0,28	0,19	0,11	1,00	0,14	1,00	0,24	0,21	0,15	0,14	0,13	0,01
2-3	0,12	0,31	0,18	0,04	1,00	0,04	1,00	0,16	0,24	0,17	0,13	0,07	0,03
3-4	0,16	0,40	0,31	0,26	1,00	0,04	1,00	0,14	0,31	0,35	0,19	0,15	0,17
4-5	0,30	0,50	0,42	0,34	1,00	0,12	1,00	0,25	0,51	0,36	0,32	0,42	0,36
5-6	0,68	0,72	0,75	0,70	1,00	0,31	1,00	0,50	0,78	0,82	0,75	0,79	0,79
6-7	1,04	0,92	1,01	0,91	1,00	0,59	1,00	1,12	0,91	1,04	1,19	1,06	1,23
7-8	1,26	1,05	1,20	1,14	1,00	0,83	1,00	1,63	1,08	1,16	1,37	1,20	1,50
8-9	1,33	1,30	1,27	1,21	1,00	1,35	1,00	1,48	1,18	1,23	1,25	1,28	1,33
9-10	1,41	1,46	1,24	1,11	1,00	1,85	1,00	1,40	1,27	1,22	1,25	1,28	1,51
10-11	1,40	1,34	1,21	1,02	1,00	1,70	1,00	1,52	1,28	1,18	1,22	1,26	1,44
11-12	1,37	1,17	1,16	0,83	1,00	1,29	1,00	1,45	1,13	1,15	1,15	1,23	1,06
12-13	1,33	1,11	1,12	0,55	1,00	1,63	1,00	1,41	1,15	1,09	1,12	1,17	1,26
13-14	1,20	1,04	1,09	0,67	1,00	1,41	1,00	1,18	0,99	1,07	1,06	1,15	1,17
14-15	1,20	1,01	1,13	0,87	1,00	1,10	1,00	1,03	1,06	1,10	1,08	1,18	1,00
15-16	1,18	1,16	1,22	0,80	1,00	1,09	1,00	0,94	1,15	1,18	1,13	1,26	1,15
16-17	1,25	1,34	1,31	1,32	1,00	1,22	1,00	0,94	1,28	1,30	1,23	1,32	1,33
17-18	1,39	1,43	1,50	2,02	1,00	1,22	1,00	1,23	1,45	1,52	1,48	1,46	1,52
18-19	1,71	1,58	1,88	2,86	1,00	1,38	1,00	1,19	1,77	1,87	1,88	1,74	1,76
19-20	1,74	1,74	1,96	2,93	1,00	2,01	1,00	1,85	2,05	1,98	1,99	1,82	1,76
20-21	1,39	1,55	1,62	1,84	1,00	1,72	1,00	1,50	1,58	1,52	1,56	1,50	1,40
21-22	1,08	1,09	1,01	1,19	1,00	1,01	1,00	1,11	1,11	1,09	1,16	1,10	1,07
22-23	0,70	0,72	0,60	0,65	1,00	1,01	1,00	0,95	0,77	0,74	0,75	0,75	0,66
23-24	0,39	0,40	0,36	0,43	1,00	0,60	1,00	0,48	0,45	0,49	0,44	0,43	0,33

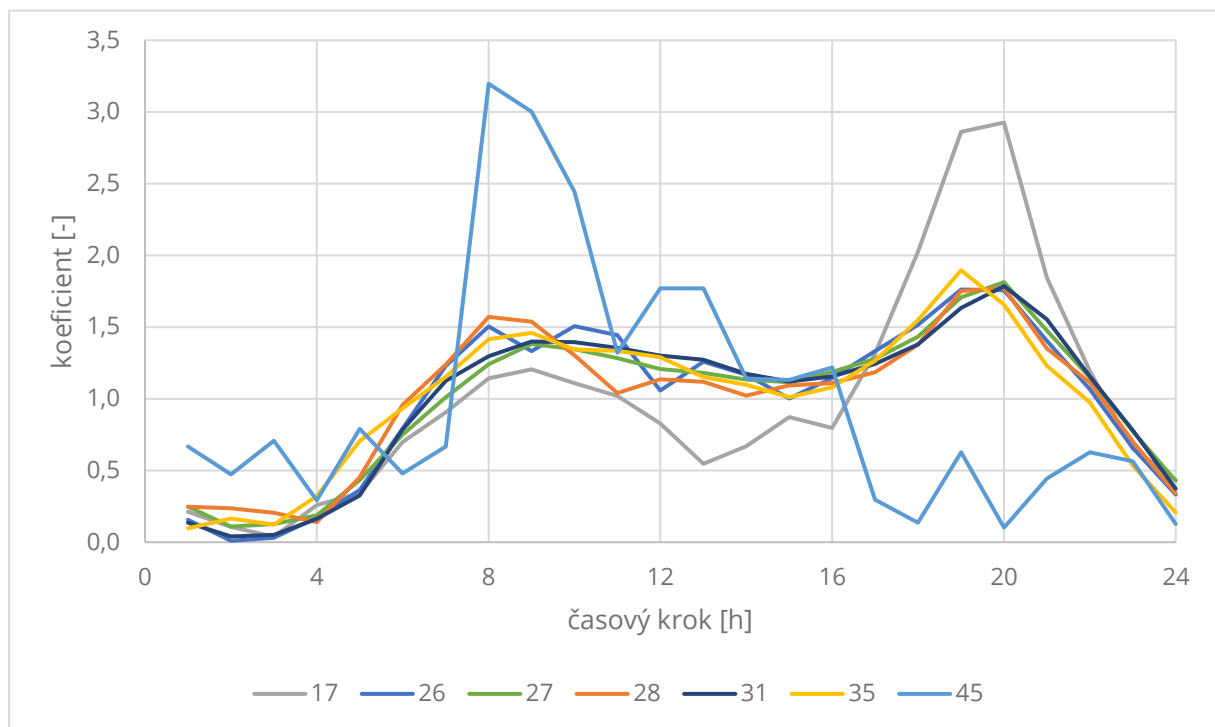
Tab. 16: Koeficienty nerovnoměrnosti odběru – MO č. 27-39

Typ odběru	Měřící okrsek (MO)												
	ID křivky/hodina	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
0-1	0,25	0,25	0,37	0,25	0,14	1,00	0,43	0,15	0,10	0,27	1,00	0,43	0,16
1-2	0,11	0,24	0,17	0,09	0,04	1,00	0,20	0,07	0,17	0,15	1,00	0,28	0,08
2-3	0,13	0,21	0,12	0,03	0,05	1,00	0,06	0,05	0,12	0,22	1,00	0,04	0,04
3-4	0,19	0,14	0,16	0,03	0,16	1,00	0,04	0,13	0,32	0,23	1,00	0,31	0,13
4-5	0,43	0,45	0,23	0,17	0,33	1,00	0,18	0,58	0,71	0,24	1,00	0,32	0,31
5-6	0,75	0,96	0,41	0,50	0,79	1,00	0,39	0,74	0,93	0,47	1,00	0,29	0,64
6-7	1,01	1,24	0,81	0,94	1,13	1,00	0,45	1,01	1,15	0,86	1,00	0,42	0,98
7-8	1,24	1,57	1,18	1,28	1,30	1,00	0,07	1,22	1,42	1,13	1,00	0,95	1,24
8-9	1,38	1,54	1,42	1,45	1,40	1,00	1,68	1,26	1,46	1,16	1,00	1,63	1,38
9-10	1,35	1,30	1,56	1,45	1,40	1,00	1,84	1,30	1,34	1,07	1,00	2,69	1,42
10-11	1,28	1,04	1,49	1,34	1,35	1,00	1,75	1,22	1,33	0,98	1,00	1,42	1,31
11-12	1,21	1,14	1,18	1,27	1,30	1,00	1,39	1,18	1,29	1,15	1,00	1,26	1,24
12-13	1,18	1,12	1,06	1,20	1,27	1,00	1,06	1,14	1,15	1,17	1,00	1,32	1,13
13-14	1,13	1,02	1,08	1,10	1,18	1,00	0,81	1,08	1,10	1,19	1,00	1,23	1,09
14-15	1,12	1,09	1,34	1,09	1,12	1,00	0,82	1,08	1,01	1,39	1,00	1,16	1,12
15-16	1,19	1,11	1,43	1,11	1,16	1,00	0,51	1,13	1,08	1,52	1,00	1,19	1,14
16-17	1,28	1,19	1,43	1,21	1,24	1,00	1,38	1,24	1,27	1,69	1,00	1,22	1,39
17-18	1,43	1,38	1,45	1,36	1,38	1,00	1,38	1,43	1,55	1,65	1,00	0,99	1,62
18-19	1,71	1,75	1,36	1,59	1,63	1,00	1,41	1,80	1,90	1,74	1,00	1,16	1,98
19-20	1,81	1,77	1,26	1,90	1,79	1,00	1,59	2,00	1,66	1,81	1,00	1,41	2,02
20-21	1,48	1,35	1,30	1,73	1,55	1,00	1,93	1,70	1,23	1,59	1,00	1,23	1,57
21-22	1,15	1,11	1,24	1,34	1,16	1,00	2,09	1,22	0,98	1,19	1,00	0,99	1,05
22-23	0,77	0,70	1,14	1,01	0,78	1,00	1,62	0,91	0,54	0,78	1,00	1,09	0,61
23-24	0,43	0,34	0,83	0,58	0,37	1,00	0,93	0,36	0,21	0,36	1,00	1,01	0,36

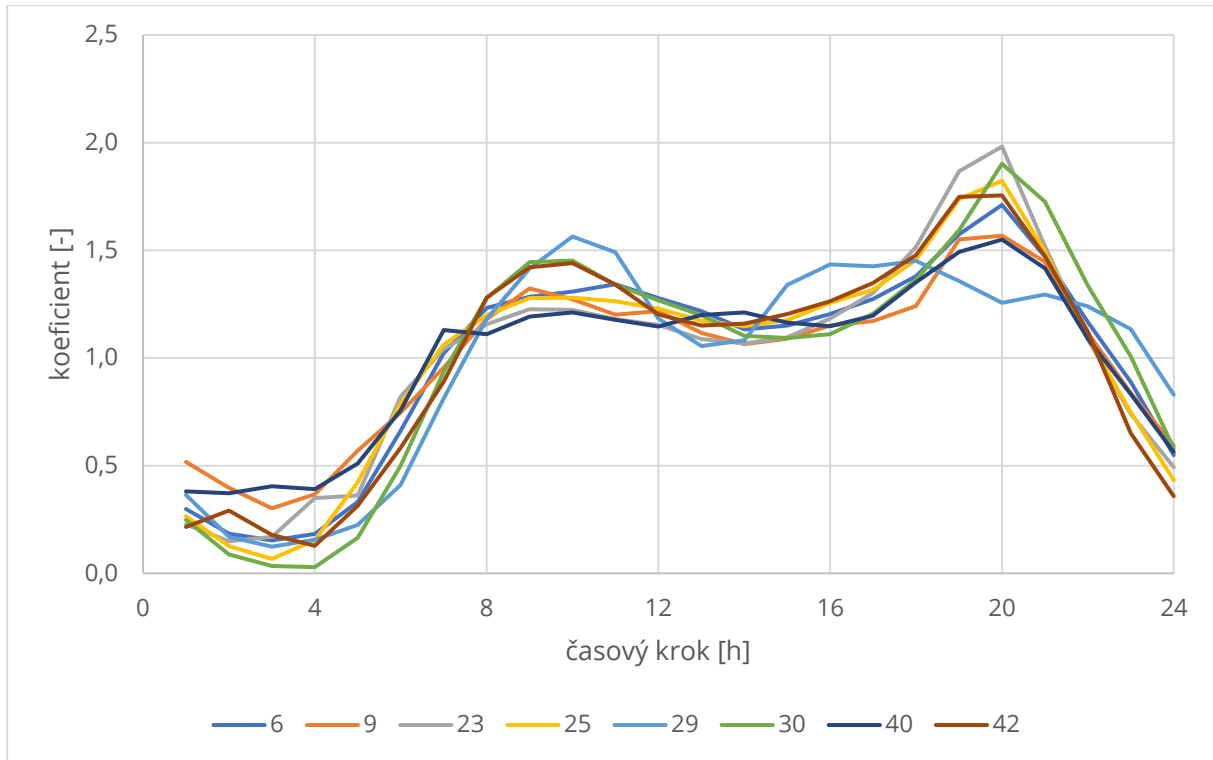
Tab. 17: Koeficienty nerovnoměrnosti odběru – MO č. 40-45

Typ odběru	Měřící okrsek (MO)					
	ID křivky/hodina	40	41	42	43	44
0-1	0,38	0,16	0,22	0,24	0,28	0,67
1-2	0,37	0,07	0,29	0,12	0,17	0,47

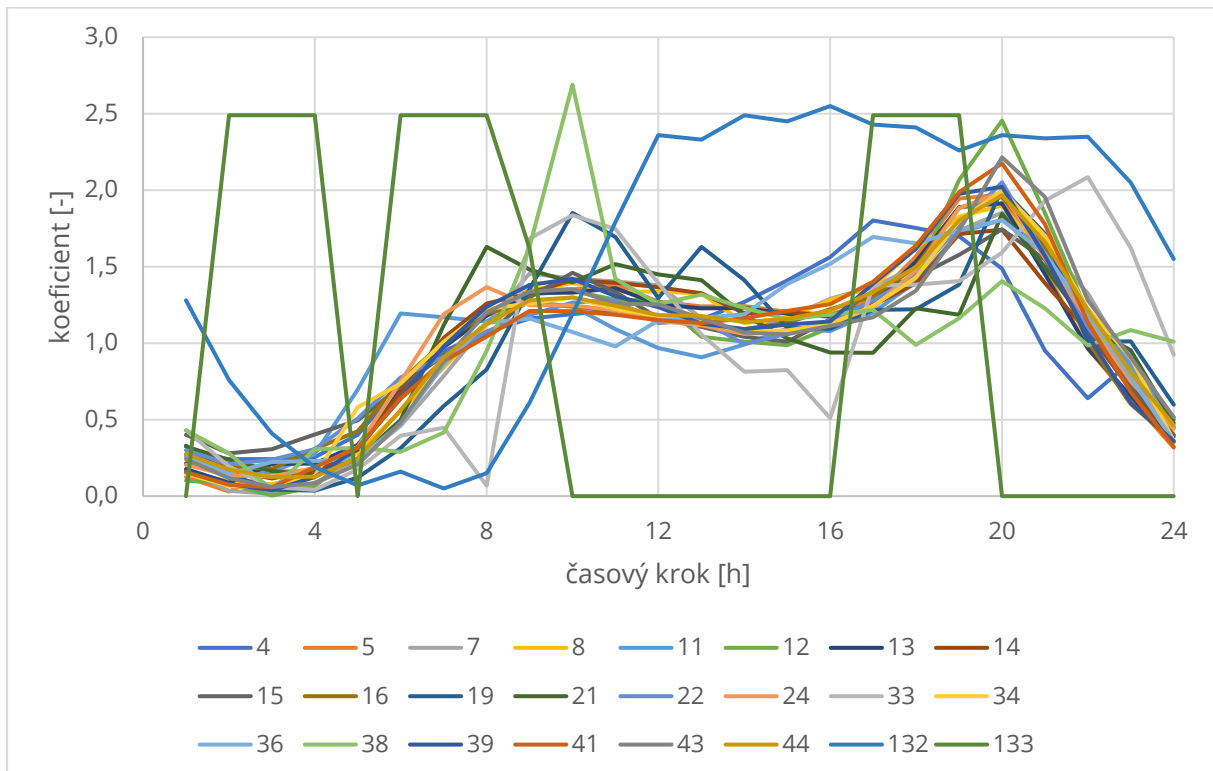
2-3	0,40	0,06	0,18	0,06	0,13	0,71
3-4	0,39	0,19	0,13	0,09	0,13	0,29
4-5	0,51	0,32	0,31	0,21	0,25	0,79
5-6	0,76	0,64	0,58	0,48	0,56	0,48
6-7	1,13	0,88	0,89	0,88	0,91	0,67
7-8	1,11	1,04	1,28	1,20	1,13	3,20
8-9	1,19	1,21	1,42	1,34	1,28	3,00
9-10	1,21	1,21	1,44	1,35	1,30	2,44
10-11	1,18	1,19	1,34	1,26	1,24	1,32
11-12	1,15	1,15	1,20	1,25	1,18	1,77
12-13	1,20	1,13	1,15	1,16	1,18	1,77
13-14	1,21	1,16	1,16	1,07	1,14	1,14
14-15	1,16	1,21	1,20	1,06	1,16	1,13
15-16	1,15	1,26	1,26	1,11	1,21	1,22
16-17	1,20	1,40	1,35	1,17	1,34	0,30
17-18	1,35	1,64	1,48	1,34	1,50	0,14
18-19	1,49	1,99	1,75	1,74	1,80	0,63
19-20	1,55	2,18	1,76	2,22	1,97	0,10
20-21	1,42	1,78	1,47	1,96	1,66	0,44
21-22	1,09	1,14	1,12	1,28	1,22	0,63
22-23	0,83	0,68	0,65	0,91	0,81	0,56
23-24	0,56	0,32	0,36	0,52	0,46	0,13



Obr. 25: Křivka nerovnoměrnosti odběru v MO – vyšší spotřeba



Obr. 26: Křivka nerovnoměrnosti odběru v MO – střední spotřeba



Obr. 27: Křivka nerovnoměrnosti odběru v MO – nižší spotřeba a tranzitní průtoky

3.4 MĚRNÁ KAMPAŇ

V celé řešené oblasti, která je zahrnuta v modelu vodovodu, byla provedena plošná měrná kampaň, při které probíhalo měření tlaků tlakovými čidly na celkem 100 vybraných místech vodovodní sítě. Tohle měření tlaků probíhalo současně s měřením průtoků. Měření tlaků bylo rozděleno do 10 etap vždy po deseti měřeních. Etapy měření probíhaly v časových intervalech.



Obr. 28: Osazené tlakové čidlo Sebalog P3

Tab. 18: Rozdělení měřicích období do etap – měření tlaků

Číslo etapy	Období měření	Počet měření	počet dnů ¹⁾
I. etapa	22. 10. do 25. 10.	10	3
II. etapa	25. 10. do 29. 10.	10	4
III. etapa	29. 10. do 1. 11.	10	4
IV. etapa	1. 11. do 5. 11.	10	3
V. etapa	5. 11. do 8. 11.	10	3
VI. etapa	8. 11. do 12. 11.	10	4
VII. etapa	12. 11. do 15. 11.	10	3
VIII. etapa	15. 11. do 19. 11.	10	4
IX. etapa	19. 11. do 22. 11.	10	3
X. etapa	22. 11. do 26. 11.	10	4
Celkem:	22. 10. do 26. 11.	100	35

Pozn.: ¹⁾ za jeden den se považuje časové období 24 po sobě jdoucích hodin, nikoliv kalendářní den.

Vybrané místa měření tlaků byla exportována z GIS v závazném geodetickém referenčním systému Jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-SJTK), který správce vodovodní sítě používá ve své databázi. Následně byly souřadnice převedeny do široce používaného systému WGS84 (celosvětově uznávaný standard zeměpisné šířky a délky pro navigaci v GPS [29]) a importovány do Google Maps. Tohle řešení umožnilo velmi snadnou navigaci k vybranému měřicímu místu a zaručilo vysoce kvalitní verifikaci vytypovaného a reálného měřicího bodu.

3.4.1 Etapizace dle tlakových pásem

K měření byla použita tlaková čidla Sebalog P3, která jsou vybavena automatickým záznamovým zařízením a zaznamenávají hodnotu tlaku s referencí 1 sekundy. Měření bylo provedeno v každém tlakovém pásmu skupinového vodovodu a čidla byla osazena kontinuálně vždy minimálně po dobu 48hodin. Současně probíhalo standardní měření průtoků na všech místech, kde voda vstupuje do měřících okrsků, které provozovatel skupinového vodovodu měří rutinně. Data získaná měřením hydraulických veličin byla následně použita pro kalibraci sestaveného hydraulického modelu vodovodu.

Tab. 19: Realizovaná měření tlaků v tlakových pásmech

číslo TP	Délka sítě [m]	Provedená měření (číslo měření)	Hustota měření [km·měření ⁻¹]
1	1 810,2	---	---
2	2 074,2	---	---
3	36 605,9	et. IV: 31	3,31
4	37 742,8	et. III: 30; et. IV: 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41	3,77
5	3 306,0	et. IV: 35, et. V: 42, 43, 44, 45, 46, 47, 50	4,58
6	529,7	et. X: 96	0,53
7	2 552,9	et.VI: 51, 52	1,28
8	10 818,5	et. VIII: 77, 78, 79, 80	2,70
9	61 028,7	et. VII: 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70; et. VIII: 71, 74; et. IX: 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88	3,05
10	2 003,7	et. VIII: 73, 75	1,00
11	652,6	et. VIII: 76	0,65
12	16 150,6	et. II: 18; et. III: 21, 22, 23, 24, 27, 29	2,31
13	9 504,7	et. II: 19, 20	4,75
14	7 970,4	et. II: 11, 12, 13	2,66
15	10 094,5	et. II: 14, 15	5,05
16	2 186,8	et. II: 16, 17	1,09

17	815,7	---	---
18	284,3	---	---
19	1 967,6	et. I: 3, 4	0,98
20	7 856,3	et. I: 1, 2	3,93
21	9 686,0	et. I: 5, 6, 7	3,23
22	4 132,6	---	---
23	1 233,7	et. I: 8	1,23
24	10 483,6	et. III: 25, 26, 28	3,49
25	3 810,9	et.VI: 53, 55	1,91
26	10 816,7	et.VI: 54, 56, 57, 59, 60	2,16
27	5 439,5	et. V: 48	5,44
28	2 369,5	et. V: 49	2,37
29	6 433,2	et. VI: 58	6,43
30	3 080,7	---	---
31	3 852,4	et. VIII: 72; et. X: 91, 95	1,28
32	1 169,6	et. X: 92, 93, 94	0,39
33	12 078,7	et. X: 97, 98	6,04
34	282,1	---	---
35	5 187,1	et. X: 99, 100	2,59
36	3 575,9	et. IX: 89, 90	1,79
37	2 559,6	et. I: 9, 10	1,28
37 ks	302 147,8		3,02

3.4.2 Zpracování dat měrné kampaně

Hodnoty tlaků a průtoků, které byly získány měřeními na síti, byly vyhodnoceny a následně porovnány s výsledky modelu. V případě potřeby byl v modelu proveden kalibrační zásah (úprava hydraulické drsnosti, úprava vnitřního profilu potrubí a další). Podrobné výsledky měrné kampaně uvádí příloha č. 2 a následující grafy.

Pro zpracování velkého množství naměřených surových dat byl použit vysokoúrovňový programovací jazyk Python. K účelům kalibrace hydraulického modelu byl vytvořen nový zdrojový kód, který hromadně načítá soubory naměřených surových dat tlakových čidel Sepalog P3 a vytváří kalibrační soubory ve formě hodinových průměrů. Nové kalibrační soubory z měrné kampaně jsou generovány ve formátu podporovaném softwarovým nástrojem EPANET, ve kterém lze načíst kalibrační soubor výsledky hydraulického modelu porovnat s výsledky skutečného měření.

```

80     args = docopt(__doc__, version='KaliPro 1.0')
81
82     start_date = dt.datetime.strptime(args['<start_time>'], '%Y-%m-%d %H:%M:%S')
83     end_date = dt.datetime.strptime(args['<end_time>'], '%Y-%m-%d %H:%M:%S')
84     txt_name = args['<input_name>']
85
86     input_data = load_files(args, start_date, end_date)
87
88     if args['hodina']:
89         f = open('C:/kalibracni_data/{}_hodinova_kalibracni_data.txt'.format(txt_name), 'w+', newline='')
90         f.write(';Program KaliPro 2020 - hodnoty tlaku pro kalibraci modelu v EPANET\n')
91         # f.write(';hodnoty tlaku pro kalibraci modelu\n')
92         f.write(';Uzel \t\tčas (h) \t\tlak (m v. s.)\n')
93
94     for source in input_data:
95         print(';soubor: ', source)
96
97         preassure_by_hour = {}
98         for hour in range(0, 24):
99             preassure_by_hour[hour] = []

```

Obr. 29: Část zdrojového kódu pro zpracování kalibračních dat

Grafický výstup surových dat byl zpracován v programu Gnuplot. Vytvořený zdrojový kód hromadně načítá surová data, ze kterých tvoří grafy. Měření tlaku bylo graficky zpracováno jak pro jednotlivá místa měření, tak pro celá tlaková pásma.

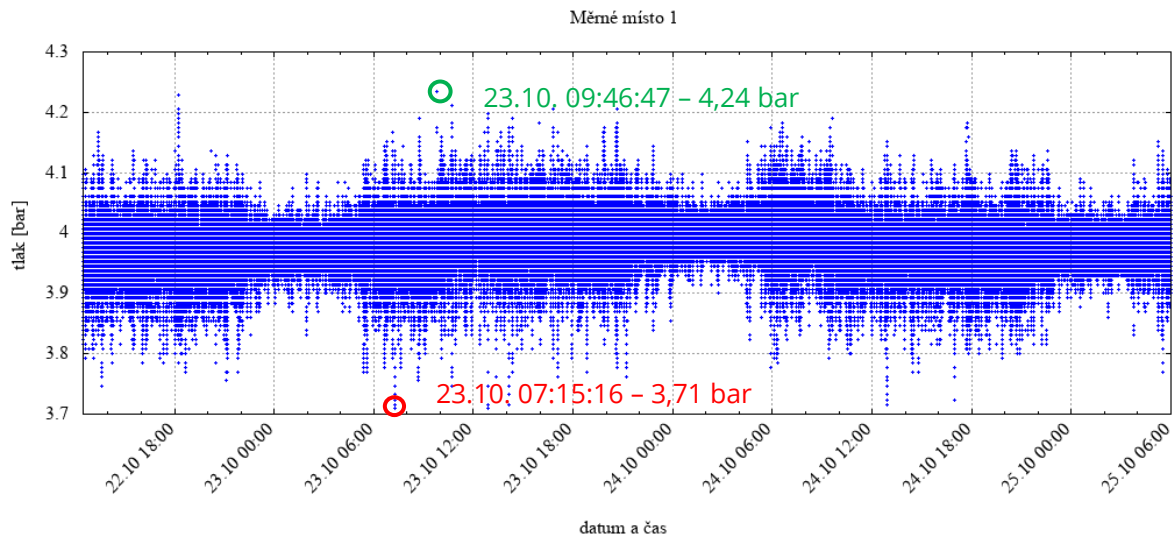
Následující tabulka a graf je datovým a grafickým výstupem zpracování surových dat měření tlaku jednoho měřícího místa, který byl naměřen tlakovým čidlem v barech. Statistickým zpracováním surových dat měření tlaků byl získán soubor dat sloužící k verifikaci kalibrace. Grafický výstup měření tlaků všech měřících míst je součástí přílohy č. 2. Tlaky, které výpočtem stanoví matematický model jsou uvedeny v jednotkách metry vodního sloupce (m v. sl.). Pro převod mezi těmito jednotkami byl použit následující vztah:

$$p \text{ (Pa)} = \rho (1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot g (9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}) \cdot m \text{ H}_2\text{O (m)}$$

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

Tab. 20: Vybrané měření tlaků na vodovodní síti – Měrné místo 1

Tlakové pásmo:	TP20	Napájecí uzel:	21
Měřidlo:	Hydrantový tlakový senzor- Sebalog P3		ID loggeru: 001281
Měřené období:	Od: 22.10.2019 07:55 Do: 25.10.2019 08:55	Nadm. výška měřidla:	354,00 m n. m.
Vyhodnocení měření	Minimum	Průměr (vypočtený)	Maximum
Tlak - měřený [bar]	3,71	3,98	4,24



Obr. 30: Graf měření tlaku – Měrné místo 1

Kompletní prezentace dat získaných měrnou kampaní byla zpracována v systému GIS a je k nahlédnutí v Příloze č. 2 – Měrná kampaň.

3.5 VÝSLEDKY KALIBRACE HYDRAULICKÉHO MODELU

Hydraulický simulační model pro každé nezávislé tlakové pásmo, kde bylo provedeno měření tlaku, byl kalibrován samostatně porovnáním hydraulických veličin měřených na síti a veličin stanovených simulačním modelem. Tento postup obsahoval následující kroky:

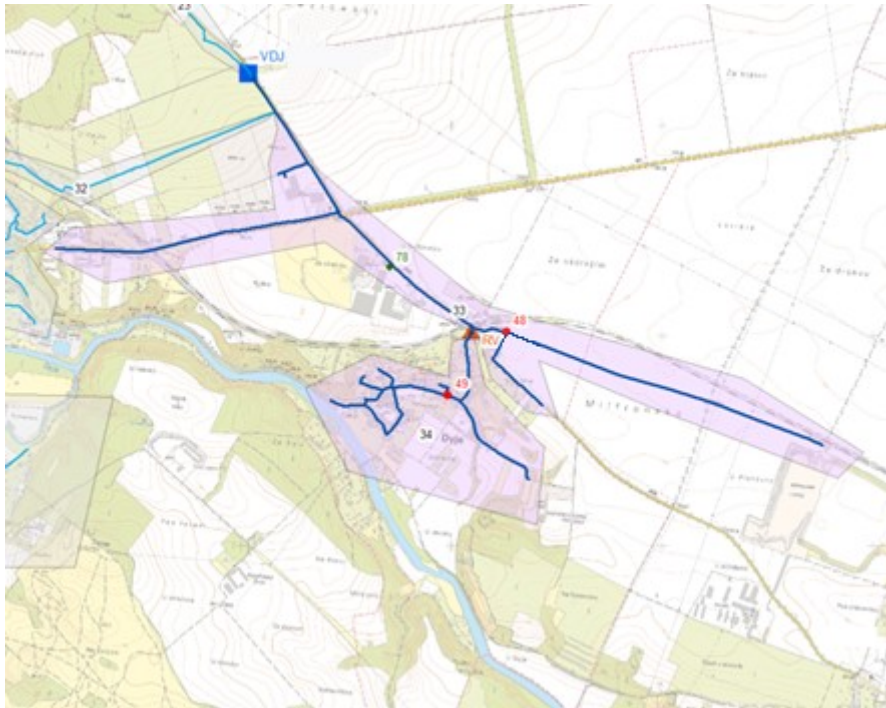
- 1) Rozčlenění na kalibrační celky.
- 2) Zvolení jednoho dne pro každý kalibrační celek, kdy v dané části sítě proběhlo měření tlaku.
- 3) Příprava kalibračních dat pro průtoky ve zvolený den.
- 4) Zatížení matematického modelu dané části sítě (kalibračního celku) skutečně měřenými průtoky dle bodu 3).
- 5) Příprava kalibračních dat pro tlaky ve zvolený den.
- 6) Provedení prvotního výpočtu bez kalibračního zásahu.
- 7) Porovnání vypočtené a změřené hodnoty tlaku.
- 8) Optimalizace kalibračního zásahu pro dosažení nejlepší možné shody.

Na základě výsledků dosažených výše uvedenými kroky byly v modelu nastaveny polohy provozních hladin všech akumulčních nádrží a přerušovacích komor. U ATS byla nastavena poloha tlakové čáry vypínacího a zapínacího tlaku. U regulátoru tlaku byla nastavena hodnota výstupního tlaku dle zjištěné polohy tlakové čáry dle měření tlaku. Pro vybraný kalibrační celek byly zaznamenány údaje, podle kterých je možné posoudit kvalitu provedené kalibrace modelu:

- Grafické znázornění kalibračního celku s uvedením zvoleného dne.
- Grafické znázornění měřících míst tlaku v rámci kalibračního celku.
- Zatížení (průtoky) kalibračního celku.
- Porovnání měřených průtoků a průtoků v matematickém modelu.

- Porovnání středních hodnot časové řady měřeného a vypočteného tlaku v měřících místech.
- Porovnání časové řady hodnot tlaku měřeného a vypočteného pro jednotlivá měřící místa.

3.5.1 Kalibrace vybraného kalibračního celku



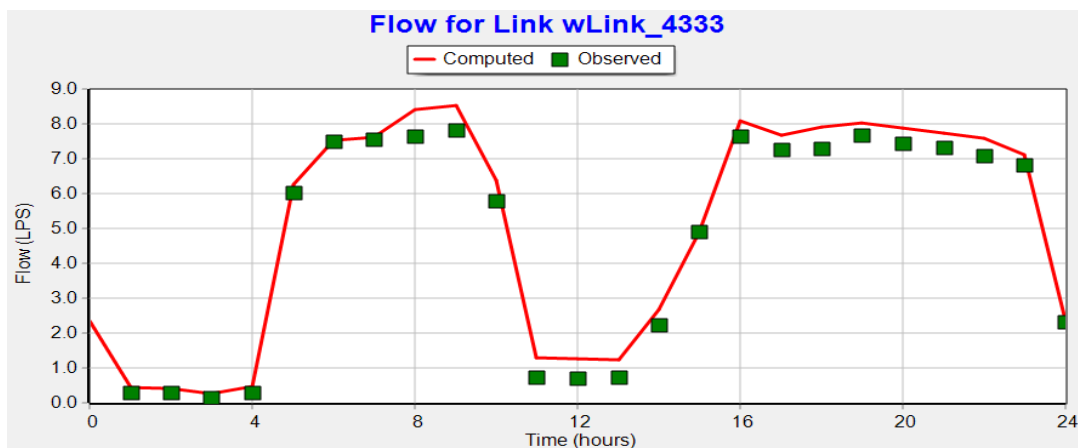
Obr. 31: Kalibrační celek Č. 21 – TP 27 + TP 28

Tab. 21: Zatěžovací stavy TP 27 + TP 28

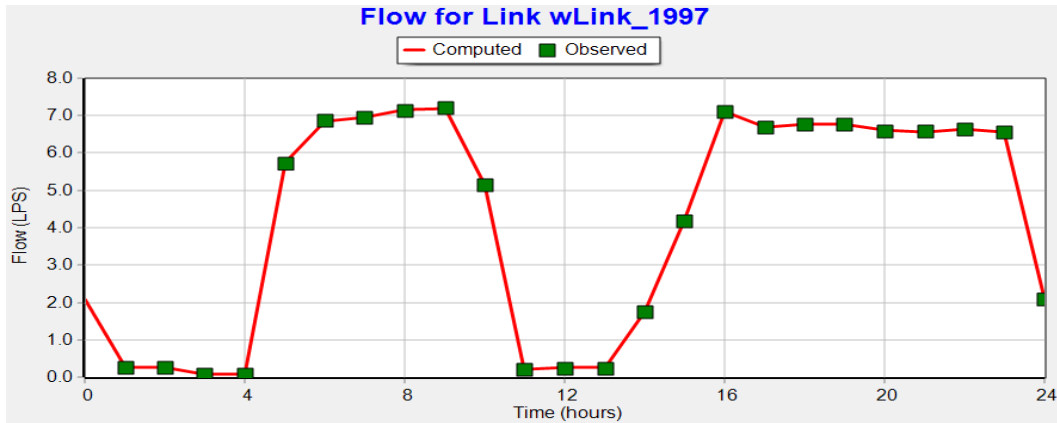
TP 27+28	MO 33		Velkoodběratel č. 78	Součet	MO 34		Součet	Součet celkem
	spotřeba [l·s ⁻¹]	ztráty [l·s ⁻¹]			spotřeba [l·s ⁻¹]	ztráty [l·s ⁻¹]		
1	0,013	0,030	0,164	0,207	0,034	0,022	0,056	0,262
2	0,085	0,030	0,006	0,121	0,009	0,022	0,031	0,151
3	0,032	0,030	0,024	0,085	0,008	0,022	0,030	0,115
4	0,030	0,030	0,022	0,082	0,013	0,022	0,034	0,116
5	0,022	0,030	0,128	0,180	0,075	0,022	0,097	0,277
6	0,120	0,030	0,072	0,222	0,203	0,022	0,225	0,447
7	0,109	0,030	0,127	0,267	0,467	0,022	0,489	0,756
8	0,045	0,030	0,125	0,200	0,479	0,022	0,500	0,700
9	0,613	0,030	0,128	0,771	0,377	0,022	0,399	1,170

TP 27+28	MO 33		Velkoodběratel č. 78	Součet	MO 34		Součet	Součet celkem
	spotřeba [l·s ⁻¹]	ztráty [l·s ⁻¹]			spotřeba [l·s ⁻¹]	ztráty [l·s ⁻¹]		
10	0,547	0,030	0,267	0,844	0,322	0,022	0,343	1,187
11	0,508	0,030	0,247	0,785	0,379	0,022	0,400	1,186
12	0,490	0,030	0,125	0,645	0,385	0,022	0,406	1,052
13	0,356	0,030	0,153	0,539	0,290	0,022	0,312	0,850
14	0,258	0,030	0,200	0,488	0,283	0,022	0,305	0,793
15	0,239	0,030	0,194	0,463	0,258	0,022	0,280	0,743
16	0,009	0,030	0,361	0,400	0,364	0,022	0,386	0,786
17	0,385	0,030	0,147	0,562	0,364	0,022	0,386	0,949
18	0,505	0,030	0,015	0,551	0,528	0,022	0,550	1,101
19	0,522	0,030	0,008	0,560	0,498	0,022	0,520	1,080
20	0,598	0,030	0,003	0,631	0,885	0,022	0,907	1,538
21	0,723	0,030	0,004	0,757	0,804	0,022	0,825	1,582
22	0,729	0,030	0,061	0,820	0,673	0,022	0,694	1,514
23	0,615	0,030	0,018	0,664	0,401	0,022	0,422	1,086
24	0,292	0,030	0,089	0,411	0,125	0,022	0,147	0,558

3.5.2 Výsledky kalibrace – průtoky

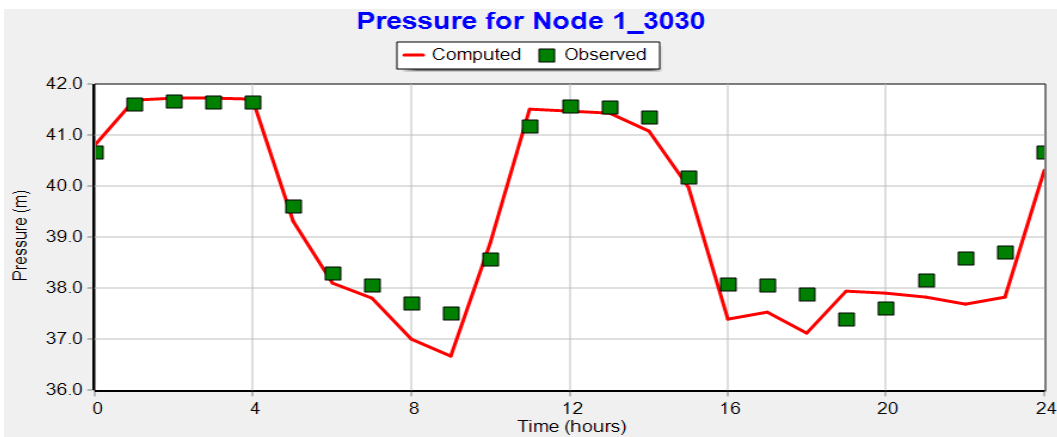


Obr. 32: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot průtoků – TP 27

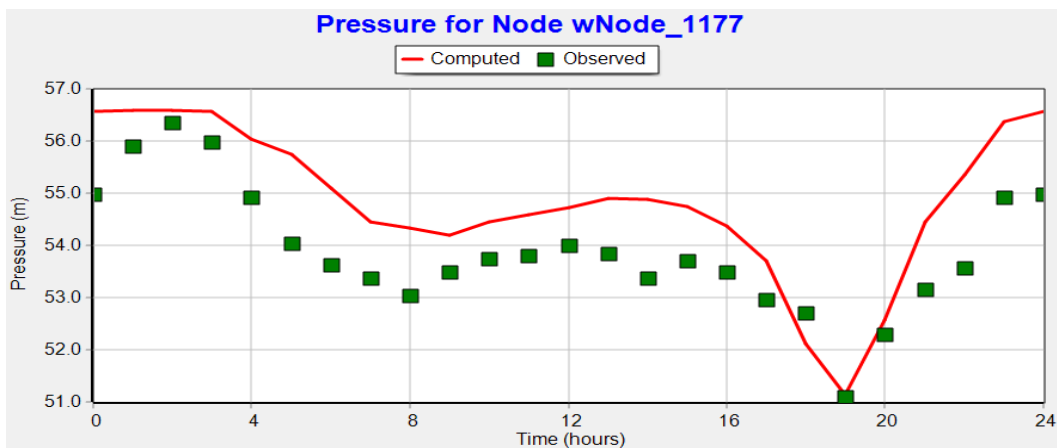


Obr. 33: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot průtoků – TP 28

3.5.3 Výsledky kalibrace – tlaky



Obr. 34: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot tlaků – TP 27



Obr. 35: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot tlaků – TP 28

3.5.4 Vyhodnocení výsledků kalibrace

Podrobným vyhodnocením tlakových poměrů byly v některých částech sítě zjištěny tlaky, které nejsou v souladu s legislativním předpisem stanovujícím požadované hodnoty tlaků (Vyhláška č. 428/2001 Sb. ve znění Vyhlášky č. 48/2014 Sb.), jsou to požadavky:

- Minimální hydrodynamický tlak v místě napojení přípojky **0,25 MPa** (**0,15 MPa** pro nejvýše dvoupodlažní zástavbu)
- Maximální hydrostatický tlak **0,60 MPa** (v odůvodněných případech **0,70 MPa**)

Ve vodovodní síti se vyskytují místa, kde jsou hodnoty minimálních hydrodynamických tlaků nižší než 0,15 MPa, ale zároveň jsou na síti místa, kde hydrostatické tlaky přesahují hodnotu 0,60 MPa, resp. 0,70 MPa.

4 MODELOVÁNÍ JAKOSTI VODY VE SKUPINOVÉM VODOVODU

Tato kapitola se věnuje modelování stáří vody ve skupinovém vodovodu s využitím verifikovaného hydraulického modelu. Cílem tohoto modelování tedy není simulovat jednotlivé ukazatele jakosti, ale maximální dosažené stáří vody, které je jedním z faktorů přímo ovlivňující jakost dodávané pitné vody a má vliv na její chuť, pach i vzhled. Se zvýšeným stářím vody je také spojeno zvýšené riziko kontaminace dodávané pitné vody způsobené množením mikroorganismů. [14]

Model jakosti EPANET aplikuje výsledky hydraulické analýzy k určení rychlosti advektivního transportu simulované látky v síti. Simulace stáří vody je pak programem interně řešena dosazením hodnot do těchto výpočtových vztahů pro transport látek, které mají za následek určení doby zdržení vody v systému. Kalibrovaný a verifikovaný hydraulický model aproximuje skutečné chování reálné sítě. Pro tento verifikovaný stav byla provedena simulace stáří vody ve vodovodní síti. Dále byl tento verifikovaný hydraulický model dle zvolených scénářů upraven za účelem simulace dopadů snižování spotřeby vody na stáří vody v síti. Tyto scénáře byly vytvořeny s ohledem na trend klesající spotřeby a celkových odběrů z vodovodních sítí, které jsou v práci uvedeny. Postup a celková metodika snižování odběrů byla volena tak, aby bylo její využití možné i pro jiné hydraulické modely formátu EPANET. [23]

Model jakosti vody byl sestaven na kvazi-stacionární bázi pro 24hodinových kroků. Pro simulaci stáří vody byl tento reprezentativní den použit celkově 14krát, což odpovídá 336 časovým krokům s délkou 1 hodina. Časový krok modelování jakosti vody byl v programu EPANET zvolen na 5 minut, to pro 14denní simulaci znamenalo 4032 výpočtů jakosti pro každý výpočtový uzel a úsek. Mísení vody ve vodojemech bylo nastaveno na kompletní a okamžité. Během simulace byly softwarem zaznamenávány maximální hodnoty stáří vody v celém vodovodním systému.

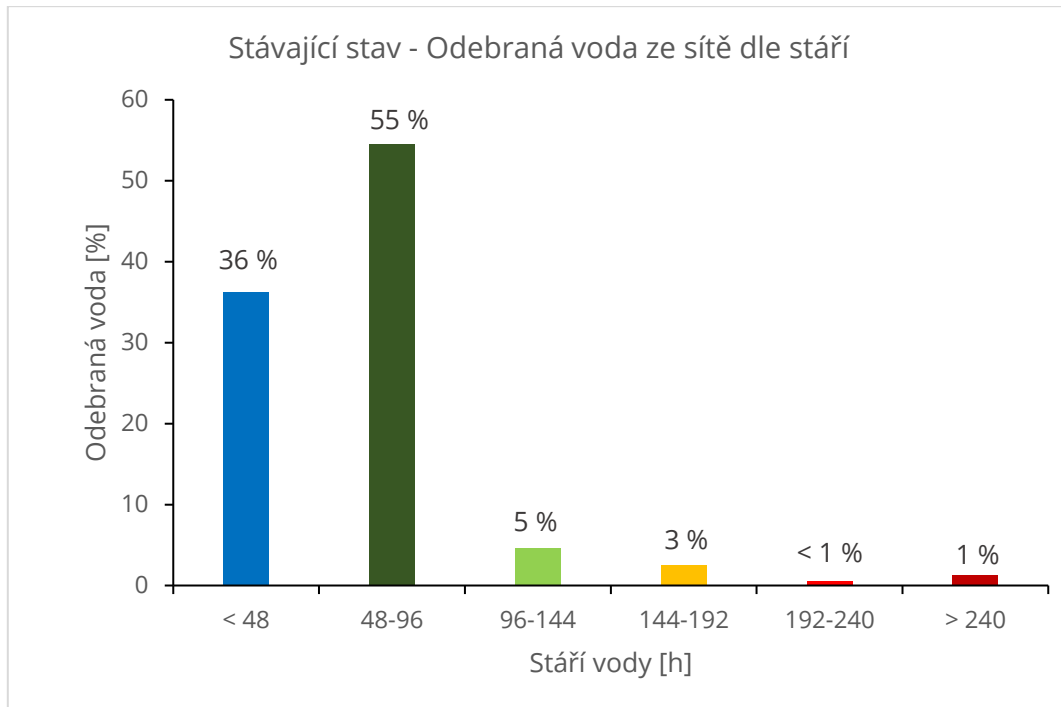
Výsledky všech simulací stáří vody byly propojením softwarových nástrojů EPANET, GIS a tabulkového procesoru analyzovány a zpracovány do následujících tabulek a grafů. Graf odebrané vody ze sítě dle stáří simuluje procentuální zastoupení odběrů ze sítě dle jejího maximálního stáří. Naopak graf stáří vody ve vodovodním potrubí zobrazuje stáří vody v síti v závislosti na délce potrubí vodovodu. Rozšířením tohoto grafu o další parametry vzniká graf stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN. Jedním z cílů tohoto grafu je poukázat na možné předimenzování jmenovitých světlostí vodovodního potrubí v analyzované síti. Tabulka stáří vody v délce sítě a DN pak obsahuje jednotlivé hodnoty délek potrubí dle v nich obsaženého maximálního stáří vody. Kvůli snazší orientaci byly u všech výstupů této práce použity stejné barvy reprezentující simulované stáří vody.

Mapové výstupy zobrazující výsledky simulace stáří vody stávajícího stavu i všech scénářů jsou zpracovány v Příloze č. 3 – Stáří vody ve vodovodní síti Skupinového vodovodu.

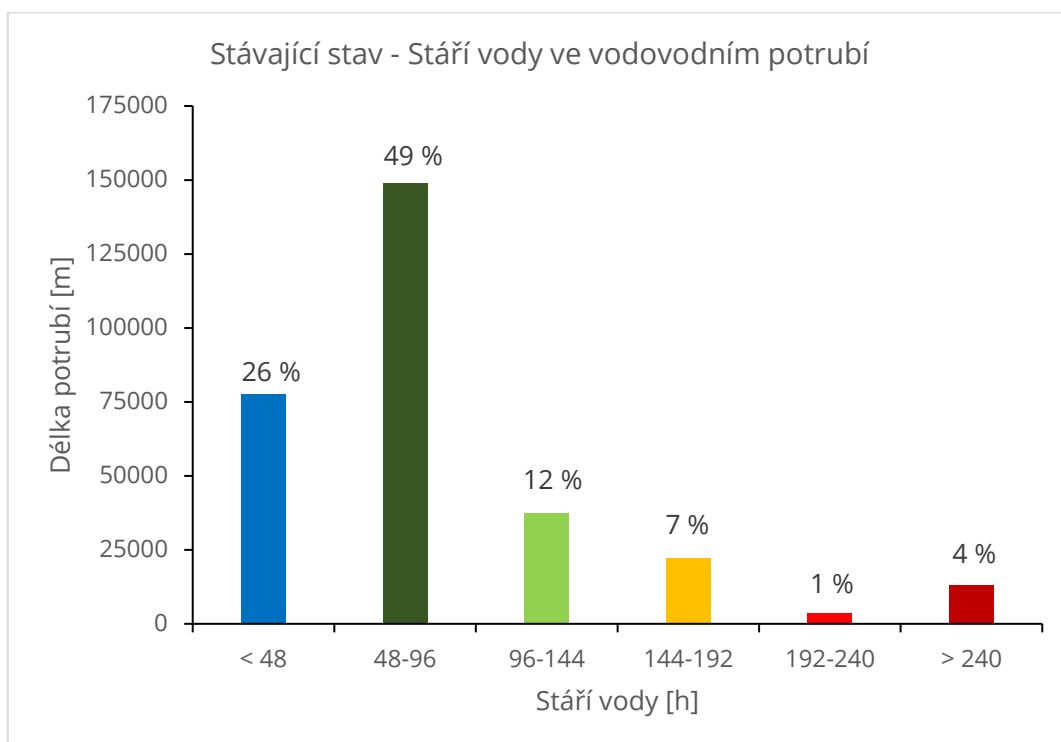
4.1 MODELOVÁNÍ STÁŘÍ VODY PRO STÁVAJÍCÍ STAV

S využitím kalibrovaného a verifikovaného hydraulického modelu vodovodní sítě byla provedena simulace stáří vody pro stávající stav v síti. Cílem této analýzy stáří vody je simulace aktuálního stavu stáří vody ve skupinovém vodovodu.

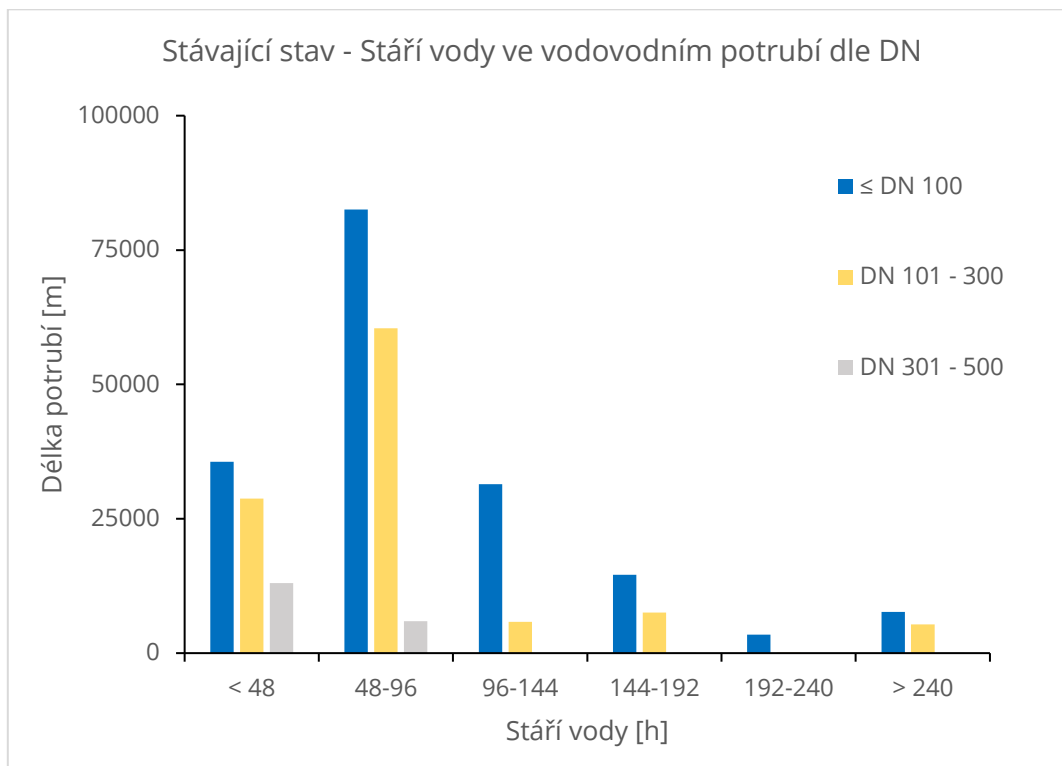
4.1.1 Výsledky simulace stáří vody pro stávající stav



Obr. 36: Stávající stav – Odebraná voda ze sítě dle stáří



Obr. 37: Stávající stav – Stáří vody ve vodovodním potrubí



Obr. 38: Stávající stav – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN

Tab. 22: Stávající stav – Stáří vody v délce sítě a dle DN

Stáří vody [h]	Délka jednotlivě [m]	Délky [%]	≤ DN 100 [%]	DN 101–300 [%]	DN 301–500 [%]
< 48	77 447	26	46	37	17
48-96	148 735	49	55	41	4
96-144	37 253	12	84	16	0
144-192	22 145	7	66	34	0
192-240	3 542	1	97	3	0
> 240	13 026	4	59	41	0
Celková délka [m]	302 148	100			

4.1.2 Úseky s vysokým stářím vody

Jak zobrazuje zmíněna mapová příloha č. 3, na vypočteném stáří vody ve vodovodní síti skupinového vodovodu je na první pohled patrné, že zvýšeným stářím vody jsou nejvíce zasažena tlaková pásma, která leží v okrajových oblastech skupinového vodovodu. Spotřeba vody v nejvíce zasažených tlakových pásmech je zastoupena zejména malými odběry místního obyvatelstva. V celém skupinovém vodovodu se také lokálně objevují úseky tzv. mrtvý konců potrubí, ve kterých se voda z důvodu nulového, nebo velmi nízkého odběru dlouhodobě akumuluje.

4.1.3 Vyhodnocení modelování stáří vody pro stávající stav

Výsledky modelování stáří vody dokazují, že nejvýznamnější problém s vysokým stářím vody vzniká v okrajových oblastech skupinového vodovodu. Stáří vody v zasažených okrajových oblastech přesáhlo hodnotu 144hodin. Nejvíce zasažená oblast je tlakovým pásmem samostatné obce, která se nachází v severní části výpočtového modelu. V tomto tlakovém pásmu přesahují vypočtené hodnoty stáří vody hodnotu 240hodin. Simulace naopak dokazuje významnost velkoodběratelů ve vodovodní síti. Stáří vody v okrajových oblastech vodovodu, ve kterých sídlí velkoodběratelé dosahovalo hodnot stáří, které se dají srovnávat s centrálním spotřebišťem skupinového vodovodu. To samé platí i pro koncové větve sítě, kterými proudí transportní průtoky. Graf odebrané vody ze sítě dle stáří (Obr. 36) ukazuje, že 55 % všech odběratelů pitné vody ze skupinového vodovodu odebírá pitnou vodu se stářím 48 až 96 hodin. Celkově 36 % odběratelů pak hospodaří s vodou, jejíž vypočtené stáří nepřesáhlo hodnotu 48hodin. Zbývající procento tvoří odběratelé nacházející se ve zmíněných postižených oblastech se zvýšeným stářím pitné vody. Následující graf (Obr. 37) poukazuje na stáří vody ve vodovodním potrubí dle zastoupení délek. Tento graf ukazuje, že 49 % všech úseků v síti obsahuje vodu se stářím 48 až 96 hodin. 26 % úseků obsahuje vodu s vypočteným stářím do 48hodin. Porovnáním výsledků prezentovaných pomocí těchto dvou grafů bylo zjištěno, že zvýšeným stářím vody je zasažena až čtvrtina všech úseků sítě skupinového vodovodu, z těchto úseků ale odebírá pitnou vodu pouze desetina všech odběratelů. Vypočtená statistická data (Tab. 22) pak mají poukázat na problém s předimenzováním vodovodních sítí, který je v práci několikrát zmíněn. Dle vypočtených dat stáří vody v úsecích se voda dlouhodobě až příliš akumuluje v potrubí se světlostí v kategorii od DN 101 do DN 300, což následně vede ke zvyšování stáří vody v celém vodovodním systému. Průměrná hodnota maximálního stáří vody celkového objemu skupinového vodovodu byla stanovena na 84,5 hodin. Nejvyšší hodnota pak přesáhla stanovený výpočtový krok 336hodin, jedná se ale o úseky mrtvých konců sítě s trvale stojící vodou, které mají minimální, nebo žádný odběr. Příloha č. 3 v GIS ukazuje vypočtené stáří vody ve výpočtových uzlech a úsecích.

4.2 SIMULACE DOPADŮ SNIŽOVÁNÍ SPOTŘEBY VODY

S předpokladem, že verifikovaný hydraulický model nabízí kvalitní aproximaci vlastnosti vody ve vodovodní síti, se nabízí různé možnosti jeho dalšího využití. Jak už bylo zmíněno v úvodu práce, tyto možnosti zahrnují například simulaci vlastností sítě po připojení nových spotřebišť nebo sledování změn hydraulických poměrů v důsledku rekonstrukcí. Plně funkční hydraulický model je tedy velmi užitečným řídicím nástrojem pro simulaci dopadů všech plánovaných změn ve vodovodním systému. Vzhledem k tomu, že spotřeba pitné vody se neustále snižuje a tím dochází ke změnám odběrů vody ze sítě, nabízí se možnost využít hydraulický model k simulaci možných budoucích dopadů snižování spotřeby. Odběry z analyzované vodovodní sítě jsou ale různé a není tak vhodné simulovat dopady snižování spotřeby pouhým globálním snížením všech odběrů ze sítě. Proto byla stanovena metodika, která třídí jednotlivé uzlové odběry do kategorií.

4.2.1 Rozdělení uzlových odběrů ze sítě dle jejich typu

Z analyzovaného skupinového vodovodu odebírají pitnou vodu nejen místní obyvatelé žijící v rodinných a bytových domech, ale i další objekty a velkoodběratelé, mezi které patří objekty veřejné vybavenosti a průmyslu. Veřejnou vybavenost ve výpočtovém modelu zastupují jednotlivé obchody, budovy pro zdravotnictví, sportovní a společenská centra, hotely a budovy místní správy. Průmysl je zastoupen výrobou zejména v oblasti stavebnictví a potravinářství. Jak už bylo zmíněno v předchozí části práce, významné objekty veřejné vybavenosti a průmyslu jsou osazeny chytrými vodoměry a jejich odběry jsou uzlově určeny dle skutečné spotřeby. Pro analýzu dopadů snižování spotřeby a odběrů z vodovodní sítě bylo nutno všechny tyto odběry rozdělit do kategorií. Vhodná kategorizace umožní lepší simulaci snižování odběrů ze sítě a poskytne přesnější a podrobnější výsledky modelování stáří vody v celém skupinovém vodovodu. Hromadná práce s daty byla provedena analýzou výpočtového souboru EPANET propojením systémů GIS a tabulkového procesoru. Celkově bylo analyzováno přibližně 7 tisíc výpočtových uzlů s hodnotami odběrů, které tvoří výpočtovou kostru hydraulického modelu. Kategorizaci výpočtových dat přibližuje následující tabulka.

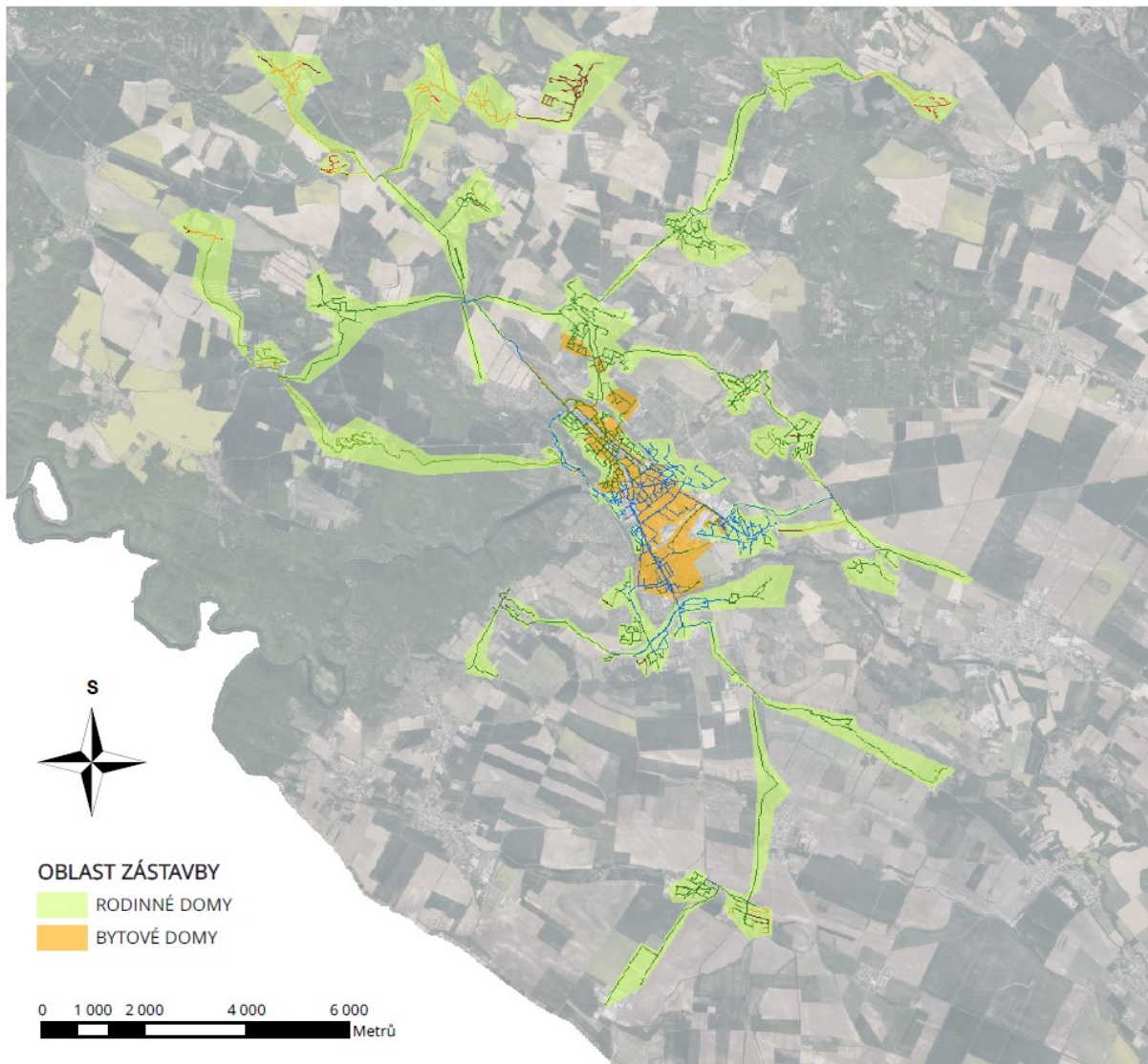
Tab. 23: Vzorová kategorizace odběrů ze sítě

ID uzlu	Uzlový odběr [$l \cdot s^{-1}$]	Typ odběru
1_105	0,001	ztráty v potrubí
1_983	0,380	průmysl
1_1002	0,140	veřejná vybavenost
1_1047	0,013	obyvatelstvo
1_1842	0,081	obyvatelstvo
1_2364	0,340	veřejná vybavenost
1_2766	0,061	obyvatelstvo

Spotřeba místního obyvatelstva

Většina odběrů ze skupinového vodovodu je zastoupena obyvatelstvem. To tvoří přibližně 60 % celkového odběrů výpočtového modelu. Uzlové odběry byly při sestavování hydraulického modelu určeny metodou součinitelů podle typu a hustoty zástavby. Typ a hustota zástavby je tedy důležitým faktorem pro zvolenou metodiku snižování odběrů, která zohledňuje počet obyvatel žijící v dané lokalitě. Pro snižování odběrů způsobené obyvatelstvem je nutné zohlednit snižování odběrů ze sítě právě této metodě. Celý skupinový vodovod byl před prováděním změn v odběrech podroben analýze v GIS a rozdělen dle typu zástavby. Odběry obyvatelstva tak byly v modelu kategorizovány dle stanovených oblastí:

- Oblast s odběry rodinných domů.
- Oblast s odběry bytových domů.



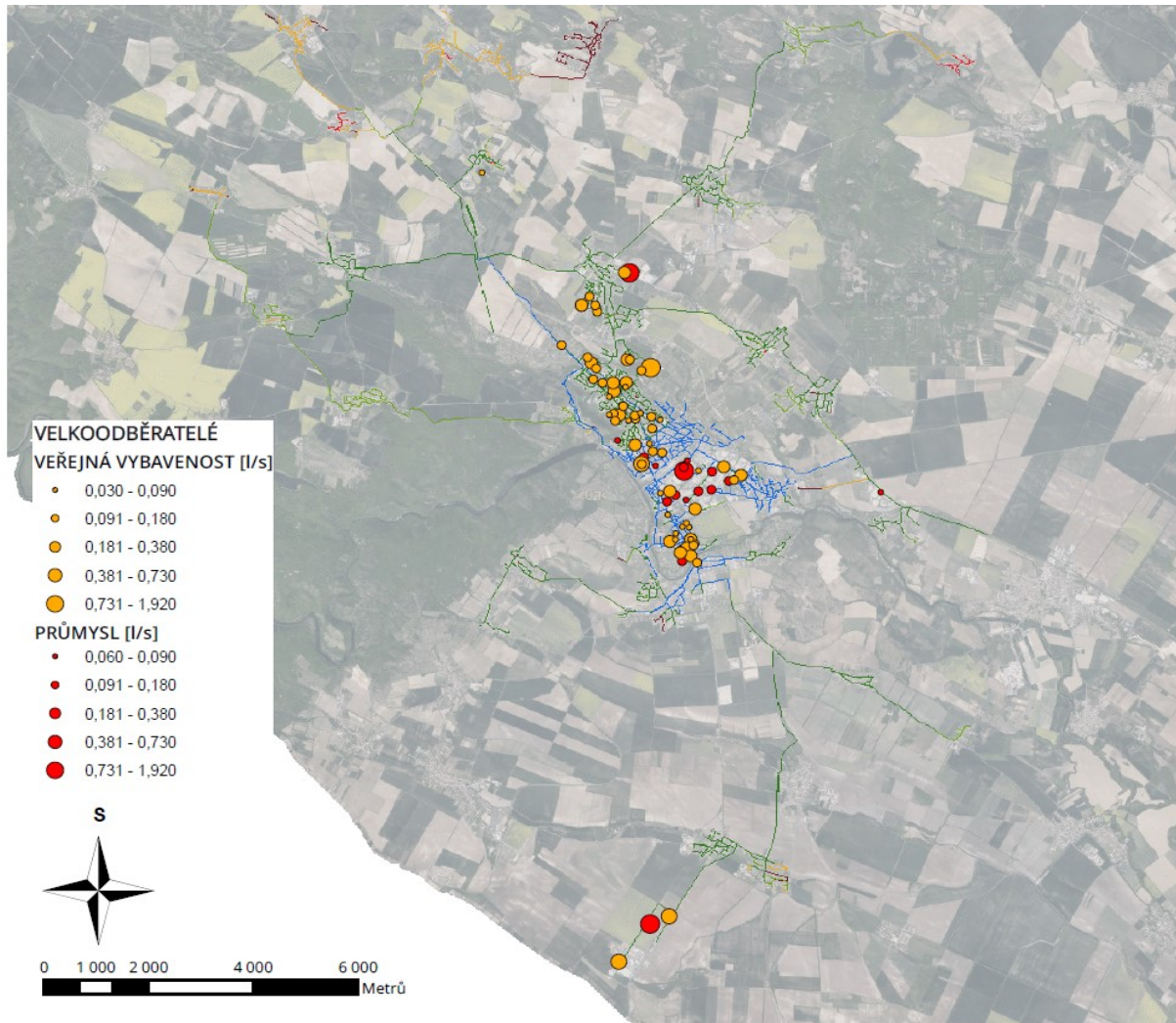
Obr. 39: Rozdělení skupinového vodovodu dle typu zástavby

Velkoodběratelé - veřejná vybavenost a průmysl

Velkoodběratelé tvoří velmi důležitou součást každého vodovodu. Jejich odběry v sítích zaručují dostatečné rychlosti, které zamezují usazování jemných nebezpečných částic v potrubí. Z hlediska stárí vody snižují dobu zdržení vody v systému a tím zvyšují celkovou jakost dodávané pitné vody. U spotřeby vody způsobené průmyslovými podniky a objekty veřejné vybavenosti lze navíc předpokládat, že již vlivem zlepšujících se technologií v průmyslu a optimalizací spotřeby kvůli snížení výdajů došlo k zastavení trendu snižování spotřeby a u velkoodběratelů nebude v budoucnu docházet k výraznému snižování odběrů pitné vody. [30]

Velkoodběratelé analyzované sítě jsou dle velikosti jejich odběrů rozděleny v příloze č. 1 na následujícím obrázku na:

- Odběry veřejné vybavenosti.
- Odběry průmyslu.



Obr. 40: Velkoodběratelé skupinového vodovodu dle velikosti odběru

Tranzitní průtoky a ztráty vody

Mezi další uzlové odběry hydraulického modelu patří ztráty vody a tranzitní průtoky. Ve výpočtovém modelu je tranzitními průtoky myšlen objem vody, který není ve skupinovém vodovodu přímo spotřebován, ale je předán do jiného vodovodu, který není součástí analyzované sítě. Všechny předávací místa jsou osazeny chytrými vodoměry. Výpočtové uzly předávacích míst tak mají nastaveny hodnoty odběrů stanovené dle měření těchto vodoměrů. K určení ztrát vody byly v modelu využity hodnoty minimálních nočních průtoků, které byly zjištěny analýzou průtoků v jednotlivých měřicích okrscích. Tyto hodnoty byly následně přerozděleny do jednotlivých uzlů v daném měřicím okrsku.

4.2.2 Simulované scénáře snižování spotřeby vody

Zvolená metodika si kladla za cíl svou adaptabilitu a možnost aplikace u všech hydraulických modelů zpracovaných ve formátu EPANET. Aplikace této metodiky je tedy možná pro všechny zpracované verifikované hydraulické modely, které jsou často ve vlastnictví vodárenských společností.

Propojením souboru nativního formátu EPANET s vhodným tabulkovým procesorem se získá nástroj pro hromadnou úpravu hodnot odběrů dle zvolených kritérií a možných scénářů. V tom to případě se jedná o scénáře reflektující dlouhodobý trend snižování spotřeby pitné vody odebrané z vodovodních sítí, který vede ke zvýšení doby zdržení ve vodovodu, zvýšení stáří vody a tím spojeným snížením jakosti distribuované pitné vody. Celkově bylo stanoveno 5 scénářů snižování odběrů ze sítě, které reflektují informace uvedené v této kapitole. Ke zvoleným scénářům nemusí nikdy přesně dojít, nicméně takto získané výsledky mohou poskytnou celkovou informaci o odolnosti analyzované vodovodní sítě proti dlouhodobému trendu snižování spotřeby. [14]

Metodika snižování odběrů - scénáře

Tab. 24: Scénáře procentuálního snížení odběrů vody z výpočtových uzlů

Typ odběru	Procentuální snížení odběrů vody [%]				
	scénář 1	scénář 2	scénář 3	scénář 4	scénář 5
Rodinné domy	-5	-10	-15	-33	-33
Bytové domy	0	0	-2	-5	-5
Veřejná vybavenost	0	0	0	0	-5
Průmysl	0	0	0	0	-2

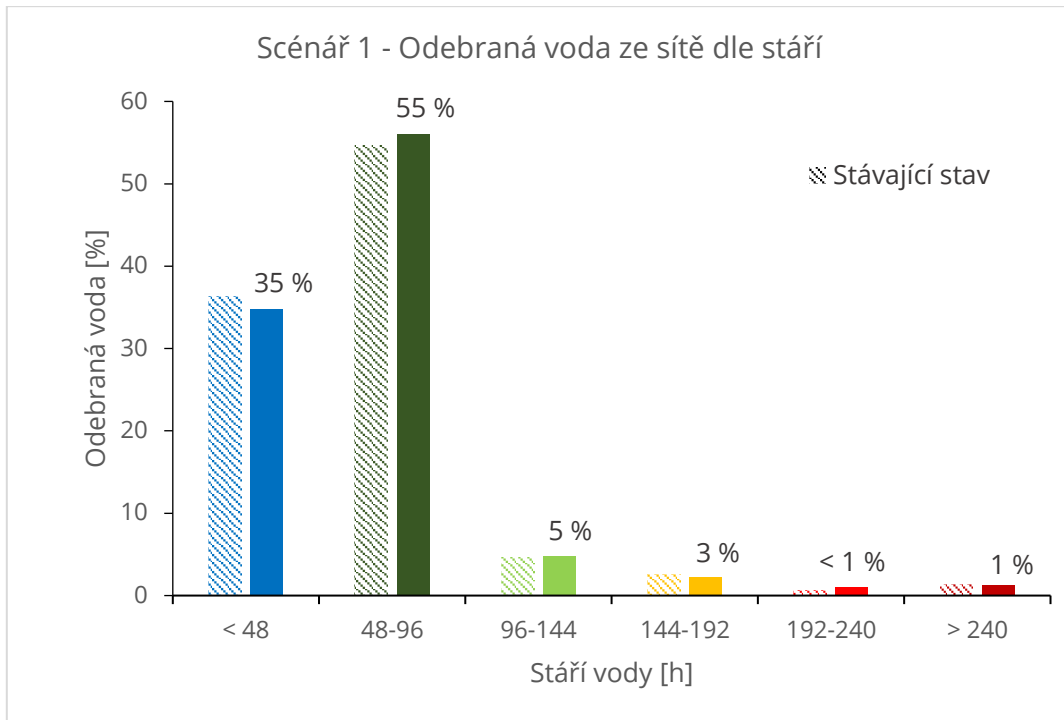
4.2.3 Výsledky analýzy stáří vody pro jednotlivé scénáře

Propojením výpočtového softwarového nástroje EPANET s tabulkovým procesorem a GIS byl získán nástroj k hromadné editaci uzlových odběrů verifikovaného hydraulického modelu dle stanovených kritérií jednotlivých scénářů. Tento nástroj může sloužit k hromadné editaci odběrů v jednotlivých tlakových pásmech, vybraných úsecích a uzlech nebo jiných oblastech skupinového vodovodu. Zpracování dat v GIS poskytuje přehlednou prezentaci výsledků. Způsob prezentace výsledných dat byl volen tak, aby bylo možné kvalitativně porovnat rozdíl mezi jednotlivými scénáři. Grafy a tabulky využívají délky potrubí v modelu, které jsou u všech scénářů stejné. Odebraná voda o určitém stáří je pak pro každý scénář přepočtena z hodnoty celkového objemu vody na procenta. Procentuální vyjádření je nutné kvůli porovnání mezi jednotlivými scénáři, protože celkové množství odebrané vody ze sítě je pro každý scénář odlišné. Následující obrázek porovnává výsledky simulovaného stáří vody jedné z okrajových oblastí skupinového vodovodu. Kompletní mapové výstupy všech scénářů v GIS jsou součástí přílohy č. 3.

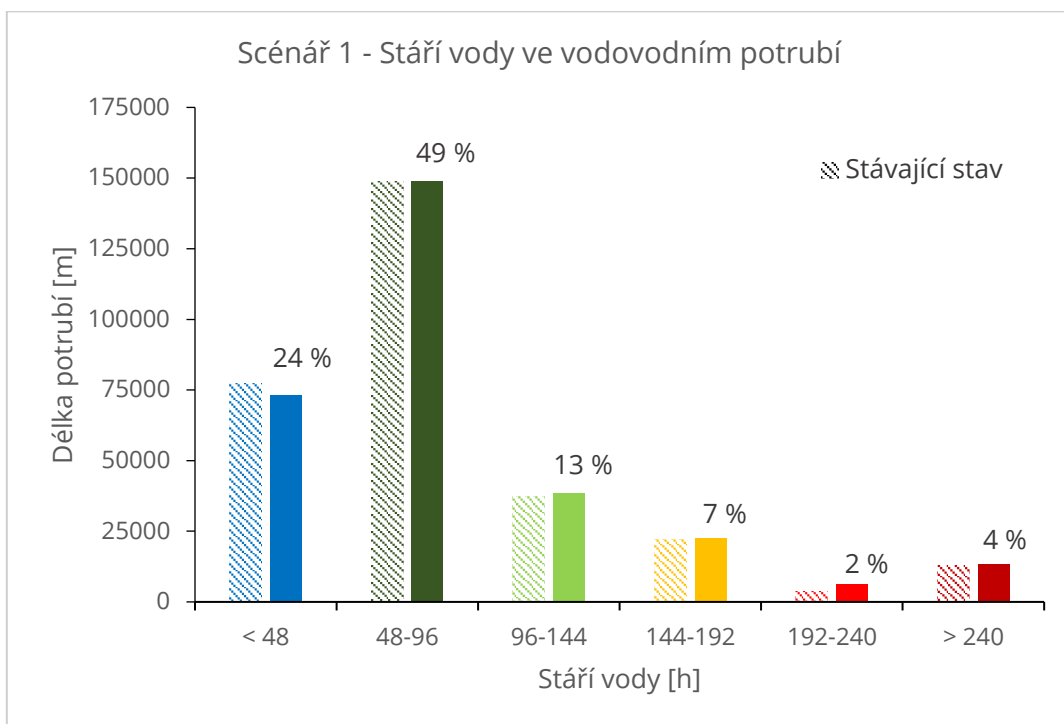


Obr. 41: Porovnání stáří vody dvou vybraných scénářů se stávajícím stavem (vlevo)

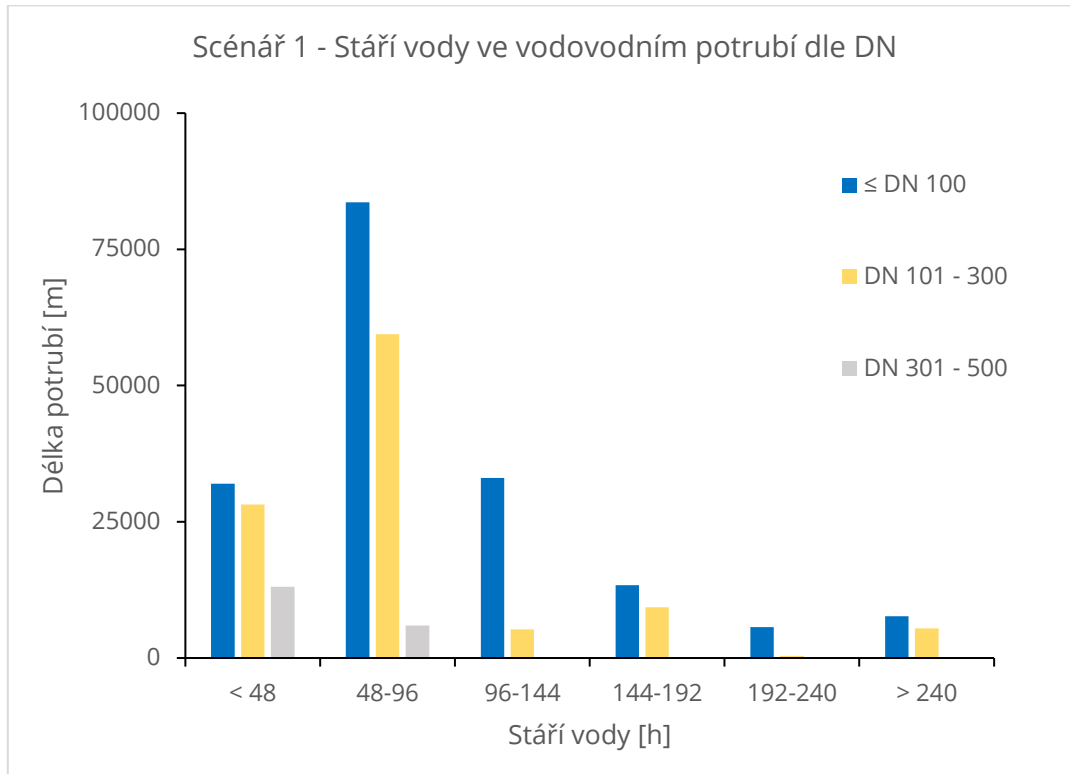
Výsledky simulace stáří vody dle scénáře 1



Obr. 42: Scénář 1 – Odebraná voda ze sítě dle stáří



Obr. 43: Scénář 1 – Stáří vody ve vodovodním potrubí



Obr. 44: Scénář 1 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN

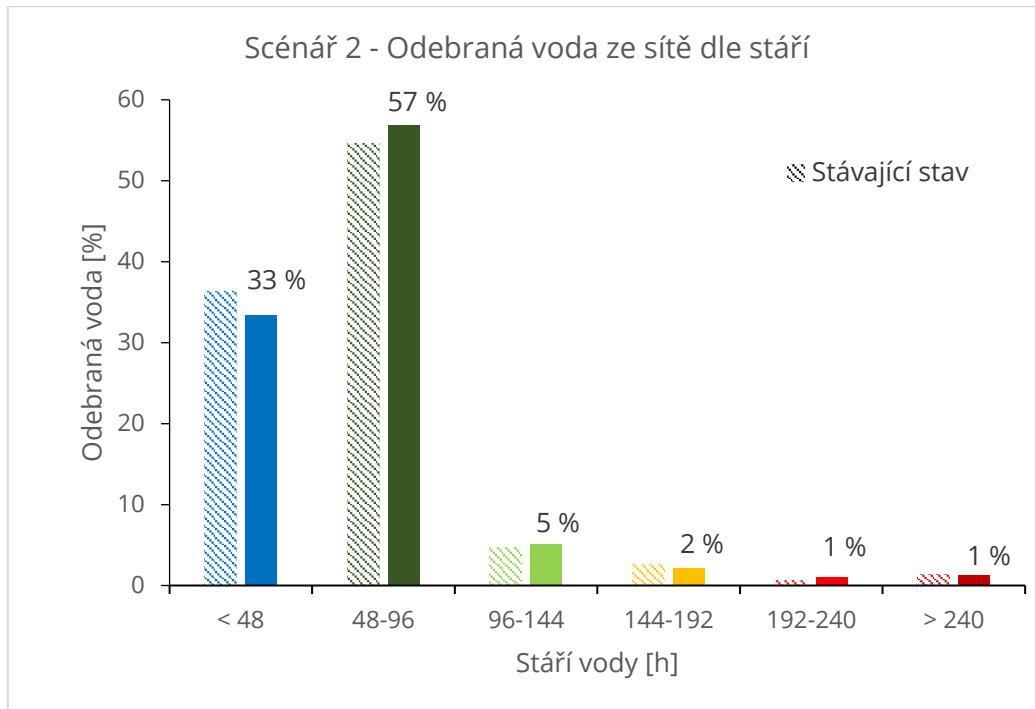
Tab. 25: Scénář 1 – Stáří vody v délce sítě a dle DN

Stáří vody [h]	Délka jednotlivě [m]	Délky [%]	≤ DN 100 [%]	DN 101–300 [%]	DN 301–500 [%]
< 48	73 193	24	44	38	18
48-96	148 814	49	56	40	4
96-144	38 296	13	86	14	0
144-192	22 643	7	59	41	0
192-240	6 076	2	93	7	0
> 240	13 126	4	58	42	0
Celková délka [m]	302 148	100			

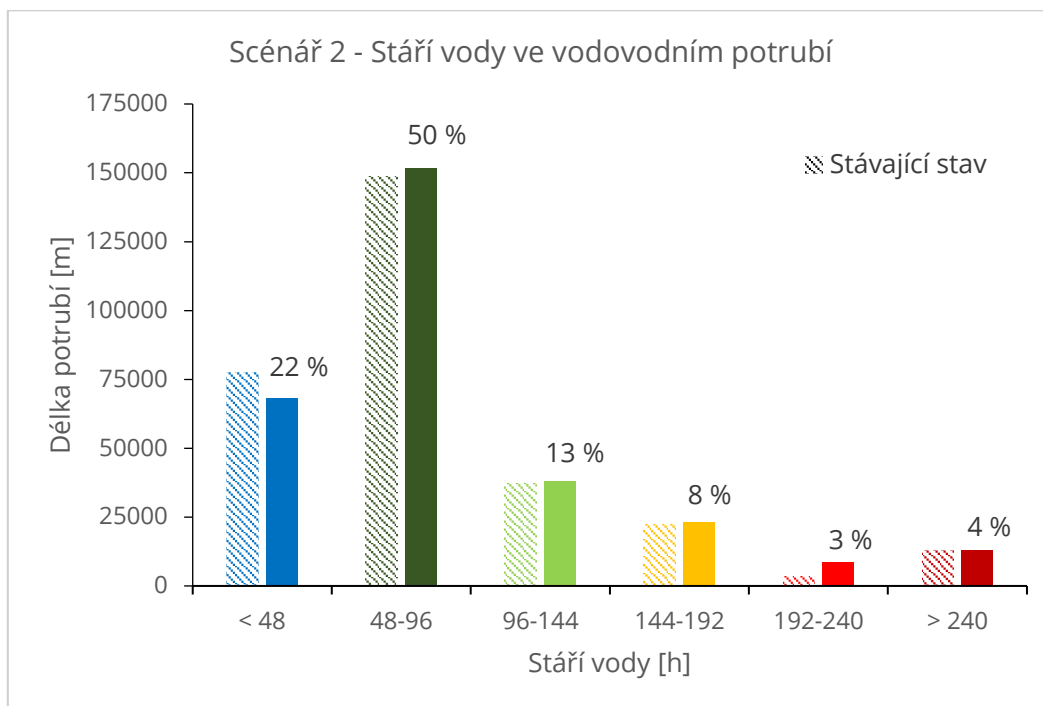
Vyhodnocení scénáře 1

První scénář počítá s 5% snížením odběrů uzlů, které v modelu představují spotřebu rodinných domů. V porovnání se stávajícím stavem došlo k jen nepatrnému navýšení stáří vody ve vodovodní síti. Průměrná hodnota maximálního stáří vody celkového objemu skupinového vodovodu byla pro scénář stanovena na 86,6 hodin, což je o 2,1 hodiny více než u stávajícího stavu.

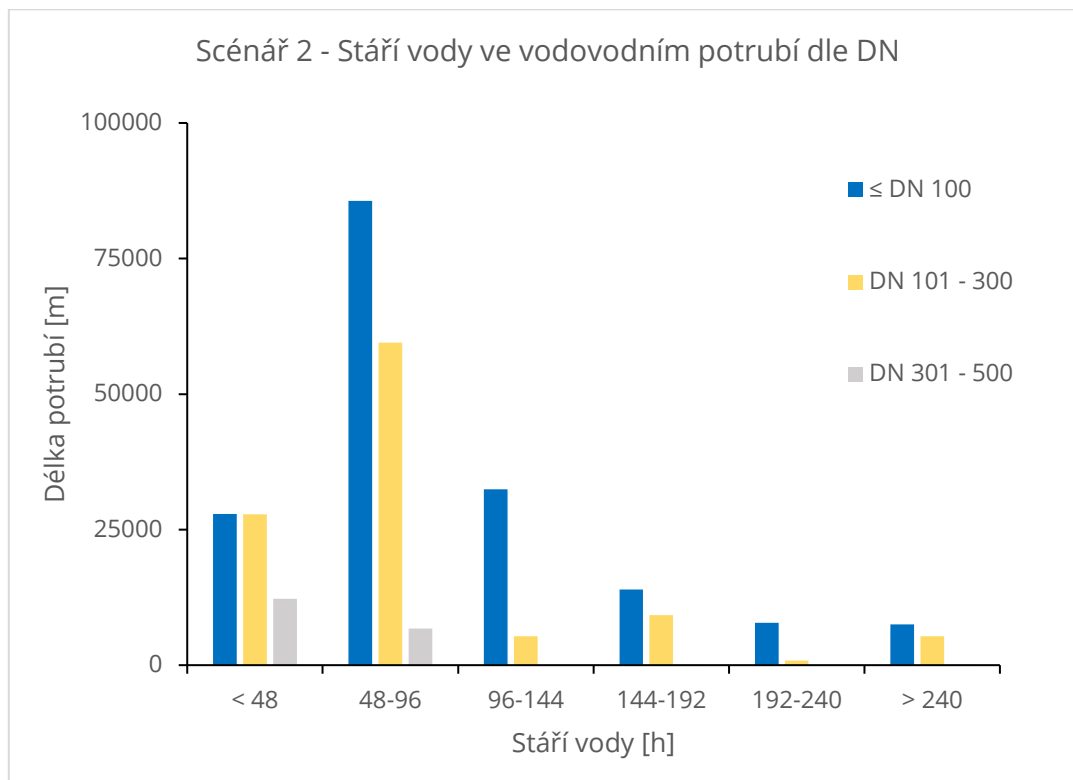
Výsledky simulace stáří vody dle scénáře 2



Obr. 45: Scénář 2 – Odebraná voda ze sítě dle stáří



Obr. 46: Scénář 2 – Stáří vody ve vodovodním potrubí



Obr. 47: Scénář 2 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN

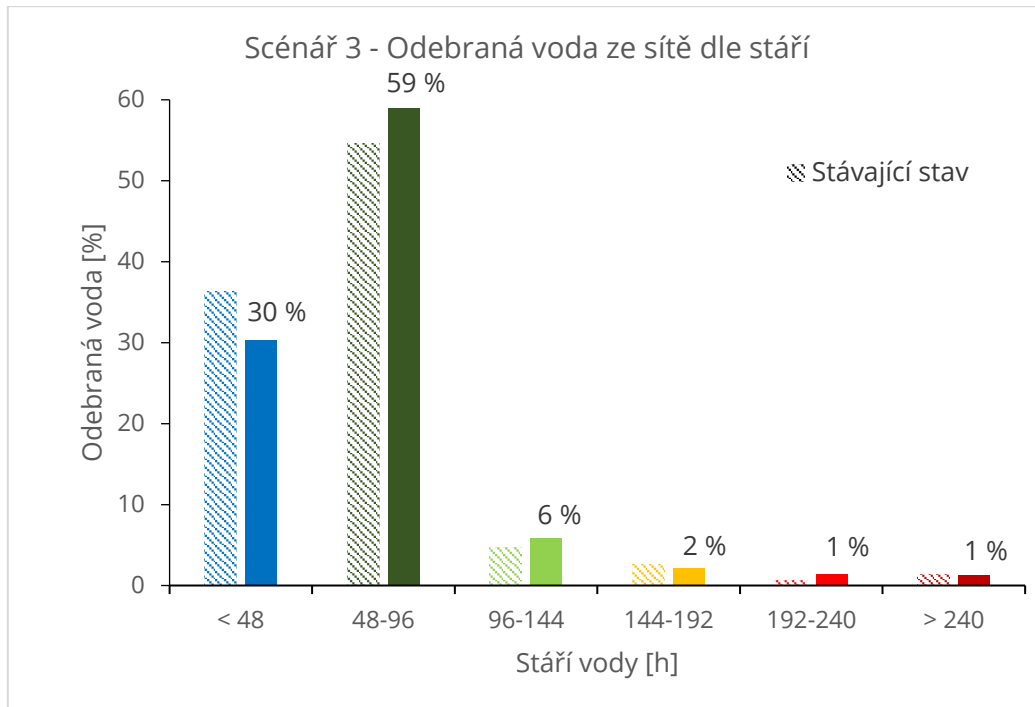
Tab. 26: Scénář 2 – Stáří vody v délce sítě a dle DN

Stáří vody [h]	Délka jednotlivě [m]	Délky [%]	≤ DN 100 [%]	DN 101–300 [%]	DN 301–500 [%]
< 48	67 961	22	41	41	18
48-96	151 701	50	56	39	4
96-144	37 772	13	86	14	0
144-192	23 190	8	60	40	0
192-240	8 660	3	90	10	0
> 240	12 864	4	58	42	0
Celková délka [m]	302 148	100			

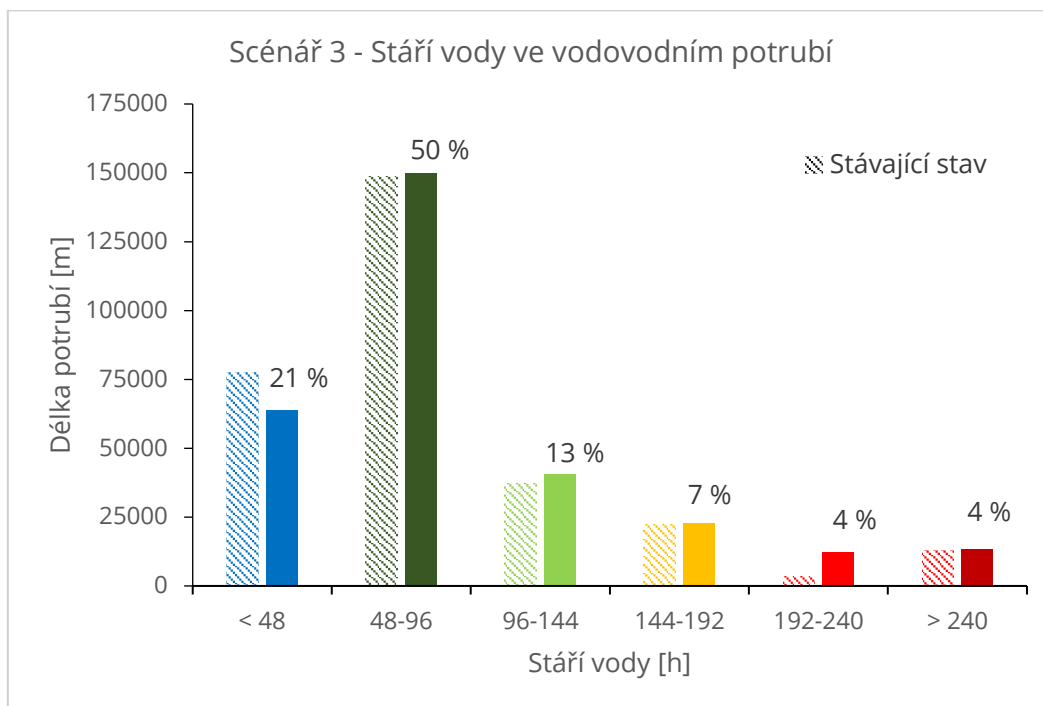
Vyhodnocení scénáře 2

U druhého scénáře s 10% snížením odběrů uzlů u rodinných domů se průměrná hodnota maximálního stáří v síti zvýšila na 88,8 hodin, což je o 4,3 hodiny více než u stávajícího stavu. Tímto snížením dochází v síti k poklesu zastoupení v kategorii stáří do 48hodin a nárůstu ostatních kategorií o jednotky procent. Rodinné domy se v analyzovaném okresním městě a přilehlých obcích nachází hlavně v okrajových oblastech skupinového vodovodu. Snížení jejich uzlových odběrů má tedy vliv hlavně na tlaková pásma v těchto oblastech zástavby.

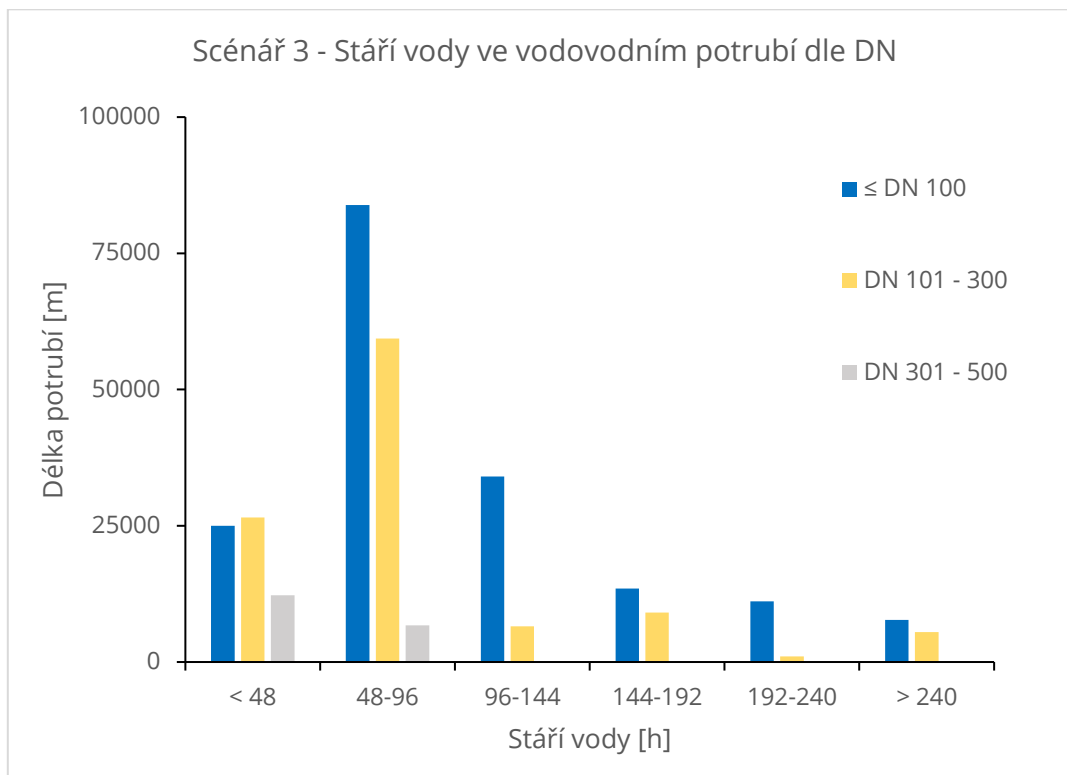
Výsledky simulace stáří vody dle scénáře 3



Obr. 48: Scénář 3 – Odebraná voda ze sítě dle stáří



Obr. 49: Scénář 3 – Stáří vody ve vodovodním potrubí



Obr. 50: Scénář 3 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN

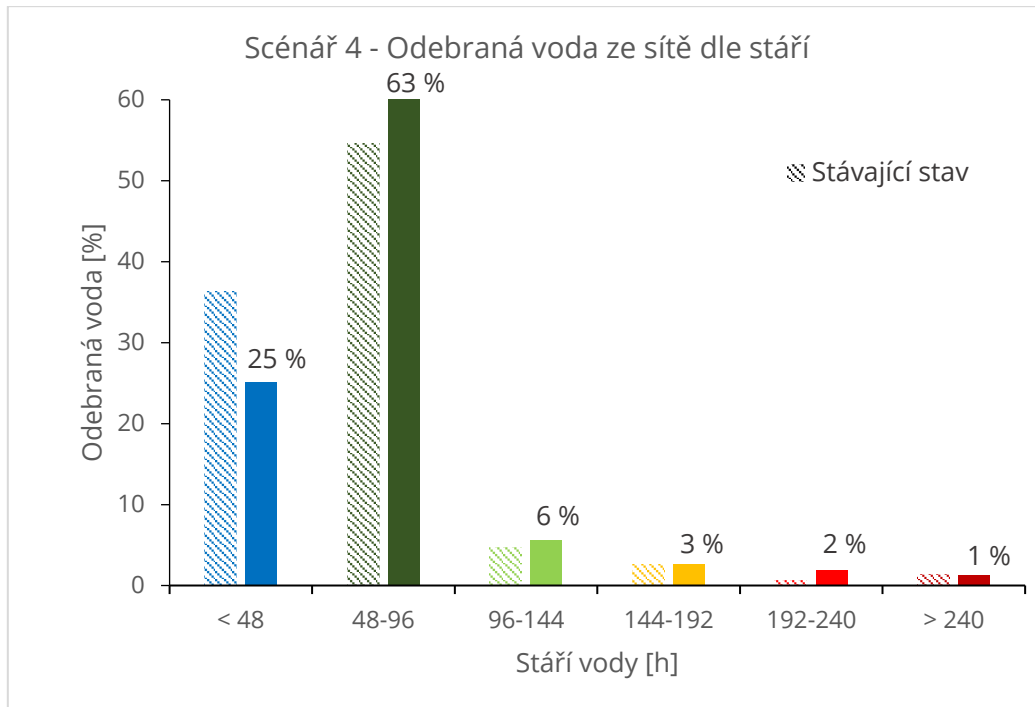
Tab. 27: Scénář 3 – Stáří vody v délce sítě a dle DN

Stáří vody [h]	Délka jednotlivě [m]	Délky [%]	≤ DN 100 [%]	DN 101–300 [%]	DN 301–500 [%]
< 48	63 768	21	39	42	19
48-96	149 855	50	56	40	4
96-144	40 545	13	84	16	0
144-192	22 539	7	60	40	0
192-240	12 182	4	91	9	0
> 240	13 258	4	58	42	0
Celková délka [m]	302 148	100			

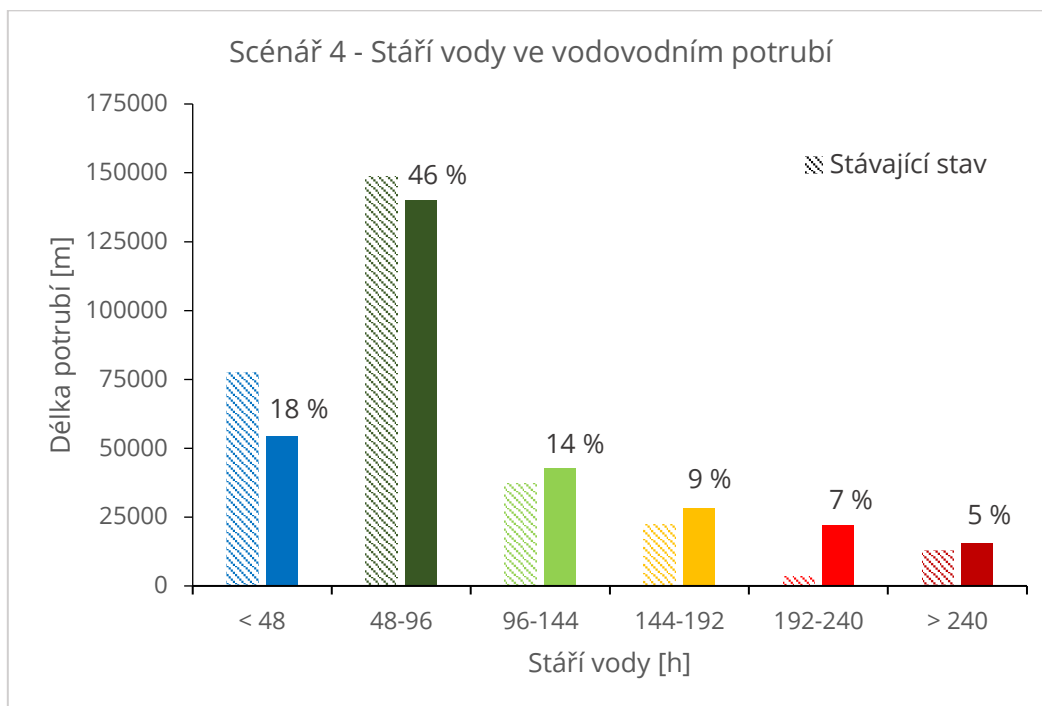
Vyhodnocení scénáře 3

Třetí scénář jako první zohledňuje snížení spotřeby vody u bytových domů. Oproti rodinným domům, u kterých v scénáři dochází ke snížení odběrů o 15 %, je snížení u bytových domů pouze 2%, a to z důvodu zohlednění zvolené metody součinitelů při tvorbě modelu. Vlivem těchto změn došlo v síti ke skokovému snížení odebrané vody ze sítě se stářím do 48hodin a nárůstu v kategorii 48-96 hodin. Ke skokovému nárůstu stáří vody ve vodovodním potrubí ale na rozdíl od předešlých scénářů dochází v kategorii 192-240 hodin, který je zřetelný hlavně v okrajových oblastech skupinového vodovodu.

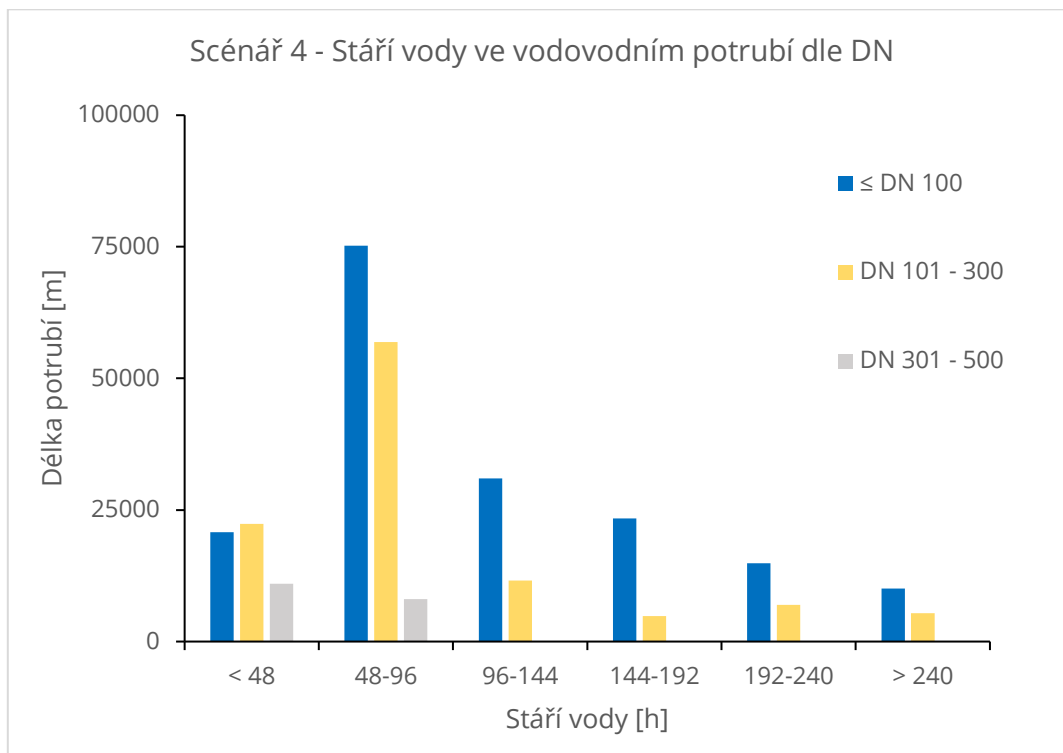
Výsledky simulace stáří vody dle scénáře 4



Obr. 51: Scénář 4 – Odebraná voda ze sítě dle stáří



Obr. 52: Scénář 4 – Stáří vody ve vodovodním potrubí



Obr. 53: Scénář 4 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN

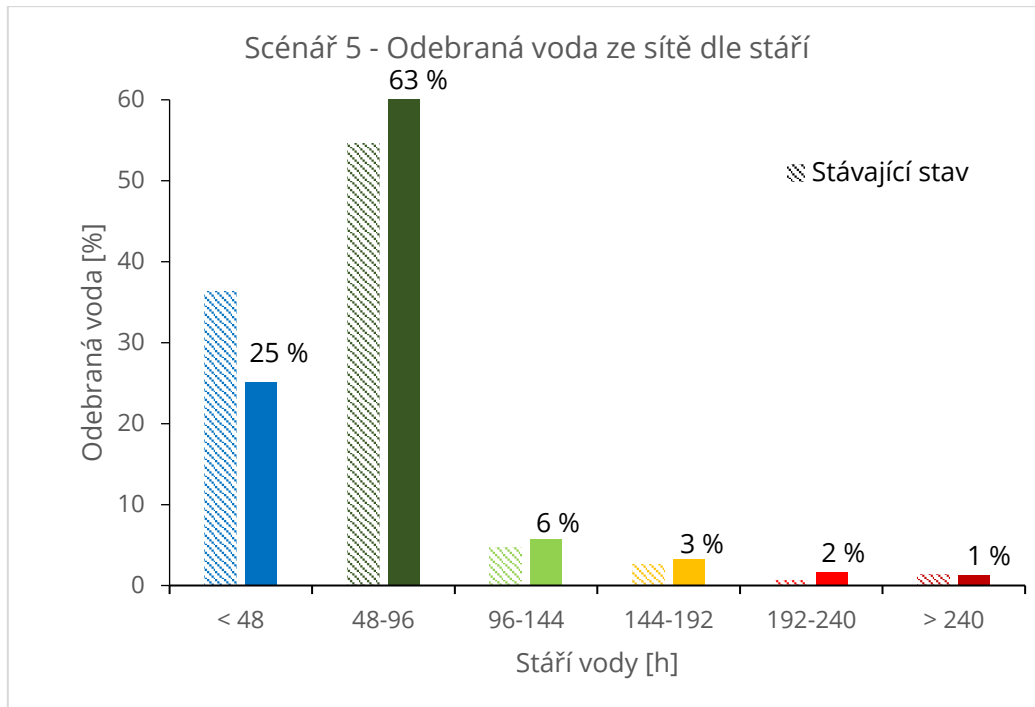
Tab. 28: Scénář 4 – Stáří vody v délce sítě a dle DN

Stáří vody [h]	Délka jednotlivě [m]	Délky [%]	≤ DN 100 [%]	DN 101–300 [%]	DN 301–500 [%]
< 48	54 109	18	38	41	20
48-96	139 977	46	54	41	6
96-144	42 617	14	73	27	0
144-192	28 212	9	83	17	0
192-240	21 804	7	68	32	0
> 240	15 429	5	65	35	0
Celková délka [m]	302 148	100			

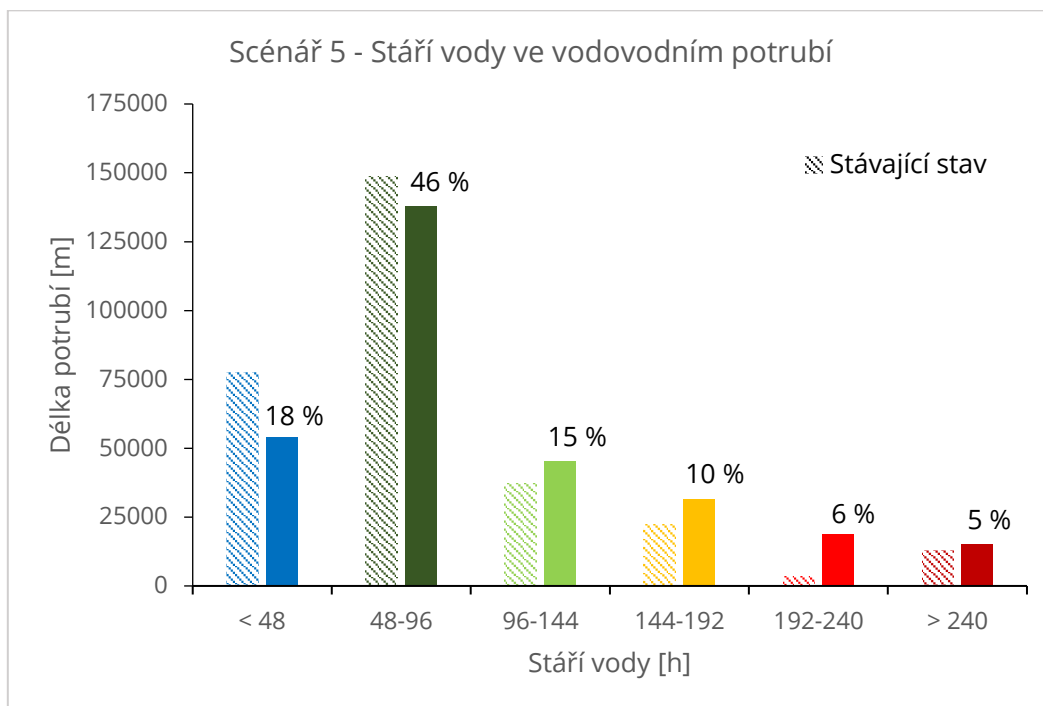
Vyhodnocení scénáře 4

Cílem čtvrtého scénáře je simulace stáří vody v síti po extrémním snížení spotřeby pitné vody v domácnostech. Odběry pitné vody v kategorii stáří do 48 hodin se vlivem těchto změn snížily o 11 %. U kategorie 48-96 hodin došlo k nárůstu odběrů o 8 %. U celkové délky potrubí a jeho obsaženém objemu dle stáří došlo k výraznému nárůstu stáří ve všech kategoriích se stářím vody větším než 96 hodin. Délkové zastoupení kategorie se stářím vody 192-240 hodin se v porovnání se stávajícím stavem zvýšilo o 18 262 m. Naopak u zastoupení délek potrubí s vodou o maximálním stářím do 48 hodin došlo ke snížení o 23 338 metrů.

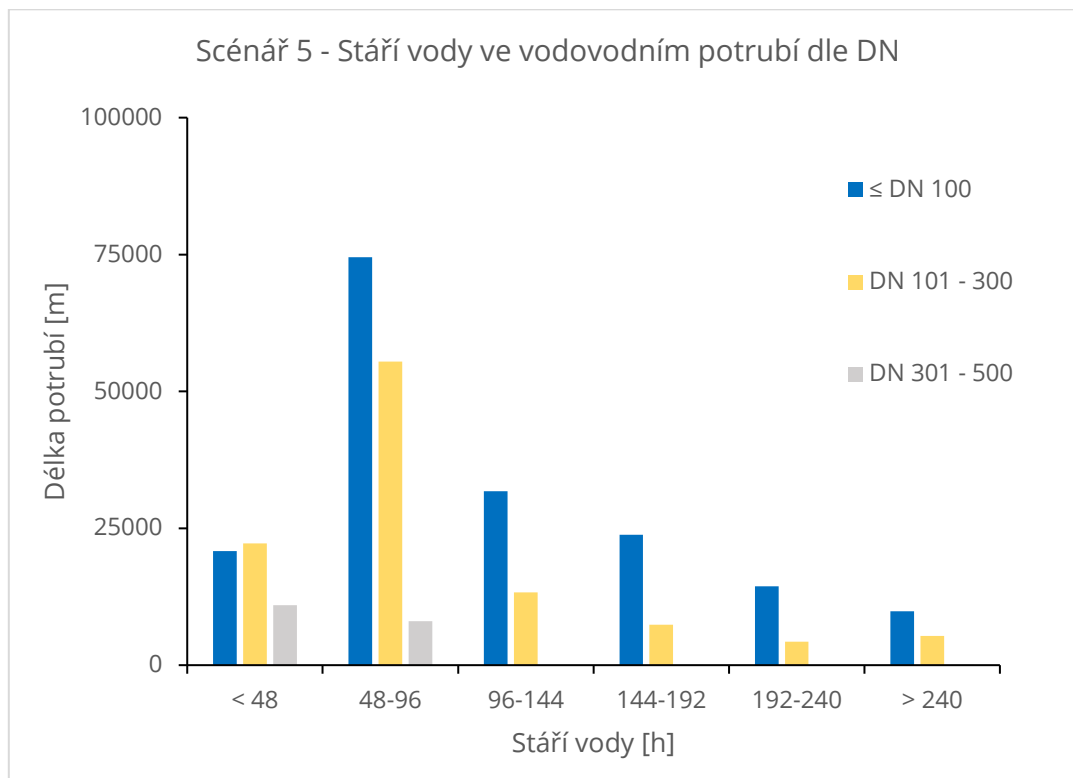
Výsledky simulace stáří vody dle scénáře 5



Obr. 54: Scénář 5 – Odebraná voda ze sítě dle stáří



Obr. 55: Scénář 5 – Stáří vody ve vodovodním potrubí



Obr. 56: Scénář 5 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN

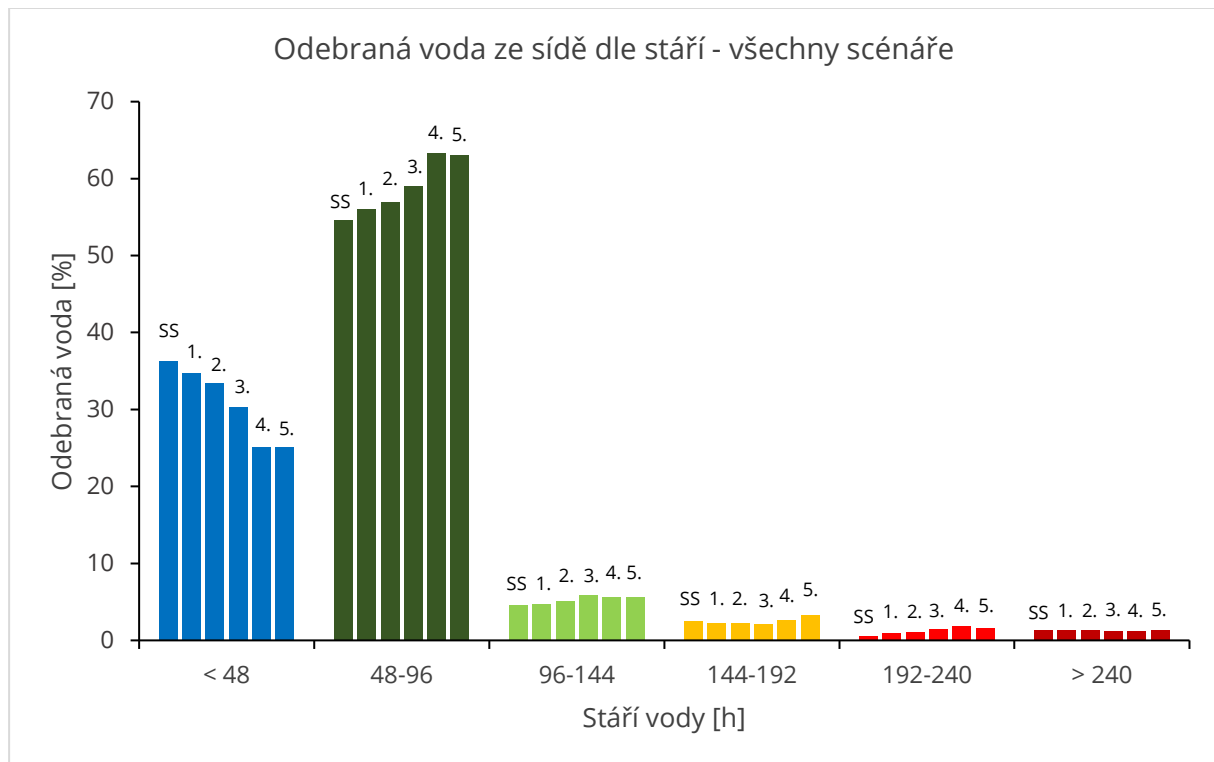
Tab. 29: Scénář 5 – Stáří vody v délce sítě a dle DN

Stáří vody [h]	Délka jednotlivě [m]	Délky [%]	≤ DN 100 [%]	DN 101–300 [%]	DN 301–500 [%]
< 48	54 030	18	39	41	20
48-96	137 857	46	54	40	6
96-144	45 067	15	71	29	0
144-192	31 232	10	76	24	0
192-240	18 747	6	77	23	0
> 240	15 215	5	65	35	0
Celková délka [m]	302 148	100			

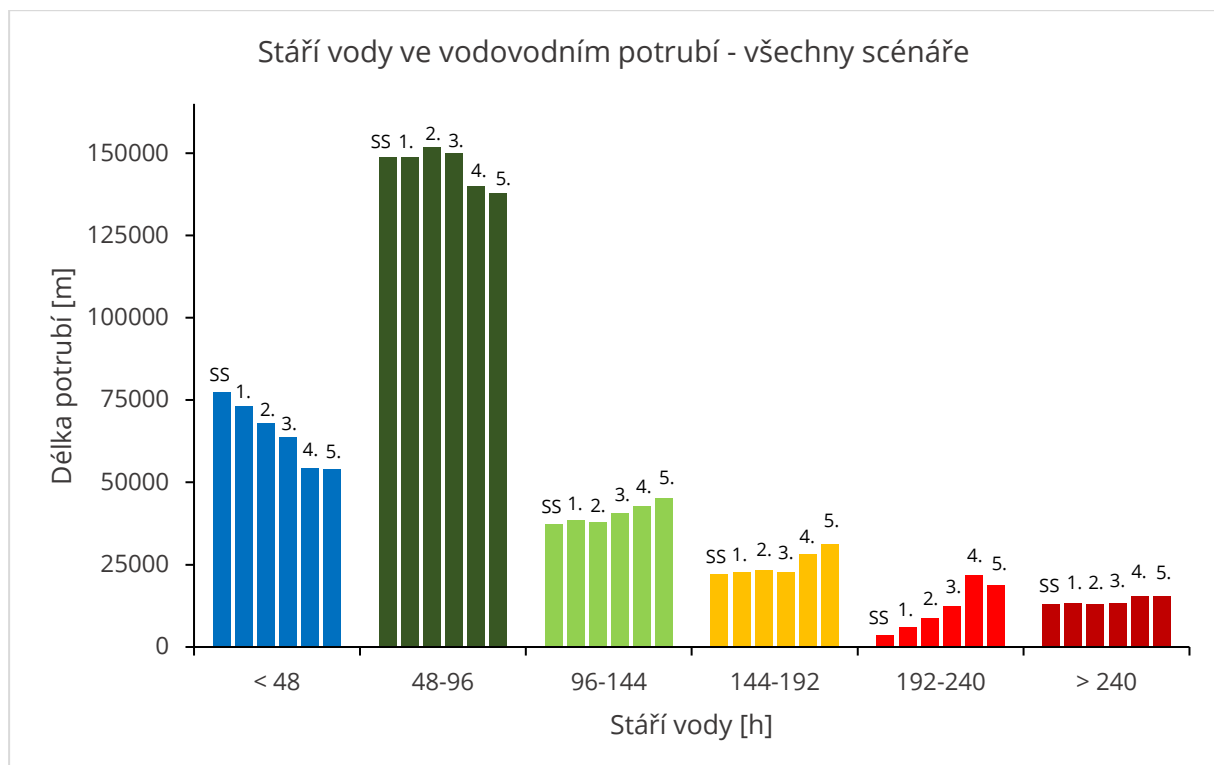
Vyhodnocení scénáře 5

Poslední scénář k maximálnímu možnému snížení spotřeby vody v domácnostech přidává snížení spotřeby u velkoodběratelů z řad průmyslu a veřejné vybavenosti. Výsledky simulace stáří jsou srovnatelné s předchozím scénářem, a to zejména v kategoriích se stářím vody do 96hodin. U ostatních kategorií došlo k ovlivnění zejména z toho důvodu, že došlo ke snížení odběrů u velkoodběratelů ležících v okrajových oblastech skupinového vodovodu, kteří mají vliv na stáří vody v úsecích nacházejících se před místem odběru velkoodběratele.

4.3 SOUHRN VÝSLEDKŮ MODELOVÁNÍ STÁŘÍ VODY VE SKUPINOVÉM VODOVODU



Obr. 57: Všechny scénáře – Odebraná voda ze sítě dle stáří



Obr. 58: Všechny scénáře – Stáří vody ve vodovodním potrubí

4.3.1 Porovnání výsledků jednotlivých scénářů

Na předchozích dvou grafech (Obr. 57 a Obr. 58) je graficky znázorněno statistické porovnání výsledků všech scénářů a stávajícího stavu. Nejvíce zastoupeným stářím vody v síti je u všech scénářů kategorie 48-96 hodin. Všechny scénáře snižování spotřeby vody mají za následek zvyšování stáří vody. Výsledky modelování stáří pro jednotlivé scénáře dokazují, že nejvýznamnější problém nastává v okrajových oblastech skupinového vodovodu. Tento problém se ale se snižujícími odběry vody v okrajových částech sítě stupňuje a ve vodovodním potrubí dochází k akumulaci vody se stářím větším než 96 hodin. Jak ukazují mapové výstupy všech scénářů v příloze č. 3, okrajové oblasti skupinového vodovodu jsou velmi náchylné na změny v odběrech, a to zejména pokud se v nich nevyskytuje velkoodběratel. Vliv velkoodběratelů na celkové stáří vody v síti lze názorně vidět v nejjihnější tlakovém pásmu skupinového vodovodu, ve kterém se i přes jeho velkou vzdálenost od centrálního spotřebiště nevyskytuje zvýšené stáří vody. Dle výsledků simulací se při budoucích rekonstrukcích sítě nabízí přehodnocení zastoupení dimenzí potrubí vybraných úseků.

4.3.2 Průměrné maximální stáří vody v síti dle zvolených scénářů

Dalším výstupem zpracovaných statistických údajů ukazujících odolnost vodovodního systému vůči snížení odběrů může být stanovení hodnoty průměrného maximálního stáří dosaženého v celé síti skupinového vodovodu. Jak ukazuje níže uvedená tabulka, rozdíl mezi extrémním scénářem č. 5 (u něhož byly sníženy uzlové odběry domácností i velkoodběratelů) a současným stavem byl modely jakosti vypočítán na 16,4 hodiny. Hodnota maximálního průměrného stáří sice opomíjí topologii jednotlivých částí vodárenské sítě, ve kterých byly při různých stavech zjištěny odlišné hodnoty stáří, ale může sloužit jako jednoduchý ukazatel vlivu dalšího snižování spotřeby na stáří vody v celé síti.

Tab. 30: Maximální průměrné stáří vody pro jednotlivé scénáře

Označení scénáře	Maximální průměrné stáří vody [h]
Stávající stav	84,5
Scénář 1	86,6
Scénář 2	88,8
Scénář 3	91,8
Scénář 4	100,4
Scénář 5	100,9

5 DISKUZE

Studie upozorňující na nepříznivý vývoj klimatické změny v globálním i lokálním měřítku ukazují, že na území České republiky by v budoucnu mohlo stále častěji docházet k dlouhotrvajícím obdobím sucha. Kombinace nedostatku atmosférických srážek a nadprůměrně vysokých teplot vzduchu se projevuje většími ztrátami vody z povodí výparem a transpirací [30]. Řídící orgány se pomocí vydání různých opatření snaží o snížení tohoto deficitu a motivují k šetrnému hospodaření s vodou, které má mít pozitivní vliv na zadržování vody v krajině. Jedním z dotačních programů podporujících snížení spotřeby vody je i zmiňovaný dotační program Dešťovka. Ten podporuje projekty zaměřené na zachytávání srážkové vody a její následné využití v domácnostech místo distribuované pitné vody z vodovodního řadu [12]. Nicméně snižování odběrů z vodovodních soustav, které jsou dimenzovány dle plánované hodinové potřeby vody v místě její budoucí spotřeby, má za následek zvyšování stáří vody v celém systému. To pak má vliv na celkovou jakost dodávané pitné vody a může vést k negativnímu ovlivnění její chutě, pachu a zbarvení. Tyto zhoršené sensorické ukazatele distribuované pitné vody odrazují odběratele od její konzumace a de facto je nutí využívat alternativní zdroje pitné vody, nejčastěji ve formě balené pitné vody. Jedná se o případ protichůdných stavů ve vodohospodářství zmíněných v úvodu práce [14]. Využívání srážkové vody ke splachování je navíc diskutabilní i z pohledu jejího samotného vlivu na zadržování vody v krajině. Srážková voda využitá ke splachování totiž vstupuje do kanalizace a po vyčištění na ČOV rychle opouští dané povodí v recipientu.

Tyhle a další v práci zmíněné faktory mohou vést k dalšímu snižování spotřeby pitné vody a zvyšování jejího stáří ve vodovodních systémech. Celý problém by se následně mohl stupňovat a mohlo by tak dojít k podobným scénářům snížení odběrů, jako jsou ty, které byly v práci vytvořeny. Práce neřeší, kdy by k těmto scénářům mohlo dojít, jen zmiňuje faktory, které zapříčiňují snižování odběrů z vodovodních systémů v důsledku snižující se spotřeby pitné vody. Vytvořené scénáře obsahují řadu nejistot. Budoucí spotřeba pitné vody, cena vodného, chování spotřebitelů a dotační politika státu reflektující neustále se zhoršující klima jsou faktory, které v dnešní době nelze přesně určit. Výsledky získané simulacemi stáří vody v této práci jsou vypočteny s využitím deterministického přístupu a se zjednodušeným definováním některých vstupů, mezi které patří například zvolená metoda součinitelů k určení uzlových odběrů dle hustoty zástavby. Práce ale zmiňuje souvislosti a celkovou provázanost všech faktorů a trendů, které se ve vodohospodářství navzájem ovlivňují.

Majitelé a provozovatelé se k vodovodním systémům chovají zpravidla konzervativně. Mezi jeden z hlavních argumentů zastávajících konzervativní smýšlení patří zejména snaha zabránit v potrubí vzniku nepravidelných jevů, které mohou vést k zákalovým událostem [16]. Hlavní problém této konzervativní filozofie je ale v dlouhodobě nízké míře adaptace na měnící se podmínky ve vodovodních sítích. Mezi typický příklad patří rekonstrukce stávajících sítí a výměna potrubí „kus za kus“, při které dochází k výměně již nevyhovujícího potrubí o jmenovité světlosti DN novým potrubím o stejné jmenovité světlosti, a to bez ověření možné vyhovující kapacity potrubí i po snížení této světlosti. S využitím matematického modelování můžeme simulovat stáří vody ve vodovodních

systemech, které poskytují celkové měřítko jakosti vody [14]. Výstupy těchto modelů by měly být reflektovány vodárenskými společnostmi a měly by vést ke změnám vedoucím k optimalizaci vodárenských sítí.

Progresivní filozofii v řízení vodovodních systémů může být dosaženo požadovaného kompromisu v optimalizaci provozu. Ať už se jedná o provedení zásahů vedoucím k zajištění samočisticích funkcí vodovodních sítí, rušení okruhů nebo zmenšování sítí, využití hydraulických modelů a analýzy jejich výstupů lze tyto optimalizační kroky nejdříve ověřit simulací, a až poté provést jejich aplikaci na reálné síti. To může vést k celkové podpoře progresivního řízení. Nicméně je podstatné vlastnictví těchto verifikovaných hydraulických modelů. V rámci zohlednění současných i budoucích změn způsobenými nízkými odběry by vlastníci vodovodních sítí měli v první fázi posoudit stávající technický stav vodovodu. V další fázi by pak mělo dojít ke zpracování hydraulického modelu a jeho verifikaci, pokud tak již jako u mnoha soustav nebylo provedeno. Konečnou fází by měla být aplikace hydraulického modelu a provádění simulací a možných modifikací s cílem dosáhnout celkového zlepšení jakostních ukazatelů pitné vody. Před samotným provedením těchto změn by ale mělo být zváženo provedení řízeného proplachu celé vodovodní sítě. [33]

6 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Cílem diplomové práce bylo provedení hydraulické analýzy vybrané vodovodní sítě se zaměřením na modelování stáří vody. Úvodem je vysvětlen význam stáří vody ve vodovodních systémech a negativní vliv stáří vody na celkovou jakost pitné vody. Ke zvýšenému stáří vody ve vodovodních systémech dochází kombinací předimenzovaných jmenovitých světlostí potrubí a dlouhodobě se snižujících odběrů, které jsou důsledkem klesající spotřeby vody. Snižování odběrů z vodovodních sítí může být způsobeno mnoha faktory.

Jedním z faktorů negativně ovlivňujících odběry z vodovodních systémů je samotná cena pitné vody. Ta se neustále zvyšuje kvůli rostoucím nákladům na její zajištění. [7]. Jelikož jsou náklady vodovodních společností hlavně fixní [31], nelze tedy předpokládat, že by za dodržení současných standardů používaných ve vodárenství došlo v budoucnu ke změně trendu rostoucích cen pitné vody. Ministerstvo financí jako cenový regulátor sice stanovilo nový cenový výměr pro stanovení ceny vodného pro období 2022-2026, jehož cílem je zabránit dalšímu zvyšování [32]. Ze souvislostí zmíněných v této práci je však patrné, že tento nový cenový výměr nebude mít požadovaný účinek a cena vody bude nadále růst. Zvyšování ceny vodného následně povede k dalšímu snížení odběrů ze sítě, negativnímu ovlivnění sensorických ukazatelů a paradoxně i k dalšímu zvýšení ceny.

S využitím matematického modelování je možné simulovat stáří vody ve vodovodních systémech [14]. V práci byl sestaven hydraulický model skupinového vodovodu, který byl kalibrován na základě dat získaných rozsáhlou měrnou kampaní. Verifikovaný hydraulický model byl následně využit k simulaci stáří vody v systému nejen pro stávající stav, ale také pro scénáře dalšího snižování odběrů vody ze skupinového vodovodu.

Simulace stáří vody lokalizovaly problematické části sítě, ve kterých dochází dlouhodobou akumulací vody v distribučním systému ke zvýšenému stáří vody. V okrajových oblastech analyzovaného skupinového vodovodu dochází ke globálnímu výskytu vysokého stáří vody. A to z důvodu nízkých průtoků a dlouho trvající dopravě vody k místu spotřeby. V centrálním spotřebišti skupinového vodovodu byl zjištěn pouze lokální výskyt úseků se zvýšeným stáří vody. Jedná se hlavně o mrtvé konce potrubí s trvale stojící vodou. Simulace dle zvolených scénářů poukazují na odolnost jednotlivých částí skupinového vodovodu proti zvyšování stáří vody způsobené snižujícími se odběry vody ze sítě. U okrajových oblastí vodovodu byla simulacemi zjištěna malá odolnost vůči snižování odběrů. To vedlo ke skokovému nárůstu stáří vody v celých tlakových pásmech. Naopak simulace jednotlivých scénářů dokazují odolnost centrálního spotřebiště a okrajových tlakových pásem, ve kterých sídlí alespoň jeden velkoodběratel pitné vody.

Výsledky simulace stáří vody ve skupinovém vodovodu ukazují na celkový význam velkoodběratelů odebírajících vodu za spotřebišťem okrajových oblastí. Hodnoty stáří vody v těchto oblastech jsou srovnatelné s hodnotami stáří vyskytujícími se v centrálním spotřebišti. To by mělo být reflektováno u projednávání nových a ve změnách stávajících územních plánů, které by po vhodném umístění jednotlivých oblastí dle typu zástavby mohly vést ke snížení rizika výskytu vysokého stáří pitné vody ve vodovodu.

Výsledky této práce by měly být reflektovány místní vodárenskou společností a měly by vést k preventivnímu programu a zajištění nápravných opatření ve vodovodní síti. Lokalizované úseky s vyskytující se vysokým stářím vody by pak měly být předmětem zvýšené pozornosti provozovatele vodovodu, kterou představuje celková četnost odběrů vzorků a časté provádění řízených proplachů vodovodní sítě. U úseků mrtvých konců potrubí a dalších okrajových částí sítě s výskytem velkého stáří vody by měla být zvážena aplikace automatických proplachovacích ventilů, které by pomocí uměle vytvořených odběrů ze sítě zajistily obměnu vody v okrajových částech sítě. Mrtvé konce potrubí s trvale stojící vodou jsou spojovány s celkově nevyhovující jakostí a častým výskytem mikroorganismů. Prostorové šíření tohoto znečištění do jiných částí sítě molekulární difuzí a disperzí by mělo být předmětem dalšího výzkumu. [33]

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Současný problém sucha v ČR: expertní stanovisko AV ČR* [online]. 2019 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.avcr.cz/export/sites/avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/files/03-2019-AVEX-SUCHO-def.pdf>
- [2] SUCHÁČEK, Tomáš. *Optimalizace tlakových poměrů ve vodovodních distribučních systémech*. Brno, 2020. 172 s., Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] ŘÍHA, Jaromír. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN isbn80-214-0827-8.
- [4] TUHOVČÁK, L., ADLER, P., KUČERA, T., RAČLAVSKÝ, J., *Vodárenství: B. Doprava vody*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2006.
- [5] BLOKKER, E. J. M., J. H. G. VREEBURG a S. G. BUCHBERGER. *Importance of demand modelling in network water quality models: a review*. Drink. Water Eng. Sci. 2008, 27-38.
- [6] *Český statistický úřad: Vodovody, kanalizace a vodní toky - 2020* [online]. [cit. 2021-9-15]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2020>
- [7] *Cena vody 2021: Vodné a stočné v 219 městech ČR* [online]. In: . 30. března 2021 [cit. 2021-9-13]. Dostupné z: <https://www.skrblik.cz/energie/voda/cena-vody/>
- [8] *Energie - vývoj cen energií na komoditních trzích* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/energie/>
- [9] *Jak šetřit pitnou vodou v domácnosti* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/bydleni/jak-na-to/clanek/jak-setrit-pitnou-vodou-v-domacnosti-40268033>
- [10] *Demografický vývoj ve městech v Jihomoravském kraji v roce 2020: Český statistický úřad* [online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/xb/demograficky-vyvoj-ve-mestech-v-jihomoravskem-kraji-v-roce-2020>
- [11] *Hradiště chce zastavit úbytek obyvatel, chystá pro ně výhody* [online], 2016. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: https://slovacky.denik.cz/zpravy_region/hradiste-chce-zastavit-ubytek-obyvatel-chysta-pro-ne-vyhody-30160309.html
- [12] *Národní program Životního prostředí: Výzva č. 12/2017: Dešťovka II* [online]. [cit. 2021-9-13]. Dostupné z: <https://www.narodniprogramzp.cz/nabidka-dotaci/detail-vyzvy/?id=50#dokumentykestazeni>
- [13] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška 252/2004 Sb.: kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody*. In: Praha: Ministerstvo Zdravotnictví
- [14] INGEDULD, Petr. *How to understand water age within your water distribution network. DHI Reservoir* [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z:

<https://blog.dhigroup.com/2017/11/13/understand-water-age-within-water-distribution-network/>

- [15] LIU, Gang, Ya ZHANG, Willem-Jan KNIBBE a Cuijie FENG. *Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review*,. *Water Research*, [online]. 2017, (116), 135-148 [cit. 2021-12-12]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.031>. ISSN 0043-1354.
- [16] VREEBURG, J.H.G. *Discolouration in drinking water systems: a particular approach* [online]. Enschede: Gildeprint BV, 2007. ISBN 978-90-74741-91-0. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/27349450_Discolouration_in_drinking_water_systems_a_particular_approach
- [17] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Effects of Water Age on Distribution System Water Quality*. Washington DC, 2002. Dostupné také z: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2007_05_18_disinfection_tcr_whitepaper_tcr_waterdistribution.pdf
- [18] SUNNY, I., P.S. HUSBAND a J. B. BOXALL. *Impact of hydraulic interventions on chronic and acute material loading and discolouration risk in drinking water distribution systems*. *Water Research* [online]. 2021 [cit. 2021-10-14]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115224>. ISSN 0043-1354. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135419309984?via%3Dihub>
- [19] DUKÁT, Petr. *Vlastnosti jemných nezpevněných sedimentů ve vodovodní síti*. Brno, 2020. 57 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jak Ručka, Ph.D.
- [20] ŘÍHA, Jaromír. *Jakost vody v povrchových vodních tocích a její matematické modelování*. Brno: NOEL 2000, c2002. ISBN 80-860-2031-2.
- [21] JANDORA, Jan. NRA017 *Matematické modelování ve vodním hospodářství: Přednáška - Věta o změně hybnosti*. Brno, 2021.
- [22] CLARK, Robert M. *Modeling Water Quality in Distribution Systems*. 2nd ed. USA: American Water Works Association, 1998. ISBN 9781583218167.
- [23] *EPANET 2.2: 1. Introduction* [online]. [cit. 2021-10-22]. Dostupné z: https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/1_introduction.html
- [24] *EPANET 2.2: 3.3. Hydraulic Simulation Model* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/3_network_model.html
- [25] *EPANET 2.2: 3.4. Water Quality Simulation Model* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/3_network_model.html
- [26] *EPANET 2.2: 12. Analysis Algorithms* [online]. [cit. 2021-10-22]. Dostupné z: https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/12_analysis_algorithms.html

- [27] *WaterGEMS: Software pro analýzu a návrh vodovodních sítí* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.bentley.com/cs/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/watergems>
- [28] *H2ONet: Model, Analyze, and Design Water Distribution Networks within AutoCAD* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.innovyze.com/en-us/products/infowater/h2onet>
- [29] Coordinate Systems. *Royal Observatory of Belgium* [online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: http://gnss.be/systems_tutorial.php
- [30] *Zpráva o stavu vodního hospodářství České republiky v roce ...: Report on state of water management in the Czech Republic: stav k ... 2020*. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky v nakl. Lesnická práce, [1997]-. ISBN 978-80-7434-570-8.
- [31] *Výroční zpráva za rok 2020: VODOVODY A KANALIZACE VSETÍN, a.s.* [online]. In: . 2020 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.vakvs.cz/media/files/report/item/files-11/ar-vak-2020---web.pdf>
- [32] ŽUROVEC, Michal Žurovec. *Nový cenový výměr zlevní předražené vodné* [online]. Ministerstvo financí České republiky, 2021-07-13 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://www.mfcr.cz/cs/aktualne/tiskove-zpravy/2021/novy-cenovy-vymer-zlevni-predrazene-vodn-42444>
- [33] RAJNOCHOVÁ, Markéta, Jan RUČKA a Tomáš SUCHÁČEK. *Význam a dlouhodobý účinek řízeného proplachu na vodovodní síti*. *Vodovod.info* [online]. 2019, 30.9.2019 [cit. 2021-12-31]. ISSN 1804-7157. Dostupné z: <http://vodovod.info/index.php/clanky/423-vyznam-a-dlouhodoby-ucinek-rizeneho-proplachu-na-vodovodni-sit#.XtFuOsAzWUm>

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vývoj specifické spotřeby vody a cen vodného a stočného v ČR [7]	3
Tab. 2: Přehled tlakových pásem (TP) skupinového vodovodu.....	25
Tab. 3: Přehled spotřeby vody v jednotlivých MO – výsledky analýzy spotřeby vody.....	27
Tab. 4: Přehled počtu validních dní v jednotlivých měřících okrcích	29
Tab. 5: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 4.....	29
Tab. 6: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 13.....	31
Tab. 7: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 22.....	32
Tab. 8: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 34.....	34
Tab. 9: Podrobné výsledky analýzy spotřeby vody – MO č. 45.....	35
Tab. 10: Spotřeba vybraných velkoodběratelů.....	37
Tab. 11: Hydraulická drsnost potrubí podle materiálu a stáří potrubí.....	38
Tab. 12: Celková délka jednotlivých skupin potrubí podle DN a materiálu potrubí.....	38
Tab. 13: Celková délka jednotlivých skupin podle potrubí dle stáří	39
Tab. 14: Koeficienty nerovnoměrnosti odběru – MO č. 1-13.....	40
Tab. 15: Koeficienty nerovnoměrnosti odběru – MO č. 14-26	41
Tab. 16: Koeficienty nerovnoměrnosti odběru – MO č. 27-39	42
Tab. 17: Koeficienty nerovnoměrnosti odběru – MO č. 40-45	42
Tab. 18: Rozdělení měřících období do etap – měření tlaků	45
Tab. 19: Realizovaná měření tlaků v tlakových pásmech	46
Tab. 20: Vybrané měření tlaků na vodovodní síti – Měrné místo 1	48
Tab. 21: Zatěžovací stavy TP 27 + TP 28	50
Tab. 22: Stávající stav – Stáří vody v délce sítě a dle DN	56
Tab. 23: Vzorová kategorizace odběrů ze sítě	58
Tab. 24: Scénáře procentuálního snížení odběrů vody z výpočtových uzlů.....	61
Tab. 25: Scénář 1 – Stáří vody v délce sítě a dle DN	63
Tab. 26: Scénář 2 – Stáří vody v délce sítě a dle DN	65
Tab. 27: Scénář 3 – Stáří vody v délce sítě a dle DN	67
Tab. 28: Scénář 4 – Stáří vody v délce sítě a dle DN	69
Tab. 29: Scénář 5 – Stáří vody v délce sítě a dle DN	71
Tab. 30: Maximální průměrné stáří vody pro jednotlivé scénáře	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Typické rozdělení stížností zákazníků vodárenských společností [16]	5
Obr. 2: Hromadění jemného nebezpečného materiálu v potrubí [15], [19].....	6
Obr. 3: Vlastnosti jemných nebezpečných částic [18], [19]	7
Obr. 4: Schéma kontrolního objemu pro odvození advektivního členu [20].....	9
Obr. 5: Schéma kontrolního objemu pro odvození difuzního členu [20].....	11
Obr. 6: Lagrangeovy souřadnice [21]	12
Obr. 7: Vývojový diagram simulace jakosti vody ve vodovodní síti [27].....	15
Obr. 8: Znázornění předpokladu kompletního mísení ve vodojemu [25].....	18
Obr. 9: Znázornění předpokladu dvou oddílového mísení ve vodojemu [25].....	19
Obr. 10: Znázornění modelu mísení Plug Flow – FIFO [25]	19
Obr. 11: Znázornění modelu mísení Plug Flow – LIFO [25]	19
Obr. 12: Reakční zóny v potrubí [25]	20
Obr. 13: Zobrazení Lagrangeovy metody řešení [26]	22
Obr. 14: Průběh spotřeby vody průměrného dne – MO č. 4.....	30
Obr. 15: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 4.....	30
Obr. 16: Průběh spotřeby vody během průměrného dne – MO č. 13.....	31
Obr. 17: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 13.....	32
Obr. 18: Průběh spotřeby vody během průměrného dne – MO č. 22.....	33
Obr. 19: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 22.....	33
Obr. 20: Průběh spotřeby vody během průměrného dne – MO č. 34.....	34
Obr. 21: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 34.....	35
Obr. 22: Průběh spotřeby vody během průměrného dne – MO č. 45.....	36
Obr. 23: Časová řada spotřeby vody v jednotlivých dnech – MO č. 45.....	36
Obr. 24: Zastoupení materiálů potrubí dle stáří	39
Obr. 25: Křivka nerovnoměrnosti odběru v MO – vyšší spotřeba.....	43
Obr. 26: Křivka nerovnoměrnosti odběru v MO – střední spotřeba.....	44
Obr. 27: Křivka nerovnoměrnosti odběru v MO – nižší spotřeba a tranzitní průtoky.....	44
Obr. 28: Osazené tlakové čidlo Sebalog P3.....	45
Obr. 29: Část zdrojového kódu pro zpracování kalibračních dat.....	48
Obr. 30: Graf měření tlaku – Měrné místo 1	49
Obr. 31: Kalibrační celek Č. 21 – TP 27 + TP 28.....	50

Obr. 32: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot průtoků – TP 27	51
Obr. 33: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot průtoků – TP 28.....	52
Obr. 34: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot tlaků – TP 27	52
Obr. 35: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot tlaků – TP 28	52
Obr. 36: Stávající stav – Odebraná voda ze sítě dle stáří	55
Obr. 37: Stávající stav – Stáří vody ve vodovodním potrubí	55
Obr. 38: Stávající stav – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN.....	56
Obr. 39: Rozdělení skupinového vodovodu dle typu zástavby	59
Obr. 40: Velkoodběratelé skupinového vodovodu dle velikosti odběru	60
Obr. 41: Porovnání stáří vody dvou vybraných scénářů se stávajícím stavem (vlevo).....	61
Obr. 42: Scénář 1 – Odebraná voda ze sítě dle stáří	62
Obr. 43: Scénář 1 – Stáří vody ve vodovodním potrubí	62
Obr. 44: Scénář 1 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN.....	63
Obr. 45: Scénář 2 – Odebraná voda ze sítě dle stáří	64
Obr. 46: Scénář 2 – Stáří vody ve vodovodním potrubí	64
Obr. 47: Scénář 2 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN.....	65
Obr. 48: Scénář 3 – Odebraná voda ze sítě dle stáří	66
Obr. 49: Scénář 3 – Stáří vody ve vodovodním potrubí	66
Obr. 50: Scénář 3 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN.....	67
Obr. 51: Scénář 4 – Odebraná voda ze sítě dle stáří	68
Obr. 52: Scénář 4 – Stáří vody ve vodovodním potrubí	68
Obr. 53: Scénář 4 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN.....	69
Obr. 54: Scénář 5 – Odebraná voda ze sítě dle stáří	70
Obr. 55: Scénář 5 – Stáří vody ve vodovodním potrubí	70
Obr. 56: Scénář 5 – Stáří vody ve vodovodním potrubí dle DN.....	71
Obr. 57: Všechny scénáře – Odebraná voda ze sítě dle stáří	72
Obr. 58: Všechny scénáře – Stáří vody ve vodovodním potrubí	72

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	... reakční plocha [m^2]
AC	... azbestocement
ATS	... automatická tlaková stanice
Bpv	... Balt po vyrovnání
c	... okamžitá hodnota koncentrace sledované látky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
$c_{k,ext}$... okamžitá hodnota koncentrace v externím zdroji [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
$c_{j x=0}$... okamžitá hodnota koncentrace látky na vstupu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
$c_{j x=L}$... okamžitá hodnota koncentrace látky na výstupu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
c_s	... okamžitá hodnota koncentrace látky v nádrži [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
ČOV	... čistírna odpadních vod
ČS	... čerpací stanice
ČSN	... česká technická norma
DBP	... vedlejší produkty dezinfekce
DN	... jmenovitá světlost
dt_{wq}	... časový krok výpočtu jakosti [s]
et	... etapa
ETE	... eternit
FIFO	... model FIFO (first-in first-out)
g	... tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
GIS	... geografický informační systém
GPS	... globální polohový systém
i	... označení časového kroku
I_k	... sada úseků vstupujících do směšovacího uzlu k
j	... úsek potrubí vystupující ze směšovacího uzlu k
JMK	... Jihomoravský kraj
k	... koeficient hydraulické drsnosti potrubí [-]
k_d	... koeficient denní nerovnoměrnosti [-]
k_h	... koeficient hodinové nerovnoměrnosti [-]
k_{ij}	... koeficient rozpadu mezi uzly i a j [s^{-1}]
k_p	... koeficient rozpadu sledované látky [s^{-1}]
LIFO	... model LIFO (last-in first-out)

L_j	... délka úseku j [m]
LT	... šedá litina
m_{H2O}	... metry vodního sloupce [m]
MNP	... minimální noční průtok
MO	... měřící okrsek
m_{otx}	... hmotnost odtékající látky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]
m_{ptx}	... hmotnosti přitékající látky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]
OC	... ocel
p	... tlak [Pa]
PE	... polyethylen
POH	... přírodní organická hmota
PR	... průmysl
PVC	... polyvinylchlorid
Q_d	... maximální denní průtok [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$], [$\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$]
Q_{dmin}	... minimální hodnota maximálního denního průtoku [$\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$]
Q_h	... maximální hodinový průtok [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]
Q_{ji}	... objemový průtok v potrubí v úseku mezi uzly i, j [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
$Q_{k,ext}$... objemový průtok vstupující z externího zdroje [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
Q_{ks}	... objemový průtok vstupující do nádrže [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
Q_{sj}	... objemový průtok vystupující z nádrže [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
Q_{MAX}	... maximální objemový průtok [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]
Q_p	... průměrný denní průtok [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]
R	... rychlost změny hmotnosti sledované látky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]
SCADA	... dispečerské řízení a sběr dat
S-JTSK	... systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SS	... stávající stav
SV	... skupinový vodovod
t	... označení časového kroku
TLT	... tvárná litina
TP	... tlakové pásmo
v	... vektor rychlosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
V	... objem vody v potrubí

VB	... veřejná vybavenost
VDJ	... vodojem
V_{ij}	... objem v potrubí v úseku mezi uzly i, j [m^3]
V_s	... akumulací objem v nádrži [m^3]
WGS84	... světový geodetický systém 1984
Δm_t	... změna hmotnosti sledované látky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]
Δm_h	... změna hmotnosti sledované látky z důvodu disperze [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]
ρ	... objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
% Q_p	... hodnota podílu minimálních nočních a průměrných průtoků [%]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Situace skupinového vodovodu	M 1:20 000
Příloha č. 2 – Měrná kampaň	M 1:20 000
Příloha č. 3 – Stáří vody ve vodovodní síti SV	M 1:20 000

SUMMARY

This work deals with hydraulic analysis of the selected water network, focusing on water age modelling. The importance of water age in water distribution systems and the negative influence of water age on the overall quality of drinking water are explained at the outset. Increased water age in water supply system is caused by a combination of oversized nominal pipe sizes and long-term decreasing water demands resulting from declining water consumption. Reductions in tap water can be caused by many factors.

The cost of drinking water is one of the factors negatively affecting water consumption. This is continuously increasing due to rising costs to hedge it [7]. As the costs of the water companies are mainly fixed [31], it cannot be assumed that there will be a change in the trend of the rising price of drinking water in the future under current standards used in the water sector. Increasing the price of water will consequently lead to a further reduction in water demands, a negative impact on the sensory indicators of distributed drinking water and, ironically, a further increase in its price.

Using mathematical modelling, it is possible to simulate the age of water in water systems [14]. Hydraulic model of a water distribution system was constructed and calibrated with data gained by an extensive measurement campaign. The Verified Hydraulic Model was subsequently used to simulate the water age in the water supply system not only for the current state, but also for scenarios of further reduction of water demands of water from the network.

Water age simulations have located problematic parts of the network in which water accumulation in the distribution system over time leads to increased water age. High water age occurs in peripheral areas of the analysed network. This is due to low flow rates and the long duration of water transport to the point of consumption. For the central consumption of the water supply network, only local occurrence of sections with increased water age was detected. Simulations under the chosen scenarios indicate the resistance of the different sections of the water network to increasing water age due to decreasing water consumption.

The results of this work should be reflected by the local water company and lead to a prevention programme and provision of remedial measures in the water network. Localized sections with a high water age occurring should then be the subject of increased attention, represented by the overall frequency of sampling and frequent management of water network flushes. Dead ends of pipes with permanently stationary water are associated with an overall unsatisfactory quality and frequent occurrence of micro-organisms. The spatial spread of this pollution to other parts of the network by molecular diffusion and dispersion should be the subject of further research [33].