VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

VYHODNOCENÍ ŘÍZENÉHO PROPLACHU VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE SYROVICE

EVALUATION OF CONTROLLEDL FLUSHING OF THE WATER SUPPLY NETWORK OF THE MUNICIPALITY OF SYROVICE

BAKALÁŘSKÁ

BACHELOR´S

AUTOR PRÁCE — ONDŘEJ ČINKA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2026

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav vodního hospodářství obcí
Student:	**Ondřej Činka**
Vedoucí práce:	**Ing. Jan Ručka, Ph.D.**
Akademický rok:	2025/26
Studijní program:	B0732A260005 Stavební inženýrství
Studijní obor:	Vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vyhodnocení řízeného proplachu vodovodní sítě obce Syrovice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci bakalářské práce bude provedeno vyhodnocení míry znečištění jednotlivých úseků vodovodního potrubí v obci Syrovice na základě údajů získaných při opakovaném proplachu vodovodní sítě v roce 2025. Zjištěná úroveň znečištění bude posuzována ve vztahu k dalším faktorům, které mohou ovlivňovat rychlost usazování nečistot v jednotlivých úsecích potrubí. Práce bude zahrnovat úvodní rešeršní část a praktickou část zaměřenou na analýzu dat. Výstupem bude tematická mapa vodovodní sítě a strukturované vyhodnocení vztahu mezi mírou znečištění a hodnocenými faktory.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Vyhodnocení informací o míře znečištění jednotlivých úseků vodovodního potrubí obce Syrovice.

Seznam doporučené literatury a podklady:

[1] Agudelo-Vera, C.; Avvedimento, S.; Boxall, J.; Creaco, E.; de Kater, H.; Di Nardo, A.; Djukic, A.; Douterelo, I.; Fish, K.E.; Iglesias Rey, P.L.; Jacimovic, N.; Jacobs, H.E.; Kapelan, Z.; Martinez Solano, J.; Montoya Pachongo, C.; Piller, O.; Quintiliani, C.; Ručka, J.; Tuhovčák, L.; Blokker, M. Drinking Water Temperature around the Globe: Understanding, Policies, Challenges and Opportunities. Water, 2020, roč. 1049, č. 12(4), s. 1-19. ISSN: 2073-4441.

[2] RUČKA, J. Základy senzorické analýzy pitné vody, možná preventivní a nápravná opatření v distribuční části vodovodu. In Základy senzorické analýzy pitné vody. Praha: Státní zdravotní ústav, 2024. s. 72-80. ISBN: 978-80-7071-451-5.

[3] RUČKA, J.; RAJNOCHOVÁ, M.; HAŠKA, A. Čištění vodovodního potrubí řízeným proplachováním po úsecích – přínosy, dostupné metody a nástroje. TZB-info, 2024, roč. srpen, č. 2024, ISSN: 1801-4399.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 4. 11. 2025

L. S.

doc. Ing. Petr Hluštík, Ph.D. vedoucí ústavu	Ing. Jan Ručka, Ph.D. vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá komplexním vyhodnocením hydraulického stavu a míry znečištění vodovodní sítě v obci Syrovice. Cílem práce bylo analyzovat příčiny zvýšeného znečištění potrubí na základě dat z řízeného proplachu 42 úseků, provedeného pomocí měřicího a čisticího robota Astacus, v kombinaci s výstupy z vytvořeného matematického modelu. V softwarových prostředích QGIS a EPANET byl sestaven model sítě a byla provedena kvazi-dynamická simulace. Výsledky prokázaly, že předimenzování sítě v obytných oblastech vede k nízkým rychlostem proudění a k nárůstu stáří vody až na hranici přesahující 50 hodin. Tyto hydraulické nedostatky jsou jednou z příčin sedimentace železitých a manganatých částí, které se usazují na koncových úsecích sítě. V závěru práce jsou provozovateli navržena konkrétní investiční a provozní opatření pro stabilizaci kvality vody, a to zejména realizace pravidelných proplachů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodovodní síť, kvalita pitné vody, řízený proplach, matematické modelování, EPANET, QGIS, stáří vody, usazování sedimentů, robot ASTACUS

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with a comprehensive evaluation of the hydraulic condition and the degree of contamination of the water distribution network in the municipality of Syrovice. The aim of the thesis was to analyze the causes of increased pipe contamination based on data from the controlled flushing of 42 sections, performed using the Astacus measuring and cleaning robot, in combination with outputs from the developed mathematical model. A model of the network was created in the QGIS and EPANET software environments, and a quasi-dynamic simulation was performed. The results demonstrated that the oversizing of the network in residential areas leads to low flow velocities and an increase in water age up to a limit exceeding 50 hours. These hydraulic deficiencies are one of the causes of the sedimentation of iron and manganese particles, which settle on the dead-end sections of the network. In the conclusion of the thesis, specific investment and operational measures for stabilizing water quality are proposed to the operator, primarily the implementation of regular flushing.

KEYWORDS

Water distribution network, drinking water quality, controlled flushing, mathematical modeling, EPANET, QGIS, water age, sediment deposition, ASTACUS robot

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace tištěné práce:

ČINKA, Ondřej. *Vyhodnocení řízeného proplachu vodovodní sítě obce Syrovice*. Bakalářská práce. Jan RUČKA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2026.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vyhodnocení řízeného proplachu vodovodní sítě obce Syrovice* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 05. 2026

Ondřej Činka
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vyhodnocení řízeného proplachu vodovodní sítě obce Syrovice* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Dále prohlašuji, že jsem při zpracování této práce využil nástrojů umělé inteligence v souladu s doporučeními a předpisy Vysokého učení technického v Brně. Nástroje umělé inteligence byly využity výhradně za účelem jazykové a stylistické korektury textu, překladu abstraktu do anglického jazyka, optimalizace struktury kapitol, vyhledávání odborných článků a informačních zdrojů. Tyto nástroje nebyly použity ke generování dat, výpočtů nebo závěrů. Za správnost, původnost myšlenek a kvalitu odevzdané práce nesu plnou a výhradní odpovědnost.

V Brně dne 28. 05. 2026

Ondřej Činka
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych upřímně poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Janu Ručkovi, Ph.D., za jeho vedení, cenné rady, přístup a čas, který mi při zpracování této práce věnoval. Také bych chtěl poděkovat své partnerce, rodině a blízkým přátelům za podporu během mého studia.

V Brně dne 28. 05. 2026

Ondřej Činka
autor práce

OBSAH

1 ÚVOD ... 8

1.1 CÍL PRÁCE ... 8

2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA PROBLEMATIKY SEKUNDÁRNÍHO ZNEČIŠTĚNÍ ... 10

2.1 Vznik a usazování částic v distribuční síti ... 10
2.1.1 Původ a charakteristika akumulovaných usazenin v potrubí ... 10
2.1.2 Hydraulické a fyzikální vysvětlení radiálního transportu ... 11
2.1.3 Proces akumulace a mobilizace ... 11

2.2 Specifika srážení manganu a železa ve vodním prostředí ... 12
2.2.1 Srážení železa a vliv úpraven vody ... 12
2.2.2 Zpožděná oxidace manganu a jeho průnik do sítě ... 12
2.2.3 Autokatalytický efekt a vliv materiálu potrubí ... 13

2.3 Vliv hydraulických podmínek a stáří vody na stabilitu kvality vody v distribuční síti 14
2.3.1 Normativní požadavky a jejich dopad na dimenzování sítě ... 14
2.3.2 Problematika hydrauliky a nízkých rychlostí proudění ... 15
2.3.3 Koncept samočisticí schopnosti a smykového napětí ... 15
2.3.4 Stáří vody a jeho vliv na kvalitu ... 16
2.3.5 Snižování koncentrace dezinfekce a biologická stabilita ... 17
2.3.6 Rizikové stavy: Mobilizace sedimentu při resuspendaci ... 18

2.4 Metody odstraňování sedimentů a udržba sítí ... 19
2.4.1 Řízený jednosměrný proplach ... 19
2.4.2 Inovativní technologie proplachu systémem Astacus ... 20

2.5 Využití hydraulických modelů v praxi ... 20
2.5.1 Analýza hydraulických parametrů a kvality vody ... 20
2.5.2 Diagnostika hydraulických parametrů a kvality vody ... 21

2.6 Využití mapových podkladů a gis pro správu sítě ... 22
2.6.1 Provozní pasport sítě ... 22
2.6.2 Tvorba map pro plánování údržby ... 22

2.7 Shrnutí teoretických poznatků a východiska pro praktickou část ... 23

3 PRAKTICKÁ ČÁST ANALÝZY VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE SYROVICE ... 24

3.1 Vodovod obce syrovice ... 24
3.1.1 Popis území ... 24
3.1.2 Vodovodní síť ... 25

3.1.3 Odběratelé pitné vody 27
3.1.4 Historické provozní problémy 27

3.2 Řízený proplach vodovodní sítě 28
3.2.1 Systém proplachu 28
3.2.2 Postup realizace 28
3.2.3 Popis technologie 29
3.2.4 Rozsah měření 29

3.3 Tvorba hydraulického modelu 30
3.3.1 Použitý softwarový nástroj 30
3.3.2 Vstupní data a topologie sítě 30
3.3.3 Analýza spotřeby vody 31
3.3.4 Definice okrajových podmínek systému 35
3.3.5 Podrobná kontrolní kalibrace modelu 36

3.4 Vyhodnocení výsledků 36
3.4.1 Nejvyšší dosažené rychlosti a stáří vody 37
3.4.2 Výškové poměry a sklon úseků 38
3.4.3 Zákal a míra znečištění 38
3.4.4 Statistická analýza a interpretace výsledků 40
3.4.5 Závěr analýzy 40

3.5 Diskuze 40

3.6 Závěry hydraulické analýzy a návrh doporučení 41

4 ZÁVĚR 42

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 43

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 48

SEZNAM OBRÁZKŮ 49

SEZNAM TABULEK 50

SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ 51

PŘÍLOHY 52

1 ÚVOD

Distribuce pitné vody je jedním z hlavních prvků infrastruktury, který má přímý a výrazný dopad na ekologii, ekonomiku a v neposlední řadě na zdraví obyvatel [7]. Přesto, že voda po opuštění úpravny musí splňovat přísné hygienické normy, koncoví zákazníci a jejich stížnosti na zhoršenou kvalitu, zabarvení a zápach, představují stálý a přetrvávající provozní problém. Toto znečištění nebývá primárně způsobeno chemickou kontaminací, ale je často důsledkem nárazového uvolnění drobných částic, které se hromadí a usazují na stěnách potrubí a při náhlé změně hydraulických podmínek jsou strženy proudem [1].

Jedním z hlavních a nejproblematičtějších prvků znečištění je mangan. Bylo zaznamenáno, že při velmi nízkých vstupních koncentracích (méně než 10 $\mu g \cdot l^{-1}$ l) má mangan schopnost během časového období, v rozsahu několika let, vytvořit na stěnách potrubí rozsáhlá ložiska [2]. Vytváření a hromadění těchto ložisek se v dnešní době nevyhnou ani moderní plastová potrubí, jelikož nánosy usazenin nepocházejí ze samotného materiálu trubek, ale pocházejí přímo z vody vlivem nedostatečného smykového napětí [3].

Hlavním přičiněním tohoto jevu je stálý hydraulický deficit [3]. Klasické vodovodní sítě v České republice jsou primárně dimenzovány na normativní požadavky požární bezpečnosti, které požadují minimální profily potrubí DN 80 a větší [4], [5]. To u obyvatelstva při běžné spotřebě vede k nízké rychlosti proudění, při které síť nedosahuje potřebné minimální rychlosti nutné pro svou samočisticí schopnost, přičemž tato minimální rychlost je v odborné literatuře definována přibližnou hodnotou 0,4 $m \cdot s^{-1}$ [6].

Toto pomalé proudění má za následek větší stáří vody v systému, což prodlužuje dobu do vyprchání zbytkového chloru a poskytuje manganu delší čas k oxidaci do jeho pevné, usazující se formy předtím, než se voda dostane ke koncovému odběrateli [7].

Pro zamezení usazování manganu a udržení čistoty sítě je při nedostatečné samočisticí schopnosti potřebná pravidelná údržba. Pro tento účel se ukazuje jako vysoce účinné čištění metodou řízeného proplachování, které oproti starším standardním metodám odstraní odolné kohezní vrstvy při značné úspoře pitné vody [8], [9]. Motivací k řešení této problematiky bylo úsilí aplikovat teoretické a praktické znalosti z oblasti matematického modelování na skutečný problém a porozumět chování sítě v čase a jeho vlivu na kvalitu vody.

1.1 CÍL PRÁCE

Tato bakalářská práce se zaměřuje především na analýzu usazování nečistot ve vodovodní síti v obci Syrovice. Cílem je vyhodnocení informací o míře znečištění jednotlivých úseků vodovodního potrubí obce Syrovice. Jakožto nástroj pro analýzu byl zhotoven matematický model soustavy, který identifikuje problémové úseky. Porovnání

vypočtených dat s reálnými daty terénu poslouží k hlubšímu pochopení chování znečištění v konkrétních podmínkách a ověření stanovené hypotézy, že dominantním faktorem znečištění vodovodního potrubí v obci Syrovice jsou samotné hydraulické podmínky v síti.

2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA PROBLEMATIKY SEKUNDÁRNÍHO ZNEČIŠTĚNÍ

Teoretická část práce pojednává o komplexním rozboru procesů, které vedou k degradaci kvality pitné vody během její dopravy ke spotřebiteli. Cílem kapitoly je objasnit hydraulické, fyzikální a chemické mechanismy vzniku a akumulace usazenin, a poukázat na konkrétní druhy znečištění v distribuční síti. Rešerše analyzuje vztah mezi dimenzováním potrubí v souladu s požadavkem technických norem, stářím vody a specifickým druhem usazenin. V závěru této kapitoly jsou představeny a shrnuty současné technologické možnosti čištění vodovodních řádů, které následně slouží jako teoretický podklad při praktické části práce.

2.1 VZNIK A USAZOVÁNÍ ČÁSTIC V DISTRIBUČNÍ SÍTI

Dodávání a zásobování obyvatelstva pitnou vodou je složitý proces, během kterého dochází k degradaci a celkovému zhoršení kvality transportované pitné vody, odborně označovanému jako sekundární znečištění. Přestože voda po opuštění úpravny musí splňovat veškerá přísně legislativní a hygienická opatření, její fyzikální, chemická i biologická nezávadnost pro lidské zdraví se v průběhu distribuce mění. Zanedbání a přehlížení těchto zásadních faktorů vede ke stížnostem koncových spotřebitelů na zhoršenou kvalitu vody a její senzorické vlastnosti, především na její zbarvení a zvýšený zákal [1].

V minulosti se pojednávalo, že hlavním zdrojem tohoto zabarvení je vnitřní koroze ocelových a litinových materiálů, ze kterých je potrubí vyrobeno, anebo průnik vnějšího znečištění do sítě. Moderní výzkumy a případové studie z posledního desetiletí však tyto předpoklady vyvracejí. Odborná literatura ukazuje, že zabarvení vody a její zákal nejsou primárně tvořeny rozpuštěnými chemickými látkami, nýbrž drobnými suspenzními částicemi, které se na vnitřních stěnách potrubí dlouhodobě akumulují [1], [3].

2.1.1 Původ a charakteristika akumulovaných usazenin v potrubí

Částice se do sítě dostávají přímo ze zdroje důsledkem separace při úpravě vody, ale samotný proces usazování začíná až v transportní síti. Jedním ze zdrojů jsou minerální sraženiny např. zoxidované železo a mangan, který se formuje na rozhraní pevné fáze potrubí a proudící vody [11].

Těmto nečistotám a jejich hromadění se nevyhne ani moderní plastové vodovodní potrubí z polyethylenu (PE) či polyvinylchloridu (PVC), které jsou obecně považovány za materiály s vysokou odolností vůči korozi. Je tedy zřejmé, že tyto usazeniny nepocházejí ze samotného materiálu. Jedná se o tzv. volné usazeniny, jež jsou připoutány k povrchu trubky pouze slabými fyzikálními silami [11].

2.1.2 Hydraulické a fyzikální vysvětlení radiálního transportu

Proces usazování těchto částic nelze vysvětlit pouze gravitační sedimentací na dně potrubí z hlediska fyzikálního a hydraulického hlediska. Je nutné poukázat i na proudění ve vodovodních sítích. V drtivé většině případů částice v turbulentním režimu tvoří souvislou vrstvu po vnitřním povrchu trubky [1].

Tím hlavním mechanismem radiálního transportu od středu potrubí směrem ke stěnám je fyzikální jev zvaný turboforéza. U turboforézy není rychlostní profil v potrubí turbulentního proudění homogenní. Ve středu profilu je rychlost a míra mísení nejvyšší, avšak těsně u stěny potrubí vniká tzv. laminární neboli viskózní podvrstva, kde se rychlost proudění blíží nule [10].

Turboforéza je fyzikální jev, při kterém se malé částice nesené v turbulentním proudění přirozeně přesouvají z míst s vysokou turbulencí do míst s turbulencí nižší [29].

2.1.3 Proces akumulace a mobilizace

Když jsou částice odvedeny do blízkosti stěny, začnou na ně působit lokální adhezní a kohezní síly (např. van der Waalsovy síly). Hlavním důvodem, proč se částice zachytí a formují soudržnou vrstvu je vliv těchto sil. Podle výzkumu Husbanda a Boxalla (2011) není tento růst ustálený v dynamické rovnováze a není nekonečný. Struktura a pevnost této vrstvy jsou přímo úměrné smykovému napětí odpovídajícímu dané rychlosti proudění. Zmíněnému napětí je potrubí v rámci běžného provozu vystaveno. Pokud v samotné vodovodní síti panují dlouhodobě velmi nízké rychlosti proudění, tato vrstva nepřetržitě narůstá, až se následně stává tzv. rezervoárem pro budoucí problémy [3].

Hlavní problémy a stížnosti cílových odběratelů nastávají ve chvíli, kdy dojde k narušení výše zmíněné rovnováhy, tedy k náhlé změně hydraulických podmínek v distribuční síti, ke zvýšení rychlosti proudění, smykového napětí a resuspenzi materiálu v pitné vodě. Může se jednat o mimořádný odběr, např. napouštění bazénů, hašení požáru, havárie na síti. Jestliže se na daném úseku takto náhle zvýší rychlost proudění, s ním i na stěnách naroste smykové napětí natolik, že překoná soudržnost naakumulovaných usazených částic. Tím dochází k jejich okamžité mobilizaci, stržení do proudu a následnému transportu ke koncovým zákazníkům [1], [3].

Z hlediska hydrauliky se van der Waalsovy síly podílejí na adhezi a kohezi pitné vody v pórovitých materiálech, což určuje chování vody vázané v jemnozrnných zeminách a procesy kapilárního vzlínání ve stavebních konstrukcích. V oblasti vodárenství a technologie čištění vod je tento efekt zásadní pro procesy koagulace a flokulace, jelikož po chemickém vyrušení odpudivých elektrostatických nábojů umožňuje shlukování nečistot do vloček. V hydraulice se podstata těchto interakcí odráží na viskozitě a vnitřním tření kapalin, z čehož v praxi přímo vyplývají výpočty hydraulických ztrát třením v potrubí [30].

2.2 SPECIFIKA SRÁŽENÍ MANGANU A ŽELEZA VE VODNÍM PROSTŘEDÍ

Železo a mangan se v povrchových a podzemních vodách vyskytují přirozeně, nejčastěji ve formě iontů Fe^{2+} a Mn^{2+}. I když se jedná o chemicky příbuzné přechodné kovy, které se v legislativě i při vodárenské praxi často řeší společně, jejich působení v reálném provozu distribuční sítě je diametrálně odlišné. Zásadní rozdíl spočívá především v kinetice jejich oxidace, tedy v rychlosti, s jakou přecházejí z rozpuštěné formy do formy pevných, nerozpustných sraženin [12], [13].

2.2.1 Srážení železa a vliv úpraven vody

Závislost rychlosti oxidace rozpuštěného železa na nerozpustné trojmocné železo (Fe^{3+}) je závislá na hodnotě pH a přítomnosti oxidačních činidel. V pitné vodě s neutrálním až mírně zásaditým pH (7,0 až 7,5) probíhá oxidace železa velmi rychle. Přidáním dezinfekčních prostředků na bázi chloru, anebo i pouhé provzdušnění samotné vody (aerace) v úpravně, tento proces urychlí natolik, že se železo vysráží do podoby vloček prakticky okamžitě [12].

Velká část železa je proto zachycena už na pískových filtrech v úpravně vody, popřípadě dále v akumulačním vodojemu. Z toho vyplývá, že do distribuční sítě se železo dostává v rozpuštěné formě jen ve velmi omezeném množství.

2.2.2 Zpožděná oxidace manganu a jeho průnik do sítě

Na rozdíl od železa je mangan z hlediska oxidační kinetiky mnohem stabilnější. U pitné vody probíhá oxidace při běžném neutrálním pH pouhým rozpuštěným kyslíkem výrazně pomaleji než u železa [12]. Významným problémem při použití běžných dávek chloru, anebo chlornanu sodného je skutečnost, že při pH okolo 7,0 nejsou schopny mangan rychle zoxidovat. Proto by k jeho okamžitému vysrážení bylo potřeba uměle navýšit pH vody nad hodnotu 8,5, nebo v úpravně vody či vodojemu aplikovat silnější oxidační činidla jako např. ozon či manganistan draselný ($KMnO_4$) [13].

Teoretické předpoklady naznačují, že přestože by aplikace zmíněných silných oxidačních činidel pronikání manganu do distribuční sítě rychle zamezila, v reálné praxi se od jejich plošného nasazení proti pomalé oxidaci manganu často upouští. Důvodem jsou závažná technologická a hygienická rizika [12].

Problémy týkající se využití ozonu jako oxidačního činidla

Zásadním problémem ozonu je jeho vysoká reaktivita s přirozeně se vyskytujícími ionty bromidů obsaženými ve vodě. Kvůli jejich reakci a oxidaci na bromičnany se stávají vysoce toxickými a karcinogenními pro lidské zdraví, a tudíž je nutné, aby podléhaly přísným hygienickým limitům [15]. Druhým hlavním problémem ozonizace je narušení biologické stability vody. Pokud by po této úpravě ozonem nenásledovala důkladná filtrace pitné

vody (např. přes aktivní uhlí), staly by se tyto látky snadno dostupnou živinou pro mikroorganismy [12].

Problémy týkající se využití $KMnO_4$ jako oxidačního činidla

Z provozního hlediska je hlavním úskalím manganistanu draselného jeho náročnost na přesnost dávkování, které musí reagovat na proměnlivou kvalitu vody. Již při menším předávkování totiž proniká nezreagovaný manganistan přes filtry do distribuční sítě. To má za následek zbarvení vody u koncových spotřebitelů do růžových až nafialovělých odstínů. Tento jev představuje nejen provozní havárii, ale při vyšších koncentracích i zdravotní riziko v podobě toxicity [13]. Dalším podstatným problémem spojeným s manganistanem draselným je jeho samotná reakce, při které vzniká velké množství nerozpustného oxidu manganičitého (MnO_2). Tento kal se usazuje v pórech pískových filtrů, způsobuje jejich ucpávání, tím zvyšuje spotřebu prací vody a tlakové ztráty v celém systému [13].

Z těchto důvodů se moderní vodárenské technologie vyhýbají rizikům spojeným s vedlejšími produkty a provozními problémy ozonu a manganistanu draselného. Namísto této agresivní chemie se tak přiklánějí k bezpečnějšímu a méně problematickému biologickému řešení.

Pokud se uměle nenavýší pH vody nad hodnotu 8,5, či se neaplikují silnější oxidační činidla, jako například předem zmíněný ozon nebo $KMnO_4$, dostane se mangan snadno skrz akumulační vodojem do sítě. Voda opouštějící vodojem je tak opticky čistá a splňuje přísně stanovené hygienické normy, tudíž vykazuje koncentrace manganu i pod hodnotou 10 $\mu g \cdot l^{-1}$. Rozpuštěný mangan tak vstupuje do distribuční sítě, která se následně stává jeho primárním chemickým reaktorem [2], [13]. Vzhledem ke zmíněné problematice potřebuje mangan ke své oxidaci a tvorbě černého MnO_2 desítky hodin. Tento čas získává ve chvíli, kdy voda vlivem nízkých průtokových rychlostí dlouhodobě stagnuje v potrubí a narůstá její stáří.

2.2.3 Autokatalytický efekt a vliv materiálu potrubí

Proces tohoto hromadění manganu v síti je umocněn autokatalytickým efektem. Jak v odborné publikaci uvádí Li, G et al. (2019), jakmile se na vnitřním povrchu potrubí již vytvoří primární vrstva zoxidovaného MnO_2, začne tato vrstva fungovat jako katalyzátor. Její povrch začne přitahovat další rozpuštěný mangan a jeho oxidaci na stěně potrubí urychlí [2].

Zahraniční výzkumy vyvracejí dříve tradovanou domněnku, že k tomuto druhu znečištění dochází pouze u kovového materiálu, ze kterého se v minulosti převážně vyrábělo potrubí. Moderní studie, kterou provedli Cerrato, J. M. et al. (2010), potvrdila teorii akumulace manganových vrstev v distribuční síti kompletně tvořenou PVC a dalšími hladkými plasty [14]. Bylo tak potvrzeno, že mangan využívá kombinace nízkého smykového napětí,

dlouhého stáří vody a vlastního autokatalytického efektu k tomu, aby vytvářel ložiska černého kalu, jež se vlivem nahodilé změny hydraulických podmínek v distribuční síti nechají ze stěn potrubí strhnout [2], [14].

2.3 VLIV HYDRAULICKÝCH PODMÍNEK A STÁŘÍ VODY NA STABILITU KVALITY VODY V DISTRIBUČNÍ SÍTI

Hydraulický režim v distribuční síti je dominantním faktorem, který poukazuje na výslednou kvalitu pitné vody u koncového spotřebitele. Zatímco chemické složení na výstupu z úpravny vody definuje potenciál pro vznik znečištění, z hlediska proudění se jedná zásadně o fyzikální parametry, které ovlivňují, zda k akumulaci těchto nečistot dojde, nebo zda budou ze systému odstraněny. Stabilita dané sítě je v tomto kontextu prezentována jako schopnost systému udržet částice ve vznosu a zamezit jejich usazování na vnitřních stěnách vodovodního potrubí. Parametry, které tuto stabilitu ovlivňují jsou rychlost proudění, smykové napětí a parametr stáří vody [3], [7]. Studium těchto jevů je zásadní pro pochopení mechanismů sekundárního znečištění v moderních sítích, které se často potýkají s určitým problémem předimenzování.

2.3.1 Normativní požadavky a jejich dopad na dimenzování sítě

Návrh vodovodních sítí a samotná konstrukce v České republice podléhá závazným legislativním a technickým předpisům, které se podílejí na zajištění dodávky pitné vody a bezpečnosti obyvatelstva v krizových situacích. Primární technické normy upravující tuto problematiku jsou ČSN 75 5401 pro navrhování vodovodního potrubí [5]. Následuje ČSN 73 0873 zabývající se zásobováním požární vodou [4].

Tyto normy do systému vnášejí protichůdné požadavky mezi hygienickými požadavky na kvalitu pitné vody a technickými požadavky na požární bezpečnost obyvatelstva.

Požární zabezpečení

Pokud má vodovod plnit protipožární funkci, potrubí se primárně navrhuje na potřebu zajistit dostatečný průtok pro odběrná místa za účelem hašení požáru. Norma ČSN 73 0873 striktně předepisuje množství vody a tlak, které má síť za povinnost dodat. Pro většinu obytných objektů v zástavbě se jedná o požadavek na minimální průtok Q = 4,0 až 12,0 $l \cdot s^{-1}$ při povinnosti zachování dostatečného přetlaku na hydrantu [4].

Jelikož je striktně vyžadováno, aby byly tyto vysoké nárazové průtoky v případě mimořádné události k dispozici, je po osobě navrhující distribuční síť požadováno potrubí s minimální světlostí DN 80. Z hlediska protipožární ochrany je toto dimenzování zcela logické a bezpečné. Avšak z pohledu běžného provozu a hydraulických podmínek pitné vody převyšuje reálnou spotřebu obyvatelstva [5], [6].

Předimenzování sítě a jeho důsledky

Rozdíl mezi minimálními odběry obyvatelstva a vysokými návrhovými průtoky pro protipožární ochranu vede k hydraulickému předimenzování soustavy. V obcích, kde je zástavba převážně rodinných domů s nízkým odběrem dosahuje tento nepoměr nižších hodnot než ve městech, kde je hustota obyvatelstva větší. Potrubí profilu DN 80 má průřezovou plochu větší, než je potřeba pro maximální denní potřebu vody [3].

Tento stav má negativní dopad na celkovou kvalitu vody v síti. Voda dosahuje v předimenzovaném potrubí velmi nízkých rychlostí, což neumožňuje vytváření dostatečných turbulentních sil potřebných pro zamezení usazování drobných částic. Jak uvádí odborná studie Blokker, E. J. M., J. H. G. Vreeburg et al. (2010), předimenzované sítě se stávají "akumulačními nádržemi" pro usazeniny, které by v hydraulicky optimálně navrženém potrubí nevznikly. Tento fenomén je tak prvotní příčinou, proč se i v nových plastových potrubích z kvalitního materiálu vyskytují usazené částice manganu a jiných nečistot [6], [14].

2.3.2 Problematika hydrauliky a nízkých rychlostí proudění

Předimenzování sítě má za následek výrazný hydraulický deficit, který se projevuje poklesem rychlostí proudění pod provozní hodnoty. V ideálně navržené síti ve většině případů dochází k tzv. pravidelné samočisticí rychlosti, která zajišťuje zachování drobných částic v suspenzi, která je transportována systémem v nízkých, hygienicky nezávadných koncentracích [1], [6]. V předimenzovaných profilech v menších obcích se reálné rychlosti proudění při běžné spotřebě pohybují pod hranicí 0,05 $m \cdot s^{-1}$ [27]. Z hydrodynamického hlediska proudění ztrácí svou turbulenci a přechází do režimu blízkému laminárnímu proudění. V tomto stavu se smykové napětí v blízkosti stěn potrubí prakticky blíží nule, což vytváří ideální podmínky pro usazování drobných částic [16].

Tento problém je ještě umocněn v koncových větvích sítě. Jak uvádí Friedman, M. et al. (2003), v těchto koncových úsecích dochází ke stagnaci vody, a jelikož zde chybí unášecí síla proudu, dominantním procesem se stává sedimentace částic na dno potrubí. Nízká rychlost tak primárně určuje intenzitu sedimentace – čím nižší je kinetická energie proudu, tím větší je zanášení nečistot ve formě pevných usazenin [3], [16]. Jedním z opomíjených rizik spojených s nízkými rychlostmi sítě je neschopnost reagovat na provozní výkyvy. Pokud je potrubí konstantně zanášeno z důvodu nízkých rychlostí, pak i mírné zvýšení průtoku uvede tyto usazené částice opět do vznosu, což se projeví horší kvalitou pitné vody a zvýšeným zákalem u koncových odběratelů [1], [16].

2.3.3 Koncept samočisticí schopnosti a smykového napětí

Samočisticí schopnost vodovodní sítě je stav hydraulického systému, při kterém hydraulické parametry proudění udržují pevné částice v suspenzi a transportují je soustavou, aniž by docházelo místně k akumulaci na vnitřním povrchu potrubí. Zajištění

kooperace mezních tíhových sil částic, adhezních sil, vnitřního povrchu potrubí a unášecí síly proudící pitné vody je rozhodující pro zachování tohoto samočisticího stavu [1].

Samočisticí rychlost proudění

V oborné literatuře je pro princip samočisticího efektu v distribučních sítích uváděna hodnota rychlosti proudění v rozmezí 0,4 až 0,5 $m \cdot s^{-1}$ [6]. Studie realizované v Nizozemsku potvrzují, že v případě, že rychlost proudění alespoň jednou za 24 hodin dosáhne této hranice, je po vnitřním obvodu potrubí výrazně menší množství usazených částic. V předimenzovaných sítích provozní rychlosti dosahují pouze zlomku této hodnoty, což vede k absenci samočisticího mechanismu. V takovém případě dochází k tvorbě kohézních vrstev, které vyžadují ke svému stržení větší hydraulické síly, než které jsou v síti běžné [6], [16].

Kritické napětí a mobilizace usazenin

Aby se částice z vnitřního povrchu potrubí uvolnily do vznosu, musí smykové napětí způsobeno prouděním překonat kritické smykové napětí daného sedimentu. Tato kritická hodnota závisí na charakteru usazenin, jejich stáří a stupni konsolidace. Vrstvy zoxidovaného manganu vykazují kohezní vlastnosti, které zvyšují odolnost vůči hydraulickému odtržení [17].

Podle odborné publikace Friedman et al. (2003) je pro odstranění těchto vrstev potřebné při proplachu dosáhnout smykového napětí, které je vyšší než smykové napětí, kterému byla vrstva vystavena při sedimentaci. Tento princip je základem pro navrhování technologií údržby, jako je řízený proplach, kde je cílem zvýšit rychlost proudění na hodnotu, která vytvoří napětí potřebné pro uvedení usazeného materiálu do vznosu [16], [17].

2.3.4 Stáří vody a jeho vliv na kvalitu

Stáří vody je definováno jako doba, která uplynula od okamžiku vstupu do distribučního systému až po dosažení konkrétního uzlu v síti. V praxi a v matematickém modelování se tento určitý parametr používá jako ukazatel kvality vody v systému. Čím je stáří vody vyšší, tím déle je kapalina vytavena interakcím s vnitřním povrchem potrubí a vlivům okolního prostředí [7], [18].

Stáří vody slouží jako ukazatel degradace kvality pitné vody. Dlouhá doba zdržení v potrubí vyvolává negativní procesy, které zhoršují vlastnosti pitné vody:

- Snížení koncentrace chloru: Koncentrace chloru v čase klesá důsledkem reakce s organickými látkami ve vodě a ubývá i ve vodě, dokud se nedostane pod detekovatelnou úroveň. Tímto snižováním síť ztrácí svou bakteriostatickou ochranu [7], [19].
- Změny teploty a narušení chemické stability: Stagnující či pomalu proudící voda přejímá teplotu z okolního prostředí. Postupným nárůstem teploty se v kapalině snižuje rozpustnost plynů, a naopak se urychluje průběh chemických a biologických reakcí rozpuštěných látek [13].
- Vztah mezi stářím vody a konkrétní problematikou srážení manganu: Oxidace rozpuštěného manganu je v síti závislá na čase. Stáří vody tedy vymezuje dobu dostupnou pro tvorbu usazenin. V koncových úsecích, kde je vysoká doba zdržení, je nevyšší riziko vzniku nánosů usazenin, a to i při dodržení hygienických limitů koncentrace manganu na vstupu do systému [13], [18].

Cílem je navrhovat a udržovat vodovodní sítě tak, aby doba zdržení neutvářela vhodné podmínky pro výše zmíněné degradační procesy a aby stáří vody zůstávalo na minimální hodnotě [18], [19].

2.3.5 Snižování koncentrace dezinfekce a biologická stabilita

Na kvalitu narůstajícího stáří vody v předimenzovaných úsecích má částečný vliv i časem závislé snižování koncentrace dezinfekce. Pro zajištění mikrobiologické nezávadnosti během distribuce se do pitné vody aplikuje chlor, chlornan sodný či oxid chloričitý. Koncentrace chloru v čase klesá vlivem oxidačních reakcí s organickými látkami a interakcemi s vnitřním povrchem potrubí. V úseku, kde je dlouhá doba zdržení se zbytkový chlor postupně zcela vyčerpá, což vede k lokální ztrátě biologické stability [7], [19].

Tvorba biofilmu na stěnách potrubí

Poté, co vymizí účinek chloru, začne množení organismů, které se v pitné vodě přirozeně vyskytují v nízkých a hygienicky nezávadných koncentracích. Tyto bakterie mají tendenci přilnout na vnitřní stěny potrubí bez ohledu na drsnost nebo materiál. Následně produkují extracelulární polymerní substanci, čímž na stěně vytvářejí vrstvu zvanou biofilm. Jedná se o vrstvu se zvýšenou viskozitou a kohezí, která mění hydraulickou drsnost potrubí a tím ovlivňuje proudění [11], [20].

Synergie biofilmu a srážení manganu

Z hlediska sekundárního znečištění je přítomnost biofilmu zásadní, jelikož tato struktura funguje jako síť pro anorganické částice suspendované ve vodě. Jak prokazuje studie Li et al. (2022), v biofilmu se vyskytují specifické kmeny bakterií, které enzymaticky oxidují rozpuštěný mangan [20].

Tato oxidace probíhá rychleji než chemická oxidace rozpuštěným kyslíkem. Biofilm tak v potrubí působí jako katalyzátor a aktivně odebírá rozpuštěný mangan z proudící vody, přeměňuje jej na pevné oxidy manganičité a tyto částice ukládá ve své organické struktuře. Výsledkem je vznik organicko-anorganických nánosů, které se hromadí na dně a na stěnách potrubí, dokud nejsou vystaveny smykovému napětí překračující jejich kohezní pevnost [20], [21].

Rostoucí organicko-anorganická vrstva postupně zvyšuje drsnost vnitřní stěny potrubí, čímž dochází ke zpomalení rychlosti proudění a vytváření ideálních podmínek pro další usazování částic. Biofilm zde funguje jako strukturální pojivo, které ztvrdlé oxidy manganu pevně váže k povrchu trubky. Vzniklá kompaktní hmota tímto zmenšuje efektivní průtočný profil potrubí, lokálně zvyšuje tlakové ztráty třením a vytváří vysoce odolné inkrustace [17].

2.3.6 Rizikové stavy: Mobilizace sedimentu při resuspendaci

Vrstva usazenin, formovaná za ustálených podmínek s nízkou rychlostí proudění, se nachází ve stavu podmíněné rovnováhy. Tato rovnováha je narušena v okamžiku, kdy je systém vystaven podmínkám způsobujícím resuspendaci. [1].

Mechanismus resuspenze

Resuspenze materiálu v pitné vodě nastává při zvýšení rychlosti proudění nebo smykového napětí, anebo když dojde k náhlé změně hydraulických podmínek v distribuční síti. V praxi bývá způsoben provozními stavy, mezi které patří odběr požární vody, porucha na vodovodním řádu, rychlá manipulace s uzávěrem nebo neřízené proplachování sítě [3].

Při takovém skokovém zvýšení rychlosti proudění dochází k nárůstu střední průřezové rychlosti. Ve chvíli, kdy smykové napětí překročí kohezní pevnost sedimentu, dochází k mechanickému rozrušení struktury biofilmu a anorganických usazenin. Materiál je strháván do vodního proudu, čímž vzniká proces zvaný resuspenze [17].

Vliv změny směru proudění

Vysoce rizikovým jevem je změna směru proudění, ke které dochází například při přesměrování dodávky vody během havárií. Vzniklé usazeniny nabývají struktury, která odpovídá vektoru proudění. Výzkum Friedman, Melinda, David HOLT et al. (2003) prokazuje, že tyto nánosy mají vůči proudění v opačném směru nižší mechanickou odolnost. K jejich odtržení postačuje smykové napětí, které je nižší než napětí potřebné k mobilizaci nánosů usazenin ve směru původním [16].

Výsledkem těchto fyzikálních procesů je transport suspendovaných látek směrem ke koncovým odběratelům. V případě manganových usazenin se tento jev projevuje

vyplavováním uvolněných tmavě hnědých až černých částic do vody. Z provozního hlediska signalizuje tento stav nutnost zahájení systematické údržby potrubí [1], [3].

2.4 METODY ODSTRAŇOVÁNÍ SEDIMENTŮ A UDRŽBA SÍTÍ

Jak bylo popsáno v předchozích částech, proces akumulace a usazování drobných částic znečištění, manganu a biofilmu je v předimenzovaných vodovodních sítích fyzikálně-chemický jev, kterému se moderní soustavy nevyhnou. Přestože je cíl navrhovat sítě, ve kterých nedochází k usazování a akumulaci drobných částic, v praxi se distribuční systém bez zajištění mechanického odstraňování těchto vrstev neobejde. Je potřeba zvolit správnou metodu údržby, která je založena na cíleném vytváření výše definovaných smykových sil [1], [16]. V současné době se jako nejúčinnější a nejšetrnější metoda pro odstraňování těchto sedimentů prokazuje řízený jednosměrný proplach metodou pokročilé technologie Astacus.

2.4.1 Řízený jednosměrný proplach

Řízený jednosměrný proplach (JSP) je standardní metoda pro odstraňování měkkých a částečně kohézních usazenin, jako jsou oxidy manganu, železa a neinkrustované biomasy [16], [22].

Naopak u běžně prováděného neřízeného proplachu (otevření a odkalení hydrantu) proudí voda k místu odběru všemi dostupnými cestami v síti. Vlivem rozdělení průtoků do více větví však nedochází k dostatečnému nárůstu rychlosti a smykovému napětí. Důsledkem je vyšší spotřeba vody při nízké účinnosti čištění, které s sebou nese riziko zanesení dosud čistých úseků sítě [22].

Principy jednosměrného proplachu

Metoda JSP využívá k dosažení maximálního čisticího efektu dva principy:

- Zvýšení smykového napětí: Vytvořením jediné možné cesty pro vodu v potrubí dochází k nárůstu rychlosti a kinetické energie, která má za následek vyšší smykové napětí překračující kohézní síly usazenin [16], [17].
- Čištění sítě po úsecích: Je nutné, aby čištění sítě probíhalo v logickém pořadí od zdroje čisté vody směrem k okrajovým a koncovým větvím sítě. Tento postup zajišťuje výhradně čistou vodu v propláchnutém úseku, což eliminuje riziko sekundárního znečištění již vyčištěných úseků [22], [9].

Benefity a přínos jednosměrného proplachu

Oproti neřízenému proplachování přináší tato metoda vyšší čisticí účinnost a zároveň snížení celkového objemu spotřebované vody.

2.4.2 Inovativní technologie proplachu systémem Astacus

V rámci této práce je posuzováno i využití pokročilé technologie Astacus. Jedná se o měřicí a proplachovací zařízení, které v reálném čase monitoruje hydraulické podmínky a kvantitativní parametry pitné vody [9].

Principy technologie Astacus

Při čištění je kontinuálně sledován tlak a průtok v síti. Tyto parametry jsou důležité pro dosažení požadovaného smykového napětí a rychlosti proudění. Dohled obsluhy zajišťuje maximální účinnost proplachu a předchází plýtvání pitné vody [9].

Benefity a přínos technologie Astacus

Tento systém údržby vodovodní sítě přináší následující výhody:

- Úspora pitné vody: Díky přesné optimalizaci trasy proplachu na základě reálných dat technologie Astacus dosahuje nižší spotřeby pitné vody na 30 až 40 % objemu spotřebovaného při standardních metodách [9].
- Dlouhodobá stabilita kvality vody: Smykové síly odstraní mobilní sedimenty a zároveň nenarušují pevně stabilizované inkrustace na stěnách potrubí. Výsledkem je hydraulicky stabilní vnitřní povrch potrubí, díky čemuž zůstává kvalita pitné vody po dokončení proplachování stálá a nedochází vlivem sekundárního znečištění k jejímu zhoršení [9].
- Datový výstup: Astacus vygeneruje digitální protokol, který provozovateli poskytuje měřitelný doklad o účinnosti provedené údržby [9].

2.5 VYUŽITÍ HYDRAULICKÝCH MODELŮ V PRAXI

Vodovodní síť představuje komplexní převážně podzemní infrastrukturu, a proto hydraulický stav nelze zcela pokrýt měřením v terénu. V moderním provozu jsou proto nezbytným nástrojem pro analýzu sítě matematické modely [23].

Pro relevantní výsledky je však potřeba model kalibrovat na základě skutečných dat naměřených v terénu či poskytnutých provozovatelem dané sítě. Vstupní data zahrnují záznamy o skutečném množství vody odebraném z vodojemu za stanovené období, fakturační údaje o spotřebě a také geometrické a technické parametry sítě [23].

Na základě těchto podkladů model iterativně řeší soustavy rovnic kontinuity a energetických ztrát. Tím stanovuje parametry, které jsou v terénu obtížně měřitelné, zejména průběh rychlostí, smykové napětí a stáří vody v jednotlivých úsecích sítě [24].

2.5.1 Analýza hydraulických parametrů a kvality vody

Hydraulické modely slouží k plošné diagnostice skrytých provozních problémů prostřednictvím tzv. modelového výzkumu. Tento postup spočívá v sestavení

matematického modelu vodovodní sítě, na kterém se provádějí výpočetní simulace provozních stavů. Podstatou je analýza dat a hledání spojitostí mezi provozními hydraulickými parametry z modelu a reálným chováním vodovodní sítě. Tato konfrontace s provozní praxí umožňuje identifikovat kritická místa se zvýšeným usazováním sedimentů.

Identifikace úseků s nízkou rychostí proudění

Bodové měření tlaku na hydrantech vypovídá pouze o tlakových poměrech v daném místě, model slouží k plošné identifikaci oblastí se stagnací vody a předimenzovaných úseků sítě, které vykazují nízké rychlosti proudění. Pomocí této analýzy lze lokalizovat úseky, kde je střední průřezová rychlost nízká, což představuje riziko pro akumulaci a sedimentaci kohézních částic [23].

Analýza stáří vody

Významným výstupem kvazi-dynamického modelu je stanovení parametru stáří vody, který udává dobu, za kterou částice vody doputuje od zdroje ke koncovému spotřebiteli [24]. Tento výpočet je zásadní pro posouzení kvality pitné vody. Úseky s vysokým stářím vody úzce korelují s úbytkem zbytkového dezinfekčního činidla. Tento deficit poskytuje ideální podmínky pro umocnění oxidačních procesů a rozvoj mikrobiologického biofilmu [1].

Model tak poskytuje mapu rizikových úseků a tvoří podklad pro stanovení hypotézy o příčinách zhoršené kvality vody.

2.5.2 Diagnostika hydraulických parametrů a kvality vody

Kromě diagnostiky potřebné k následujícímu posouzení hydraulického stavu slouží model pro prediktivní modelování. Tato schopnost umožňuje bezpečně analyzovat a následně předcházet potenciálním scénářům, které by v praxi degradovaly kvalitu vody pro koncové spotřebitele [23].

Upravování tras vodovodního potrubí v modelu

V modelu má možnost uživatel simulovat uzavření vybraných úseků, odběr z konkrétního hydrantu a ověřit dva posuzované parametry:

- Zda průtok skutečně vygeneruje požadované smykové napětí.
- Zda odběr nezapříčiní nežádoucí pokles tlaku v sousedních větvích.

V případě, že simulace predikuje výskyt podtlaku nebo nedostatečných průtočných rychlostí, je nutné pro tento stav zhotovit hydraulické posouzení a návrh nápravných opatření [16], [24].

Simulace havarijních stavů

Při haváriích nebo rozsáhlých manipulacích dochází k náhlé změně směru proudění. Dynamická simulace predikuje, ve kterých potrubích dojde k obrácení toku a lokalizuje úseky ohrožené resuspenzí usazenin [1], [24]. Provozovatel tak získá prostor pro preventivní opatření.

2.6 VYUŽITÍ MAPOVÝCH PODKLADŮ A GIS PRO SPRÁVU SÍTĚ

Výstupy z hydraulických výpočtů představují pouze tabulky čísel, které jsou pro řízení provozu sítě v terénu obtížně použitelné. Tyto hodnoty je proto potřeba přenést na konkrétní mapový podklad, k čemuž slouží mapové a geografické informační systémy. Tyto programy slouží k pokročilé vizualizaci sítě, kde se k prostorovým datům o potrubí přiřazují vypočtené provozní parametry, zejména distribuce rychlosti a doba zdržení vody [25].

2.6.1 Provozní pasport sítě

Základem pro práci s modelem i samotnou údržbu je dokumentace skutečného stavu sítě, značená jako tzv. pasport vodovodu. V rámci legislativy České republiky podléhá rozsah a grafická podoba stavebnímu řádu předepsaného prováděcí vyhláškou o dokumentaci stavby [26].

Digitální pasport v mapě zakresluje:

- Trasy a dimenze potrubí
- Armatury, objekty a jejich polohu

2.6.2 Tvorba map pro plánování údržby

Propojením pasportu s výsledky hydraulického modelu vznikají mapy, které poukazují na skutečný stav sítě.

Lokalizace problémových úseků

Výstupy hydraulického modelu umožňují tematickou vizualizaci sítě. Jednotlivé úseky jsou barevně odlišeny na základě vypočtených parametrů. Oblasti s nízkou rychlostí proudění a vysokou dobou zdržení vody mohou být takto zřetelně identifikovány. Komplexní analýza sítě zohledňuje výskyt míst s častou změnou směru proudění a výrazným kolísáním provozních průtoků. Dále je potřeba zahrnout dimenzi a stáří konkrétního potrubí, které definují skutečný průtočný profil a drsnost stěn. Průnik všech těchto hydraulických a fyzikálních proměnných umožňuje identifikovat místa, kde usazeniny zhoršují kvalitu pitné vody. Tato analýza následně slouží jako podklad pro plán údržby, díky kterému se stanoví prioritní úseky určené k čištění [1].

Tvorba manipulačních plánů pro řízené proplachování

Základním smyslem tvorby proplachovacích plánů není pouze administrativní příprava, ale primárně postup celého servisního zásahu. Identifikace kritických míst v hydraulickém modelu poskytuje primární informaci o tom, v jakých úsecích se nacházejí usazeniny. Na tento krok navazuje tvorba samotného manipulačního řádu, jehož účelem je navrhnout sekvenci kroků pro odstranění usazenin. Cílem je zajistit kontrolovaný odvod mobilizovaného sedimentu z vodovodní sítě tak, aby nedošlo k sekundárnímu znečištění a zhoršení kvality vody [25].

Do provozního a manipulačního schématu se definují:

- Určení hlavního zásobovacího řádu a zdroje čisté vody
- Lokalizace uzávěrů
- Stanovení odkalovacích hydrantů a jejich pořadí

Výstupem je manipulační schéma pro pracovníky provádějící údržbu. Tento mapový podklad zajišťuje, že manipulace na síti proběhne ve stanoveném pořadí. Tím se eliminuje riziko sekundární kontaminace vyčištěných úseků a předchází se vzniku nežádoucího zvýšení rychlosti proudění, zvětšení smykového napětí, resuspenzi materiálu a změn hydraulických podmínek v distribuční síti [26].

2.7 SHRNUTÍ TEORETICKÝCH POZNATKŮ A VÝCHODISKA PRO PRAKTICKOU ČÁST

Na základě provedené rešerše lze konstatovat, že sekundární zhoršování kvality vody je problémem komplexním. Z fyzikálně-chemického a biologického hlediska je podstata srážení manganu a jeho spojitost s potrubním biofilmem v současné vědě objasněna.

Zásadní otázkou je však prostorová distribuce tohoto jevu. Ačkoliv se ví, proč a jak se mangan sráží, není zcela zřejmé, proč se v rámci jedné distribuční sítě akumuluje tak nerovnoměrně.

Nalezení odpovědi na tuto otázku je hlavním předmětem navazující praktické části. Prostřednictvím aplikace matematického modelování a analýzy konkrétní vodovodní sítě bude zkoumán vztah mezi hydraulickými parametry a reálným výskytem manganu a dalších usazenin.

3 PRAKTICKÁ ČÁST ANALÝZY VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE SYROVICE

Cílem praktické části je přenést teoretické poznatky o sekundárním zhoršování kvality pitné vody do provozního prostředí. Znečištění distribučních sítí je komplexní proces zahrnující rozvoj biomasy, akumulaci mobilních usazenin a srážení manganu. K objasnění příčin nerovnoměrného rozložení těchto nánosů byla provedena analýza vodovodu v obci Syrovice.

Na základě dat z pasportu byl sestaven hydraulický model, který byl poté zkalibrován podle dat z opakovaného proplachu sítě. Pomocí výpočetních simulací byly analyzovány parametry rychlost proudění a stáří vody. Na základě těchto dat byly stanoveny kritické úseky náchylné k akumulaci znečištění.

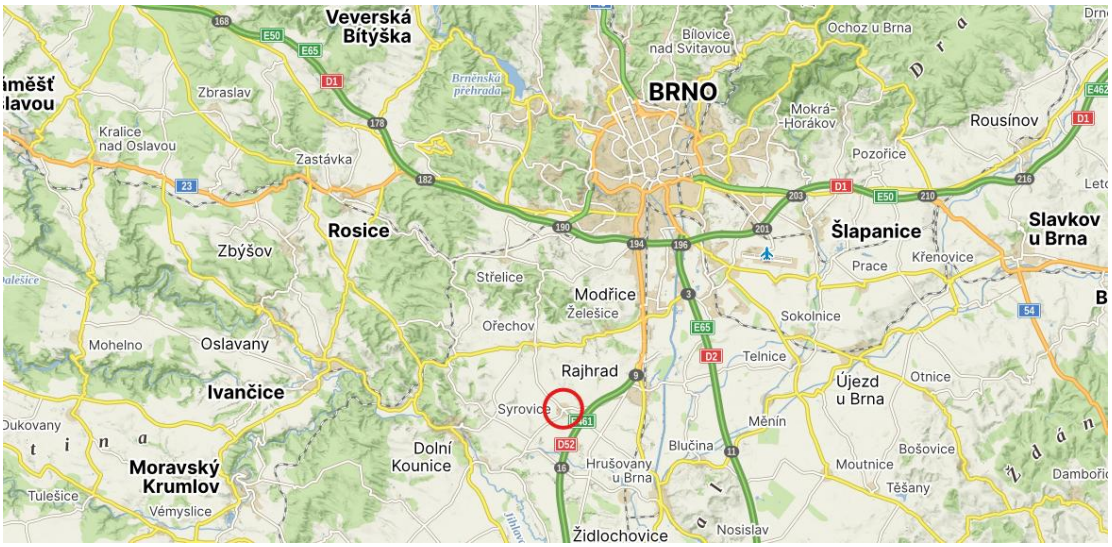
Výstupy z modelu byly následně porovnány s provozními daty z již proběhlých řízených proplachů technologií Astacus. Hledáním spojitostí mezi teoretickým modelem a skutečným množstvím znečištění byla stanovena pracovní teze. Jelikož digitální model nezahrnuje veškeré provozní faktory, bylo provedeno terénní šetření a konzultace s technickým pracovníkem provozovatele sítě. Cílem bylo ověřit stanovené domněnky a zjistit specifické lokální souvislosti a historické detaily o síti, které není možné z matematického modelu vyčíst.

3.1 VODOVOD OBCE SYROVICE

Pro úspěšné sestavení matematického modelu a lokalizaci míst distribučního systému je potřeba definovat základní prostorové, technické a provozní parametry. Vodovodní síť v obci Syrovice funguje jako samostatný, izolovaný komplex.

3.1.1 Popis území

Zájmové území se nachází v Jihomoravském kraji, přičemž přesné geografické umístění obce Syrovice v rámci České republiky a jejího bližšího okolí zobrazuje přehledná mapa širších vztahů na *Obr. 1*



Obr. 1: Geografická poloha obce Syrovice na mapě širších vztahů [Zdroj: Vlastní zpracování na mapovém podkladu Mapy.cz [40].

Z *Obr. 1* je patrné, že obec leží v blízkosti Brna.

Z hlediska morfologie terénu se obec nachází v geomorfologickém celku Dyjsko-svratecký úval. Terén zájmového území je mírně zvlněný a rozsah stávající stavby v intravilánu obce se nachází v rozmezí 215 až 250 m n. m. [31].

3.1.2 Vodovodní síť

Prostorové uspořádání infrastruktury na území obce, primárně trasování distribuční sítě, zobrazuje celková mapa vodovodní sítě a infrastruktury na *Obr. 2*

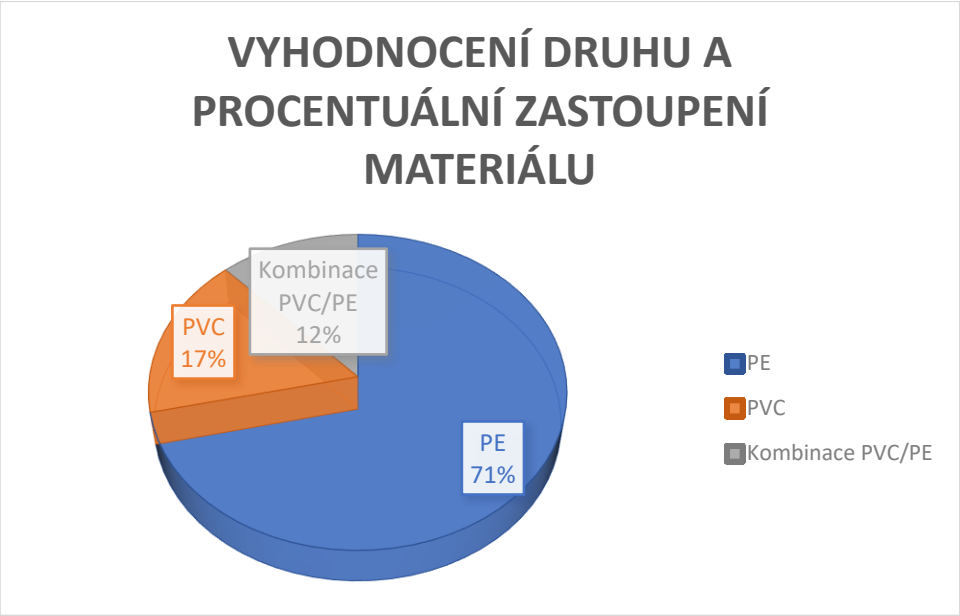
Obr. 2: Celkové technické schéma vodovodní sítě obce Syrovice [Zdroj: Vlastní zpracování]

Z *Obr. 2* vyplývá, že výrazným rysem jsou koncové úseky, které z hydraulického hlediska představují primární riziko potenciálního stagnování vody a nízkých rychlostí proudění. Pro zajištění požadovaného tlaku a plynulé distribuce vody využívá systém vodárenské objekty, jejichž specifikace je shrnuta v *Tab. 1.*

Tab. 1: Hlavní objekty vodárenského systému Syrovice [31].

Proces	Objekt – specifikace	Poznámky
Zdroj vody	Vlastní jímací území – podzemní vrty	HV-611, HSY 1
Úprava vody	Bez technologické úpravny	Pouze hygienické zabezpečení
Akumulace	Zemní vodojem VDJ Syrovice	Kapacita 2 × 100 m³
Doprava vody	Automatická tlaková stanice (ATS)	Tlak do sítě

V *Tab. 1* jsou zobrazeny prvky vodárenské soustavy, na kterých je hydraulický režim sítě závislý. Důležitým faktorem je také materiálové složení potrubí. Vodovodní distribuční síť je tvořena plastovým potrubím, převážně PE, PVC a jejich kombinací. Poměry daného zastoupení zobrazuje *Graf 1.*



Graf 1: Procentuální zastoupení potrubních plastových materiálů v distribuční síti [Vlastní zpracování].

Jelikož v systému nejsou staré kovové materiály, které by podléhaly korozi a uvolňovaly do vody inkrustace železa, lze provozní problémy s kvalitou vody a tvorbou nánosů přisoudit chemickému srážení manganu ze zdroje a rozvoji organické biomasy na vnitřním povrchu plastových trubek.

3.1.3 Odběratelé pitné vody

Z hydraulického zatížení vodovodní sítě je primárním ukazatelem počet trvale žijících obyvatel, který v obci Syrovice činí 2097 osob [36]. Celkovou bilanci denní spotřeby pitné vody ovlivňuje občanská vybavenost a průmysl. V obci se nachází základní škola s kapacitou 190 žáků spolu s učiteli, mateřská škola, kterou navštěvuje 98 dětí a přidružená jídelna vydávající průměrně 350 porcí denně [37], [38]. Významným faktorem, který ovlivňuje denní špičky odběru pitné vody je přilehlý logisticko-průmyslový areál Prologis Park Brno – Syrovice, ve kterém denně pracuje na třísměnném provozu průměrně 1000 zaměstnanců. Všechny tyto subjekty jsou brány v potaz při výpočtu denní spotřeby pitné vody [39].

3.1.4 Historické provozní problémy

Hlavním impulsem pro detailní analýzu sítě byl provozní stav spojený s lokálním zhoršováním kvality pitné vody. Před realizací vykazoval distribuční systém opakující se potíže, které jdou charakterizovat v následujících bodech:

- Vizuální závady: Stížnosti koncových odběratelů na zhoršenou kvalitu pitné vody, projevující se výskytem tmavých až černých pevných částic.
- Fyzikální projev: Vysoké hodnoty zákalu způsobované resuspenzí usazenin při náhlých výkyvech v síti.

Jako příčina znečištění zde byla stanovena akumulace chemicky vysráženého manganu z podzemního zdroje. Tento proces byl kombinován s plošnou sedimentací biomasy na hladkém vnitřním povrchu plastového potrubí.

3.2 ŘÍZENÝ PROPLACH VODOVODNÍ SÍTĚ

K odstranění nahromaděných sedimentů a k získání podkladních hydraulických dat ke kalibraci matematického modelu bylo v obci Syrovice provedeno čištění a údržba potrubí metodou řízeného jednosměrného proplachování (JSP).

3.2.1 Systém proplachu

Pro realizaci čištění vodovodního potrubí v obci Syrovice byl zvolen specializovaný diagnosticko-proplachovací systém Astacus. Jedná se o technologii, která nahrazuje tradiční manuální postupy a přináší do procesu údržby moderní automatizaci [9]. Využití tohoto zařízení v terénu vyobrazuje *Obr. 3.*

Obr. 3: Robot Astacus pro čištění vodovodního potrubí, testování požárních hydrantů a měření teploty vody [9]

Jak ukazuje *Obr. 3*, Astacus se instaluje přímo na výtokový líc hydrantu. Zařízení pomocí integrovaného servopohonu reguluje průtok vody, čímž si zajišťuje dosažení potřebné unášecí rychlosti proudění [9].

3.2.2 Postup realizace

Praktický výkon čištění sítě vychází z metodiky JSP po úsecích. Základním předpokladem je postupné proplachování jednotlivých úseků pomocí uzávěrů na síti [9].

Postup proplachování pro každý vytyčený úsek probíhá následovně:

1. Příprava úseku: Manipulace s uzavíracími šoupátky na síti za účelem vytvoření jednosměrného toku.
2. Spuštění procesu: Kontrolované otevření výpusti pomocí systému Astacus pro plynulý nárůst průtoku.
3. Fáze čištění: Vyplavování sedimentů z potrubí pomocí automaticky nastavené rychlosti proudění.
4. Ukončení a uzavření: Dosažení vizuálně čisté vody s nízkými hodnotami zákalu a následné uzavření výpusti strojem [27], [28].

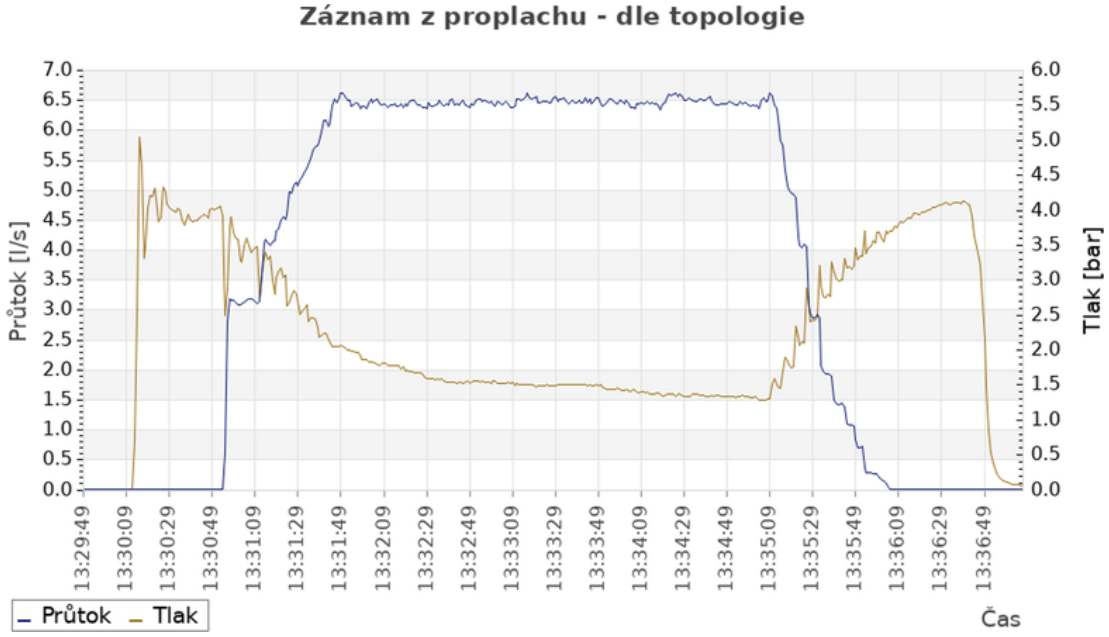
Tento přesný a řízený postup zaručí, že nedojde k nežádoucí resuspenzi mobilizovaného znečištění do okolních, provozně aktivních úseků distribučního systému.

3.2.3 Popis technologie

Kromě samotného odkalení potrubí plní systém Astacus funkci diagnostického a měřicího uzlu. Nedílnou součástí je telemetrická jednotka a soustava přesných senzorů, které v reálném čase digitalizují průběh celého procesu. Tato technologická vlastnost stroje transformuje údržbu sítě na přesné měření. Získaná data následně slouží pro kalibraci matematického modelu [9].

3.2.4 Rozsah měření

Po každém proplachu systém zaznamená soubor provozních dat z konkrétního uzlu sítě. Sledované a ukládané veličiny jsou okamžitý průtok ($l \cdot s^{-1}$) a hydrodynamický tlak (bar) [9]. Dynamiku hydraulických parametrů v průběhu jednoho měřeného úseku ilustruje *Graf 2*.



Graf 2: Technologie Astacus: Záznam průběhu měřeného tlaku a průtoku během proplachu potrubí [28].

Z Interpretace dat v *Grafu 2* je vidět hydraulická odezva distribuční sítě na uměle vyvolaný odběr. Zaznamenané tlakové rozdíly při průtoku představují zásadní empirický podklad. Tyto hodnoty jsou v následujících částech práce využity jako nástroj pro kalibraci matematického modelu.

3.3 TVORBA HYDRAULICKÉHO MODELU

Sestavení matematického modelu distribuční sítě představuje důležitou fázi celé práce. Hydraulický model slouží jako zjednodušený model reálného vodovodu, který umožňuje simulaci tlakových a průtokových poměrů. V následujících podkapitolách je popsán postup jeho tvorby. Od volby softwarového prostředí, přes topologii sítě a uzlových odběrů, až po okrajové podmínky. Hlavním cílem celého procesu je připravit funkční model, který je zkalibrován pomocí reálných dat získaných při řízeném jednosměrném proplachu. Tímto způsobem je zajištěna požadovaná přesnost a vypovídající hodnota výsledných simulací.

3.3.1 Použitý softwarový nástroj

Pro sestavení topologie a následnou simulaci se využívá prostředí geograficko-informačního systému QGIS v kombinaci se specializovaným zásuvným modulem QGIS-Red [32], [33]. Tento nástroj efektivně integruje prostorovou správu dat s výpočetním jádrem softwaru EPANET [24], což umožňuje provádět tlakové a průtokové analýzy s reálným mapovým podkladem sítě.

Výpočetní jádro modelu je nastaveno pro řešení tlakových ztrát třením pomocí Darcy-Weisbachovy rovnice. Zohledňuje vliv kinematické viskozity vody i režim proudění. Tímto představuje nejpřesnější volbu pro modelování moderních sítí s hlavním zastoupením plastových materiálů.

Hlavní kalibrační proměnnou modelu je hydraulická drsnost potrubí. Její výchozí hodnota je iterativně upravována, dokud teoretické tlakové ztráty v modelu neodpovídají reálným úbytkům tlaku naměřeným strojem Astacus.

3.3.2 Vstupní data a topologie sítě

Výchozím podkladem pro definování prostorové geometrie modelu je mapa a provozní data vodovodu poskytnuty obcí Syrovice [31]. Tyto podklady sloužily pro vytvoření základní topologie sítě v programu QGIS [32].

Tato základní digitální kostra je manuálně obohacena o fyzikální a hydraulické parametry. Na základě informací o potrubním materiálu jsou k jednotlivým úsekům doplněny hodnoty hydraulické drsnosti a vnitřní průměry profilů.

Nezbytným krokem je výškové uspořádání distribuční sítě. K tomu slouží výškopisná data z geoportálu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČUZK) [34].

Z digitálního modelu reliéfu se extrahují nadmořské výšky, které jsou následně přiřazeny ke všem uzlům v modelu. Díky prostorovým a výškovým souřadnicím uzlů software dopočítá skutečné délky všech potrubních úseků.

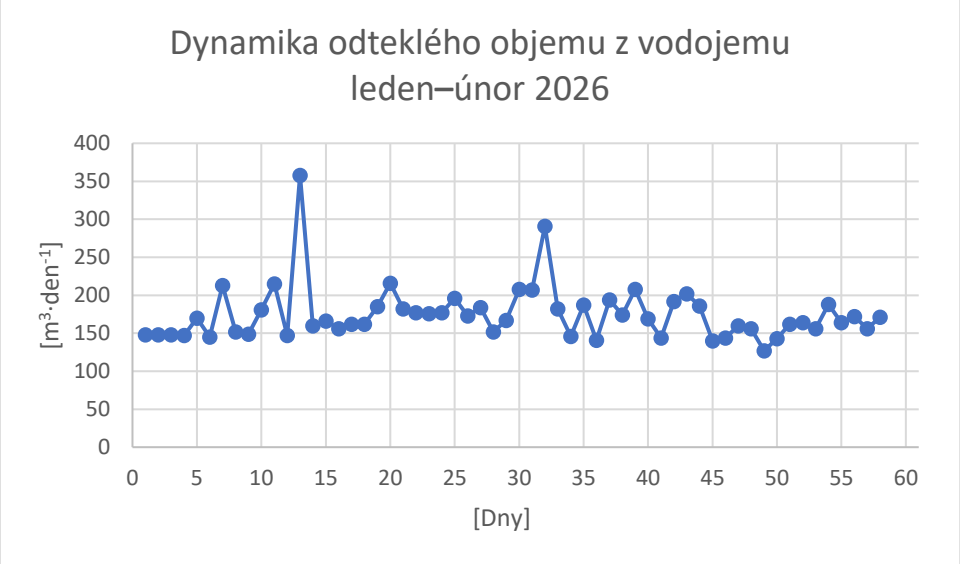
3.3.3 Analýza spotřeby vody

Základním předpokladem pro vytvoření digitální kopie vodovodní sítě je správné stanovení průměrné denní potřeby vody. Tato hodnota se standardně počítá na základě směrných čísel č.12 vyhlášky č. 428/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů [35].

Pokud by tento teoretický, podle norem správný přístup, byl aplikován na zájmové území Syrovice, blížila by se celková denní potřeba k hodnotě 300 $m^3 \cdot den^{-1}$. Takto vysoká hodnota slouží k návrhu maximální možné kapacity sítě. Pro účely kalibrace modelu na skutečný stav sítě v době měření je nevyhovující. Rozhodujícím se stala skutečná data z provozu.

Analýza skutečných dat a zdůvodnění diference

Analýza záznamů z provozního deníku vodojemu Syrovice za období měsíců ledna a února roku 2026 slouží ke zjištění, že skutečný průměrný denní odteklý objem do sítě činí pouze 175 $m^3 \cdot den^{-1}$. Dynamiku tohoto odběru zobrazuje *Graf 3*.



Graf 3: Vývoj reálného denního odběru z vodojemu Syrovice v analyzovaném období [Zdroj: Vlastní zpracování na základě dat provozovatele]

Tento rozdíl mezi teoretickým výpočtem podle platné normy a reálnou situací je důsledkem souběhu několika faktorů:

- Sezónní odběr u obyvatelstva: V zimních měsících klesá spotřeba pitné vody v domácnostech. Odpadají odběry jako např. zalévání zahrad, napouštění bazénů nebo mytí automobilů.
- Povánoční útlum v logistice: Období ledna a února představuje v logistice povánoční útlum spojený s úbytkem agenturních pracovníků.
- Úsporné technologie v průmyslu: Přestože se podle platné vyhlášky uvažuje pro místní průmysl a sklady vyšší specifickou spotřebu, areál Prologis Park spadá do logistických hal standardu „A“. Ty jsou vybaveny vysoce úspornými technologiemi, čímž se skutečná spotřeba výrazně snižuje. Voda zde slouží pouze k základní osobní hygieně.

Konkrétní výpočet potřeby vody

Pro simulaci chování distribuční sítě byly na základě výpočtů určeny průměrná a maximální potřeba vody pro jednotlivé kategorie odběratelů v obci Syrovice. Výpočty specifických potřeb vody byly provedeny v souladu se směrnými čísly potřeby vody dle platné vyhlášky Ministerstva zemědělství a metodických postupů návrhové normy ČSN 75 5401 [35], [5]. Tyto hodnoty slouží jako vstupní parametry pro stanovení uzlových odběrů. Pro všechny výpočty byl použit koeficient denní nerovnoměrnosti k_d = 1,5 a koeficient hodinové nerovnoměrnosti k_h = 1,8.

Pro každou kategorii odběratelů byly stanoveny následující obecné rovnice:

- Průměrná denní potřeba vody: $Q_p = n \cdot q$
- Maximální denní potřeba vody: $Q_d = Q_p \cdot k_d$
- Maximální hodinová potřeba vody: $Q_h = Q_d/24 \cdot k_h$

Kde:

- Q_p – průměrná denní potřeba vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- n – počet jednotek (-)
- q – specifická potřeba vody ($m^3 \cdot os^{-1} \cdot d^{-1}$)
- Q_d – maximální denní potřeba vody ($m^3 \cdot d^{-1}$)
- k_d – součinitel denní nerovnoměrnosti (-)
- Q_h – maximální hodinová potřeba vody ($m^3 \cdot h^{-1}$)
- k_h – součinitel hodinové nerovnoměrnosti (-)
- 24 – konstanta pro přepočet denního průtoku na hodinový průtok ($h \cdot d^{-1}$)

Vstupní parametry pro výpočet jednotlivých kategorií byly stanoveny následovně:

- Obyvatelstvo: n = 2097 (obyvatel), q = 72,27 ($m^3 \cdot os^{-1} \cdot d^{-1}$)
- Občanská vybavenost: n = 638 (celkem osob), q stanoveno dle normových hodnot [35]
- Průmysl: n = 500 (zaměstnanců), q = 15 ($m^3 \cdot os^{-1} \cdot d^{-1}$)

Výsledné hodnoty potřeby vody pro jednotlivé dílčí kategorie odběratelů shrnuje *Tab. 2*

Tab. 2: Potřeba vody pro jednotlivé kategorie [Zdroj: Vlastní zpracování].

Potřeba pro obyvatelstvo		
Q_p	151,55	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Q_d	227,33	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Q_d	9,47	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
Q_h	17,05	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
Potřeba pro občanskou vybavenost		
Q_p	15,88	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Q_d	23,82	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Q_d	0,99	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
Q_h	1,79	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
Potřeba pro průmysl		
Q_p	7,50	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Q_d	11,25	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Q_d	0,47	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
Q_h	0,84	$[m^3 \cdot h^{-1}]$

Pro celkovou potřebu vody byly využity následující součtové rovnice:

- Celková průměrná denní potřeba vody: $Q_{p,celk} = \Sigma Q_p$
- Celková maximální denní potřeba vody: $Q_{d,celk} = \Sigma Q_d / 24$

Kde:

- $Q_{p,celk}$ – celková průměrná denní potřeba vody ($m^3 \cdot d^{-1}$)
- $Q_{d,celk}$ – celková maximální denní potřeba vody přepočtená na hodiny ($m^3 \cdot h^{-1}$)

Vzhledem k odlišnému časovému průběhu u různých skupin odběratelů se celková maximální hodinová potřeba stanovuje jako maximum ze tří kombinací provozních extrémů. Tyto dílčí kombinace reprezentují scénáře zatížení distribuční sítě a zavádí součinitele současnosti pro kombinaci různých typů spotřebišť:

- Maximální hodinová potřeba obyvatelstva spolu s maximální denní potřebou pro občanskou vybavenost a průmysl: $h_1 = Q_{h,\,obyv} \cdot k_1 + Q_{d,\,obc}/24 \cdot k_2 + Q_{d,\,prum}/24 \cdot k_3$
- Maximální hodinová potřeba občanské vybavenosti spolu s maximální denní potřebou pro obyvatelstvo a průmysl: $h_2 = Q_{d,\,obyv}/24 \cdot k_1 + Q_{h,\,obc} \cdot k_2 + Q_{d,\,prum}/24 \cdot k_3$
- Maximální hodinová potřeba průmyslu spolu s maximální denní potřebou pro občanskou vybavenost a obyvatelstvo: $h_3 = Q_{d,\,obyv}/24 \cdot k_1 + Q_{d,\,obc}/24 \cdot k_2 + Q_{h,\,prum} \cdot k_3$
- Výsledná maximální hodinová potřeba celého spotřebiště: $Q_{h,\,max} = \max(h_1, h_2, h_3)$

Kde:

- h_1, h_2, h_3 – kombinace extrémů pro jednotlivé kategorie ($m^3 \cdot h^{-1}$)
- $Q_{h,\,obyv}$, $Q_{h,\,obc}$, $Q_{h,\,prum}$ – maximální hodinové potřeby vody daných kategorií ($m^3 \cdot h^{-1}$)
- $Q_{d,\,obyv}$, $Q_{d,\,obc}$, $Q_{d,\,prum}$ – maximální denní potřeby vody daných kategorií ($m^3 \cdot d^{-1}$)
- k_1 – součinitel současnosti pro kategorii obyvatelstva [-]
- k_2 – součinitel současnosti pro kategorii občanské vybavenosti [-]
- k_3 – součinitel současnosti pro kategorii průmyslu [-]
- 24 – konstanta pro přepočet denního průtoku na hodinový průtok ($h \cdot d^{-1}$)

Součinitelé současnosti byly z hlediska specifické konfigurace uvažovány jako jednotkové. Výsledné hodnoty celkových denních potřeb ukazuje *Tab. 3.*

Tab. 3: Celková potřeba vody pro celé spotřebiště [Zdroj: Vlastní zpracování].

Potřeba vody pro celé spotřebiště		
$Q_{p,celk}$	174,93	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
$Q_{d,celk}$	10,93	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
h_1	18,51	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
h_2	11,73	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
h_3	18,89	$[m^3 \cdot h^{-1}]$
Q_{hmax}	18,89	$[m^3 \cdot h^{-1}]$

Kompletní podrobné výpočty a výpisy dat viz *Příloha č.1*.

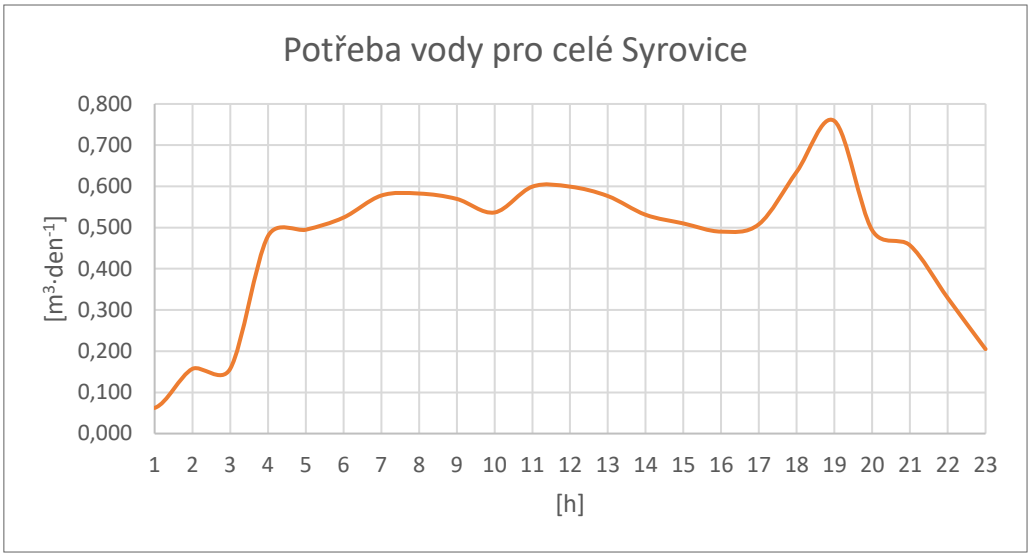
Rozložení reálné spotřeby do topologie modelu

Aby byl matematický model věrný reálnému chování sítě, byl celkový výpočetní objem 175 $m^3 \cdot den^{-1}$ poměrově rozložen mezi dílčí odběratele.

Hodinová nerovnoměrnost a časové vzory

Pro kvazi-dynamickou simulaci sítě v čase bylo potřeba rozložit denní spotřebu do 24hodinového cyklu. Jelikož platná legislativa křivky odběrů nedefinuje, byly časové vzory stanoveny expertním odhadem na základě reálného chování sítě. Křivka průměrné denní hodinové nerovnoměrnosti obyvatelstva zobrazuje ranní a večerní špičku, odběr

občanské vybavenosti kopíruje provoz školy s maximem při přípravě obědů. Průmysl vykazuje díky třísměnnému provozu stabilní odběr s výkyvem při střídání směn. Kombinaci těchto průběhů zobrazuje *Graf 4*.



Graf 4: Křivka průměrné hodinové denní nerovnoměrnosti pro celé spotřebiště [Zdroj: Vlastní zpracování]

Vzhledem k velkému objemu potrubí a relativně nízkým odběrům trvá obměna vody déle než 48 hodin. Simulace proto byla záměrně spuštěná na 72 hodin. Tím došlo k stabilizaci výpočtu a možnosti analyzovat reálné stáří vody v síti.

V závěrečném kroku byly průměrné potřeby převedeny na uzlové průtoky a společně s časovými vzory konkrétně přiřazeny k jednotlivým bodům (kompletní výpočty, grafy a tabulky jsou součástí *Přílohy č.1*).

3.3.4 Definice okrajových podmínek systému

Aby byl matematický model schopen vypočítat rozložení tlaků v distribuční síti, musí mít definované okrajové podmínky. V distribuční síti Syrovice plní tuto roli akumulační vodojem doplněný o výtlačné čerpadlo, které čerpá vodu ze zdroje směrem do vodojemu a ATS, která zajišťuje dostatečný tlak v distribuční síti. Kalibrace byla testovaná na konkrétních uzlech.

Čerpací systémy

Transport pitné vody ze zdroje do akumulačního vodojemu je zajištěn čerpadlem. Jelikož samotný gravitační tlak k zásobení sítě není dostatečný, distribuce je hned za vodojemem posílena ATS. Chování obou čerpacích systémů je definováno jejich výkonovými křivkami.

Kontrolní kalibrace

Pro ověření přesnosti modelu byly v okrajových oblastech sítě vybrány 4 hlavní kontrolní uzly a na těchto místech proběhlo testování hydrantů pomocí stroje Astacus. Výstupy

z tohoto měření, zpracované do tří samostatných reportů, se staly podkladem pro kalibraci modelu. Kompletní kalibrační metoda je podrobně rozepsána v následující kapitole.

3.3.5 Podrobná kontrolní kalibrace modelu

Kalibrace představuje finální krok validace matematického modelu, který přímo navazuje na terénní testování. Tento proces spočívá v systematickém porovnávání tlakových hodnot simulovaných softwarem se skutečnými daty z proplachování sítě strojem Astacus na čtyřech kontrolních uzlech.

Hlavním cílem bylo odstranit přirozené rozdíly mezi teoretickým výpočtem a skutečným stavem sítě. Toho bylo dosaženo iterativním laděním drsnosti potrubí, které bylo korigováno na základě materiálového složení. V uzlech s vyšší odchylkou byla upravena distribuce odběru tak, aby model reflektoval hydraulické ztráty v potrubí při odběru vody.

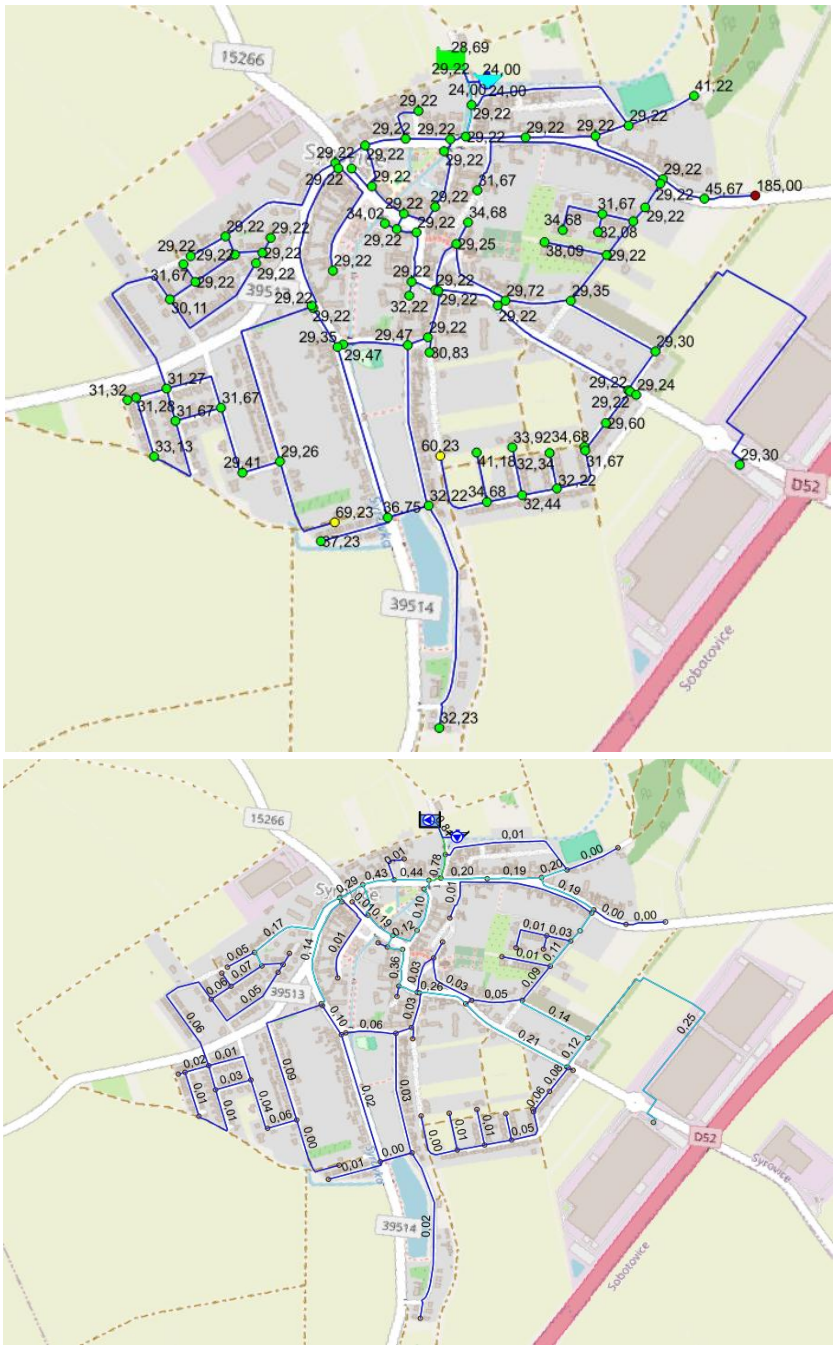
Po dokončení zmíněných optimalizačních kroků bylo dosaženo vysoké shody tlaků, odchylky se pohybovaly v rámci přípustné tolerance. Výsledný hydraulický model tak lze prohlásit za úspěšně zkalibrovaný.

3.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po úspěšné kalibraci matematického modelu a provedení kvazi-dynamické simulace byla získána prostorová hydraulická data. Na základě souvislosti těchto teoretických výstupů s daty z terénních proplachů byla identifikována kritická místa v síti a objasněny příčiny zhoršené kvality vody.

3.4.1 Nejvyšší dosažené rychlosti a stáří vody

Primárním faktorem ovlivňujícím sedimentaci částic v potrubí je rychlost proudění. Pomocí výpočetního softwaru byla vytvořena plošná prostorová analýza maximálních denních rychlostí a stáří vody v jednotlivých řádech. Která je zobrazena na *Obr.4.*



Obr. 4: Prostorová analýza maximálních rychlostí (dole) a maximálního stáří vody (nahoře) [Zdroj: Vlastní zpracování]

Z *Obr.4* je zřejmé, že v koncových úsecích rychlost klesá pod minimální rychlost potřebnou pro samočisticí schopnost. Tento deficit hydraulických podmínek se vyobrazuje na

nárůstu stáří vody, které v koncových uzlech dosahují podstatně vyšších hodnot než zbytek sítě. Tím vzniká prostředí náchylné k usazování znečištění.

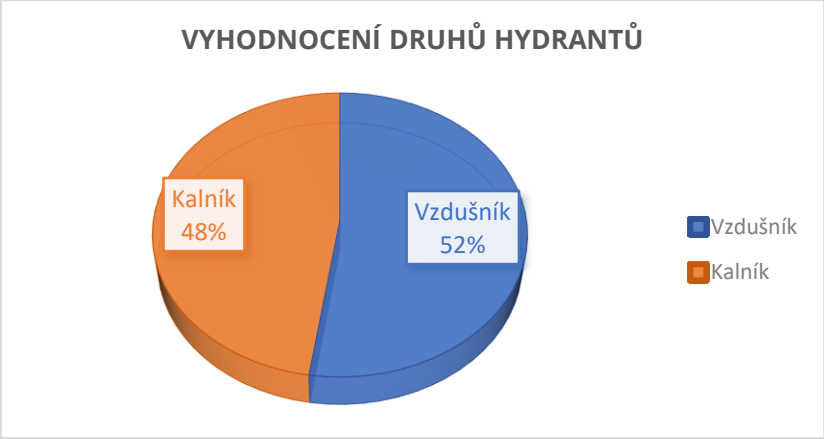
3.4.2 Výškové poměry a sklon úseků

Pro distribuční síť je důležitá konfigurace vypouštěcích a odvzdušňovacích armatur. V rámci terénního proplachování bylo analyzováno celkem 42 úseků sítě.

Geodetickou a hydraulickou analýzou bylo zjištěno střídání klesajících a stoupajících sklonů vůči směru proudění. Na základě tohoto uspořádání byly úseky roztřízeny do dvou technologických celků:

- Úseky s kladným sklonem: Úseky jsou zpravidla osazeny vzdušníky pro eliminaci vzduchových kapes.
- Úseky se záporným sklonem: Úseky jsou zakončeny kalníkem na místech, kam se gravitačně usazují jemné částice.

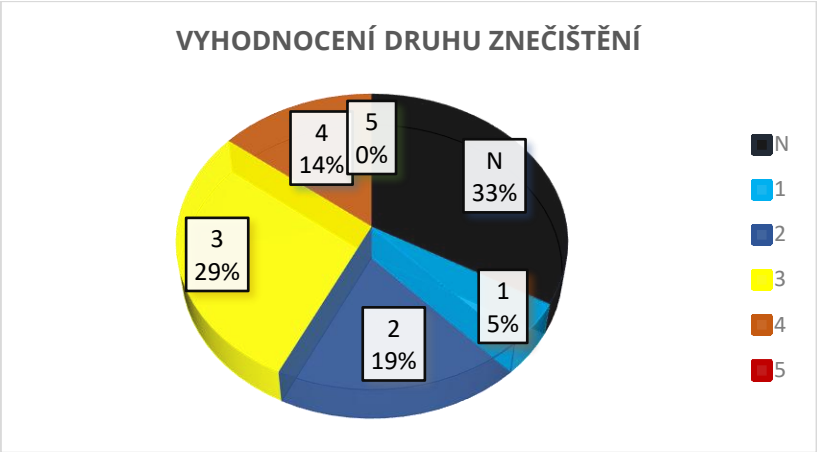
Poměr kalníků a vzdušníků zobrazuje *Graf 5*.



Graf 5: Statistický poměr analyzovaných sklonů úseků [Zdroj: Vlastní zpracování]

3.4.3 Zákal a míra znečištění

Hlavním parametrem kvality vody hodnoceným během terénních testů byl zákal a vizuální znečištění. Každý proplachovaný úsek byl klasifikován na pětibodové stupnici (1 = křišťálová voda, 5 = velmi silně znečištěná), případně byl kvůli specifickým podmínkám označen jako neměřitelný (N). Výsledky ukazují, že největší procento spadá do kategorie středního znečištění (stupeň 3), přičemž úsek s velmi silným znečištěním (stupeň 5) nebyl zaznamenán. Přesné poměrové rozložení robrazuje *Graf 6.*



Graf 6: Procentuální rozdělení stupňů znečištění proplachovaných úseků [Zdroj: Vlastní zpracování]

Procentuální zastoupení jednotlivých stupňů znečištění znázorněného v grafu je počítáno z celkového počtu 42 proplachovaných úseků. Hodnota pro každý stupeň znečištění byla vypočtena jako poměr počtu s danou úrovní znečištění vůči celkovému počtu hodnocených úseků, výsledné hodnoty byly následně vyjádřeny v procentech.

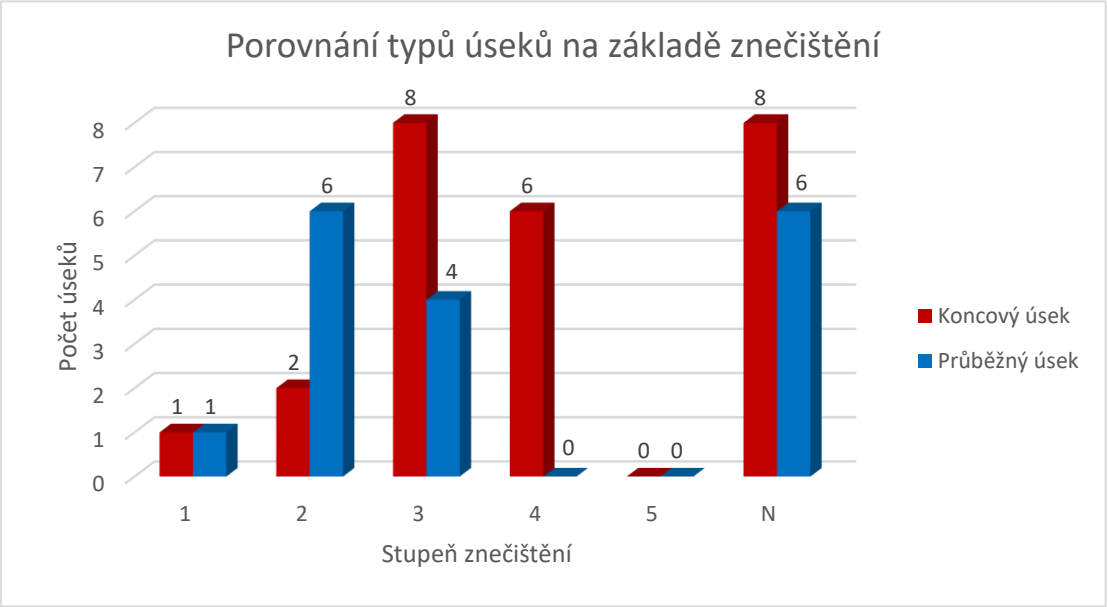
Pro lepší pochopení souvislostí byla tato hodnotící škála vynesena do topologie sítě v prostředí QGIS. Vznikla tak mapa znečištění, která, jak ukazuje *Obr. 5*, zobrazuje nejvíce zasažené části obce Syrovice.

Obr. 5: Úroveň znečištění vodovodní sítě Syrovice na základě terénní analýzy [Zdroj: Vlastní zpracování]

3.4.4 Statistická analýza a interpretace výsledků

Data z matematického modelu a terénního měření prokazují spojení mezi hydraulickými podmínkami sítě a její kvalitativní degradací. Z komplexní analýzy vyplývají tyto závěry:

- Vliv koncových úseků na kvalitu vody: Koncové úseky vykazují vyšší naměřené znečištění potrubí, které znázorňuje *Graf 7*. Právě v koncových úsecích se totiž vyskytuje nízká průtoková rychlost a vysoké stáří vody.
- Materiálová nezávislost: Celková analýza nepotvrdila vliv materiálu potrubí na množství usazování. Primárním faktorem zůstává stáří vody a rychlost proudění v daném úseku.



Graf 7: Porovnání typů úseků na základě stupňů znečištění [Zdroj: Vlastní zpracování]

3.4.5 Závěr analýzy

Analýza prokázala, že ačkoliv distribuční síť obce Syrovice disponuje dostatečnou kapacitou pro protipožární ochranu, předimenzování profilů v okrajových oblastech znemožňuje samočištění sítě a odplavování usazenin. Matematický model poukázal na kritické koncové úseky s větším stářím vody oproti zbytku distribuční sítě, které představují primární riziko pro degradaci kvality pitné vody. K vyřešení této situace se nabízejí dvě řešení:

- Pravidelné řízené proplachování distribuční sítě: Efektivní a ekonomicky udržitelné provozní opatření spočívající v zavedení pravidelného řízeného čištění úseků.
- Lokální zmenšení profilu potrubí na konci úseku.

3.5 DISKUZE

U dosažený výsledků je zapotřebí kriticky zhodnotit metodiku provádění matematického modelu, limity vstupních dat a průběh terénního měření. Tvorba modelu vodovodní sítě

obce Syrovice s sebou nesla několik zjednodušení, která mohla ovlivnit výsledné hydraulické parametry.

Prvním významným faktorem je sledované období. Model byl kalibrován na základě skutečných dat z ledna a února, kdy průměrný denní odtok z vodojemu byl 175 $m^3 \cdot den^{-1}$. Toto zimní období představuje z hydraulického hlediska spodní hranici zatížení. V letních měsících, kdy je spotřeba vody vlivem zalévání zahrad a dopouštění bazénů větší, lze v síti pozorovat vyšší rychlosti proudění. Ukazuje se tak, že zimní data byla pro identifikaci nejhorších možných scénářů z hlediska stáří vody ideální. Pro celkové posouzení sítě by však bylo vhodné porovnat model i v letních měsících.

Druhým faktorem je stanovení křivek průměrné hodinové denní nerovnoměrnosti. Tyto křivky musely být, vzhledem k absenci vodoměrů s kontinuálním přenosem dat, stanoveny expertním odhadem. Tím pádem se jedná o zjednodušený matematický model. Následná vysoká shoda simulovaných dat s daty naměřenými v terénu však prokázala, že zjednodušení nemá na přesnost modelu prokazatelný negativní vliv.

Posledním aspektem je hodnocení znečištění sítě. Pětistupňová škála vizuálního hodnocení přináší do měření určitou míru subjektivity. Tento fakt byl v terénu minimalizován tím, že proplachování strojem Astacus prováděl ucelený technický tým s jednotnou metodikou vizuálního hodnocení.

3.6 ZÁVĚRY HYDRAULICKÉ ANALÝZY A NÁVRH DOPORUČENÍ

Na základě vyhodnocení kvazi-dynamické simulace a analýzy dat z terénního měření lze formulovat konkrétní závěry o stavu distribuční sítě v obci Syrovice. Dominantními faktory ovlivňujícími kvalitu pitné vody jsou nevhodné hydraulické podmínky.

V okrajových obytných oblastech nedochází vlivem nízkých odběrů k dosažení samočisticích rychlostí, které vede ke stárnutí vody a akumulaci usazenin znečištění.

Pro zajištění stabilní kvality pitné vody se provozovateli doporučuje čištění metodou JSP a pravidelné odkalování koncových úseků.

4 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá vyhodnocením hydraulického stavu a míry znečištění vodovodní sítě v obci Syrovice. Hlavním cílem, kterého mělo být v rámci analýzy dosaženo, bylo provázat data získaná z terénních proplachů s teoretickými hydraulickými parametry sítě a identifikovat faktory ovlivňující degradaci kvality pitné vody. Všechny definované cíle byly splněny.

V úvodní části byla sestavena detailní rešerše. Ta poskytla teoretický základ pro pochopení mechanismu tvorby sedimentů, oddělování železitých a manganatých částic z vodního prostředí nebo vlivu hydrodynamických podmínek na kvalitu vody v potrubí. Současně byla popsána moderní metoda jednosměrného řízeného proplachování.

Těžištěm praktické části práce byla tvorba a kalibrace matematického modelu v prostředí softwaru QGIS a EPANET, který sloužil jako digitální kopie skutečné vodovodní soustavy. Na základě provozních dat byla realizována kvazi-dynamická simulace s prodlouženou dobou chodu na 72 hodin. Tento postup umožnil stanovit důležité faktory, jako jsou maximální denní rychlosti proudění a maximální stáří vody v jednotlivých uzlech.

Zásadním výstupem práce je propojení simulačních dat s výsledky terénního hodnocení 42 proplachovaných úseků. Statistická analýza potvrdila, že v posuzované síti tvořené výhradně plastovými materiály nemá materiál potrubí na úroveň znečištění statisticky významný vliv. Dominantními faktory jsou hydraulické podmínky sítě. V okrajových obytných oblastech vlivem nízkých odběrů a dimenzování potrubí dochází ke stagnaci vody a jejímu stárnutí až za hodnotu 50 hodin. Model a zkoušky v terénu společně lokalizovaly kritické uzly na koncových úsecích. Analýza dále prokázala vliv geomorfologie trasy, kdy se uvolněné částice vlivem gravitace akumulují na koncových úsecích vodovodní sítě.

Na základě těchto závěrů byla provozovateli navrhnuta dvě nápravná opatření. Jako investiční, avšak ekonomicky náročné řešení, bylo navrhnuto lokální zmenšení profilů koncových úseků. Jako optimální alternativa bylo doporučeno zavedení harmonogramu údržby sítě s využitím čisticí a diagnostické technologie Astacus, která odstraňuje sedimenty s minimálními provozními náklady.

Pro rozšíření této analýzy se nabízí možnost zatížit zkalibrovaný model daty z letních měsíců. V letním období dochází k odlišnému hydraulickému chování sítě z důvodu zvýšených odběrů. Porovnání zimního a letního provozního režimu by pomohlo k navržení efektivnějšího celoročního pláne údržby sítě.

Předložená bakalářská práce přináší ucelený postup propojující teorii se skutečnou vodárenskou praxí. Výstupy práce mají praktické využití pro provozovatele sítě v obci Syrovice a slouží jako podklad pro rozhodování v oblasti údržby vodovodní infrastruktury.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] VREEBURG, J. H. G. a J. B. BOXALL. Discolouration in potable water distribution systems: A review. *Water Research* [online]. 2007, roč. 41, č. 3, s. 519-529 [cit. 2026-05-28]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.09.028

[2] LI, G. et al. Field studies of manganese deposition and release in drinking water distribution systems: Insight into deposit control. *Water Research* [online]. 2019, roč. 150, s. 226-235 [cit. 2026-05-28]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.074

[3] HUSBAND, S. a J. B. BOXALL. Asset deterioration and discolouration in water distribution systems. *Water Research* [online]. 2011, roč. 45, č. 1, s. 113-124 [cit. 2026-05-28]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.021

[4] ČSN 73 0873. *Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.

[5] ČSN 75 5401. *Navrhování vodovodního potrubí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.

[6] BLOKKER, E. J. M., J. H. G. VREEBURG et al. Self-Cleaning Networks Put to the Test. *Provincial Waterworks*. 2010 [cit. 2026-05-28].

[7] US EPA. *Effects of Water Age on Distribution System Water Quality* [online]. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2002 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/2007_05_18_disinfection_tcr_whitepaper_tcr_waterdistribution.pdf

[8] PREVEDELLO, C. et al. Comparative analysis of air scouring and unidirectional flushing of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* [online]. 2020, roč. 146, č. 8 [cit. 2026-05-28]. ISSN 1943-5452. Dostupné z: https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001254

[9] RUČKA, Jan, Markéta RAJNOCHOVÁ a Aleš HAŠKA. Čištění vodovodního potrubí řízeným proplachováním po úsecích – přínosy, dostupné metody a nástroje. *TZB-info* [online]. 14. 8. 2024 [cit. 2024-05-15]. ISSN 1802-4815. Dostupné z: https://voda.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-voda-kanalizace/27284-cisteni-vodovodniho-potrubi-rizenym-proplachovanim-po-usecich-prinosy-dostupne-metody-a-nastroje

[10] VAN THIENEN, P. et al. Radial transport processes as a precursor to particle deposition in drinking water distribution systems. *Water Research* [online]. 2011,

roč. 45, č. 5, s. 1809-1824 [cit. 2026-05-28]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.012

[11] GAUTHIER, V. et al. Organic matter as loose deposits in a drinking water distribution system. *Water Research* [online]. 1999, roč. 33, č. 4, s. 1014-1026 [cit. 2026-05-28]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00300-5

[12] STUMM, Werner a James J. MORGAN. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters* [online]. 3. vyd. New York: Wiley, 1996 [cit. 2026-05-11]. ISBN 0-471-51185-4. Dostupné z: https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-4069544-83cb3d73dc.pdf

[13] KOHL, P. M. a S. J. MEDLAR. *Occurrence of Manganese in Drinking Water and Manganese Control* [online]. Denver: American Water Works Association (AWWA), 2006 [cit. 2026-05-11]. ISBN 1-58321-441-5. Dostupné z: https://www.scribd.com/document/366651828/Occurrence-of-Manganese-pdf

[14] CERRATO, J. M. et al. Manganese accumulation in drinking water distribution systems. *Water Research* [online]. 2010, roč. 44, č. 19, s. 5599-5613 [cit. 2026-05-28]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.05.021

[15] DONG, Wen Yi, Zi Jun DONG, Feng OUYANG a Yang DONG. *Potassium Permanganate/ Ozone Combined Oxidation for Minimizing Bromate in Drinking Water* [online]. ResearchGate, 2011 [cit. 2026-05-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/240838260_Potassium_Permanganate_Ozone_Combined_Oxidation_for_Minimizing_Bromate_in_Drinking_Water

[16] FRIEDMAN, Melinda, David HOLT et al. *Establishing Site-Specific Flushing Velocities* [online]. Denver: Awwa Research Foundation, 2003 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://files.engineering.com/files/aed72bbb-af3e-44ca-985b-8d65c7c06c97/Establishing_Site-Specific_Flushing_Velocities.pdf

[17] BOXALL, J. B. a A. J. SAUL. Modeling Discoloration in Potable Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering* [online]. 2005, roč. 131, č. 5, s. 716-725 [cit. 2026-05-28]. ISSN 0733-9372. Dostupné z: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:5(716

[18] MACHELL, J. a J. B. BOXALL. Modeling and monitoring of water age and quality in a large scale complex water distribution system. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2014, roč. 60, s. 97-107 [cit. 2026-05-28]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.022

[19] AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *M32 Computer Modeling of Water Distribution Systems* [online]. 3. vyd. Denver: American Water Works Association,

2012 [cit. 2026-05-28]. Manual of water supply practices. ISBN 978-1-58321-844-0. Dostupné z: https://library.knu.edu.af/opac/temp/11559.pdf

[20] LI, Xiaoqi et al. Initial Formation and Accumulation of Manganese Deposits in Drinking Water Pipes: Investigating the Role of Microbial-Mediated Processes. *Environmental Science & Technology* [online]. 2022, roč. 56, č. 10, s. 6276–6287 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08293

[21] GINIGE, Maneesha P., Jason WYLIE a Jason PLUMB. Influence of biofilms on iron and manganese deposition in drinking water distribution systems. *Biofouling* [online]. 2011, roč. 27, č. 10, s. 1051-1063 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/08927014.2010.547576

[22] POURCEL, Florian a Sophie DUCHESNE. Comparative analysis of air scouring and unidirectional flushing of water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* [online]. 2020, roč. 69, č. 7, s. 701–714 [cit. 2026-05-28]. ISSN 1606-9935. Dostupné z: https://doi.org/10.2166/aqua.2020.146. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/342743585_Comparative_analysis_of_air_scouring_and_unidirectional_flushing_of_water_distribution_systems

[23] WALSKI, Thomas M. et al. *Advanced Water Distribution Modeling and Management* [online]. Waterbury: Haestad Methods, 2001 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221936180_Advanced_Water_Distribution_Modeling_and_Management

[24] ROSSMAN, Lewis A. *EPANET 2 Users Manual* [online]. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2000 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221936237_Epanet_2_users_manual

[25] QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System* [online]. Open Source Geospatial Foundation Project, 2023 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://qgis.org

[26] ČESKO. Vyhláška č. 131/2024 Sb., o dokumentaci staveb. In: *Sbírka zákonů České republiky* [online]. 2024 [cit. 2026-05-15]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2024-131

[27] TUHOVČÁK, Ladislav, Jan RUČKA a Jiří BÍLÝ. *Vodárenství I: Studijní opory*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006. 252 s.

[28] RUČKA, J. *Technologie Astacus pro čištění potrubí, testování požárních hydrantů, měření a monitoring teploty vody* [online]. VODA BRNO, s.r.o., univerzitní spin-off firma Vysokého učení technického v Brně, Brno, 2024 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://www.vodabrno.cz

[29] CAPORALONI, M., TAMPIERI, F., TROMBETTI, F. a VITTORI, O. Transfer of particles in nonisotropic air turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences* [online]. 1975, 32(3), 565–568 [cit. 2026-05-10]. ISSN 1520-0469. Dostupné z: https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0565:TOPINA>2.0.CO;2

[30] WAALS, Johannes Diderik van der. *Over de continuïteit van den gas – en vloeistoftoestand* [online]. Leiden: A. W. Sijthoff, 1873 [cit. 2026-05-11]. Dostupné z: https://digitalcollections.universiteitleiden.nl/view/item/3669504#page/10/mode/1up

[31] AQUATIS a.s. *Plán rozvoje vodovodů a kanalizací Jihomoravského kraje: Karta obce Syrovice* [online]. Brno: Jihomoravský kraj, 2004 [cit. 2026-05-16]. Dostupné z: https://www.jmk.cz/archiv/ozp/PRVK_JMK/A_TextovaTabulkovaCast/CZ0643_Brno-venkov/A3_karty_obci/667_01_Syrovice_VK.pdf

[32] QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System* [software online]. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://qgis.org

[33] *QGIS-Red plugin* [software online]. QGIS Python Plugins Repository, 2024 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://plugins.qgis.org/plugins/QGISRed/

[34] ČÚZK. *Geoportál ČÚZK: Digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G)* [online]. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, 2026 [cit. 2026-05-17]. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz/

[35] ČESKO. Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích), ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů České republiky* [online]. 2001, část 161 [cit. 2026-05-28]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-428

[36] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Počet obyvatel v obcích – k 1. 1. 2024* [online]. Praha: ČSÚ, 2024 [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/pocet-obyvatel-v-obcich-k-112024

[37] ZÁKLADNÍ ŠKOLA A MATEŘSKÁ ŠKOLA SYROVICE. *O škole* [online]. Syrovice: ZŠ a MŠ Syrovice [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: https://skolasyrovice.cz/

[38] ZÁKLADNÍ ŠKOLA A MATEŘSKÁ ŠKOLA SYROVICE. *Školní jídelna* [online]. Syrovice: ZŠ a MŠ Syrovice [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: https://skolasyrovice.cz/skolni-jidelna/

[39] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Informační systém EIA: Záměry na území ČR* [online]. Praha: CENIA, česká informační agentura životního prostředí [cit. 2025-12-28]. Dostupné z: Informační systém EIA

[40] SEZNAM.CZ. *Mapy.cz* [online mapový portál]. Praha: Seznam.cz, 2026 [cit. 2026-05-16]. Dostupné z: https://mapy.com/cs/turisticka?x=16.4581340&y=49.1237007&z=11

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$m \cdot s^{-1}$ – metr za sekundu

$m^3 \cdot s^{-1}$ – metr krychlový za sekundu

$m^3 \cdot os^{-1} \cdot d^{-1}$ – metr krychlový na osobu za den

$m^3 \cdot d^{-1}$ – metr krychlový za den

$m^3 \cdot h^{-1}$ – metr krychlový za hodinu

PE – polyethylen

PVC – polyvinylchlorid

$KMnO_4$ – manganistan draselný

MnO_2 – oxid manganičitý

JSP – jednosměrný proplach

ATS – automatická tlaková stanice

k_h – koeficient hodinové nerovnoměrnosti

k_d – koeficient denní nerovnoměrnosti

h_1, h_2, h_3 – kombinace extrémů pro jednotlivé kategorie

$Q_{h,\ obyv}$, $Q_{h,\ obc}$, $Q_{h,\ prum}$ – maximální hodinové potřeby vody daných kategorií

$Q_{d,\ obyv}$, $Q_{d,\ obc}$, $Q_{d,\ prum}$ – maximální denní potřeby vody daných kategorií

k_1 – součinitel současnosti pro danou kategorii

Σ – suma, součet

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Geografická poloha obce Syrovice na mapě širších vztahů [Zdroj: Vlastní zpracování na mapovém podkladu Mapy.cz [40]. 25

Obr. 2: Celkové technické schéma vodovodní sítě obce Syrovice [Zdroj: Vlastní zpracování] 26

Obr. 3: Robot Astacus pro čištění vodovodního potrubí, testování požárních hydrantů a měření teploty vody [9] 28

Obr. 4: Prostorová analýza maximálních rychlostí (dole) a maximálního stáří vody (nahoře) [Zdroj: Vlastní zpracování] 37

Obr. 5: Úroveň znečištění vodovodní sítě Syrovice na základě terénní analýzy [Zdroj: Vlastní zpracování] 39

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hlavní objekty vodárenského systému Syrovice [31]. 26

Tab. 2: Potřeba vody pro jednotlivé kategorie [Zdroj: Vlastní zpracování]. 33

Tab. 3: Celková potřeba vody pro celé spotřebiště [Zdroj: Vlastní zpracování]. 34

SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ

Graf 1: Procentuální zastoupení potrubních plastových materiálů v distribuční síti [Vlastní zpracování]. 27

Graf 2: Technologie Astacus: Záznam průběhu měřeného tlaku a průtoku během proplachu potrubí [28]. 29

Graf 3: Vývoj reálného denního odběru z vodojemu Syrovice v analyzovaném období [Zdroj: Vlastní zpracování na základě dat provozovatele] 31

Graf 4: Křivka průměrné hodinové denní nerovnoměrnosti pro celé spotřebiště [Zdroj: Vlastní zpracování] 35

Graf 5: Statistický poměr analyzovaných sklonů úseků [Zdroj: Vlastní zpracování] 38

Graf 6: Procentuální rozdělení stupňů znečištění proplachovaných úseků [Zdroj: Vlastní zpracování] 39

Graf 7: Porovnání typů úseků na základě stupňů znečištění [Zdroj: Vlastní zpracování] 40

PŘÍLOHY

Příloha č.1 – Celkové výpočty, grafy a tabulky